ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE
Sezione di Bologna

Giovanni Pietro SINI

Révision et ajournement avec la collaboration de

D. Di FERDINANDO et G. SIRRI

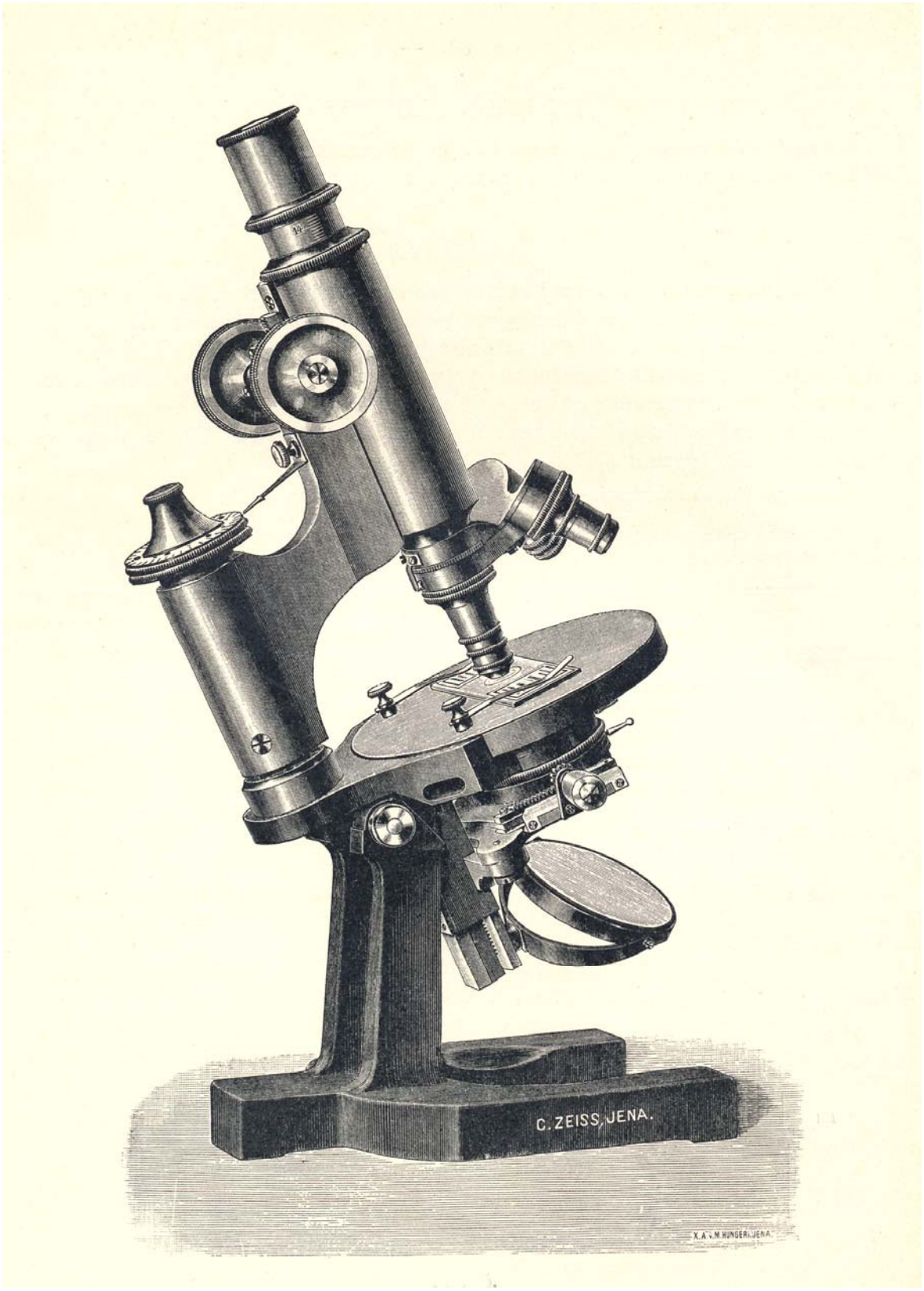
PROBLÈMES TECHNIQUES

de la

MICROSCOPIE OPTIQUE

Bologna - 2005 – 2019

NB: Ce texte peut être copié librement, diffus ou imprimé, pourvu qu'à titre gratuit et avec la citation de la source.



Statif IV C, avec revolver, 3 objectifs et un oculaire
(Gravure tirée de: Zeiss Jena, “Microscopes et Appareils Auxiliaires”, 35ème édition, 1913

À la mémoire de mes parents,
qui m'ont apprit à réfléchir

LES CONTENUS

Ce manuel entend s'adresser à tous ceux qui opèrent sur le microscope optique pour la recherche, l'enseignement, l'entretien, la réparation, la conservation dans un musée, ou simplement pour l'usage d'un amateur.

Il naît de l'expérience développée au cours de décennies de travail dans le champ de l'optique à Bologne, près de l'Institut National de Physique Nucléaire, avec la construction d'appareils optiques-mécaniques sophistiqués pour l'analyse automatisée des photogrammes, puis avec des collaborations avec le CERN, avec l'ENEA, avec l'Institut National d'Optique de Florence; tout ceci dans le cadre de travaux de physique dans lesquels l'utilisation d'instruments d'optique est fondamentale pour la mesure et l'acquisition des données, comme aussi dans les développements récents de machines pour l'analyse des émulsions nucléaires.

L'Italie est très dépourvue de littérature technique dans le champ de la microscopie optique; revues spécialisées n'existent pas, il n'y a pas d'instituts, écoles ou cours.

Depuis beaucoup d'années ont cessé l'activité la glorieuse maison KORISTKA de Milan et le rayon microscopie des ateliers GALILEO. Depuis lors en Italie on achète seulement des instruments d'importation et les rapports avec les constructeurs sont toujours indirects et souvent insatisfaisants.

Ce manuel veut remplir par suite une lacune. Il s'agit de microscopie optique générale, avec quelque résumé des techniques spéciales (techniques de contraste, polarisation, fluorescence, photographie, reprise par la télévision). Innovations techniques récentes (microscopie confocale, par ex.) ne sont pas traitées étant donné qu'il s'agit encore d'applications en évolution.

Les aspects mathématiques de la matière sont limités à l'illustration des phénomènes fondamentaux et ils demandent seulement la connaissance de l'algèbre et les rudiments de la trigonométrie. Les phénomènes physiques de base sont décrits séparément, souvent de manière intuitive.

L'approche est essentiellement technique, avec l'attention soit aux problèmes conceptuels, soit aux problèmes pratiques que doit affronter en général le micrographe. Ce manuel a surtout tâché de donner une compréhension possiblement intuitive de la cause des phénomènes décrits et des suggestions pratiques proposées chaque fois.

Soit-il au niveau des principes généraux, sont données des indications sur les contrôles et sur les opérations d'alignement partiel ou total que le technicien doit affronter pendant et après le démontage de l'instrument, comme il est demandé par les opérations normales d'entretien et nettoyage[1].

Toujours avec référence à l'entretien, sont décrits des instruments, accessoires, ou solutions techniques qui ne sont plus dans le commerce, mais que le technicien peut être appelé quand même à démonter et réparer.

Ce manuel a circulé dans une version préliminaire dans les ans '90. Il a été révisé récemment avec la collaboration de deux jeunes chercheurs de l'INFN, la graphique améliorée et les formats adaptés, même avec le but de le rendre disponible sur le web, pour permettre une consultation facile à n'importe qui ait la nécessité ou l'intérêt à s'occuper de microscopie optique.

[1] Details techniques sur plusieurs appareils et accessoires sont donnés dans plusieurs articles et dans les "Schede tecniche" (en italien), visibles dans le même site: www.funsci.it.

OLYMPUS®, Modèle VANOX, de: Catalogue Olympus M215E-0691B -1995.

PRÉSENTATION

La microscopie optique est une technique qui est donnée malheureusement comme évidente. Peu de personnes ont la patience de l'enseigner et sont peut-être encore moins ceux qui ont la patience de l'apprendre.

Le résultat est que tous les laboratoires, départements, instituts expérimentaux ont des microscopes de type et application différente, mais l'entretien est très souvent mauvais: l'optique n'est pas nettoyée, elle n'est pas centrée et la qualité de l'observation invariablement empire.

C'est en outre opinion commune de considérer cette branche comme maintenant complètement systématisée et par suite pas convenable à offrir aux spécialistes un champ d'application suffisamment stimulant et motivant.

Moins que jamais dans le monde académique on sent la nécessité d'une présentation des aspects techniques de la microscopie: ou on étudie les problèmes fondamentaux, ou il ne vaut pas le coup de s'appliquer.

Pour cela je crois que cette œuvre de l'ami Dr. G. P. Sini soit particulièrement utile. De façon systématique il examine toute la problématique soit théorique que applicative du microscope optique et il le reporte au rang d'instrument indispensable dans beaucoup de branches de la recherche expérimentale.

Avec l'avènement de l'optoélectronique et de puissants et rapides calculateurs, la microscopie a repris récemment une poussée énorme, avec la possibilité de grandes profondeurs de champ et avec la reconstruction des images au moyen des fonctions de transfert. Dans la technique, l'analyse d'image trouve applications étendues en biologie, science des matériels, technologie des poussières.

Je suis reconnaissant au Dr. Sini pour avoir rempli cette lacune bibliographique et pour continuer à nous rappeler que rien n'est dépassé, et moins que jamais le microscope optique.

Prof. Vittorio PRODI
Département de Physique
Université de Bologna

SOMMAIRE

LES CONTENUS 3
PRÉSENTATION 5
1 - Terminologie 12
1.1 - “Optique” 12
1.2 - Microscope 15
1.3 - Micrographie 17
1.4 - Microscopie 18
1.5 - Technique microscopique 18
1.6 - “Objet” 18
1.7 - “Image” 18
1.8 - Objectif – oculaire 19
2 - Éléments d’optique 20
2.1 - La mesure des angles 20
2.2 - Les fonctions trigonométriques 20
2.3 - La réfraction 21
2.4 - Le prisme déviateur 24
2.5 - Les lentilles sphériques 25
2.5.1 - L’approximation de Gauss 27
2.6 - Les images réelles 27
2.6.1 - Les lois fondamentales 28
2.6.2 - Cas particuliers - L’agrandissement 29
2.7 - Les images virtuelles 34
2.8 - Les lentilles épaisses et les plans principaux 35
3 - Principe de l’objectif 36
3.1 - Objectifs “à conjuguée finie” 36
3.2 - Objectifs “à conjuguée infinie” 36
4 - Principe de l’oculaire 40
4.1 - La loupe de grossissement 40
4.2 - L’ “effet du tube” 41
4.3 - Le grossissement visuel 42
4.4 - L’oculaire et l’image intermédiaire 43
5 - Les diaphragmes 45
5.1 - Diaphragmes de champ 45
5.2 - Ouverture et diaphragme d’ouverture 46
5.2.4 - Ouverture relative 47
5.2.5 - Ouverture numérique 48
5.2.6 - Diaphragme d’ouverture 48
5.2.7 - Disque de Ramsden 49
5.2.8 - Diaphragme de l’objectif 49
5.2.9 - Apertomètre 50
6 - Les pupilles 51
6.1 - Le “vignetage” 51
7 - Les champs 53
7.1 - Champ angulaire et index de champ 54
7.2 - Oculaires négatifs 55
8 - L’éclairage de l’objet 57
8.1 - Diascopie et fond clair 58
8.2 - Les sources 58
8.3 - Le principe du condensateur 59
8.4 - Éclairage diffus simple 60
8.5 - Éclairage diffus avec condensateur 61
8.6 - Éclairage critique 62
8.7 - Éclairage critique avec collecteur 63
8.8 - Éclairage selon les principes d’A. Köhler 63
8.9 - Alignement de l’éclairage selon A. Köhler 67
8.10 - Le rendement photométrique du système éclairant 69

9 - La pupille de l'oculaire 71
10 - La longueur du tube 73
11 – Les prismes 75
12 - La mesure de l'agrandissement 77
12.1 - Les micromètres 77
12.2 - L'agrandissement de l'objectif 78
12.3 - Les mesures géométriques au microscope 79
12.4 - L'agrandissement longitudinal ou axial 81
12.5 – Le grossissement visuel de l'oculaire 81
12.6 - L'agrandissement linéaire de l'oculaire 82
12.7 – Le grossissement global du microscope 83
12.8 - Le grossissement nominal 84
13 - L'optique non-gaussienne - Les aberrations 86
13.1 - Les aberrations du plan 86
13.1.1 - La courbure de champ 87
13.1.2 - La distorsion 89
13.2 - Les aberrations du point - La définition 90
13.2.1 - L'aberration chromatique longitudinale ou axiale 91
13.2.2 - L'aberration chromatique latérale ou transversale 93
13.2.3 - L'aberration sphérique ou de sphéricité 94
13.2.3.1 - La longueur du tube 95
13.2.3.2 - La distance entre les lentilles 96
13.2.3.3 - L'épaisseur de la lamelle 96
13.2.4 - La coma 99
13.2.5 - L'astigmatisme 100
13.3 - Considérations générales sur les aberrations du point 102
13.4 - L'aberration d'onde 103
13.5 - Remèdes contre les aberrations 103
14 - La profondeur de champ 105
15 - La perception 111
16 - L' immersion 113
16.1 - L'huile d'immersion 115
16.2 - Les avantages 116
16.3 - Les désavantages 117
16.4 - Le nettoyage 117
16.5 - La lamelle et l'immersion 118
16.6 - La notation de l'immersion 119
17 - Le contraste 120
17.1 - Le contraste pour objets étendus 120
17.1.1 - Champ éclairé excessif 121
17.1.2 - Les reflets 121
17.1.3 - L'ouverture excessive 122
17.1.4 - Les imperfections 123
17.1.5 - Les ciments 123
17.2 - Le contraste pour objets "petits" 124
17.3 - Les remèdes 126
18 - Optique ondulatoire 127
18.1 - Diffraction par une arête 127
18.2 - Diffraction par une ouverture circulaire 128
18.3 - Diffraction dans une lentille convergente - La centrique 128
18.4 - L'observation de la centrique - Le star test 132
18.5 - La diffraction et la résolution des réseaux 135
18.6 – Le sens de l'ouverture 139
18.7 - La diffraction dans la pupille d'objectif 140
18.8 - L'observation des "maxima" 141
18.9 - L'ouverture du condensateur et l'éclairage oblique 142
18.10 - L'ouverture et le contraste - Le "champ noir" 145
18.11 - La mesure de l'ouverture et de la résolution 146
18.12 – Le grossissement "utile" 150

19 - Les objectifs pour microscope **153**
19.1 - La monture mécanique 153
19.1.1 - La fixation de l'objectif 156
19.1.2 - Longueur mécanique et parfocalité 157
19.1.3 - Distance de travail 160
19.1.4 - Parcentralité ou parcentrage 161
19.1.5 - La notation sur les objectifs 162
19.2 - Le système optique de l'objectif du microscope 164
19.2.1 - La "luminosité" de l'objectif 165
19.2.2 - La "netteté" 166
19.2.3 - La structure de l'objectif 167
19.2.3.1 - Objectifs classiques, à champ non aplani 168
19.2.3.2 – Les objectifs plan 169
19.2.4 – Les objectifs à grand champ 172
19.2.5 – Les objectifs sans lamelle 173
19.2.6 - Le diaphragme à iris incorporé 175
19.3 - Les classes de correction de l'objectif du microscope 175
19.3.1 - La compensation 178
19.3.2 - L'achromatisme total et les systèmes CF 180
19.3.3 – Les objectifs mono- et polychromatiques 181
19.3.4 - Objectifs catoptriques et "long distance" 182
19.4 - Le choix et l'équivalence des objectifs 184
19.5 - Le contrôle de l'objectif 187
19.5.1 - Défauts contingents 187
19.5.2 - Défauts d'assemblage 189
19.5.3 - Défauts de projet 190
19.5.4 - Les réseaux 192
19.5.5 - L'observation de la pupille et le microscope auxiliaire 193
19.6 – L'entretien de l'objectif 195
20 - L'oculaire du microscope **197**
20.1 - Le champ de l'oculaire 198
20.2 - La parfocalité des oculaires 199
20.3 – La structure mécanique 200
20.4 – La structure optique 202
20.4.1 – Oculaires positifs et négatifs 202
20.4.2 - Les formules classiques 203
20.4.3 - Les aberrations des oculaires 205
20.4.4 - L'aberration chromatique 205
20.5 - L'équivalence des oculaires 206
20.6 – Les oculaires divergents 206
20.7 – Les oculaires projectifs 207
20.8 – Les oculaires de mesure 208
20.9 - La notation des oculaires 210
20.10 - Oculaires et lunettes 211
20.11 – La propreté de l'oculaire 212
21 – Le condensateur **214**
21.1 – Le champ du condensateur 215
21.1.1 - Les solutions de pis-aller 215
21.1.2 - Le diaphragme de champ à iris 216
21.1.3 - La lentille frontale escamotable 216
21.1.4 - L'abaissement du foyer image 218
21.1.5 - Condensateurs interchangeables 219
21.1.6 - Types spéciaux 219
21.1.7 - La distance de la source 220
21.2 - Le rendement photométrique du condensateur 221
21.3 – La distance frontale du condensateur 221
21.4 – La focalisation du condensateur 223
21.5 – L'ouverture du condensateur 225
21.6 – La structure du condensateur 226

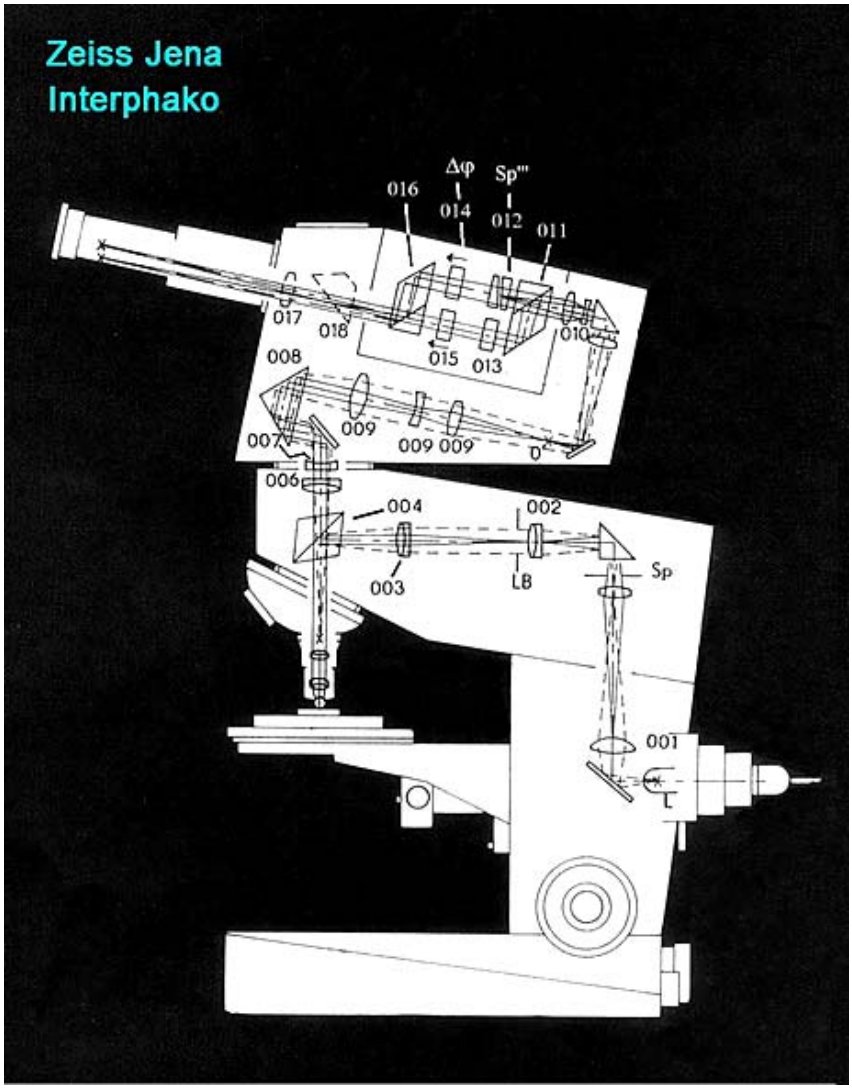
21.7 – Les aberrations du condensateur 228
21.8 – Les diaphragmes annulaires 230
21.9 – Le centrage du condensateur 231
21.10 - Nettoyage et démontage du condensateur 232
22 – La micro - lampe 234
22.1 - Le miroir 235
22.2 - Le collecteur 237
22.3 - Le diaphragme de champ éclairé 241
22.4 - Le miroir sphérique postérieur 241
22.5 - Le porte-filtres 242
22.6 - Le corps lumineux 243
22.6.1 - Sources à incandescence 244
22.6.2 - Sources à arc 246
22.6.3 - Sources à flamme 249
22.6.4 – Les caractéristiques du corps lumineux 249
22.7 – La focalisation du corps lumineux 252
22.8 – Le centrage de la microlampe 253
22.9 - Fautes dans le centrage de tout le système éclairant 254
23 - Les filtres optiques 257
23.1 – La composition des filtres 258
23.2 – La fonctions des filtres 260
23.3 - Les filtres en microscopie générale 262
24 – Les tubes porte-oculaires 265
24.1 – Les tubes bi-oculaires 266
24.1.1 - Correction dioptrique et parfocalité 267
24.1.2 - L'"effet du tube" et la convergence 268
24.1.3 – La distance inter-pupillaire 269
24.1.4 – Le centrage 271
24.1.5 – Le facteur de tube 271
24.1.6 – L'équipollence des tubes 272
24.2 – Les tubes trioculaires 273
25 – Les tubes intermédiaires 276
25.1 – Les lentilles simples 276
25.2 – Les lentilles complexes 277
25.3 – Les prismes 278
25.4 – Les filtres 279
26 - Les platines 280
26.1 - Platines fixes 282
26.2 - Le guide – objets 283
26.3 – Les platines tournantes 284
26.4 - Platines de translation 286
26.5 - Problèmes mécaniques 287
26.6 – Les platines à glissement 291
27 - Le statif 293
27.1 - Les types fondamentaux 294
27.2 - La structure du statif 300
27.3 - Problèmes mécaniques 307
27.4 - Les centrages 308
27.5 - Le choix du statif 309
27.6 – Les contrôles et l'entretien du statif 309
27.7 - Les accessoires spéciaux 311
28 - La vision microscopique 318
29 - Stéréo - microscopie 323
29.1 - Les caractéristiques saillantes 324
29.2 - La "boîte des prismes" 326
29.3 - Fins et applications 328
29.4 - Problèmes spéciaux 329
29.4.1 - Parcentralité 329
29.4.2 - Parfocalité 330

29.4.3 - L'angle entre les axes 331
29.5 - Le schéma de Greenough 332
29.6 - Le schéma d'Abbe à pupille divisée 335
29.7 - L'objectif unique (CMO) 336
29.8 – Les objectifs additionnels 339
29.9 - Systèmes zoom 339
29.10 - Les aberrations 340
29.11 – L'éclairage épiscopique 341
29.11.1 - L'éclairage latéral 341
29.11.2 - L'éclairage diffus 342
29.11.3 - L'éclairage vertical ou coaxial 342
29.12 - Éclairage diascopique 344
29.12.1 – Le fond clair 344
29.12.2 – Le fond noir 345
29.13 - Le statif 345
30 - Les techniques spéciales 350
30.1 – Épiscopie 350
30.1.1 - L'épiscopie en fond noir 355
30.1.2 - Statifs renversés 356
30.2 - Le fond noir et l'éclairage oblique en diascopie 357
30.3 - Le contraste à modulation d'amplitude 360
30.4 - Le contraste de phase 362
30.5 - Le contraste interférentiel 365
30.6 - La fluorescence 368
30.7 - Microscopie en radiation polarisée 372
30.8 - La photo - micrographie 375
30.8.1 – Le cadrage 377
30.8.2 - Délimiter l'image 378
30.8.3 - Focaliser 379
30.8.4 - Mesurer le temps d'exposition 381
30.8.5 - L'obturateur 383
30.8.6 - Définition et résolution dans l'image photographique 383
30.8.7 - Les formats et les émulsions 384
30.8.8 - Les filtres 385
30.8.9 - Les sources 386
30.9 - La reprise de télévision au microscope 386
30.9.1 - Le matériel sensible pour la télévision 387
30.9.2 - Sensibilité spectrale 388
30.9.3 - Sensibilité totale 389
30.9.4 - Résolution 390
30.9.5 - Dimensions utiles de la surface sensible 391
30.9.6 - Poids, encombrement, fixation mécanique 393
30.9.7 - Rapport signal/bruit ou "signal/noise ratio" 394
30.9.8 - Le contraste 395
30.9.9 - Stabilité long terme, "impression" et "burning" 395
30.9.10 – La persistance à bref terme ("lag") 395
30.9.11 - Distorsion 396
30.9.12 - L'écran 396
30.10 - La micro – projection 399
30.11 - Conclusions 401

SUPPLÉMENTS
31 - Le relèvement des caractéristiques 402
31.1 - Fiche "microscope" 402
31.2 - Fiche "objectif" 408
31.3 - Fiche "oculaire" 415
31.4 - Fiche "condensateur" 418
31.5 - Microscopes stéréoscopiques 420
32 - Vérifications techniques – commerciales 422

32.1 - Tube porte-oculaires 422
32.2 - Mouvements macro - et micrométriques 426
32.3 – Le revolver 429
32.4 – La platine 430
32.5 – Le condensateur 431
32.6 – L'objectif 433
32.7 – L'oculaire 436
32.8 - Microlampe et système éclairant 437

Bibliographie raisonnée 439
Liste des acronymes utilisés en microscopie 441
Adresses utiles 445



1 - TERMINOLOGIE

Il faut définir avant tout quelques termes qui recourront souvent dans le texte; ils donnent les idées de base qui représentent les fondements culturels de la microscopie.

1.1 - "OPTIQUE"

L'adjectif "**optique**" se réfère à tout ce, objet ou idée, qui se base sur la "radiation optique", c'est-à-dire celle capable d'impressionner l'œil humain sain.

Il est bien connu que, dans chaque caractère des êtres vivants, et par suite aussi dans les performances de l'œil, il existe une "variabilité", c'est-à-dire une gamme de différences entre individu et individu et entre moment et moment. Pour cela il serait impossible de définir avec précision quel est la gamme des radiations qui impressionne l'œil humain; mais pour beaucoup d'usage on peut définir un "**œil moyen**" et une gamme de radiations "optiques" valides pour tout le monde.

Les **radiations optiques** représentent une petite partie des radiations électromagnétiques; il s'agit d'oscillations d'un champ[2] électrique et d'un champ magnétique; ces oscillations se propagent en ligne droite, dans un milieu homogène, et les champs électriques et magnétiques ont une direction perpendiculaire à la direction de propagation, et perpendiculaire l'un par rapport à l'autre. Ce type d'oscillation ou "**onde**" est constitué par la variation périodique d'une forme d'énergie, le "**champ**", qu'on peut représenter comme un "vecteur" c'est-à-dire un segment à flèche; la direction du segment indique la direction du champ; la pointe de la flèche indique son sens, par ex. à droite ou à gauche; la longueur du segment indique l'intensité du champ. Au moins au niveau intuitif, nous pouvons alors définir une "**direction de propagation**" ou "**rayon**" comme une ligne géométrique le long de laquelle se transmet l'énergie de l'oscillation, et une "onde" comme variation périodique de la valeur du champ.

Les champs électriques et magnétiques viennent issus et se propagent dans beaucoup de cas simultanément, comme dans les radiations optiques, étant donné que ils sont liés à l'oscillation d'une charge électrique comme la rotation d'un électron autour d'un noyau atomique. La radiation optique naît en général d'atomes "excités" (à cause de la chaleur, d'autres radiations, etc.) qui reviennent dans l'état de repos; ceci arrive dans les "sources" qui émettent lumière propre comme un métal incandescent, une étincelle ou un "plasma" (gaz excité par la chaleur ou par les décharges électriques), une substance fluorescente excitée par d'autres radiations, certaines substances qui subissent une transformation chimique, certains semi-conducteurs, etc.

Les oscillations du champ électrique et magnétique, qui constituent l'onde optique et les autres ondes électromagnétiques, arrivent avec une loi "**sinusoïdale**"[3], c'est-à-dire l'intensité des champs, électrique et magnétique, varie dans le temps selon la fonction:

$$E = E_o \operatorname{sen} 2 \pi f t \qquad (1)$$

dans laquelle E est l'intensité instantanée du champ, E_o est l'intensité maximum qu'il présente pendant un certain temps[4], "**f**" est la fréquence[5] de l'oscillation, qui dépend de la source et "**t**" le

[2] En simplifiant, on peut dire que le "champ" est la région de l'espace dans laquelle une charge électrique ou un aimant font entendre leur présence, c'est-à-dire qu'ils exercent une force sur un autre aimant ou une autre charge. Le terme "champ" est utilisé aussi pour indiquer cette force.

[3] Sur la fonction "sinusoidale" voir le § 2.2.1.

[4] un temp qui comprend au moins quelques oscillations complètes.

[5] "Fréquence" indique le nombre d'oscillations complètes par seconde.

temps (voir la fig. 1).

La fonction **sinus**, comme on déclarera dans le § 2.2.1, oscille entre + 1 et – 1 ; pour cela E peut osciller seulement entre + E_o et – E_o.

En autres mots, le champ change continuellement d'intensité, entre une valeur maximum positive + E_o et une négative – E_o, en inversant continuellement son propre sens, avec fréquence **f**.

Pour nos applications, et pour expliquer la majorité des phénomènes optiques, il est suffisant de considérer le champ électrique, et E indique justement le vecteur électrique de la radiation optique.

La radiation optique se propage avec une vitesse "**c**" qui dépend de la nature du milieu traversé et qui assume dans le vide, et approximativement aussi dans l'air, sa valeur maximum, c'est-a-dire environ 300.000 Km/s. Si nous divisons "**c**" (espace parcouru en 1 seconde) par **f** (le numéro d'oscillations par seconde) on obtient la "**longueur d'onde**" λ (lettre grecque **l** ou "lambda" minuscule), c'est-à-dire l'espace parcouru par la radiation pendant une oscillation complète:

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (2)$$

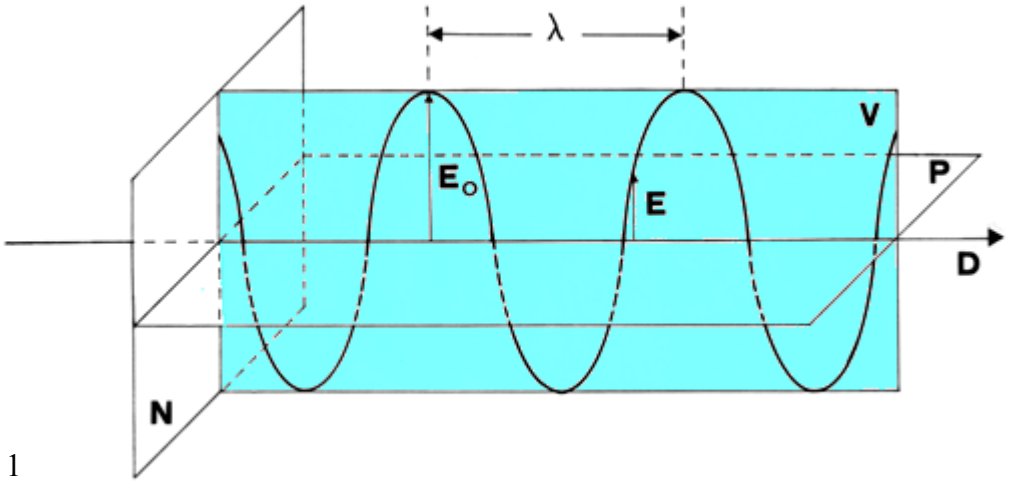


Fig. 1

Étant donné que la fonction sinus est périodique, le champ assume périodiquement la même valeur; λ peut se considérer ainsi l'espace parcouru par la radiation pendant que le champ d'une certaine valeur **E** se modifie jusqu'à reprendre la même valeur en changeant dans le même sens[6]. Le temps employé par l'oscillation à accomplir un cycle complet est exprimé en secondes, indiqué avec **T** ou "**période**", et naturellement:

$$T = 1/f \qquad (3)$$

De tout ce qu'on a dit, il résulte que l'onde optique, comme chaque onde électromagnétique, montre le vecteur électrique **E** dans un plan bien précis, nommé "**plan de vibration**" (V dans la fig. 1); dans ce plan ce trouve évidemment la direction de propagation (D dans la fig. 1). Le plan perpendiculaire à V (P dans la fig. 1) est appelé "plan de polarisation".

La valeur de λ peut changer, en principe, sans limite. En réalité, la physique s'intéresse à un "spectre"[7] de radiations électromagnétiques subdivisé en base aux valeurs de λ (valeurs arrondies):

---

[6] Étant donnée n'importe quelle radiation électromagnétique, seulement sa fréquence est constante; l'ampleur, la vitesse de propagation et ensuite λ, etc. dépendant du milieux traversé.

[7] Un "spectre" est une serie de radiations de differente longueur d'onde.

3˙000	-	600 m	=	Ondes radio “longues”
600	-	200 m	=	Ondes radio “moyennes”
200	-	10 m	=	Ondes radio “courtes”
10	-	1 m	=	Ondes radio “ultra-courtes”
1 m	-	1 mm	=	“Micro-ondes”

Toutes ces ondes sont produites par des courants alternées dans des circuits oscillants (émetteurs radiophoniques, TV, FM, radar, Marconi thérapie) ou par des corps chauds.

Suivent des autres gammes d’ondes produites par des transitions électroniques dans des atomes excités, comme il est dit plus haut, ou par des transitions moléculaires; dans ces gammes on utilise comme unité de mesure le millième de mm ou “micromètre”, simplifié en “**micron**”, indiqué avec le signe μ ou μm dans lequel μ indique le **m** grec minuscule ou “mu”, ou le “**nanomètre**” ou “**nm**”, qui est le millième de μ, c’est-à-dire le millionième de mm, c’est-à-dire le milliardième de mètre. On a ainsi:

$$1\mu\,m = 10^{-6}\,m = 10^{-3}\,mm$$
$$1\,nm = 10^{-9}\,m = 10^{-6}\,mm = 10^{-3}\,\mu m$$

Eh bien, on a encore les gammes de radiations suivantes:

de 1 mm à 0,8 μm = **Infrarouge** ou **IR**, radiation thermique produite par tous les corps chauds;

de 0,8 μm à 0,4 μm = **Radiation optique**, radiation produite par des transitions électroniques, comme on a dit;

de 400 nm à 10 nm = **Ultra-violet** ou **UV**, produit par différentes sources à haute température, lampes spéciales, corps célestes, etc., avec des forts effets chimiques.

À ce moment, on utilise comme unité de longueur l’Ångström[8] (Å):

$$1\,Å = 0{,}1\,nm = 10^{-4}\,\mu m = 10^{-7}\,mm = 10^{-10}\,m.$$

++ de 10 nm à 1 Å = rayons X produit par des noyaux atomiques excités dans des appareils spéciaux (tubes Röntgen[9]) ou dans des corps célestes;

++ moins de 1 Å = rayons **γ** (lettre **g** minuscule grecque ou “gamma”); il s’agit de radiations très pénétrantes et dangereuses produites par la décomposition d’atomes ou de corps célestes (“rayons cosmiques”).

Comme on voit, la radiation optique occupe un secteur très délimité du spectre global des radiations électromagnétiques.

Le **microscope optique** est justement un instrument qui utilise la radiation optique ou, en cas spéciaux, les radiations les plus voisines, comme l’infrarouge prochain ou l’ultraviolet (voir le par. 19.3.3).

Ils existent aussi des microscopes qui utilisent des ultra-sons ou des rayons X ou des électrons, mais il s’agit d’instruments de toute autre nature que nous ne traiterons pas dans ce manuel (voir, dans ce même site, l’art. n° 42 – en italien).

Dans le “**spectre optique**” il y a donc des radiations de longueur d’onde entre environ 0,4 et 0,8 μ; ces radiations produisent dans l’œil différentes sensations “moyennes” de couleurs pures, qui vont du violet, environ 400-450 nm, au bleu, 450-500 nm, vert, 500-580 nm, jaune, 580-600

---

[8] Andreas Jonas ÅNGSTRÖM (prononciation: ônström), physicien suédois, 1814 - 1874. En réalité, l’unité Å a été déclaré illégal à partir de 1981 par un decret CEE du 20 Décembre 1979.

[9] Wilhelm Conrad RÖNTGEN (prononciation: röntghen), physicien allemand (1845-1923).

nm, orange, 600-650 nm, jusqu'au rouge, au-delà de 650 nm.

Les "couleurs" sont des représentations psychiques qui correspondent à un agent physique qui est la radiation optique de différente longueur d'onde. Cependant, les couleurs réelles sont en générale mixtes, constitués ou provoqué par des parties plus ou moins étendues du spectre optique. Il est très difficile d'avoir des sources de couleurs "pures", c'est-à-dire des sources monochromatiques, capables d'émettre sur une seule longueur d'onde ou au moins dans un spectre très limité. Celui-ci est le cas des lasers.

La sensation de blanc naît dans notre œil dans des cas très différents, par ex. en mélangeant des couples de couleurs, c'est-à-dire des radiations, dites "**complémentaires**", dont il existe des exemples infinis, ou parties plus ou moins étendues du spectre. En général, les **sources "blanches"** (soleil, nuages, flammes, corps incandescents, etc.) émettent un spectre continu qui couvre tout le spectre optique, soit-il souvent avec une intensité pas uniforme, et il est facile, avec un prisme par ex., décomposer la lumière blanche dans les radiations constituantes (voir plu loin où on parle de la dispersion au § 2.3.1).

1.2 - MICROSCOPE

Le substantif "Microscope" indique un instrument qui utilise la radiation optique pour un double but:

1.2.1 - Agrandir

Pour nous ce terme signifie "obtenir une image d'un certain objet qui sois agrandie par rapport à l'objet même". "Le microscope n'agrandit pas les objets", qui restent ce qu'ils sont, mais il fournit d'eux une image agrandie.

Chaque instrument est convenable à l'observation seulement de certaines catégories d'objets.

On pourrait dire qu'aussi la longue-vue et le télescope font voir "les objets agrandis"; et en effet ils existent des "**télé-microscopes**" dans lesquels la distance entre instrument et objet est très grande, même quelque mètre. La frontière entre les deux catégories d'instruments est nuancée donc, mais en principe le microscope s'adresse aux objets "au plat de main", la lunette aux objets éloignés.

En nous limitant au microscope optique, ce terme fut introduit en 1624 par J. Faber[10] de l'Accademia dei Lincei et il a conservé le sens originaire. En sens étroit on appelle "**microscope simple**" un système optique formé d'une seule lentille ou d'un groupe de lentilles reconductible à une lentille simple. En somme il s'agit de la "lentille de grossissement" ou "**loupe**", dont le fonctionnement est expliqué dans le § 4.1. De ce dispositif on a des exemples très anciens, peut-être d'époque babylonienne, et toujours il rend des grands services, surtout dans le travail en plein air, étant donnés ses petites dimensions. Son grossissement peut arriver à des valeurs élevées, quelque centaine de fois, mais pour obtenir celui-ci il faut augmenter la courbure des lentilles et ceci signifie en diminuer le diamètre.

Avec une lentille sphérique de 1 mm de diamètre le grossissement "conventionnel" (voir le § 4.3) peut arriver à 350 ×, mais à ce moment là la lentille devient presque inutilisable:

--le champ objet est étroit, inférieur au diamètre de la lentille;

--la lentille, pour ne pas diminuer le champ ultérieurement, va tenue tout prés de l'œil;

--l'objet doit être tenu à une distance de la lentille qui soit inférieure au diamètre de celle-ci;

--une lentille simple résulte atteinte de forts aberrations, la correction des quelles rend le système complexe et cher.

En conséquence, en pratique, la lentille de grossissement plus utile au naturaliste a un grossis-

[10] Johannes FABER, d'origine bavaroise (1574-1629).

sement pas supérieur à 10 × (focale pas inférieur à 25 mm, diamètre 10 - 15 mm) et elle peut être constituée par une lentille simple.

Pour des grossissements supérieurs on utilise le "**microscope composé**" formé par deux ou plus lentilles, mais toujours reconductible à deux lentilles simples dans son fonctionnement essentiel (voir le § 1.8). Avec cet appareil on obtient aisément les plus grandes valeurs de **grossissement "utile"**, environ 1.500 × dans l'observation visuelle, à peu prés la moitié en photographie (voir le § 18.12), avec des distances raisonnables pour l'œil et pour l'objet, avec des **champs visuels** même au-delà de 50°. Le **champ objet**, la part visible de l'objet (voir les §§ 7 et 19.2.4) peut aller de 25 mm à 0,1 mm, en cas extrêmes; on peut avoir des plus grandes valeurs dans les microscopes "stéréoscopiques" (voir le § 29).

Les premiers microscopes composés remontent au début du 17e siècle, peut-être par œuvre de G. Galilei[11], peut-être par œuvre d'un artisan hollandais, Z. Janssen[12], peut-être par un autre hollandais (Drebbel[13]) ou par l'anglais Digges (1571-1629). Mais, jusqu'au début du 19e siècle, c'est-à-dire jusqu'à la découverte de l'achromatisme (voir le § 13.2.1), les performances de ces instruments étaient pires de celles du microscope simple et elles ne recevaient pas d'attention de la part des spécialistes. Seulement près des classes aisées le microscope venait jugé un objet de luxe, aujourd'hui on dirait un "status symbol", et on l'utilisait pour des observations "curieuses et extravagantes".

À travers le grossissement, le microscope permet l'observation d'objets ou de structures trop petites pour l'observation directe, leur localisation, c'est-à-dire la définition de leur disposition à l'intérieur d'un complexe d'autres objets, et, avec des accessoires convenables, leur mesure (dimensions ou autres propriétés physiques) et leur photographie ou reprise par la télévision.

1.2.2 – Résoudre

L'autre but fondamental du microscope, trop souvent ignoré, est d'augmenter le "pouvoir résolutif" de l'œil.

Le "**pouvoir résolutif**" d'un système optique exprime en général la possibilité d'en tirer une image qui monstre évidents, distincts ou "résolus", certains "détails", correspondants à certaines structures de l'objet.

Par ex., si nous photographions de la distance de 30 cm une page de journal avec un bon objectif photographique de type normal, nous pourrons distinguer dans la photo les lettres particulières. Si ces dernières sont considérées comme la structure caractéristique de cet objet, alors nous dirons que "l'objectif a résolu la structure en examen", c'est à dire il distingue les détails.

"**Résoudre**" a un sens proche de "dissoudre", c'est-à-dire "séparer", donc "rendre distinct", "rendre clair"; en allemand "auflösen" signifie "décomposer, diluer, séparer" au-delà de "résoudre".

Nous continuons avec notre exemple: le même journal, photographié à 100 m de distance avec le même objectif, nous apparaîtra comme un petit rectangle gris, qui ne contient pas les détails, la structure de l'objet, c'est-à-dire les lettres particulières. La structure de l'objet n'a pas été "résolue".

Quelqu'un pourrait penser qu'il s'agit d'un problème d'agrandissement et que l'image du journal est trop petite, simplement.

Mais si on essaie à agrandir cette photographie avec un microscope ou un projecteur, l'image du journal deviendra grande quant on veut, même plus grande que celle photographiée à 30 cm de distance, mais la "structure", les lettres particulières n'apparaîtront jamais.

Autre exemple: avec un microscope, même de modeste qualité, on peut observer touts les glo-

---

[11] Galileo GALILEI, mathématicien, physicien et astronome pisan (1564-1642). Il appela "occhialino" son instrument.

[12] Zacharias JANSSEN, lunettier flamand (1587-1638).

[13] Cornelis van DREBBEL ou DREBEL, physicien et mécanicien hollandais (1572-1634).

bules dans un frottis de sang; mais ils n'apparaissent jamais dans l'image du même objet fournie par un objectif photographique normal, bien qu'on agrandisse l'image par un moyen quelconque.

Nous reviendrons amplement sur la notion de résolution (voir le § 18), mais il est clair que l'utilité d'un instrument optique repose dans sa capacité de nous montrer la structure fine de l'objet, c'est-à-dire de "la résoudre", et le "**pouvoir résolutif**" est autant plus grand que plus petits sont les détails qui apparaissent dans l'image fourni par cet instrument, c'est-à-dire autant plus voisins sont les point (points en sens optique, voir au § 18.4) qui peuvent se révéler encore comme distincts dans l'image.

Par suite, pour évaluer un microscope, il n'a pas le sens considérer son agrandissement maximum, mais plutôt son meilleur pouvoir résolutif. Ce dernier est rarement déclaré par le constructeur mais on le déduit avec une simple formule (voir le § 18 et la formule (52)) de la valeur d'ouverture de ses objectifs. Cette dernière est déclarée toujours par les constructeurs sérieux: en cas contraire, le microscope doit être considéré dépourvu de valeur.

Obtenir des forts agrandissements est techniquement facile et économique; même des instruments jouet permettent des agrandissements de 2.000 ou 5.000 fois. Mais un instrument sérieux ne va pas au-delà de 1.500, étant donné que dans ces conditions on a déjà le meilleur agrandissement utile (voir le § 18.12).

Nous sommes en train de parler évidemment de microscopes optiques composés; et dans cette catégorie la résolution va d'environ 6 à 0,2 μ (voir le § 18.6), selon l'ouverture et d'autres caractéristiques du système optique.

1.3 - MICROGRAPHIE

Le terme "Micrographie" indique les branches de la science et les techniques qui ont génériquement pour objet le microscope optique:

--Théorie sur le fonctionnement du microscope et sur l'interprétation des images qu'il fournit.

-- Techniques de construction et d'emploi des microscopes.

-- Techniques d'entretien et de contrôle.

-- Techniques de préparation des objets à observer.

-- Documentation des images avec le dessin, la photographie ou les techniques de la télévision et digitales.

-- Élaboration des images avec les moyens du calcul digital ou analogique.

-- Observations qualitatives.

-- Mesures, comptages et évaluations quantitatives de tout genre sur les images fournies par le microscope.

"Micrographe" est celui qui s'occupe ou se sert de microscopes pour n'importe quel but pertinent.

Plus récemment, le terme "micrographie" a revêtit un sens plus restrictifs:

-- en botanique, le même que "technique microscopique", voir plus loin;

-- en métallographie: observation en générale au microscope d'échantillons d'essai métalliques ou leur photographie.

La micrographie puise à la physique, en particulier à l'optique et à la mécanique, quelquefois à la chimie (verres d'optique, alliages métalliques, lubrifiants, adhésifs, etc.) et toujours à la technologie.

1.4 - MICROSCOPIE

"**Microscopie**" est par contre un terme plus restrictif, qui indique seulement la pratique sur le fonctionnement, l'emploi et l'entretien du microscope.

"**Microscopiste**" est celui qui utilise le microscope, sans s'occuper des problèmes théoriques, de la construction, du fonctionnement de l'instrument, etc.

La "**Microscopie générale**" s'occupe des principes généraux de fonctionnement et d'emploi du microscope, et elle représente l'objet de ce volume.

La "**Microscopie spéciale**" s'occupe de techniques spéciales qu'on applique en microscopie: radiation polarisée, fluorescence, contraste de phase, champ noir, phénomènes interférentiels, épiscopie, durimétrie, photographie, reprise et élaboration TV, etc. Nous en mentionnerons dans le chapitre 30.

Note: on appelle **diascopie** l'observation d'objets minces et transparents, éclairés par-dessous ("lumière transmise"); **épiscopie** celle des objets opaques, éclairés par-dessus ("éclairage vertical" ou "lumière réfléchie" ou "lumière incidente").

1.5 - TECHNIQUE MICROSCOPIQUE

"**Technique microscopique**" est l'ensemble des méthodes utilisés pour la préparation des objets à observer au microscope; pour les objets vivants: "fixation" (conservation de la structure), coloration, section, lévigation, "montage", etc. Pour les objets opaques, section, polissage, attaque chimique, etc.

Telles méthodes ont le but de rendre l'observation plus fructueuse et plus confortable, et pour chaque type d'objets il existe une "technique microscopique" particulière.

Sur les différentes techniques nous avons une ample littérature.

1.6 - "OBJET"

Pour "objet" nous entendrons l'objet qui doit être observé à travers le microscope, dont l'instrument doit fournir une image agrandie. Il peut avoir une nature variée. Pour être observé il peut demander des manipulations mêmes compliquées, par l'œuvre de la "technique microscopique".

L'objet peut être "en relief", à trois dimensions, seulement dans des cas spéciaux (microscopes stéréoscopiques) ou de toute façon à bas agrandissement. Normalement, il doit être étalé ou sectionné ou poli, de façon à présenter à l'observation une surface plane.

1.7 - "IMAGE"

"Image" est l'image de l'objet fournie par le microscope ou en général par un système optique; l'image doit être le plus possible semblable à l'objet et elle doit être formée par la convergence des rayons, ou de leurs prolongements, qui émergent du système optique. Le plan ou la surface courbe dans laquelle on trouve le point de convergence de chacun des faisceaux qui viennent des différents points de l'objet s'appelle "plan image", même quand il n'est pas plan.

Nous verrons que telle image peut avoir des caractéristiques variées et que, à l'intérieur du microscope, il peut y avoir, d'un objet donné, différentes images, en différents position, très différentes entre elles.

On verra la différence entre images «réelles» et «virtuelles» (§§ 2.6 et 2.7).

1.8 - OBJECTIF - OCULAIRE

Si le microscope composé, comme on l'a défini, est réductible à au moins deux lentilles ou systèmes de lentilles, nous pouvons définir:

"Objectif" le système optique qui se trouve plus près de l'objet.

"Oculaire" l'autre système optique essentiel, qui se trouve dessus l'objectif, près de l'œil de l'observateur ou près de la plaque photographique ou de la caméra de télévision.

D'autres systèmes ou lentilles accessoires peuvent se trouver entre objectif et oculaire ("lentilles de tube", variateurs d'agrandissement, prismes, miroirs, etc.) ou sur l'oculaire (en particulier dans les systèmes photographiques ou de télévision). De ces éléments accessoires on parlera plus loin.

Parfois, on peut avoir une photographie d'un objet au microscope composé en enlevant l'oculaire en se servant directement de l'image «intermédiaire» (§ 3.1) issue du seul objectif, mais dans ces cas on doit parler de «macro-photographie» ou, mieux, de «photomacrographie».

Aussi le système éclairant peut comporter des groupes simples ou complexes de lentilles, miroirs, prismes, etc. sous l'objectif (diascopie) ou entre objectif et oculaire (épiscopie), et de ceci on parlera en détail dans les chapitres qui suivent; mais ces accessoires ne constituent pas une partie essentielle du microscope composé.

2 – ÉLÉMENTS D'OPTIQUE

2.1 - La MESURE des ANGLES

En géométrie les angles plans se mesurent de manières différentes:

-- en **degrés** sexagésimaux: un angle de 360°, correspondant à un tour complet, se divise en 360° degrés; un angle plan en 180°; un angle droit en 90°. Un angle aigu est toujours inférieur à 90°; ensuite chaque degré est divisé en 60 ***minutes*** (***premiers***) ***(')***, et chaque premier en 60 (***minutes***) ***secondes (")***.

-- en **radians**, en faisant correspondre à un angle cette partie de cercle ou "arc", qui est délimitée par les côtés de l'angle quand son sommet coïncide avec le centre du cercle. L'unité de mesure est la longueur du rayon du cercle ou "**radian**" (abrégé avec "rad" ou "**rd**"); en autres mots, 1 radian est cet arc de cercle la longueur duquel est égal au rayon "**r**" du cercle même.

Un cercle entier correspond donc à $\mathbf{2\pi r}$ c'est-à-dire à 2π radians. Un angle plan, 180°, correspond à π rad, un angle droit à $\pi/2$ rad, 1° sexagésimale à 0,01745 rad.

Vice versa, 1 rad = 57° 17 45" = 57,2958° et 0,1 rad = 5° 43 47".

On préfère l'expression en degrés ou radians selon l'application.

2.2 – Les FONCTIONS TRIGONOMÉTRIQUES

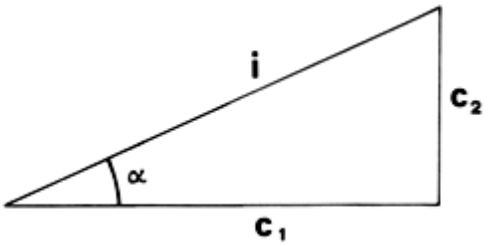


Fig. 2

En beaucoup de cas il convient exprimer les angles avec les fonctions trigonométriques, c'est-à-dire comme rapport de segments, qui est un numéro pur, sans dimensions. On considère un triangle rectangle (fig. 2); l'angle à mesurer α[14] soit compris entre l'hypoténuse "**i**" et le côté "c_1" adjacent. Eh bien, nous intéressent deux fonctions de α:

2.2.1 – Sinus

Le "sinus" de α est le rapport $\mathbf{c_2}$ / **i**:

$$\text{sen } \alpha = \mathbf{c_2} / \mathbf{i} \qquad (4)$$

C'est naturel que $\mathbf{c_2} \leq \mathbf{i}$ pour lequel sen $\alpha \leq 1$; sen 0° = 0; sen 90° = 1; sen 180° = 0; sen 270° = –1; sen 45° = 0,707; sen 1° = 0,01745; sen 10° = 0,173648.

On remarque qu'un angle de 10°, exprimé en rad est égal à 0,174533 pour lequel, pour petits angles, sinus et arc (mesure en radians) peuvent en beaucoup de cas se considérer équivalents.

2.2.2 – Tangente

La "tangente" de α est le rapport c_2 / c_1:

$$\text{tg } \alpha = \mathbf{c_2} / \mathbf{c_1} \qquad (5)$$

[14] "alpha" ou "a" minuscule de l'alphabet grec.

Étant donné que $\mathbf{c_1}$ et $\mathbf{c_2}$ peuvent rester entre eux dans n'importe quel rapport, $c_2 / c_1 = \text{tg } \alpha$ peut être compris entre $+\infty$ et $-\infty$ [15]. On devine que: tg 45° = 1; tg 90° = ∞; tg 180° = tg 0° = 0; tg 270° = − ∞; tg 1° = 0,017455; tg 10° = 0,176327. Même ici, pour des petits angles, la tangente se confond avec le sinus et avec l'arc exprimé en radians.

2.3 – La RÉFRACTION

Quand nous avons défini la radiation optique (voir le § 1.1), nous avons appelé "**direction de propagation**" ou "**rayon**" la ligne le long de laquelle se propage l'énergie radiante, c'est-à-dire l'onde.

Nous avons dit que la direction de propagation est une droite si le milieu est homogène. Nous entendons avec ceci un milieu qui a les mêmes propriétés dans tous les points. En microscopie nous aurons toujours à faire avec des éléments optiques de tel type. Milieux pas homogènes existent cependant en nature (air ou eau en grandes masses à température pas homogène, etc.) et en certaines applications optiques spéciales (lentilles "GRIN" à index variable point par point, etc.).

Nous traiterons aussi, sauf indication contraire, de corps "**isotropes**", c'est-à-dire qui présentent les mêmes propriétés en toutes les directions. Sont au contraire "**anisotropes**" les cristaux en grande majorité et certains composants organiques, qui d'ailleurs peuvent être homogènes; mais pour maintenant nous ne nous en occupons pas. Il nous intéresse par contre préciser que dans un milieu homogène et isotrope la direction de propagation est une droite et la vitesse de propagation est la même dans toutes les directions (et avec elle l'index, voir plus bas).

Étant données ces prémisses, donc, avec une source ponctuelle l'onde est toujours sphérique (étant donné qu'en chaque instant elle se trouve à distance constante de la source, en toutes les directions) et sa direction de propagation coïncide toujours avec la normal à la surface de la sphère, c'est-à-dire avec un rayon de celle-là.

Si la source se trouve à une distance infinie, on peut supposer que l'onde qui joint à l'observateur soit plane (une calotte sphérique de rayon infini est plane) et la direction de propagation est normale à ce plan. L'onde que nous considérons n'est pas que le lieu géométrique des points dans lesquels la radiation arrive dans le même instant.

La direction de propagation peut être représentée ainsi avec une droite et celle-ci coïncide avec la notion de "**rayon**." Le rayon n'est pas l'onde, c'est-à-dire une réalité physique; il en est seulement un symbole géométrique: c'est la droite le long de laquelle l'onde se propage.

On utilise communément le terme "rayon lumineux", mais aucun rayon ni direction de propagation ni onde sont "lumineux" étant donné que ces objets ne produisent pas de "lumière"; seulement un corps peut le faire ("corps lumineux"). Non plus on peut dire "rayon de lumière" étant donné que la "lumière" est une sensation, une représentation psychique. Autour de nous il existe seulement cette réalité physique nommée "radiation" et celle-ci est une forme d'énergie, tout simplement. La source peut seulement être "de lumière" ou mieux, "de radiation". Limitons-nous donc au terme "rayon" ou "rayon optique."

En conclusion, comme on a expliqué, le rayon est rectiligne dans un milieu homogène et, dans un milieu isotrope, il est toujours perpendiculaire à la surface de l'onde. Nous ne pouvons pas décrire ici certaines exceptions qui se vérifient dans les milieux anisotropes.

[15] Le symbole ∞ indique la valeur infinie d'une quelque grandeur.

2.3.1 – La loi de Snell

Maintenant nous considérons la surface de séparation **s** entre deux milieux transparents et homogènes (1) et (2): la surface **s** (vue en section dans la fig. 3) soit plane. Soit donné un rayon incident **I** qui frappe la surface **s** dans le point P ("point d'incidence"). Soit N la perpendiculaire, ou "normale", à la surface **s** dans le point P. Soit **i** l'**angle d'incidence** entre le rayon incident **I** et la normale N. Au-delà de **s,** le rayon **I** se propage dans le milieu (2) et s'appelle "**rayon réfracté**" (R); R forme avec N l'angle **r** (**angle de réfraction**).

La **loi de Snell-Descartes**[16] dit que:

1) Rayon incident et rayon réfracté se trouvent dans un même plan avec la normal qui passe par le point d'incidence. Ce plan est le "**plan d'incidence**".

2) Le rapport: sen **i** / sen **r** = n est constant (6)

Ce "**n**" est appelé "**index de réfraction**" relatif aux milieux (1) et (2). Si (1) est le vide (ou avec bonne approximation l'air), alors on appelle **n** "index de réfraction absolu" attribué au milieu (2) ou, simplement, "index", et il dépend de la nature chimique et des conditions physiques du milieu (2); c'est une constante du milieu si sont constantes ses condition et si est définie la longueur d'onde λ de la radiation incidente.

Si λ varie, alors varie aussi **n** avec une loi qui dépend de la nature et des conditions du milieu. Cette variation est appelée "dispersion de l'index" ou, simplement, "**dispersion**" (voir le § 13.2.1).

Si en P (fig. 3) arrive un faisceau de rayons parallèles de différente λ, chaque rayon, en base à la propre λ, sera réfracté en différente mesure; avec **i** constant sera différent **r** et, au-delà de P, nous aurons un faisceau de rayons de différente direction, c'est-à-dire un faisceau globalement divergent ou, pour mieux dire, "**dispersé**" dans le plan d'incidence.

Étant donné que **n** dépend de λ, quand on indique ou on mesure **n** il faut spécifier à quelle valeur de λ on se réfère; donc **n** est fonction de λ ($\mathbf{n}_\lambda$). En pratique, on se réfère souvent à la longueur d'onde émise par les vapeurs incandescentes de sodium (588,99 - 589,59 nm), qui correspond à la ligne jaune D du spectre du soleil. On indiquera donc $\mathbf{n}_D$.

Étant donné que la fonction **n** n'est pas linéaire, la valeur de la dispersion est différente selon le région spectrale à laquelle on se réfère. La formule usuelle est indiquée dans le § 13.2.1.

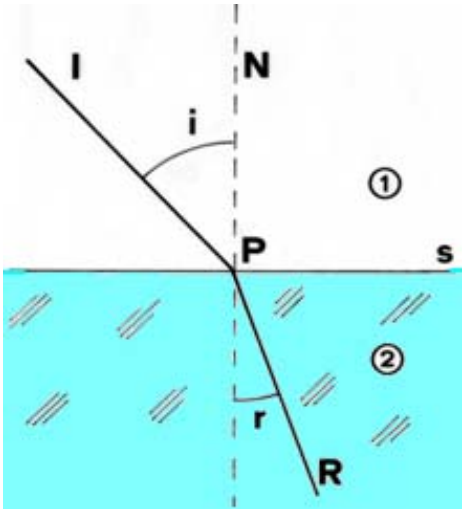


Fig. 3

2.3.2 - Les conséquences

De la loi de Snell on déduit (voir la fig. 3):

•• si le rayon incident **I** est perpendiculaire à **s**, il coïncide avec la normale N et il repose sur la même droite de R; **i** = **r** = 0; il n'y a pas de réfraction, ni dispersion. Avec "**incidence normale**" chaque rayon incident continue non pas dévié, indépendamment de la valeur de λ.

•• Si **i** augmente, **r** augmente aussi, soit-il en mesure différente.

•• Si un milieu transparent et homogène (2) (fig. 4) est limité par deux surfaces planes et parallèles (s_1 et s_2), un rayon incident **I** subit une première réfraction en P1 ("pied" de la normale N_1,

[16] SNELL ou SNELLIUS Willebrordus, mathématicien hollandais (1580-1626). René DESCARTES (Cartesio, en italien), philosophe français (1596-1650). Le premier étude de la réfraction, cependant, serait dû à l'astronome anglais Thomaxe Harriot (1560 – 1621).

c'est-à-dire point d'incidence de **I**), et puis une seconde en P_2 (incidence de $\mathbf{R_1}$, pied de la normale N_2).

À la fin, on a que $\mathbf{i} = \mathbf{r_2}$ et par suite le rayon final R_2, réfracté deux fois, est parallèle à **I**, mais seulement déplacé latéralement. Dans ces conditions R_2 n'est pas dispersé (R_1 l'est[17]). Si $\mathbf{i} = 0$ (**I** frappe normalement), aussi $\mathbf{r_1 = r_2 = 0}$ et le rayon R_2 émerge pas dévié, sa direction coïncide (est parallèle) avec celle de **I**.

•• Qu'on considère encore la fig. 3; soit (1) le vide ou l'air ou autre gaz léger, qui a l'index très prochain à 1; on peut montrer que, en mettant en (2) n'importe quel milieu optique transparent sauf que le vide, on a: $\mathbf{r < i}$, c'est-à-dire le rayon réfracté R (fig. 3) se rapproche de la normale N par rapport à **I**; donc: **sen r < sen i** et n >1. En conclusion: l'index absolu de n'importe quel milieu est toujours plus grand que 1.

•• Si on donne a **i** sa plus grande valeur, c'est-à-dire: $\mathbf{i} = 90°$, on a sen **i** = 1; le rayon incident **i** est rasant à **s**; dans ces conditions, **r** assume sa plus grande valeur:

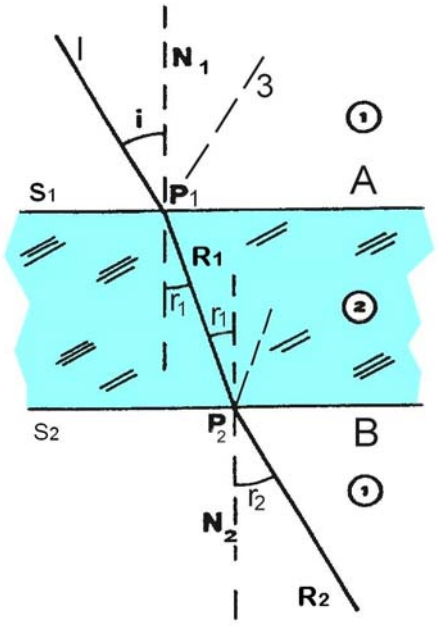
$$\text{sen } \mathbf{r} = \text{sen } \mathbf{i} / \mathbf{n} = 1 / \mathbf{n} = \text{sen } \theta \qquad (7)$$

Cette valeur maximum de **r** est appelée "**angle limite**" et nous l'indiquons avec la lettre θ (theta, minuscule, en grec).

•• Si le rayon incident vient d'un milieu avec index n > 1 et il entre dans un milieu d'index plus petit, par ex. dans le vide ou en air, il résulte qu'il s'éloigne de la normale. Dans la fig. 3 supposons que le rayon aille du bas en haut: le rayon incident devient R; l'angle de réfraction devient **i** et il est plus grand de l'angle d'incidence (qui devient **r**). Quand **r** augmente, aussi **i** augmente jusqu'au point dans lequel $\mathbf{r} = \theta$ (angle limite). Dans ces conditions, $\mathbf{i} = 90°$ et le rayon réfracté (dans ce cas **I**) émerge rasant à **s**.

•• Finalement, dans le cas de la fig. 5, si $\mathbf{r_1} > \theta$, le rayon incident (R_1) ne vient pas réfracté, c'est-à-dire il ne dépasse pas la surface **s**, mais il est "totalement réfléchi" en P et il continue comme rayon réfléchi (R_2). Cette réflexion s'appelle "**interne totale**" étant donné que toute l'énergie incidente est réfléchie (si le milieu est totalement transparent, la surface de séparation plane est absolument propre, etc.), pendant que dans les réflexions normales il y a une partie réfléchie, une partie transmise (si le matériel est transparent), ou une partie absorbée (matériels métalliques, par ex.).

Fig. 4



La réflexion totale obéit aux mêmes lois de la réflexion normale:

•• le rayon incident (R_1), le rayon réfléchi (R_2) et la normale (N) dans le point d'incidence (P), se trouvent dans le même plan (plan d'incidence)(voir la fig. 5);

•• l'angle de réflexion, $\mathbf{r_2}$ est égal à l'angle d'incidence ($\mathbf{r_1}$).

[17] En réalité, on peut parler pour R_2 de "dispersion parallèle" dans le sens que les rayons réfractés en R_2, correspondants aux différentes longueurs d'onde présentes, sont tous parallèles entre eux mais pas coïncidents.

Si le milieu (2) de la fig. 5 est un verre normal bore-silicate léger (crown), avec $\mathbf{n}_D = 1{,}515$, on a (voir le formule (7)): sen $\theta = 1/n = 0{,}660$; $\theta = 41{,}30°$; donc, si un rayon arrive sur une surface verre-air (en venant du verre) avec un angle de 45°, supérieur à l'angle limite θ pour ce verre, il vient totalement réfléchi comme si la surface du verre fût opaque, c'est-à-dire dépourvue de transmission. On a ainsi un miroir idéal à rendement maximum.

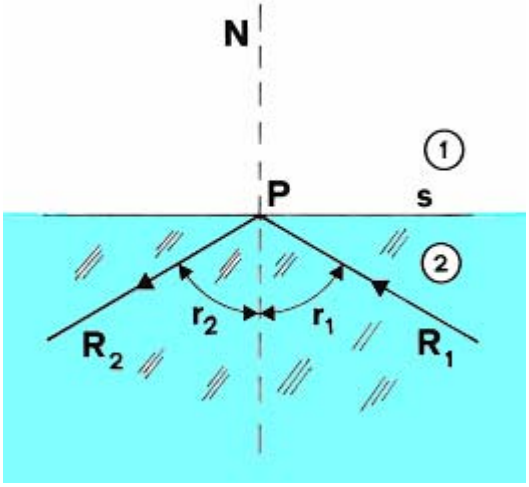


Fig. 5

On exploite ce phénomène dans les "**prismes à réflexion totale**" ou "à réflexion interne", amplement utilisés dans les microscopes, jumelles et autres instruments (voir le § 11).

2.4 - Le PRISME DÉVIATEUR

On considère un dièdre, par ex. un bloc de verre (vu en section dans la fig. 6) limité par deux surfaces planes, s_1 et s_2, concourants dans une arête S. L'angle entre les faces du dièdre ("angle du prisme") est indiqué avec α.

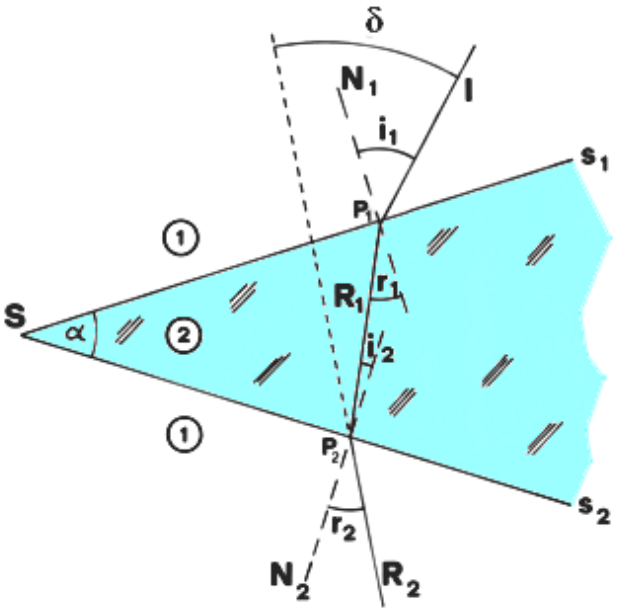


Fig. 6

Le milieu (1) aux deux côtés du dièdre peut être de l'air. Si un rayon **I** arrive sur $\mathbf{s_1}$ comme dans la fig. 6, sur la base de l'index du verre (2), de la valeur de l'angle d'incidence $\mathbf{i_1}$ et des lois de la réfraction, on peut construire le parcours du rayon à travers (comme R_1), et dehors (R_2) du dièdre. On peut demontrer que le rayon émergent (R_2) est dévié par rapport au rayon incident **I** d'un angle δ ("delta", **d** minuscule de l'alphabet grec) qui dépend entre autre de l'angle "du prisme" α; R_2 s'éloigne de toute façon de l'arête S, par rapport à la direction de **I** et la "déviation" δ grandit au grandir de α et de **n**.

Naturellement, si la radiation incidente sur le dièdre est mixte (rayons de différente λ), le rayon R_2 sera "dispersé" à l'éventail, il y aura une différente direction de R_2 pour chaque valeur de λ. Nous verrons que cette dispersion arrive aussi dans les lentilles, et elle constitue un grand problème pour le projeteur de systèmes optiques (voir les §§ 13.2.1 et 13.2.2).

2.5 – Les LENTILLES SPHÉRIQUES

En microscopie, sauf des cas très rares, on utilise des lentilles sphériques, c'est-à-dire des pièces de verre "optique"[18] limitées par deux surfaces sphériques ou bien une sphérique et une plane.

Supposons pour simplicité une lentille plan-convexe, mais le principe de fonctionnement est le même pour toutes les lentilles. Voir la fig. 7 dans laquelle on considère une section partielle d'une telle lentille selon les conventions du § 2.6 et quelques rayons, ($I_{1,2,3}$) qui incident sur la surface sphérique **s_1**.

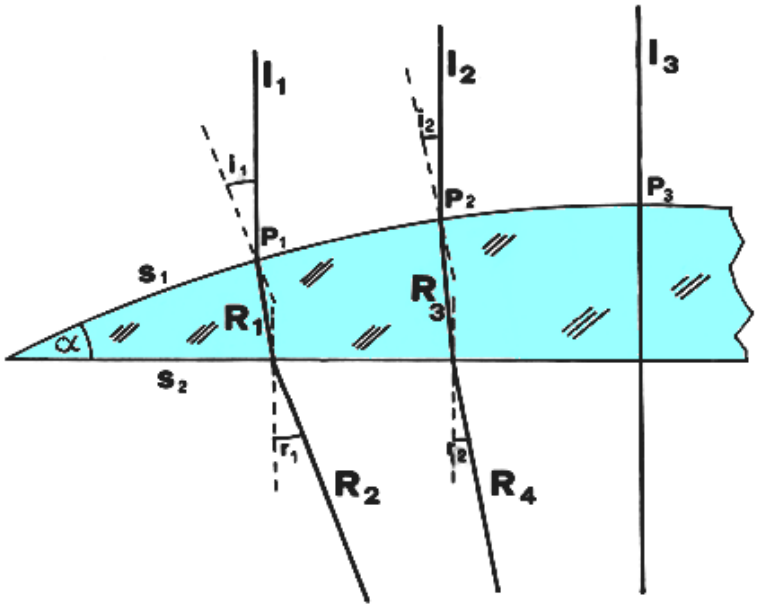


Fig. 7

Dans le point d'incidence **P_1**, le rayon **I_1** rencontre une surface courbe mais, étant donné que **I_1** est une direction, sans dimensions transversales, **s_1** se conduit en **P_1** comme si elle fût plane. Ainsi **I_1** se conduit comme s'il traversât un prisme, c'est-à-dire comme dans la fig. 6; le même on peut dire d'**I_2** et de toute autre rayon incident mais, si l'inclinaison de s_1 est plus petite, c'est-à-dire si **P_2** s'éloigne de l'arête plus de **P_1**, la déviation de **R_4** est plus petite de celle de **R_2**. Sans entrer dans les détails, on devine comme tous les rayons incidents parallèles à **I_1** émergent de la lentille en formant globalement, en principe, un faisceau convergent. On peut considérer la lentille sphérique comme un prisme dans lequel l'angle α sois décroissant en partant du bord et en allant vers le centre; en même temps change l'angle de déviation δ d'un maximum à zéro (δ est l'angle de déviation entre **R_2** et **I_1**, entre **R_4** et **I_2**, etc.).

Nous avons à peine indiqué "zéro" parce qu'un rayon qui arrive sur la lentille au sommet de la calotte sphérique, c'est-à-dire perpendiculaire aux deux faces comme **I_3** dans la fig. 7, ne subit pas de déviation pour ce que nous avons dit dans le § 2.3.2. C'est comme dire qu'en **P_3** les surfaces **s_1** et **s_2** sont planes et parallèles.

[18] C'est-à-dire doué de grande homogénéité et transparence et de propriétés optiques très particulières et contrôlées avec des moindres tolérances.

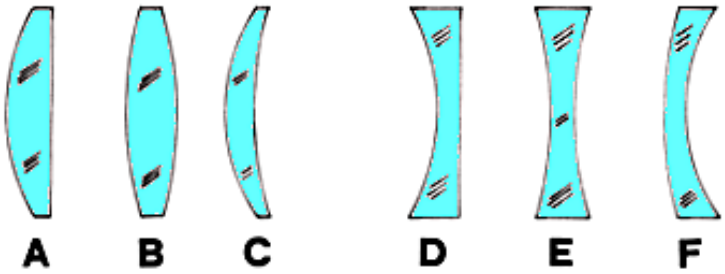


Fig. 8

Cette fonction fondamentale d'une lentille comme celle de la fig. 7 doit donc être soulignée: un faisceau de rayons parallèles devient, en émergeant de la lentille, **convergent**. Peut-être pas convergent dans un point géométrique sans dimensions, comme nous verrons en parlant des aberrations, mais convergent dans une petite région que nous appellerons à son temps "**cercle de confusion**". Si les rayons parallèles incidents sur la lentille peuvent se considérer comme provenant d'une source ponctuelle à distance infinie ("les droites parallèles se rencontrent à l'infini"), les rayons émergents se rencontrent dans un "point" qui est optiquement correspondant à la source, c'est-à-dire son "image." Nous avons ainsi le schéma de base d'une lentille convergente: étant donné un point "objet", à celui-ci correspond un point "**conjugué**" ou "image": correspondance biunivoque entre chaque point-source d'un côté de la lentille et le point-image conjugué de l'autre côté.

Eh bien, étant donnée une lentille sphérique, on appelle "**axe**" la droite qui passe par les centres de courbure des deux surfaces. Si une des faces est plane, l'axe passe par le centre de la face courbe et il est normal à la face plane. L'**axe optique** de la lentille est aussi son axe de symétrie (axe de symétrie d'ordre infini, ayant à faire avec des surfaces sphériques ou planes). Dans la fig. 7, le rayon I_3 coïncide avec l'axe et il n'est pas dévié.

On appelle lentilles "**positives**" ou "**convergentes**" les lentilles dont l'épaisseur est plus grand au centre qu'aux bords; elles peuvent être plan-convexes, biconvexes ou convexe-concaves ("**ménisques convergents**"). Voir la fig. 8A, B et C pour leur section axiale.

On appelle lentilles "**négatives**"[19] ou "**divergentes**" les lentilles dont l'épaisseur est plus petite au centre; on a ici aussi lentilles plan-concaves, biconcave et concave-convexes ("**ménisques divergent**s"). Voir la fig. 8D, E et F.

Les lentilles convergentes alors, si elles sont frappées par un faisceau de rayons parallèles entre eux et parallèles à l'axe, produisent un faisceau de rayons qui se dirigent, à peu près, dans un point dit "**foyer**" ou "point focal"; le foyer se trouve sur l'axe et il est éloigné de la lentille d'une longueur dite "**longueur focale**" (**f**), comme nous verrons.

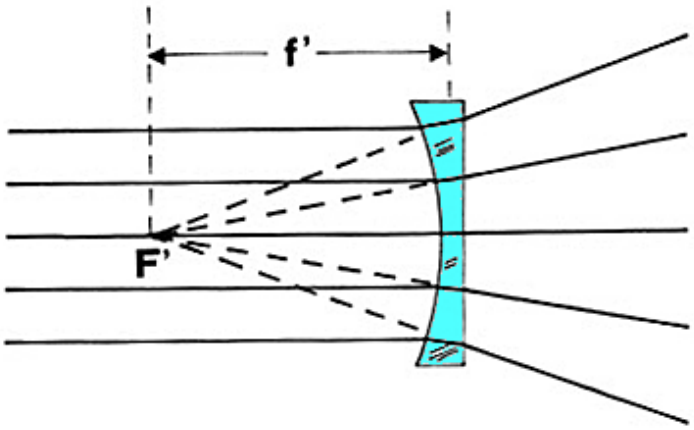


Fig. 9

Les lentilles divergentes, si elles sont frappées par des rayons parallèles entre eux et parallèles à l'axe (sauf le cas des ménisques de forte épaisseur - voir le § 19.2.3.2), elles produisent un faisceau émergent de rayons divergents. Ceux-ci ne se dirigent donc pas dans un foyer réel mais, si on

[19] En microscopie le terme "négatif" indique un type particulier d'oculaire convergent (voir le § 7.2 et la fig. 27) et pour cela les lentilles divergentes doivent être indiquées seulement comme "divergentes".

trace à reculons les prolongements des rayons émergents, on peut identifier un "**foyer virtuel**" F_1 qui se trouve sur l'axe (fig. 9)[20].

2.5.1 - L'approximation de Gauss[21]

L'étude géométrique du comportement des lentilles est très complexe, mais pour les buts que se propose ce volume il peut suffire, au moins pour le moment, de nous occuper de la "**approximation de Gauss**" ou "**théorie des lentilles minces**" ou "**optique paraxiale"**.

Il s'agit d'une simplification qui considère des lentilles idéales avec ces caractéristiques:

•• la lentille est "mince", c'est-à-dire avec épaisseur négligeable;

•• les rayons incidents sur elle sont "paraxiales", c'est-à-dire très voisins à l'axe; il est comme dire qu'on utilise seulement la partie centrale de la lentille, ou que la lentille est diaphragmée par un étroit diaphragme centré sur l'axe qui se trouve dans le plan de la lentille même;

•• les rayons sont "peu" inclinés sur l'axe, au sens que tous les angles formé par eux (angles d'incidence, d'ouverture, de champ, etc.) sont petits et on peut confondre l'arc avec le sinus et avec la tangente (voir le § 2.2).

•• la radiation utilisée est "monochromatique", c'est-à-dire formée par des ondes avec une seule valeur de λ;

•• les ondes considérées sont toujours sphériques (ou planes si leur rayon de courbure est infini); elles sont donc **homocentriques**, c'est-à-dire: dans leur propagation elles divergent ou se dirigent toujours vers un même point qui est le centre de la sphère; à chaque point objet correspond donc un point image (voir plus loin), et les rayons d'un faisceau convergent ou divergent concourent tous dans (ou viennent de) un de ces points. Si un faisceau est parallèle, ce point se trouve à distance infinie et l'onde correspondante est plane (ou bien sphérique avec rayon de courbure infini).

Nous verrons que dans les lentilles réelles ces ondes homocentriques (sphériques) et ces images ponctuelles n'existent pas; la formation des images est atteinte de "aberrations" (voir le § 13) et d'autres phénomènes, comme la diffraction (§ 18).

En chaque cas, une lentille sphérique unique produit cet effet fondamental: une onde incidente, sphérique ou plane, vient convertie dans une autre onde, sphérique ou plane, avec un différent rayon de courbure; c'est-à-dire: d'un faisceau de "rayons", parallèles, convergents ou divergents, émerge un autre faisceau avec une différente valeur de convergence ou de divergence.

2.6 - Les IMAGES RÉELLES

Dans les limites de l'approximation de Gauss, nous examinons le comportement de n'importe quelle lentille convergente. Nous supposons de plus que la lentille se trouve dans le vide ou (avec des légères différences) dans n'importe quel gaz léger.

Notre but sera de tirer des relations univoques entre la position et la dimension de l'objet et la position et la dimension de l'image. Nous nous limiterons de toute façon, ici encore, aux principes utiles en microscopie.

En tous les schémas qui suivent nous utiliserons les **conventions** suivantes (se référer à la fig. 11):

•• la radiation procède de gauche à droite; donc l'objet (source) se trouve à gauche de la lentille; la direction inverse est négative;

---

[20] Dans une lentille mince plan-convexe ou plan-concave, la longuer focale **f** est égale environ au double du rayon de courbure de la surface sphérique; si la lentille est biconvexe ou biconcave, symétrique et mince, **f** est à peu près égal au rayon de courbure.

[21] Carl Friedrch Gauss, mathématicien allemand (1777–1855).

•• objet et image, sauf indication contraire, sont sans épaisseur et ils se trouvent dans un plan perpendiculaire à l'axe; nous aurons ainsi un plan-objet et un plan-image; l'objet et l'image sont souvent indiqués dans une seule moitié de leur plan, d'habitude avec une flèche;

•• il est toujours indiqué l'axe optique de la lentille, qui est l'axe de symétrie rotatoire du système;

•• les lentilles sont représentées dans leur section médiane, qui contient l'axe;

•• les lettres majuscules sont utilisées pour indiquer les points; les minuscules pour les segments; les lettres grecques minuscules pour les angles;

•• les lettres avec une apogée (**'**), indiquent les points ou les longueurs du côté image; sans apogée, du côté objet; les longueurs à gauche de la lentille (côté objet) ont un signe négatif;

•• **y** (ou **y'**) indique la distance de l'axe d'un point objet (ou image) extra-axial;

•• **h** (ou **h'**) indiquent la distance du point d'incidence (ou émergence), d'un rayon sur la lentille par rapport à l'axe. Dans une lentille mince, pour le même rayon, on a: h = h**'**.

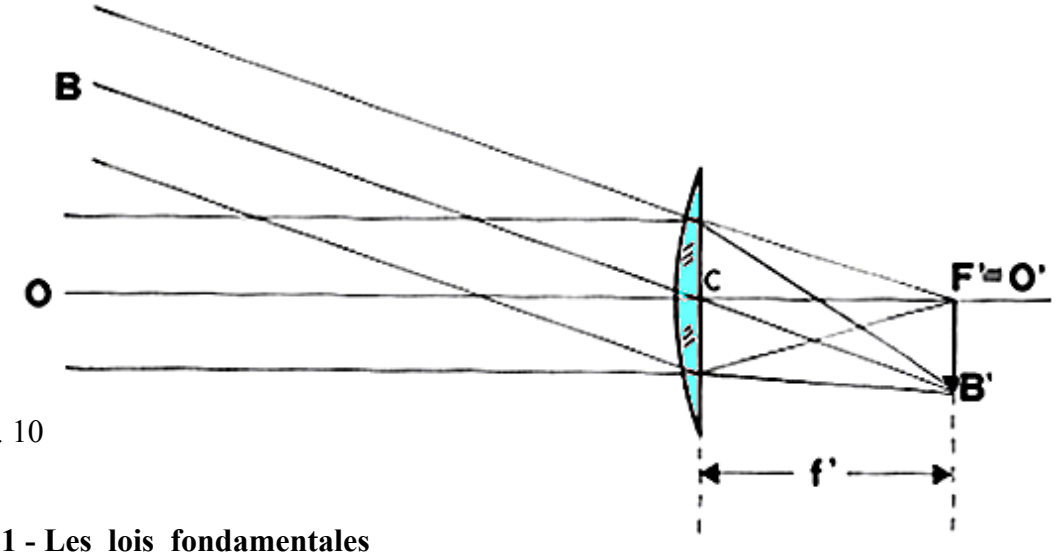


Fig. 10

2.6.1 - Les lois fondamentales

Dans les limites citées de l'optique paraxiale sont valables les principes suivants:

•• l'axe optique traverse la lentille mince dans un point nommé "**centre**" de la lentille (C);

•• un rayon qu'arrive sur une lentille convergente en se propageant parallèlement à l'axe, émerge d'elle en passant toujours pour un point nommé "**foyer image**" (F'). La distance entre le foyer et le centre (C-F') est appelé "**longueur focale**" ("**image**") ou "distance focale" ou, simplement, "la focale", et elle est indiquée avec **f'**. Le foyer F' est dit aussi "foyer postérieur" ou "second foyer" (fig. 10)[22];

•• à chaque point objet sur l'axe (O) correspond un point image (O') toujours sur l'axe (fig. 11); O et O' se nomment "**points conjugués**";

•• à chaque point objet hors de l'axe (B) correspond un point image, lui aussi "conjugué", hors de l'axe (B');

•• la distance objet-lentille (O – C), qui est appelée "distance **conjuguée-objet**" et est indiquée avec **a**, détermine la distance lentille-image (C – O') qui est appelée "**conjuguée-image**" et est indiquée avec **a'**. Cette dépendance de **a'** de **a** justifie le terme de grandeurs "conjuguées" (fig. 11);

[22] Dans une lentille sphérique on peut exprimer sa "puissance" P (l'unité de mesure est le "**dioptrie**" (D)) comme l'inverse de sa focale, exprimé en mètres: P = 1/f. Voir aussi la formule (71) dans le § 20.10.

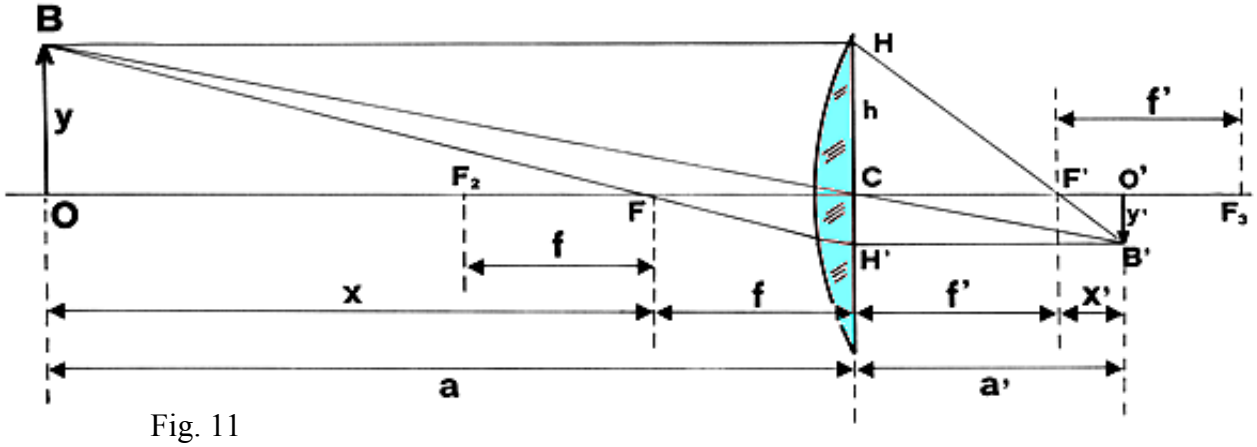


Fig. 11

•• la distance entre image et foyer image (F' – O') est indiquée avec **x'** et, par rapport à un terme utilisé en photographie, elle est appelé "**tirage**"[23]. On définit aussi un **x** côté objet (OF = a – f) (fig. 11);

•• de tout ce qu'a été dit résulte:

$$a' = f' + x' \quad (8)$$

et: $$a = f + x \quad (9)$$

•• un rayon qui traverse la lentille en passant par le centre **C** continue tout droit, ne pas dévié;

•• un rayon qui arrive sur la lentille en passant par un point spécial qui se trouve sur l'axe, nommé **foyer objet** (F), émerge de la lentille parallèle à l'axe. C'est l'équivalent du foyer image sur défini (F'). Dans la fig. 11, le rayon BH', en passant par F, émerge comme H'B', qui est parallèle à l'axe.

On peut montrer que, si la lentille est limité des deux côtés par le même milieu transparent, la distance FC = **f** est égal à CF' = **f'**. Ainsi **f**, la focale côté objet est égale à celle côté image **f'**. **F** est appelé aussi "**premier foyer**" ou "foyer antérieur". Voir encore la fig. 11;

•• l'espace entre lentille et objet s'appelle "espace-objet"; celui entre lentille et image, "espace image".

2.6.2 - Cas particuliers - L'agrandissement

En base à tout ce qu'a été dit, nous pouvons identifier quelques cas spéciaux de fonctionnement des lentilles convergents minces, particulièrement utiles pour la compréhension de la microscopie.

2.6.2.1 - Agrandissement = 0 - Ref. fig. 10

L'objet, étendu, se trouve à une distance infinie.

C'est le cas de l'objectif d'une longue-vue, d'une jumelle, d'un appareil photo, avec objet éloigné; c'est aussi le cas de la "lentille de tube" de certains microscopes (voir le § 3.2.3).

Le point axial de l'objet (O, hors illustration), se trouvant à une distance infinie, envoie à la lentille un faisceau parallèle qui converge en O', lequel coïncide avec F'. Un point extra-axial (B) produit une image d'une manière analogue en B'. Le lieu géométrique de tous les points possibles analogues à B' est un plan perpendiculaire à l'axe qui coupe l'axe en F', dit «**plan image**», qui dans ce cas coïncide avec le "**plan focal postérieur**" (dans les lentilles réelles le "plan" focal n'est jamais un plan). B' et F' sont situés dans tel plan.

[23] En réalité, "tirage" indiquerait la distance totale entre objectif et image réelle; les grandeurs **x** et **x'** devraient donc être appelées, avec une expression moins abrégée , "**distance extrafocale** côté objet" ou "côté image".

D'un objet à distance infinie (en pratique, beaucoup plus grande par rapport à la focale **f'**) la lentille produit dans son plan focale **une image renversée**; telle image est distante de la lentille d'une longueur égale à **f'**.

2.6.2.2 - Agrandissement < 1 - Réf. fig. 11

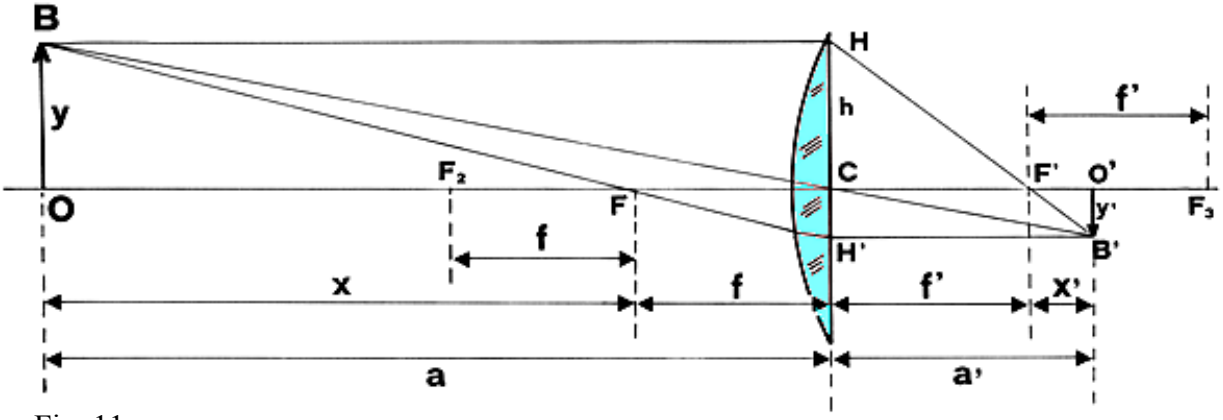


Fig. 11

Dans la fig. 11 sont indiqué les symboles, les points et les longueurs que nous avons définies.

Elle peut être vu comme un cas général auquel les autres peuvent se reconduire; le cas de la fig. 10, par ex., retombe dans la fig. 11 en mettant $a = x = \infty$ et, dans ce cas, $x' = 0$, $a' = f'$.

Dans le cas de la fig. 11, par contre, l'objet est éloigné de la lentille d'une longueur finie: $a > 2f$; l'image se forme à une distance comprise entre f' et 2f'; elle est **renversé et rapetissée** par rapport à l'objet. Le plan image ne coïncide plus avec le plan focal postérieur.

Les lois générales qui établissent les rapports entre les conjuguées, la focale et le tirage sont[24]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \qquad (10)$$

$$f^2 = x\,x' \quad \text{(formule de Newton)} \qquad (11)$$

On peut tirer la construction de l'image graphiquement en exploitant les principes exposés dans le § 2.6.1: le rayon BC, en passant par le centre C, continue non dévié jusqu'à B'; le rayon BH, parallèle à l'axe (y = h), émerge de la lentille en passant par le foyer image F'; le rayon BH', en passant par le premier foyer (F), émerge de la lentille et continue parallèlement à l'axe (CH' = y'). Les trois rayons se rencontrent en B'.

La fig. 11 illustre les conditions de travail d'un objectif photographique ou pour jumelle avec un objet à distance finie, et d'un condensateur de microscope (voir le § 8.3); même un oculaire fonctionne ainsi, si pour son objet on considère la pupille de l'objectif.

Toujours dans la fig. 11, il est indiqué un seul point extra-axial (B ou B'), comme nous ferons dans beaucoup d'autres figures; mais ça seulement à fin de simplicité. En effet, n'importe quel objet pas ponctuel peut être considéré comme formé par infinis points comme B. Normalement l'objet et l'image sont centrés par rapport à l'axe, et dans les schémas on les considère plans et perpendiculaires à l'axe.

De la fig. 11 on peut éclairer aussi la notion d'agrandissement, applicable à tous les autres cas: en rappelant les conditions qu'on a définies plus haut, il résulte que BO et B'O' sont perpendiculaires à l'axe; à ce moment là il résulte définissable un "a**grandissement linéaire transversal**", indiqué avec M, égal à:

$$M = y'/y = B'O'/BO \qquad (12)$$

[24] Dans bien de textes, les symboles **a** et **a'** sont indiqueés avec **p** et **q**.

Tel agrandissement est dit "**linéaire**" parce que c'est un rapport de segments, pas de sur faces ou de volumes; il est dit "**transversal**" parce que les segments considérés se trouvent dans le plan objet et image qui sont perpendiculaires à l'axe. On peut le définir aussi comme le rapport entre la longueur d'un segment dans le plan-image et la longueur du segment correspondant dans le plan-objet.

Étant donné les triangles semblables OBC et O'B'C (fig. 11) on peut montrer que:

$$M = y'/y = a'/a \qquad (13)$$

L'agrandissement M est donc égal au rapport des "conjuguées" **a** et **a'**.

Étant donné les triangles semblables HCF' et B'O'F' (angles droits en C et O'), on peut montrer que:

$$M = y'/y = y'/h = x'/f' = x'/f \qquad (14)$$

(dans l'hypothèse que la lentille soit limité des deux côtés par le même milieu, on a déjà expliqué que **f = f'** et naturellement: y = h = HC).

À partir des triangles H'CF et BOF (semblables, et droits en C et O), on montre de la même façon:

$$M = f / x \qquad (15)$$

Dans le cas de la fig. 11 il est clair que **a' < a** et **M < 1** : image **rapetissée**. Dans le cas de la fig. 10 il résultait: **a = x =** ∞ ainsi que **x' = 0** et **a' = f';** donc l'agrandissement était:

$$\mathbf{M = a'/a = f'/\infty = 0};\ \text{ou:}\ \mathbf{M = x'/f = 0/f = 0};\ \text{ou:}\ \mathbf{M = f/x = f/\infty = 0} \qquad (16)$$

Cela ne signifie pas que l'image a des dimensions nulles (un objet à distance pratiquement infinie comme le ciel étoilé a toujours aussi une étendue transversale) mais que l'image est infiniment plus petite que l'objet.

2.6.2.3 - Agrandissement = 1 - Réf. fig. 12

Même la fig. 12 est un cas spécial du cas général de la fig. 11:

a = OC = 2 f = a' = CO' = 2 f'; de plus: x = x' = f M = a'/a = x'/f = f/x = 1.

L'agrandissement est **unitaire**; les deux conjuguées sont égales et égales au double de la focale. La figure est symétrique par rapport au plan de la lentille (supposée mince). L'image a les mêmes dimensions de l'objet et elle est évidemment renversée.

On remarque que, dans ce cas, la distance objet-image totale:

(OO' = a + a' = x + f + f' + x' = 4f) est la moindre possible.

Celui-ci est le cas de certains "duplicateurs pour diapositives" et de certaines lentilles de transport ou "**lentilles-relais**" utilisées dans les longues-vues ou dans certains microscopes (voir le § 25.2).

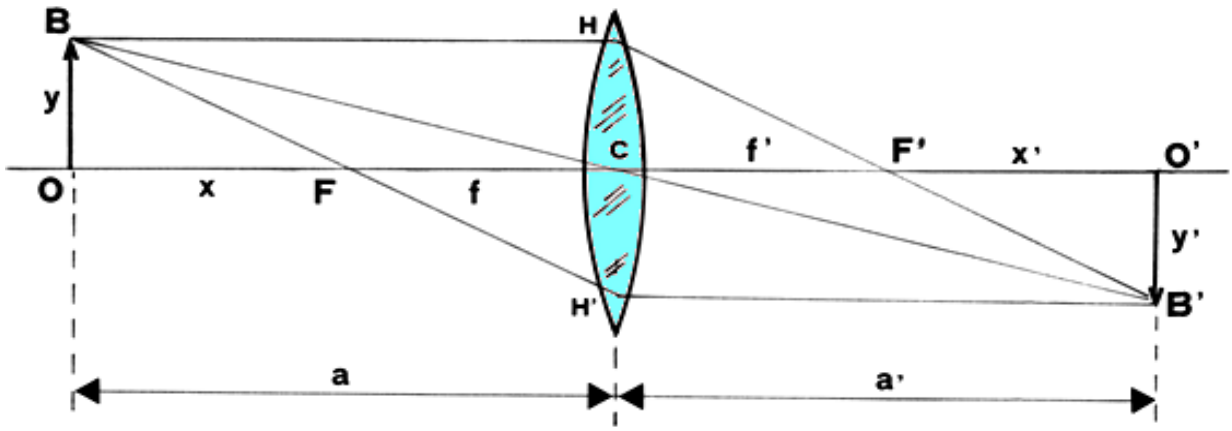


Fig. 12

2.6.2.4 - Agrandissement > 1 - Ref. fig. 13

On a un autre cas spécial quand l'objet se trouve par rapport à la lentille à une distance plus petite de **2 f**, cependant plus grande de **f** (fig. 13): f < a < 2f.

Ce cas est renversé par rapport à celui de la fig. 11; a' > a; x < f; x' > f; M = a'/a > 1.

Sont encore valable la formule (14) (M = x'/f) et la (15) (M = f/x).

L'image est distante de la lentille plus de **2 f** et elle est agrandie par rapport à l'objet, toujours renversée[25].

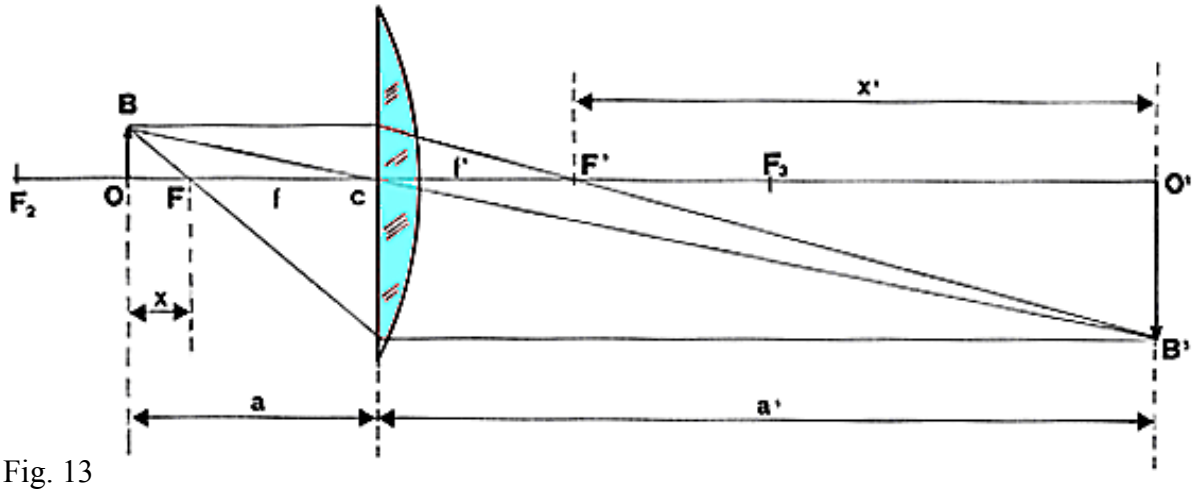


Fig. 13

Ce cas est très important étant donné que c'est le cas d'un objectif macro-photographique, d'un objectif de projecteur et d'un objectif de microscope classique avec "**conjuguée finie**". Cette dernière locution fait allusion au fait que la plus grande partie des objectifs pour microscope construit avant le 1960, et peut-être encore aujourd'hui, sont calculés pour opérer selon le schéma de la fig. 13 dans laquelle la "conjuguée" (image) est de longueur finie, c'est-à-dire qu'elle n'est pas infinie (voir le cas suivant), soit-il en étant supérieure à **2 f**.

Aussi le collecteur de la micro-lampe (voir le § 22.2) fonctionne selon ce schéma.

Nous avons jusqu'à présent discuté toujours de cas dans lesquels, de chaque point-objet, émerge un faisceau de rayons divergents, ou à la limite parallèles; les distances dans le système étaient telles que ce faisceau, au-delà de la lentille, se dirige dans un point-image. Par suite, en mettant un écran dans le plan-image, on pourrait former une image de l'objet, au sens que, à chaque point-objet, correspond sur l'écran un point-image.

Ce type d'image, qui est formée par la convergence des rayons et qu'on peut recueillir sur un

[25] En général (image réelle renversée, lentille mince), la distance total objet-image est donné par: f(2 + M + [1/M]).

écran, s'appelle "**image réelle**". En absence d'écran, au-delà de l'image, les rayons qui se dirigent sur elle continuent en divergeant de chaque point-image comme si ce fût une nouvelle source, c'est-à-dire un nouvel objet. L'image réelle peut être traitée par suite, avec limitations opportunes, comme un objet, et être observée de l'œil nu ou d'un système optique qui suit (comme un oculaire ou une loupe).

Dans tous les cas considérés d'image réelle, l'image peut être plus petite ou plus grande que l'objet, mais toujours renversée.

On a vu aussi que, à mesure que l'objet se rapproche de la lentille, l'image s'en éloigne et devient plus grande.

En rapprochant encore l'objet, on a des nouvelles situations comme celle décrite ici après.

2.6.2.5 - Agrandissement = ∞ - Ref. fig. 14

Dans la fig. 14 on a le cas inverse de celui de la fig. 10: l'objet s'est rapproché de la lentille jusqu'à une distance egal à **f**; O coïncide avec le premier foyer F;

$$\mathbf{a = f\ ;\ x = 0}$$

Pour des raisons de symétrie, il devra être:

$$\mathbf{a' = x'} = \infty \quad \text{et} \quad M = a'/a = \infty/a = \infty$$

L'image se forme à une distance infinie. L'agrandissement est infini, mais pas au sens que l'image a des dimensions infinies, plutôt au sens qu'elle est "infiniment" plus grande que l'objet.

Celui-ci est le fonctionnement de certains illuminateurs et des objectifs de microscope "**à** (deuxième) **conjuguée infinie**" ou "**à l'infini**", ainsi nommés à cause de la valeur de leur conjuguée-image. Nous verrons comme ils sont utilisés dans le schéma général d'un microscope.

Dans ce cas, les faisceaux des rayons émergents de la lentille et correspondants à chaque point objet particulier sont des faisceaux parallèles; ceci signifie qu'ils se dirigent vers un point image à l'infini. L'image est renversée donc, infiniment agrandie, à l'infini. L'onde émergente de la lentille est **télécentrique**, au sens que son centre de courbure se trouve à une distance infinie et l'onde est plane.

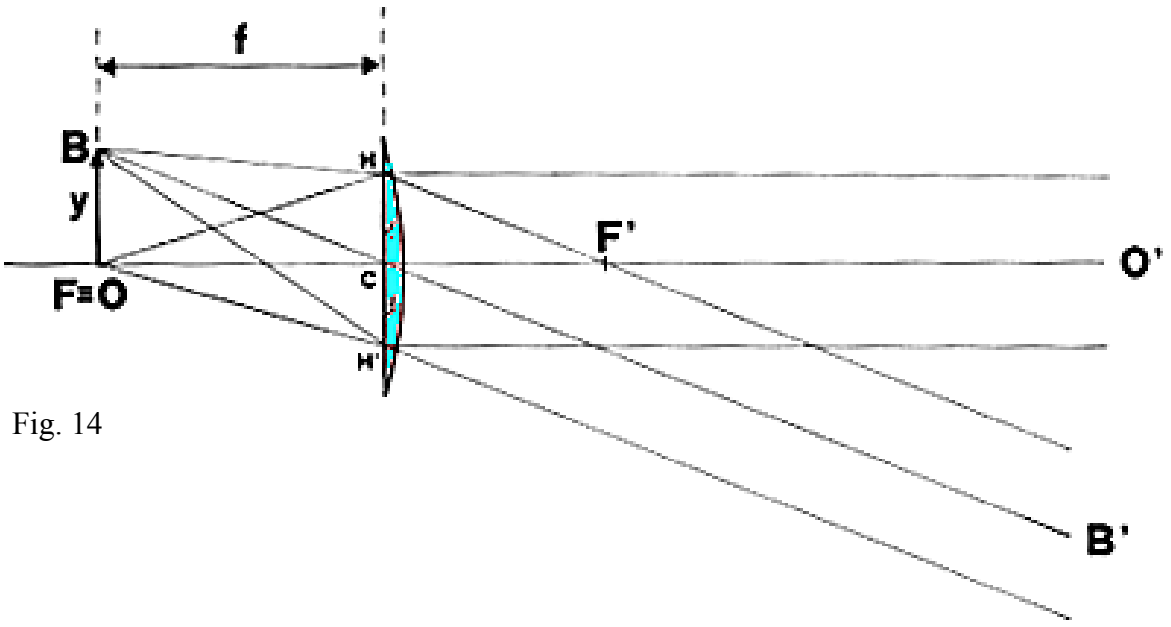


Fig. 14

2.7 – Les IMAGES VIRTUELLES

Nous avons intitulé le chapitre précédent: "IMAGES RÉELLES". En effet, en tous les cas examinés jusqu'à présent, illustrés dans les figures de 10 à 13, les rayons émergents de la lentille convergent vers une "**image réelle**", concrète, qu'on peut recueillir sur un écran. Mais déjà avec la fig. 9 on a vu que les rayons émergents d'une lentille peuvent diverger; dans un tel cas cette lentille ne forme pas une image réelle; seulement les prolongements des rayons tracés à reculons, peuvent converger vers une image fictive ou "virtuelle."

Ainsi, en continuant avec l'examen des cas spéciaux dans les lentilles convergentes, qui ont toujours produit jusqu'à présent des images réelles, nous approchons encore l'objet à une distance (de la lentille convergente mince, toujours à l'intérieur de l'optique paraxial) plus petite de la focale.

Dans la fig. 15, on a: **a < f; x < 0**. En mettant un écran à droite de la lentille on n'observera jamais aucune image se former sur cet écran, étant donné que les rayons provenant de chaque point objet divergent encore au-delà de la lentille. On n'a pas d'image réelle.

Essayons cependant de tracer vers la gauche les prolongements des rayons émergents de la lentille et correspondants à chaque point objet particulier (hachurés dans la fig. 15). Ils se dirigent vers les points "virtuels" correspondants, un point image pour chaque point objet.

À O correspond O', à B correspond B', etc. On peut construire par suite (même graphiquement) en appliquant les principes généraux déjà utilisés, une "**image virtuelle**" qui n'existe pas physiquement, ni se projette sur un écran, mais qui existe géométriquement.

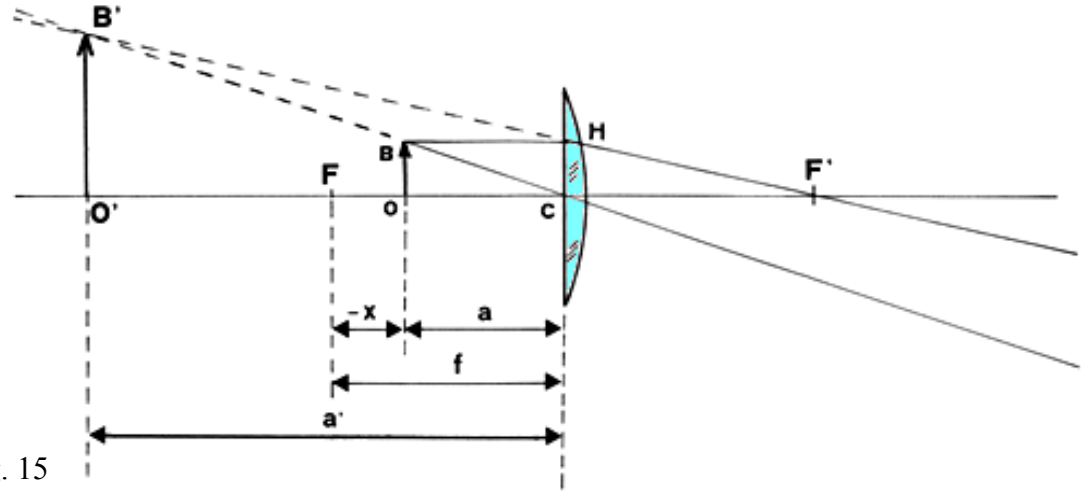


Fig. 15

Il y a cependant un avantage: un œil ou une lentille convergente mis à droite de la lentille de la fig. 15, tourné vers la lentille même, reçoit des rayons divergents ***comme si*** ils ne vinssent pas des points objet (O, B, etc.) mais des points correspondants de l'image virtuelle (O' et B'). Les rayons émergents de la lentille sont interprétés comme provenant de l'image O'B'. Nous ne "voyons" donc pas l'objet mais son image virtuelle, agrandie (pas renversée) comme on dit dans le § 4.3.

Le principe de la construction d'une image virtuelle obtenue en traçant à reculons les prolongements des rayons, peut s'appliquer aussi au cas des rayons parallèles de la fig. 14: au lieu de dire que les rayons se rencontrent vers la droite dans une image réelle à l'infini, on peut dire que leurs prolongements se rencontrent vers la gauche dans une image virtuelle, toujours à l'infini.

Pendant que les images réelles des cas précédents sont toujours renversées, l'image virtuelle est droite: dans la fig. 15, le segment-objet OB est dirigé come le correspondant segment-image O'B'.

Même les lentilles divergentes (voir aussi la fig. 9, § 2.5) peuvent produire des images virtuelles droites, et celui-ci est le principe de l'oculaire divergent de G. Galilei.

Eh bien, sur la base de ce qu'un a dit, à la place de l'objet OB (fig. 14 ou 15) on peut mettre

une image réelle (produite par ex. par un système convergent comme celui de la fig. 11). Cela arrive dans les télescopes, longues-vues et jumelles dans lesquels un objectif qui travaille comme dans la fig. 11 produit une image réelle qui tombe exactement ou un peu au-delà du premier foyer d'un oculaire convergent qui opère comme dans la fig. 14 ou 15. Quelque chose de semblable arrive dans un microscope (voir le § 4.4).

2.8 – Les LENTILLES ÉPAISSES et les PLANS PRINCIPAUX

Jusqu'à présent on a décrit des systèmes optiques idéaux, avec les caractéristiques conventionnelles décrites dans le § 2.5.1, en particulier des «lentilles infiniment minces».

Les différentes longueurs (conjuguées, focale, tirage) ont été mesurées à partir du centre C de la lentille (voir le § 2.6.1).

Mais les lentilles réelles ont une épaisseur pas négligeable et elles sont constituées souvent par différentes lentilles collées entre elles ou espacées. Un rayon, parallèle à l'axe, incident en A (fig. 16) subit une série de déviations, en B, C et D, en traversant autant de surfaces air-verre (ou verre-verre, si se trouvent en contact des lentilles de différent index) et à la fin il se dirige vers le foyer-image (F').

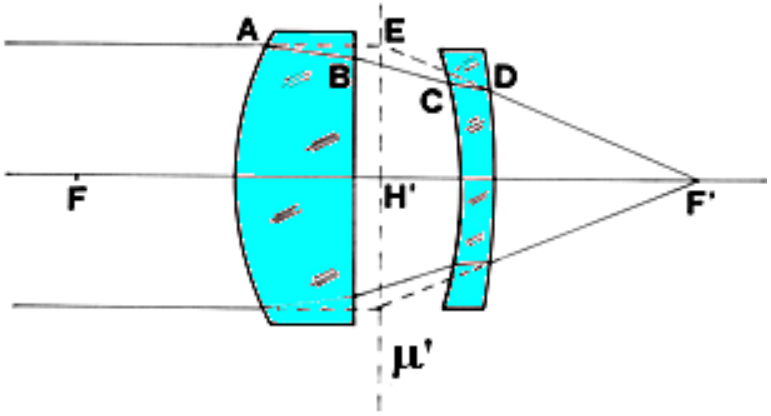


Fig. 16

Imaginons de prolonger en avant le rayon incident (en A) jusqu'au point E, et à reculons le rayon émergent (de D, jusqu'à E). Ces deux rayons virtuels (hachurés dans la figure 16) se rencontrent dans un point (E). Avec toutes les infinies couples possibles de rayons incident-émergent, on construit des infinis points analogues à **E** qui reposent sur une surface (symétrique autour de l'axe) qui n'est pas généralement plane, appelée cependant "**plan principale** image" et indiquée aves la lettre **m** minuscule grecque ou "mu" (**μ'**).

Si on considère des rayons émergents du foyer-objet (F), ils devront émerger de la lentille parallèles entre eux et à l'axe et pour eux on pourra construire de la même façon un "plan principal objet" (μ) (voir plus loin, fig. 24). Les deux plans principaux coupent l'axe en deux-points nommés "**points principaux**" (objet et image), indiqués avec H et H'.

Eh bien, toutes les longueurs (conjuguées, etc.) doivent être mesurées à partir des points principaux. En effet, du point de vue de la formation de l'image, tout se déroule comme si les lentilles réelles n'existassent pas, et toute la "puissance" de la lentille fût concentrée dans le plan principal. Ce plan devient ainsi l'équivalent d'une lentille mince qui déroule la même fonction de la lentille épaisse réelle, au moins d'un point de vue géométrique.

Alors, pour définir les propriétés de la lentille épaisse, il est suffisant de définir la position des points principaux (et avec ceci de l'axe) et la position des foyers, qui indiquent la puissance.

Les plans principaux peuvent être internes ou externes à la lentille épaisse réelle et leur position peut se déduire des données du projet ou de mesures très complexes («plateforme nodale».

Heureusement, en microscopie les grandeurs essentielles peuvent normalement se calculer sans connaître la position des plans principaux.

3 – Le PRINCIPE de l'OBJECTIF du MICROSCOPE OPTIQUE

3.1 - OBJECTIFS "À CONJUGUÉE FINIE"

On prenne un schéma comme celui de la fig. 13. Nous supposons encore que l'objet soit plan et infiniment mince, perpendiculaire à l'axe; nous sommes encore à l'intérieur de l'approximation de Gauss, en négligeant donc l'épaisseur de la lentille.

Le long d'un axe commun on a, centrés, l'objet OB (comme on a déjà expliqué, la clarté impose de schématiser dans les illustrations seulement la moitié de l'objet et de l'image; mais il n'est pas difficile d'imaginer un objet ou une image symétrique par rapport à l'axe), la lentille sphérique convergente, l'image réelle, renversée et agrandie O'B'. Les distances sont celles de la fig. 13: **f < a** < 2f; **a' > 2 f**. Sont encore valables le formules de (13) à (15) du § 2.6.2.2:

$$M = y'/y = a'/a = x'/f = f/x$$

Ça représente le fonctionnement normal de la première lentille convergente du microscope composé qui, comme déjà précisé, s'appelle "**objectif**".

L'image réelle O'B' se trouve, pour ce qu'on a dit au § 2.7, devant une deuxième lentille convergente (en pratique, l'oculaire), et précisément à une distance de cette lentille égal ou à peine inférieure à sa focale (voir la fig. 20 dans le § 4.4).

La focale de l'objectif est indiquée comme $\mathbf{f_{ob}}$; la deuxième lentille convergente s'appelle "**oculaire**" et sa focale est indiquée avec $\mathbf{f_{oc}}$ (point focal image $\mathbf{F'_{ok}}$).

Tout ça est le schéma de base du microscope optique composé.

L'image A'B' (fig. 20), étant donné qu'elle se trouve entre objectif et oculaire, s'appelle "**image intermédiaire**". Telle image est renversée par rapport à l'objet AB. L'image virtuelle fournie par l'oculaire (A"B") est droite par rapport à son propre objet (qui est l'image intermédiaire A'B'), donc renversé par rapport à l'objet AB.

3.2 – OBJECTIFS "À CONJUGUÉE INFINIE"

Le schéma décrit plus haut est dit "à **conjuguée finie**" en faisant référence à la conjuguée image **a'** (dans la fig.13: **a'** = CO'). En pratique, dans le microscope, **a'** change de 120 à 250 mm; elle dépend de la position du point principale image de l'objectif (H' dans la fig. 16), qui est différente pour chaque objectif, et de la position de l'image intermédiaire, qui devrait rester par contre constante pour tous les objectifs et les oculaires de la même série, au moins dans la production récente.

La valeur de **a'** n'a pas beaucoup de relations avec la "**longueur optique**" ou celle "**mécanique**" du tube (voir le § 10).

Le schéma d'un objectif à conjuguée finie porte donc à former une image intermédiaire réelle, renversée et agrandie par rapport à l'objet, à une distance finie de l'objectif, sans besoin d'autres parties optiques.

C'est le schéma le plus ancien, le plus simple, et il ne souffre pas de limitations sur le plan théorique. Cependant il a un inconvénient: en beaucoup de cas, il est nécessaire d'interposer entre objectif et oculaire des lames de verre limitées par des faces planes et parallèles (filtres, prismes, etc.). Ces parties sont dépourvues de puissance optique, justement parce que les faces sont planes, et par suite ne modifient pas l'agrandissement, mais elles déplacent l'image intermédiaire, d'une longueur égale à environ 1/3 de l'épaisseur **d** de la lame; plus exactement, si A est le déplacement de l'image en direction de l'axe, nommé aussi "**avancement**", on a:

$$A = [(n -1) / n] \cdot d \qquad (17)$$

dans laquelle **n** est l'index de la lame. En particulier, l'image intermédiaire se déplace en direction de l'oculaire.

Le phénomène de l'avancement de l'image s'explique simplement sur la base du phénomène de la réfraction dans un faisceau convergent. Il produit un déplacement de l'image mais pas une variation de ses dimensions.

Eh bien, n'étant pas pratique de compenser le déplacement de l'image intermédiaire avec un mouvement de l'oculaire, en pratique on fait changer la distance objet-objectif et la position de l'image intermédiaire au moyen du mouvement de "mise au point" (voir le § 27.2.2). Cette manœuvre porte cependant quelques inconvénients:

-- on perd la "parfocalité" des objectifs, c'est-a-dire qu'on perd la mise au point quand on change d'objectif (voir le § 19.1.2);

-- les objectifs travaillent avec des conjuguées altérées et ceci, surtout dans le cas des objectifs forts, provoque l'apparition d'aberrations (voir le § 13.2.3);

-- l'agrandissement vient altéré, toujours à cause de l'altération des conjuguées.

Pour éviter la retouche de la mise au point avec les effets nuisibles relatifs, chaque fois qu'on insère ou on exclut un filtre ou un prisme, on a donc cherché depuis longtemps une autre solution.

3.2.1 - La lentille convergente

Un premier remède consiste à insérer avec le filtre ou le prisme un opportun système optique convergent qui compense le déplacement de l'image intermédiaire. Cette solution est rarement suivie en pratique étant donné qu'elle réduit l'agrandissement.

3.2.2 - Le "Telan" (voir, dans ce site, section "Microscopie optique", l'art. n° 45)

On peut aussi insérer entre objectif et oculaire un système "Telan". Voilà le principe: le déplacement de l'image intermédiaire provoquée par le prisme dépend du fait que le faisceau qui concourt en chaque point de l'image intermédiaire est convergent (fig. 13). Si le faisceau était parallèle, il y n'aurait pas de déplacement (les rayons frapperaient tous normalement à la lame et ils ne seraient pas déviés, au moins pour les points près de l'axe).

Pour obtenir un faisceau parallèle (pour chaque point image) en quelque région entre objectif et oculaire, on utilise le système TELAN (fig. 17).

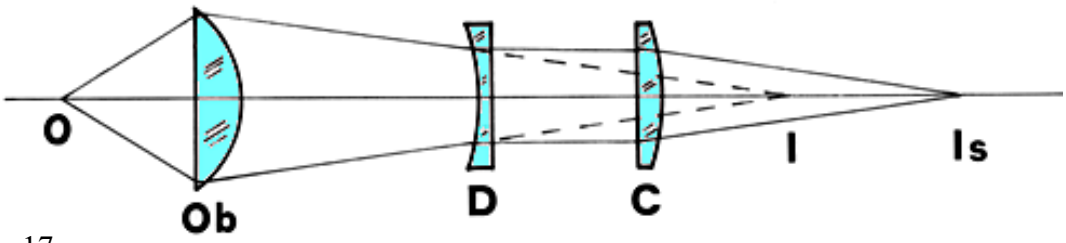


Fig. 17

L'objectif Ob, en conditions normales, produirait une image intermédiaire en position **I**. Au dessus de l'objectif on pose une lentille divergente **D** telle que le faisceau convergent devienne parallèle. À une distance opportune au dessus de D on pose une lentille convergente **C** qui rend le faisceau de nouveau convergent de façon à former une nouvelle image intermédiaire déplacée en **Is**.

On fait de manière que les traits **Ob-D** et **C-Is** forment globalement une longueur égal à la

conjuguée-image originale de l'objectif (Ob-I). De cette manière l'image en **Is** est identique à celle en **I**, elle est seulement déplacée du trait I-Is = D-C. Dans l'espace D - C on peut mettre ou extraire n'importe quel lame à surfaces plan-parallèles sans que l'image intermédiaire change de position ou de dimensions en vertu du fait qu'entre les lentilles D et C le faisceau produit pour chaque point objet est parallèle (télécentrique).

Le Telan est utilisé aussi pour interposer entre objectif et oculaire quelque système intermédiaire (changeurs d'agrandissement, lentilles de Bertrand-Amici, etc., voir le § 25.2); les changeurs d'agrandissement ont en général des conjuguées infinies des deux côtés (ils sont "afocaux", comme les longues-vues (voir, dans ce site, l'article n° 45, en italien)).

3.2.3 – Objectifs à conjuguée infinie

Pour éviter les lentilles additionnelles du Telan, il y a une troisième méthode, qui est justement celle des "**objectifs à conjuguée infinie**" déjà utilisés à la fin du XIX sec. dans les instruments qui font normalement usage de prismes au dessus de l'objectif (microscopes polarisateurs et métallographiques), dans la suite de plus en plus diffus à partir de 1930 à l'œuvre des constructeurs Reichert (Vienne), Leitz Wetzlar et Zeiss (Jena).

Dans la fig.18 on voit, le long de l'axe, l'objet **Og** mis dans le premier foyer de l'objectif **Ob**. Chaque point de l'objet (le point indiqué ici est seulement celui sur l'axe) produit après Ob un faisceau parallèle. À ce moment on aurait une image intermédiaire à l'infini (voir la fig. 14 dans le § 2.6.2.5) et par suite inutilisable. Pour avoir une image intermédiaire réelle à la distance utile il suffit de mettre sur l'objectif une lentille convergente LT, dite "**lentille de tube**". Étant donné que le faisceau incident sur LT est parallèle, il se dirige dans le second foyer de LT (ii); ici se forme l'image intermédiaire et ici doit se trouver le premier foyer de l'oculaire. Dans l'espace entre objectif et LT on a un faisceau parallèle pour chaque point objet. La distance LT - image intermédiaire est égale à la focale de LT, indiquée avec $\mathbf{f_t}$, et elle est variable, selon le constructeur, de 250 mm à 160 mm, avec plusieurs exceptions[26].

La lentille de tube est présente maintenant dans la majorité des instruments de haut niveau construits dans les derniers 50 ans et dans les modèles stéréoscopiques du type CMO (§ 29.7).

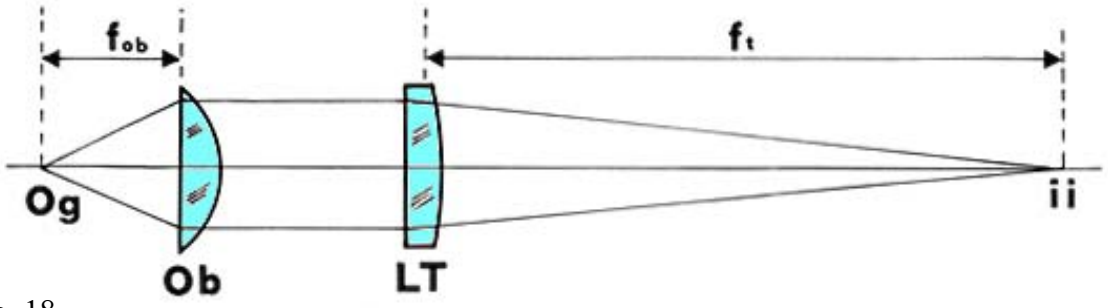


Fig. 18

Au point de vue de la structure, la différence entre les objectifs classiques "à conjuguée finie" et ceux "à l'infini" est légère: dans le calcul du système des lentilles on doit tenir évidemment compte des différentes distances de l'objet et de l'image afin d'optimiser les performances du système.

De plus, si on compare l'agrandissement d'un objectif à conjuguée finie (formule 14, § 2.6.2.2: M = x'/f) avec celui d'un objectif à conjuguée infinie (voir ici dessous la (18): M = f_t/f_{ob}), en tenant compte que, dans la (14), **f** indique la focale de l'objectif $\mathbf{f_{ob}}$, on en déduit que la focale de tube $\mathbf{f_t}$ est numériquement égale à **x'** (supposant que l'agrandissement soit égal). Mais **x'**, dans le cas des objectifs à conjuguée finie, est souvent de l'ordre de 160 mm (cela dépend de la structure de l'objectif), pendant que la $\mathbf{f_t}$ est variable au moins entre 180 et 250 mm. Il en résulte

[26] On trouve la valeur de 180 mm (Olympus), 200 mm (Nikon, Leica), 165 mm (Zeiss), etc.

que, à pareil agrandissement, un objectif à conjuguée infinie a une focale supérieure à celle du correspondant objectif à conjuguée finie. Si la focale est plus grande, à parité d'ouverture, sera plus grand aussi le diamètre des lentilles et par suite l'encombrement général de l'objectif.

À ce moment là, l'espace entre objectif et lentille de tube devient une espèce de zone franche dans laquelle il est possible d'introduire ou éliminer n'importe quel élément dépourvu de puissance sans changer l'agrandissement ni la focalisation (lames plan-parallèles, filtres, prismes, systèmes galiléens afocaux avec fonction de changeur d'agrandissement, etc.); de cette "zone franche" on peut changer la longueur dans des amples limites; la limite supérieure peut être donnée par quelque vignetage (§ 6.1) et quelque aberration.

La structure à seconde conjuguée infinie facilite l'interchangeabilité des accessoires et la construction d'instruments à structure modulaire. C'est une commodité pour le constructeur, plus que pour l'utilisateur.

Pour calculer l'agrandissement linéaire d'un objectif à conjuguée infinie, on peut faire cette considération approximative: l'image intermédiaire est formée par le complexe de l'objectif + lentille de tube (fig. 18); la première conjuguée (**a**), de ce complexe est la focale $\mathbf{f_{ob}}$ de l'objectif; la seconde conjuguée (**a'**), est la focale de la lentille de tube ($\mathbf{f_t}$), souvent égale à 250 mm. Par suite, en appliquant la (13), on a:

$$M = a'/a = f_t/f_{ob} \tag{18}$$

Comme nous verrons dans le § 10 pour les objectifs a conjuguée finie (voir la fig. 20), la distance entre le foyer supérieur de l'objectif ($\mathbf{F'_{ob}}$) et le foyer inférieur de l'oculaire ($\mathbf{F_{ok}}$) est égale à la distance entre $\mathbf{F'_{ob}}$ et l'image intermédiaire (cette dernière devrait se trouver toujours au niveau de $\mathbf{F_{ok}}$)**.** On indique cette distance comme "**longueur optique du microscope**" (**Δ**). Mais alors **Δ** est égale à **x'** (fig. 13) et, pour ce qu'on a dit plus haut, elle est égale à $\mathbf{f_t}$: $\Delta = x' = ft$. Ainsi la formule (14): $\mathbf{M = x'/f}$ équivaut à la (18): $\mathbf{M = f_t / f_{ob}}$, et donc:

$$M = f_t / f_{ob} = \Delta / f \tag{19}$$

Quand $\mathbf{f_t = \Delta}$ est égale à 250 mm, on a $\mathbf{M = 250 / f}$, et celle-ci est l'expression du grossissement d'un oculaire (§ 4.3) et donc elle doit être suivie du symbole "×". En général, en effet, les constructeurs indiquent l'agrandissement des objectifs à conjuguée infinie avec un numéro suivi par "×" (et seulement dans ce cas).

Il faut remarquer aussi qu'un objectif à conjuguée infinie produit l'image intermédiaire conjointement à la lentille de tube. On peut considérer par suite tel système double comme un objectif normal à conjuguée finie: il suffit de se rappeler que nous avons à faire avec un système complexe. La focale de l'objectif à introduire dans les formules comme la (14) ou la (15) est la focale total du système objectif + lentille de tube; telle focale dépend de la distance entre objectif et lentille de tube et telle distance, comme on a vu, peut changer dans des amples limites. Mais comme peut-il un objectif à conjuguée infinie + lentille de tube donner toujours le même agrandissement si sa focale totale n'est pas définie? Cette apparente contradiction se dépasse en pensant que, en changeant la distance entre objectif et lentille de tube, varie aussi la position des points principaux du système et l'hauteur **h** d'incidence des faisceaux produit par l'objectif sur la lentille de tube même. Enfin, en changeant la distance entre les deux parties, change le système total, soit pour sa focale que pour d'autres quantités, et les différents effets s'élident réciproquement de manière que l'agrandissement ne varie pas.

Par scrupule d'être exhaustif, nous rappelons que quelques constructeurs (Zeiss W.) prévoient comme lentille de tube un système simple qui, au-delà de dérouler la fonction à peine décrite, introduit volontairement des petits résidus d'aberrations qui ont comme but de "compenser" les résidus de signe opposé présents dans les objectifs. Ceci facilite globalement le travail des ingénieurs, mais rend incompatibles les objectifs d'un constructeur avec les statifs (contenants une lentille du tube) des autres. Le problème de la compatibilité est toujours présent.

4 – Le PRINCIPE de L'OCULAIRE

4.1 - La LOUPE de GROSSISSEMENT

Dans la fig. 19 est indiqué un objet AE mis à 250 mm de la pupille de l'œil d'un observateur (cette pupille est en F'). L'objet apparaît à l'observateur sous un angle α; la valeur de α dépend des dimensions d'AE et de la distance AF'; on peut dire que:

$$\text{tg } \alpha = AE/AF'$$

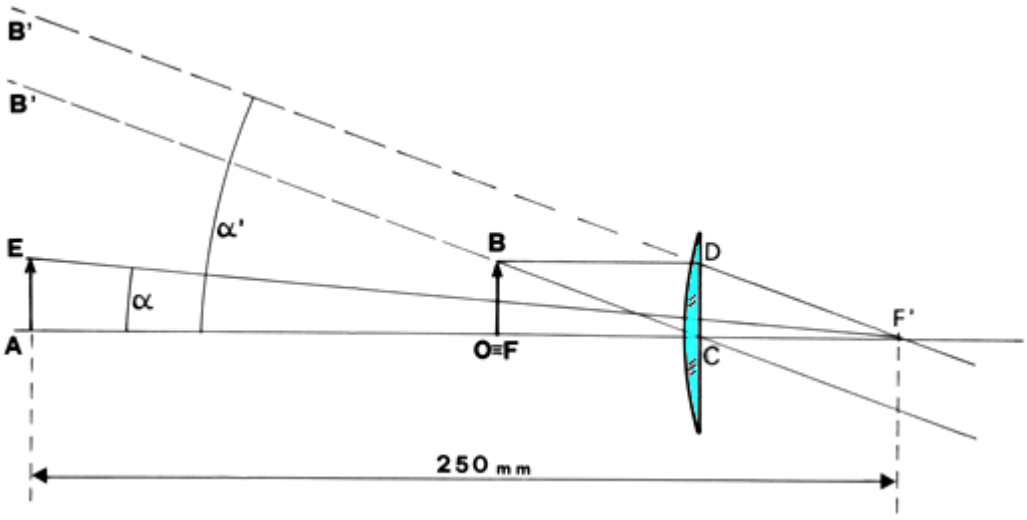


Fig. 19

Normalement, on prend pour AF' la valeur "conventionnelle" de 250 mm pour avoir une référence internationale, en supposant que celle-là soit la distance "moyenne" d'observation d'un œil sain. En réalité, un œil jeune peut avoir un "point prochain" (distance minimal de la vision distincte) de 7 - 8 cm; même moins s'il est myope. Un œil adulte voit s'éloigner le point prochain jusqu'à 1 m et, pour les personnes âgées, même au-delà 2 m, avec l'aggravation de la presbytie. Mais une valeur moyenne doit être considérée afin d'unifier les calculs.

Fixée donc la distance d'observation AF', l'angle "visuel" α sous lequel l'objet AE apparaît à l'œil, dépend seulement des dimensions d'AE.

Maintenant nous supposons de mettre en C une lentille convergente, mince pour simplicité, en manière que son foyer image F' coïncide avec la pupille de l'observateur. Nous mettons alors dans son premier foyer F un objet OB identique à l'AE; O coïncide avec F; OC = CF' = **f** (dans laquelle **f** est la focale de la lentille).

Considérons maintenant le point B de l'objet; il peut envoyer un rayon BC qui traverse la lentille dans son centre C et, pour ce qu'on a dit dans le § 2.6.1, il continue non dévié; un autre rayon, BD peut frapper sur la lentille en restant parallèle à l'axe et, par définition, il émerge en passant par le second foyer F'; si on pense que les triangles rectangles BOC et DCF' sont égaux (BO = DC; OC = CF' = **f**) il résulte que les rayons BC et DF' sont parallèles. D'ailleurs, tous les points, comme O et B, mis dans le plan focale d'une lentille convergente, quand ils envoient des rayons vers la lentille même, ils produisent chacun au-delà de la lentille un faisceau parallèle (voir la fig. 14).

Donc, le point B est vu par l'observateur (mis en F') comme s'il se trouvât à l'infini (B'); à l'œil de l'observateur arrivent en effet les rayons parallèles BC et DF' qui sont interprétés COMME SI ils vinssent d'un point à l'infini, sur le prolongement de BC ou DF'. Nous pouvons dire que, sur

le prolongement des rayons comme BC, on trouve l'image virtuelle droite de B, que nous pouvons indiquer avec B' (à gauche, hors de la figure 19)[27].

Jusqu'à présent nous avons supposé que l'objet (OB) se trouve dans le premier foyer de la lentille convergente, selon le schéma de la fig. 14. Étant donné que l'image virtuelle qui apparaît à l'œil (mis en F') se trouve à l'infini, l'œil peut rester détendu (le muscle ciliaire ne se contracte pas), étant donné que l'œil détendu "met au point" justement les objets à grande distance. Celui-ci est l'usage correct d'une lentille de grossissement.

Mais nous supposons maintenant de nous mettre dans les conditions de la fig. 15 (voir le § 2.7): la conjuguée-objet **a** (OC) est légèrement plus petite de la focale **f**. On a déjà expliqué que, dans ces conditions, se forme une image virtuelle O'B', droite et agrandie, du même côté de l'objet OB. Étant donné que les rayons (ou leurs prolongements) qui se dirigent vers chaque point de l'image ne sont pas parallèles, l'image virtuelle se trouve à distance finie et l'œil qui l'observe doit «**accommoder**», c'est-à-dire contracter le muscle ciliaire, comme on fait en observant un objet rapproché. Dans ces conditions l'observation prolongée produit de la fatigue.

Le passage de la condition de la fig. 14 ou 19 à celle de la fig. 15 est très facile, spécialement si la lentille est forte: ça suffit un petit déplacement de la lentille rapport à l'objet, c'est-à-dire une retouche de la "mise au point." En conséquence de ce petit déplacement de la lentille, l'image virtuelle se déplace de l'infini à une distance très petite et l'œil doit changer son accommodation dans des limites très amples.

4.2 – L'"EFFET du TUBE"

La condition d'observation à travers une lentille de grossissement comme celle schématisée dans la fig. 15 doit donc être considérée erronée étant donné qu'elle impose à l'œil un effort inutile.

Mais c'est souvent l'œil même qui se pose dans cette condition. Voilà pourquoi: la lentille de grossissement, avec sa monture, représente un objet assez petit qu'on approche de l'œil; comme on a déjà mentionné, et comme nous dirons mieux, même l'oculaire du microscope se conduit comme une lentille de grossissement: lui aussi doit être rapproché de l'œil et on le trouve au bout supérieur d'un "**tube**" ou autre structure close. Dans ces conditions, l'observateur qui se rapproche à la lentille ou à l'oculaire se pose inconsciemment dans les conditions de regarder à l'intérieur de la lentille ou du tube comme s'il lorgnât dans une boîte à travers un petit trou dans sa paroi; ces points réels ou virtuels sont très voisins à l'œil et donc l'œil, toujours inconsciemment, «accommode», c'est-à-dire il s'efforce de focaliser sur un point rapproché. Sur le même point l'observateur tendra à mettre l'image finale du microscope en utilisant les boutons de mise au point de l'instrument.

Ce "effet du tube" est absolument irrationnel et seulement un bon autocontrôle et beaucoup de sens critique peuvent l'éviter; malheureusement, avec le passer du temps, l'habitude erronée à accommoder l'œil s'affirme et, quand l'âge porte au surgir de la presbytie, l'observation peut devenir très pénible. Dans ces cas, on sait, on donne toujours la faute à l'instrument, qui a le seul tort d'obéir aux lois de l'optique, au lieu de s'assumer les responsabilités de nos fautes.

Comment méthode pour éviter l'effet du tube, on peut conseiller une forme d'autosuggestion: on regarde dans l'oculaire avec un œil et avec l'autre œil, peut-être à travers un miroir, on garde le panorama en dehors de la fenêtre en tâchant de concentrer l'attention sur celui-là. Cet œil devrait être ainsi forcé à se détendre en traînant l'autre, et dans ces conditions on doit focaliser le microscope.

[27] Le point B', au pont de vue visuel, peut etre consideré à distance infinie; par suite il peut se trouver soit sur la droite CB, soit sur la F'D.

4.3 – Le GROSSISSEMENT VISUEL

Dans les figg. 11, 12 et 13 (voir le § 2.6.2) on a vu qu'une lentille convergente peut donner une image réelle et dans cette image il est possible de définir des segments comme O'B' et calculer le rapport entre ces segments et les correspondants dans l'objet, comme OB.

Le grandissement est alors défini **linéaire transversale** comme rapport de segments (voir les formules (12) et (13)).

Mais, dans le cas d'une image virtuelle (figg. 14, 15 et 19) on a démontré que l'image ne peut pas être recueillie sur un écran et de toute façon, pour une moindre variation de la conjugué-objet, la position de l'image peut changer grandement jusqu'à l'infini; de la même façon changent ses dimensions. Dans ces conditions il n'est pas possible de définir et mesurer la longueur d'un certain segment dans l'image et ainsi il n'a pas de sens parler d'agrandissement linéaire.

Tout de même, dans le schéma de la fig. 19, on a vu que l'objet AE, à la distance "conventionnelle", apparaît sous un "angle visuel" (α); de la même façon, l'image virtuelle AB' (hors de la figure, à gauche) apparaît sous un angle plus grand (α'). On peut alors définir un "**grossissement visuel**"[28] (**V**) (à ne pas confondre avec le grossissement "angulaire" qui s'applique à d'autres situations) donné par:

$$V = \alpha' / \alpha \qquad (20)$$

c'est-à-dire par le rapport entre les angles sous lesquels l'observateur voit un certain segment dans l'image virtuelle et le segment correspondant dans l'objet.

L'agrandissement linéaire est un rapport (de segments), et donc il doit être indiqué comme **n:1**, ex.: 40:1 signifie qu'un segment dans l'image réelle est 40 fois plus grand du segment correspondant dans l'objet. S'il y a réduction (image plus petite de l'objet) d'habitude on écrit **1:n**, comme on fait dans les dessins techniques ou dans les cartes topographiques; ex. 1:10.000 signifie qu'un élément donné sur la carte est 10.000 fois plus petit de l'objet réel correspondant.

Au contraire, dans le cas du grossissement visuel, on a un rapport d'angles, qui se distingue en lui faisant suivre le signe ×; un oculaire 8 ×, par ex., montre un objet sous un angle 8 fois plus grand de comme on le verrait à l'œil nu, à 250 mm de distance.

Eh bien, dans la fig. 19, on peut imaginer que, pour une certaine position de l'objet OB, on ait une image virtuelle AB' à la distance de 250 mm de l'œil de l'observateur (comme dans la fig. 15). Il est facile de montrer que les triangles B'AF' et DCF' sont semblables pour lequel AF':CF' = AB':CD ; en sachant que CD = OB = AE, et de plus CF' = **f' = f** et AF' = 250 mm, on peut écrire:

$$\frac{250}{f} = \frac{AB'}{AE}$$

mais: $AB'/AF' = \text{tg}\,\alpha'$ et $AE/AF' = \text{tg}\,\alpha$

pour lequel:

$$\frac{250}{f} = \frac{AB'}{AE} = \frac{\text{tg}\ \alpha'}{\text{tg}\ \alpha};$$

Pour les petits angles on a vu que les tangentes se confondent avec les angles (exprimés en radians) pour lequel:

$$V = \alpha' / \alpha \sim 250/f \qquad (21)$$

[28] Le grossissement visuel est dit aussi "**conventionnel**" ètant donné qu'il est calculé sur la base de la distance d'observation "conventionnelle**"** de 250 mm.

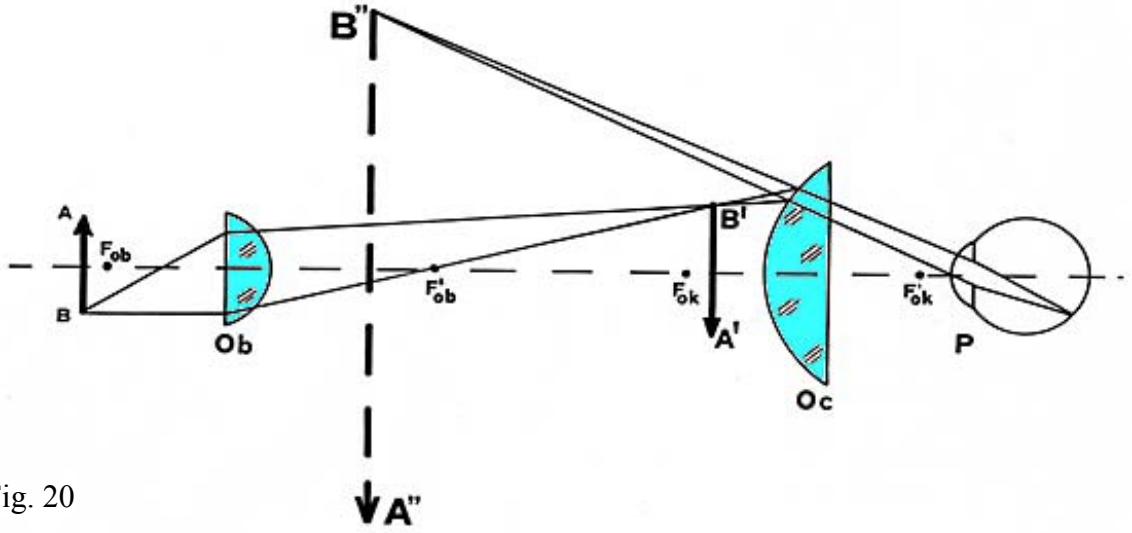


Fig. 20

4.4 - L'OCULAIRE et l'IMAGE INTERMÉDIAIRE

On a déjà mentionné le principe selon lequel une image réelle peut se présenter en partie comme un objet, au sens que les rayons qui convergent sur son plan continuent au-delà d'elle comme si ils vinssent d'un objet.

Observons la fig. 20: AB est un objet mis devant à un objectif Ob, un peu devant son premier foyer (F_{ob}). Selon le schéma de la fig. 13 (§ 2.6.2.4), de l'objet AB se forme une image réelle renversée, agrandie (A'B' dans la fig. 20). Voici le schéma d'un objectif à conjuguée finie.

Eh bien, après l'image réelle A'B', qui correspond à celle qui a été défini «image intermédiaire» (voir le § 3.1), on trouve un système convergent avec la fonction d'oculaire (Oc). Dans la fig. 20 se représente un microscope pas correctement focalisé: en effet l'image intermédiaire, A'B' se forme au-delà du premier foyer d'Oc (F_{ok}) et l'image virtuelle A"B" se forme à une distance finie en obligeant l'œil à accommoder (voir la fig. 15 dans le § 2.7). Mais cela a été fait au but de représenter l'image virtuelle A"B" à l'intérieur de l'illustration au lieu qu'à l'infini.

On peut appeler l'image A"B" «**image finale**» du microscope, et on peut voir qu'elle est renversé par rapport à l'objet, agrandie et droite par rapport à l'image intermédiaire A'B', et encore plus agrandie par rapport à l'objet AB.

Alors l'oculaire Oc agit comme une lentille de grossissement posée devant à un objet, mais avec cette différence: de chaque point de l'image intermédiaire, par ex. du point B', n'émerge pas un faisceau de rayons dans toutes les directions, comme il arriverait avec un objet diffusant éclairé par l'extérieur, mais un faisceau conique comme prolongement du faisceau convergent qui a la base dans la lentille de l'objectif et le sommet en B', et il s'agit d'un cône très étroit.

Maintenant nous comparons la fig. 14 (§ 2.6.2.5) dans laquelle on représente un système convergent devant à un objet OB, mis dans son premier foyer, avec la fig. 21, qui représente un oculaire correctement mis à point sur une image intermédiaire (A'B'). L'image intermédiaire est cette fois dans le foyer de l'oculaire Oc (O' ≡ F).

Dans la fig. 14, de chaque point de l'objet émergent des rayons dans toutes les directions; sont indiqués seulement ceux qui remplissent la surface utile de la lentille; à chaque point objet correspond donc un faisceau, divergent devant, parallèle après, qui intéresse toute la surface de la lentille.

Dans la fig. 21 on voit par contre les différences causées par le fait que l'objet pour Oc est une image réelle, une image intermédiaire créée par un objectif comme dans la fig. 20. Le faisceau émergent de B' (comme de tout autre point extra-axial) est étroit et il occupe une moindre partie de la surface utile de la lentille Oc; non seulement, mais tel faisceau n'est pas dirigé vers le centre de la lentille comme dans la fig. 14, mais vers les bords. Pour former l'image (finale) de chaque point objet (ou, au moins, de chaque point pas axial de l'image intermédiaire) l'oculaire agit donc

avec des faisceaux marginaux, et nous verrons que ceci favorise l'apparition d'aberrations comme l'astigmatisme. Seulement pour le point axial de l'image intermédiaire (O') est utilisé un faisceau centré paraxial.

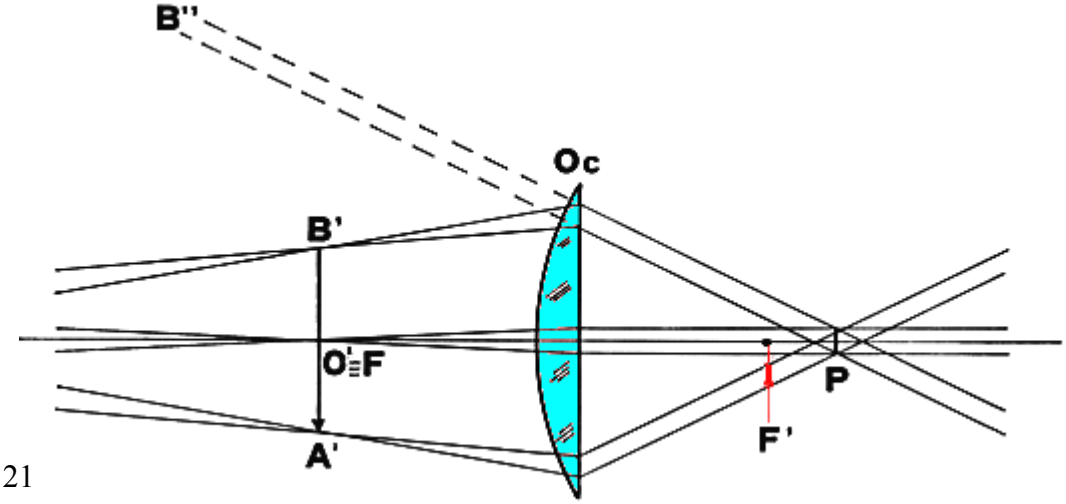


Fig. 21

Et encore: à chaque point de l'image intermédiaire correspond un différent faisceau émergent d'Oc, dirigé vers le point P; étant donné que tous ces faisceaux naissent du plan focale antérieur de l'oculaire Oc, chacun d'eux, en émergeant de Oc, doit être constitué par des rayons parallèles. Et en effet, dans la figure 21 est indiqué à reculons le prolongement des rayons provenant de B' et réfractés par Oc qui concourent à l'infini dans l'image finale (virtuelle) B".

Mais considérons maintenant, pour chaque faisceau partiel qui concourt en chaque point de l'image intermédiaire, le rayon centrale ("**rayon principal**"), celui qui passe par le centre de l'objectif (non représenté dans la fig. 21) et par A' ou B', O', etc.

Tous les rayons principaux, correspondants à tous les points de l'image intermédiaire, émergent du centre de l'objectif et ils arrivent par suite sur l'oculaire Oc légèrement divergents entre eux. Selon le schéma de la fig. 11 (§ 2.6.2.2) ils doivent se diriger tous dans un point un peu au-delà du second foyer d'Oc (F'); en effet l'objectif est toujours distant d'Oc d'une longueur beaucoup plus grande du double de la focale d'Oc (f_{oc}). Avec la différence cependant que tous les rayons principaux émergent du centre de l'objectif, c'est-à-dire d'un point axial, et, après l'oculaire, ils se dirigent tous dans un point axial (P dans la fig. 21), un peu au-delà de F'. En P il y a donc l'image réelle, rapetissée et renversée, de l'objectif Ob. Mais Ob n'est pas un point, mais un cercle centré sur l'axe; donc son image ne peut pas être un point mais un petit disque. Et en effet, comme il est indiqué dans la fig. 21, en P se dirigent des faisceaux cylindriques avec section pas nulle; les mêmes, dans un plan perpendiculaire à l'axe et passant par P, traversent tous un disque (en pratique, de 1 - 4 mm de diamètre) qui est justement l'image d'Ob.

Ce disque est appelée "**disque oculaire**" ou "disque de Biot"[29] ou "de Ramsden"[30] et il est visible en observant, de quelques décimètre de distance, l'oculaire d'un microscope bien éclairé. Pour le **disque de Ramsden** passent TOUS les rayons émergents du microscope, c'est-à-dire tous les rayons qui forment l'image finale. En correspondance de ce disque doit être placée la pupille de l'observateur. Nous verrons qu'il constitue la "**pupille de sortie**" de l'oculaire et du microscope (voir le § 9).

Dans la littérature en langue anglaise, le disque de Ramsden est appelé souvent "**eyepoint**" (ou bien "point de l'œil", c'est-à-dire "point dans lequel doit être placée la pupille de l'œil").

Maintenant il devrait résulter claire la différence essentielle entre loupe de grossissement et oculaire: la loupe produit une image agrandie virtuelle d'un objet réel; l'oculaire produit une image virtuelle d'une image réelle, produite à son tour par une autre lentille, l'objectif.

[29] Jean-Baptiste BIOT, physicien, mathématicien et astronome français (1774-1862).

[30] Jesse RAMSDEN, technicien anglais, élève de J. Dollond (1735-1800).

5 – Les DIAPHRAGMES

On appelle diaphragme une ouverture, un trou, dans un écran opaque qui se trouve dans un plan perpendiculaire à l'axe d'un système optique.

Le trou en microscopie est en général rond et centré sur l'axe; en photographie, cinématographie, etc. il peut être rectangulaire, polygonale, etc., en général centré. Si le diaphragme est circulaire et de diamètre variable, on parle de "diaphragme à iris" ou simplement "**iris**" pour ressemblance avec l'iris de l'œil humain. La variabilité du diamètre de l'"iris" est obtenue avec le croisement de minces lamelles arquées en acier. Le diaphragme a le but de limiter les dimensions transversales du faisceau de rayons qui le frappent.

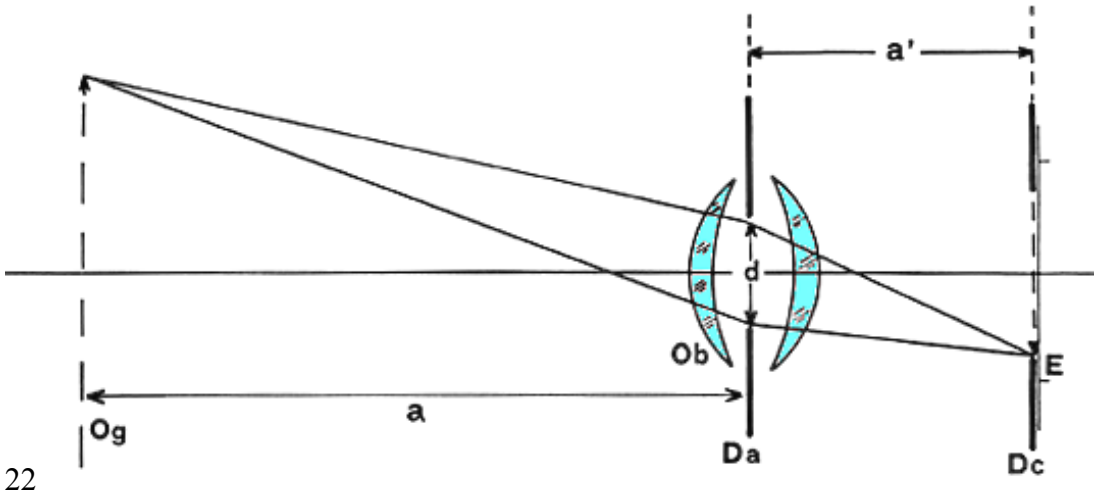


Fig. 22

Considérons un système optique général comme un objectif photographique, un objectif de jumelle, etc. (fig. 22). Nous supposons pour maintenant que la lentille soit mince. Nous avons ainsi trois plans importants: le plan objet (Og), le plan image, E (où on doit trouver l'émulsion dans le cas d'un système photographique) et le plan de l'objectif Ob. Tous ces plans, dans le cas idéal qui correspond aux instruments normaux, peuvent être supposés perpendiculaires à l'axe. Les premiers d'eux, Og et E, sont conjugués, au sens que leur position dépend des lois illustrées dans le § 2.6.2.2 (formules (10) ou (11)).

5.1 - DIAPHRAGMES de CHAMP

Nous commençons avec quelque distinction.

Jusqu'à présent nous avons toujours parlé d'objets et images comme plans conjugués perpendiculaires à l'axe d'un système optique, sans jamais nous occuper de leurs dimensions; mais jamais ils ne peuvent pas être étendu sans limite: la limite peut être très différente; par ex. elle peut être donné par les bords de la rétine de l'œil ("*ora serrata*"), des marges du format photographique, etc.

Dans le cas d'un appareil photo, par ex., (fig. 22) devant le plan de l'émulsion sensible E, il y a toujours une lame opaque qui porte un trou rectangulaire correspondant au format photographique prévu.

Cette «fenètre» limite ainsi les dimensions de l'image, c'est-à-dire du plan image; elle est donc un "**diaphragme de champ image**" ou simplement "**diaphragme de champ**" (Dc. dans la figure). En général, pour limiter les dimensions de l'image on pose un diaphragme semblable dans le plan image; mais on pourrait limiter aussi le champ objet en mettant sur lui un diaphragme cor-

respondant, compte tenu de l'agrandissement. Sauf des rares cas, ceci n'est pas praticable, au moins quand l'objet est éloigné. Par ex. il ne serait pas pratique de limiter le champ objet avec des écrans quand on photographie un paysage.

Le diaphragme de champ n'influe pas sur les caractéristiques de l'image, mais seulement sur ses dimensions; étant donné que beaucoup d'aberrations optiques (voir le § 13) augmentent vers les marges du champ, le projet d'un système optique cherche toujours à réduire les aberrations jusqu'aux marges du champ prévu, en laissant qu'elles empirent, souvent brusquement, au-delà de ces marges. Il est par suite important connaître les dimensions du champ prévues par le constructeur, et ne pas utiliser le système au-delà de ces dimensions. Nous reviendrons sur la notion de champ dans le § 7.

Maintenant revenons aux figures 20 ou 21 qui donnent une vision schématisée d'un oculaire de microscope; on a parlé jusqu'à présent de l'image intermédiaire, c'est-à-dire de l'image réelle fournie par l'objectif Ob (A'B') sans en préciser les dimensions. Mais, à la suite de ce qu'on a déjà dit, il faut limiter l'image intermédiaire et offrir à l'observateur une image limitée par une marge nette. On obtient ça en mettant un diaphragme de champ (un anneau opaque) dans le plan de l'image intermédiaire (plan focale antérieure de l'oculaire). La même chose se fait dans les jumelles, longue-vue, télescopes. Ce diaphragme s'appelle "**diaphragme de champ visuel**" (DV) étant donné qu'il limite le champ visuel de l'oculaire. DV se trouve dans le plan image de l'objectif et par suite pour l'objectif il sert de diaphragme de champ image, mais il se trouve aussi dans le plan de l'image intermédiaire qui est l'objet pour l'oculaire; donc DV représente en même temps un exemple de diaphragme de champ-objet, au point de vue de l'oculaire.

Il s'agit d'une bague ou d'une lame percée (presque toujours un trou circulaire), à bords tranchants (pour éviter les reflets de la part des rayons rasants), qu'on peut trouver dans tous les oculaires. Il peut arriver que dans le plan focal antérieur d'un oculaire on trouve une lentille, avec des fonctions de lentille de champ (voir plus loin); dans ces cas le DV peut être invisible étant donné qu'il est remplacé dans sa fonction par la monture de la lentille. Le constructeur évite toujours, de toute façon, de mettre des lentilles ou des lames transparentes dans le plan de l'image intermédiaire ou dans les plans conjugués avec elle étant donné que chaque égratignure ou pépin de poussière sur les surfaces optiques résulterait au point et on le verrait distinctement, superposé à l'image de l'objet.

Dans un certain sens, le DV limite la région d'objet qui est vue à travers l'oculaire, c'est-à-dire le champ objet de l'objectif; on peut dire aussi qu'à DV est conjuguée son image réelle créé par l'objectif en procèdent à reculons; c'est-à-dire, l'objectif crée une image réelle rapetissée de DV dans le plan de l'objet. Il serait impossible de limiter le champ objet avec un diaphragme mis à l'intérieur de la préparation.

5.2 - OUVERTURE et DIAPHRAGMES d'OUVERTURE

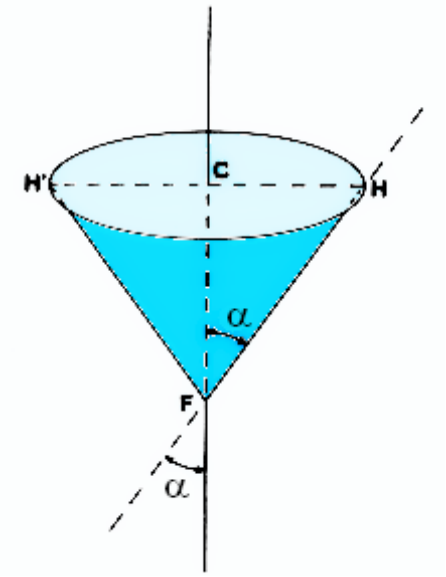
Examinons le terme "ouverture" dans ses sens optiques:

5.2.1 - Surface ou diamètre d'un trou, normalement circulaire, dans un écran opaque, génériquement définissable comme "diaphragme."

5.2.2 - Diamètre d'un faisceau conique ou cylindrique de rayons qui traverse un diaphragme, comme on a à peine défini.

5.2.3 - Angle d'ouverture d'un cône, c'est-à-dire l'angle double de la semi-ouverture (α ans la fig. 23); c'est l'angle entre l'axe du cône et une de ses génératrices. La notion d'ouverture 2α, ou de **semi-ouverture α,** s'applique à un cône de rayons divergents ou convergents. On parle même de "**ouverture angulaire**".

Fig. 23



5.2.4 - Ouverture relative

Soit HH' un diamètre d'une lentille mince (voir les figures 14 et 23) avec centre en C; soit F son foyer dans lequel nous pouvons imaginer une source ponctuelle; soient FH et FH' les limites du faisceau utile accepté par la lentille. Alors il sera FC = **f** la focale de la lentille (ou en général sa conjuguée, peu importe si côté objet ou côté image, étant donné que la notion d'ouverture s'applique des deux côtés).

Eh bien, l'**ouverture relative** vient indiquée conventionnellement avec le rapport:

$$\textbf{ouverture relative} = \frac{FC}{HH'} = \frac{f}{d} \qquad (22)$$

en étant **d** le diamètre utile de la lentille (voir **d** dans la fig. 22) et **f** la focale de la lentille.

Telle valeur est matérialisée dans les textes américains ou anglais avec **f #** (ou "f number" ou "speed"), en italien avec **F** ou **f** ou "numero f", en créant confusion avec le symbole de la focale. Le terme anglais "speed", correspondant à la "rapidité" italienne (éviter le terme de "luminosité" d'une lentille pour ne pas créer confusion avec des notions photométriques homonymes), se réfère au phénomène que, si augmente le diamètre utile **d** de la lentille, grandit aussi l'éclairage sur le plan image et, en photographie, on peut diminuer le temps d'exposition.

Il faut noter cependant que le numéro f# grandit quand diminue l'ouverture angulaire (α, (voir plus haut); donc pour exprimer une "augmentation d'ouverture" on utilise souvent la valeur inverse 1/f# (en étant f# le rapport **f / d**). Quand on trouve, sur un objectif quelconque, la notation par ex. f/5, cela signifie que son diamètre utile est 1/5 de sa focale.

$$1/f\# = d/f \qquad (22\text{ bis})$$

De tout ce qu'a été dit, il est clair que la notion d'ouverture relative est utilisée surtout pour les objectifs photographiques pour lesquels l'ouverture réelle dépend en général du diamètre du "diaphragme d'ouverture" à l'intérieur du système. Il s'agit presque toujours d'un diaphragme à iris qui permet de changer l'ouverture entre un minimum et un maximum. La (22 bis) fait comprendre qu'une augmentation d'ouverture traine une diminution de f#, mais l'échelle des valeurs de f# utilisée normalement n'est pas linéaire: étant donné que f# est une fonction linéaire du diamètre **d** et la quantité de radiation qui traverse le diaphragme est proportionnelle à sa surface, c'est-à-dire à $\mathbf{d^2}$, les valeurs normalisées de f# diffèrent l'un de l'autre d'un facteur $\sqrt{2} = 1{,}41$ environ:

1,4 - 2 - 2,8 - 4 - 5,6 - 8 - 11 - 16 - 22, etc.

Si on augmente f# d'un déclic, "d'un diaphragme", le temps d'exposition devra doubler (et vice versa si on diminue f#) si on désire avoir le même effet sur l'émulsion ("**lois de réciprocité**").

5.2.5 – Ouverture numérique (NA = Numerical aperture, pour les textes anglais, ON = Ouverture numérique, pour le français, A = Apertur, pour l'allemand)

C'est une fonction trigonométrique de la semi-ouverture angulaire α (fig. 23):

$$NA = \text{sen } \alpha$$

Cette expression est nécessaire en microscopie ou en peu d'autres cas (fibres optiques, etc.) à cause des valeurs élevées de α. Ou mieux, étant donné que certains objectifs de microscope, dits "à immersion" (voir le § 16) prévoient la présence d'un liquide entre l'objet et leur première lentille, il faut introduire dans la formule le facteur **n** (index de réfraction du liquide) comme on expliquera mieux plus loin:

$$NA = n \text{ sen } \alpha \qquad (23)$$

Pour un objectif normal, immergé en air (objectifs "à sec") on a: **n = 1** et **NA = sen α.**

On rappelle que la fonction **sen α** peut assumer la valeur maximum **1** (pour α = 90) et donc NA est au maximum égal à **1** pour les objectifs à sec et égal à **n** pour ceux à immersion.

On peut montrer que l'ouverture numérique reste en rapport simple avec le numéro f#:

$$NA = 1 / (2 \cdot f\#) \qquad (24)$$

Telle relation est cependant valide seulement pour les systèmes corrigés dans lesquels le plan principal est sphérique et concentrique au foyer.

On peut montrer aussi que, étant donné un système convergent corrigé qui produit une image réelle (figures 11, 12, 13 dans le § 2.6.2), les ouvertures des deux côtés du système restent dans le rapport inverse des conjuguées, c'est-à-dire dans le rapport inverse de l'agrandissement M: si l'image est M fois plus petite que l'objet, par ex., l'ouverture côté image (NA') est M fois plus grande de celle côté objet (NA):

$$NA/NA' = M \qquad (25)$$

5.2.6 – Diaphragme d'ouverture

Revenons maintenant à la fig. 22; le numéro f# d'**Ob** sera: a'/d.

Ce qui limite et définit l'ouverture d'Ob c'est le diamètre **d** du faisceau utile qui traverse la lentille, qui est déterminé par la monture de la lentille (ou de la plus petite des montures, si il y en a plus d'une) ou d'un diaphragme spécial (Da), parfois réglable ou "à iris".

Étant donné que ce diaphragme règle ou limite l'ouverture de l'objectif, définie d'une façon quelconque, on l'appelle "**diaphragme d'ouverture**".

Ce diaphragme ne limite jamais le champ objet ou image, mais il a beaucoup d'autres effets:

-- il règle la quantité de radiation qui traverse l'objectif, donc l'éclairage sur le plan-image; dans le cas de la photographie, il fixe le temps d'exposition. On a déjà expliqué que tel éclairage est proportionnel, à peu près, à la surface du trou du diaphragme **Da**, c'est-à-dire au carré de son diamètre **d** , donc au carré de l'inverse du numéro f# . De cette manière, quand on veut réduire de moitié le temps d'exposition, il faut augmenter **d** (c'est-à-dire réduire le numéro f#) de $\sqrt{2}$;

-- il règle aussi la "profondeur de foyer", que, en première approximation, est proportionnel au carré du numéro f# ; nous reviendrons sur le sujet au § 14 (formule (37));

-- il influe même sur les aberrations, c'est-à-dire sur la "définition" de l'image (voir le § 13.2). Dans une lentille simple, l'aberration sphérique transversale est inversement proportionnelle au cube du numéro f# ; la sphérique longitudinale et la coma sont inversement proportionnelles à son carré; la longueur des «focalines» astigmatiques et le diamètre de la chromatique axiale sont inversement proportionnels à la première puissance du numéro f# ;

-- dans le cas du condensateur du microscope, il influe aussi sur le contraste (voir le § 18.10);

-- il influe sur la résolution, liée aux phénomènes de diffraction (voir le § 18.6).

5.2.7 – Le disque de Ramsden

Dans un microscope, comme dans n'importe quel instrument d'optique, il y a beaucoup de diaphragmes d'ouverture. Chaque système transparent, au moins, est diaphragmé par sa monture

mécanique, et le diaphragme n'apparaît pas à première vue.

Dans l'oculaire nous avons déjà trouvé un diaphragme de champ visuel (DV); mais l'oculaire, au-delà de produire une image agrandie de l'image intermédiaire, produit (voir fig. 21, § 4.4), une image rapetissée de l'objectif; dans ce cas, DV se conduit comme diaphragme d'ouverture pour l'oculaire (voir aussi les §§ 5.1 et 9).

En tant qu'il forme une image agrandie de l'objet et de l'image intermédiaire, l'oculaire n'a pas apparemment de diaphragme d'ouverture, mais ce diaphragme existe virtuellement en tant qu'on a expliqué que chaque rayon concourant dans l'image finale traverse une "pupille" (P dans la fig. 21) qui est le "**disque de Ramsden**" cité dans le § 4.4. Ce "disque" est le diaphragme d'ouverture de l'oculaire par rapport à l'image de l'objet.

5.2.8 – Le diaphragme de l'objectif

Dans n'importe quel objectif il y a toujours au moins un diaphragme d'ouverture constitué par la plus petite des montures des lentilles; parfois un diaphragme véritable sous la forme de lame percée. Dans l'objectif du microscope de toute façon il s'agit de diaphragmes fixes. Seulement pour des applications spéciales (fond noir), dans les objectifs les plus forts, il y a un diaphragme à iris, réglable de l'extérieur avec une bague spéciale; ceci au but de réduire l'ouverture numérique (§ 19.2.6).

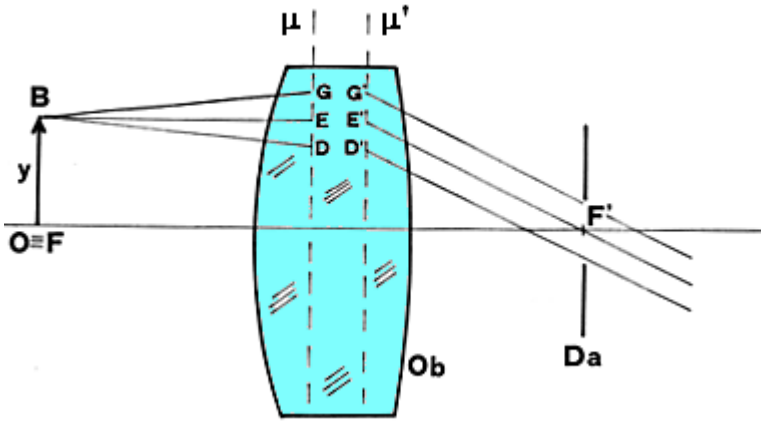


Fig. 24

À ce moment il est bien mentionner de toute façon la position qu'il peut avoir.

En général le constructeur dispose tel diaphragme de façon à minimiser les aberrations; et telle influence peut être très forte. Mais nous considérons deux cas spéciaux:

--- le diaphragme d'ouverture est disposé tout prés de la lentille, si elle est mince, ou au centre du système, si celui-ci est plus ou moins symétrique, comme dans la fig. 22. Ceci arrive souvent dans les objectifs photographiques. Si un système optique est symétrique par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe et le diaphragme se trouve dans ce plan de symétrie, quelques aberrations résultent effacées comme la coma et la distorsion;

--- le diaphragme est mis dans le plan focal image (le plan focal objet dans le microscope est inaccessible, étant donné qu'il se trouve à l'intérieur de la préparation). Nous voyons ce cas de plus près.

Nous considérons pour simplicité le cas d'un objectif "à conjuguée infinie", mais la situation est semblable à celle de la "conjuguée finie" (voir la fig. 24). L'objet OB se trouve dans le premier plan focale de l'objectif **Ob** dont **μ** et **μ'** sont les plans principaux. Le diaphragme **Da** se trouve dans le second plan focal, et il est circulaire et centré.

Considérons un point objet extra-axial B, mais le discours serait identique pour chaque autre point objet. Le rayon BE, parallèle à l'axe, émerge en passant par le foyer image (F'). Le rayon B - E - E' - F' sera le rayon principal, c'est-à-dire le rayon centrale du faisceau utile qui traverse le système. Les rayons BG et BD, comme tous les rayons émergents de B, étant donné qu'ils vien-

nent d'un point du plan focal objet, peuvent émerger de la lentille seulement comme faisceau parallèle. Le diamètre de tel faisceau est limité évidemment par **Da**.

Cette situation est donc bien différente de celle de la fig. 22 ou de la fig. 13 (§ 2.6.2.4). Elle est appelé "**système télécentrique**" et elle offre plusieurs avantages pratiques entre lequel celui-ci: si l'objet vient défocalisé, son image ne change pas de dimensions et ceci est précieux quand on doit exécuter des mesures linéaires sur l'objet, dans les comparateurs, etc. En outre, si l'objet a une certaine épaisseur (supposons d'observer un objet avec la forme de cylindre centré), les points sur les côtés de l'objet disposés plus en avant ou plus en arrière le long d'une droite parallèle à l'axe peuvent apparaître défocalisés mais pas déplacés latéralement.

Pour se convaincre de ça il suffit de penser que, si le point B (fig. 24) se déplace en avant ou en arrière le long de la droit BE, le rayon principal E'F' ne se déplace pas et ainsi reste fixe aussi l'image de B. Ceci porte à la plus grande netteté dans les bords de l'image des objets hors de l'axe, comme ferait une augmentation de la profondeur de foyer.

Par la suite nous verrons des autres diaphragmes dans le système éclairant du microscope.

On rappelle que les diaphragmes mis le long d'un système optique représentent des objets et les lentilles à leurs côtés en créent des images. Nous verrons, dans le microscope, quelques exemples d'images conjugués avec des diaphragmes.

5.2.9 – Les Apertomètres (voir le § 31.2.2)

Limitons nous à la microscopie. Le seul cas qui nous intéresse vraiment c'est l'ouverture de l'objectif et du condensateur (voir dans ce site, section "Microscopie optique", l'art. n° 46, en italien).

Pour mesurer l'ouverture de l'objectif on met devant lui une graduation gravée sur la surface plane (apertomètre de Beck), ou cylindrique (apertomètre d'Abbe) d'un bloc de verre. La graduation montre directement les valeurs d'ouverture. Si la distance entre graduation et objectif est de quelques fois la focale de l'objectif et si la graduation est éclairée uniformément, près du plan focal supérieur de l'objectif on a une image rapetissée et renversée de la graduation, ou au moins de cette partie d'elle qui correspond à l'angle d'ouverture de l'objectif. On a ainsi une lecture directe de la valeur d'ouverture.

Dans le cas d'un condensateur on peut faire à moins de l'apertomètre: on illumine le condensateur du bas avec une forte lampe à faisceau concentré (peut suffire la microlampe); le diaphragme doit être complètement ouvert; sur le condensateur on pose un bout de papier vertical de manière que l'axe optique y soit compris; sur le papier on dessinera le profil du faisceau qui émerge du condensateur. En mesurant le diamètre du faisceau à une certaine hauteur et avec des simples calculs trigonométriques on en tire sen α.

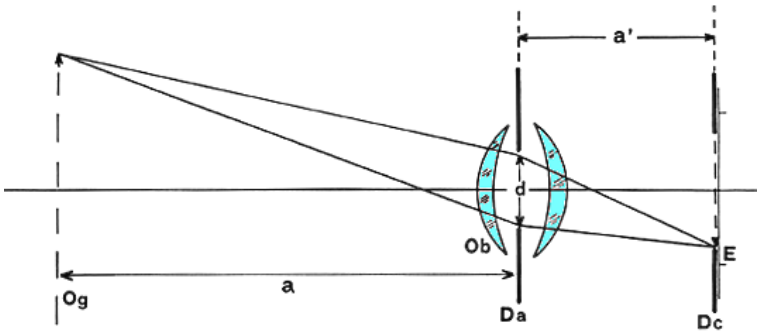
En pratique, ces mesures sont rarement nécessaires étant donné que les constructeurs modernes déclarent toujours l'ouverture de leurs systèmes optiques. Une mesure directe est utile tout au plus, pour obtenir une valeur réelle, qui peut différer de celle nominale, et dans le cas des objectifs anciens, ou la valeur de l'ouverture n'est pas indiquée.

6 - Les PUPILLES

Dans une figure comme la 22 (ici dessous répétée) est représenté un système optique doué de diaphragmes parmi lesquels celui d'ouverture (Da) de diamètre **d**. Quand on parle de lentilles minces, le plan de **Da** peut coïncider avec la lentille. Mais si le système est "épais", d'épaisseur pas négligeable, le diaphragme se trouve ou d'un côté du système ou à son intérieur, mais de toute façon d'un ou des deux côtés se trouvent une ou plusieurs lentilles épaisses, les plans principaux desquelles peuvent difficilement coïncider avec le diaphragme même.

En observant le **Da** du côté du plan objet ou du plan image on ne voit donc pas **Da** mais son image, d'habitude virtuelle, donnée par les lentilles qui se trouvent entre le plan objet (ou image) et le diaphragme même.

Eh bien, "la **pupille d'entrée**" d'un système optique simple ou complexe c'est son diaphragme d'ouverture vu par un point quelconque du plan objet ou bien l'image de tel diaphragme formé par les lentilles qui se trouvent entre le plan objet et le diaphragme même.



À la même manière on définit la "**pupille de sortie**" du côté image.

Quand on dessine un schéma optique, le "rayon principal" (voir le § 4.4) de chaque faisceau passe pour le centre des pupilles qu'il traverse dans son cours. Étant donné que dans un système centré sur un axe unique aussi les pupilles sont centrées, le point dans lequel un rayon principal rencontre l'axe est aussi le centre de quelque pupille.

Dans le calcul de l'ouverture relative (formule (22)) ou numérique (formule (23)) il faut alors tenir compte des diamètres ou angles non relatifs au diaphragme réel ou physique, mais à la pupille. Et naturellement la notion et le calcul des ouvertures peuvent être appliqués du côté objet ou du côté image en les basant sur les pupilles correspondantes.

6.1 – Le VIGNETAGE

Qu'on observe la fig. 25: il y est représenté un système convergent complexe formé de deux sous-système L_1 et L_2 et d'un diaphragme d'ouverture **Da**. À gauche on suppose un objet, très petit, placé sur l'axe optique et on représente le faisceau qui, limité en diamètre par le seul diaphragme **Da**, traverse le système en convergeant dans l'image **I**. Le diaphragme **Da** déroule la fonction de limiter l'ouverture du système.

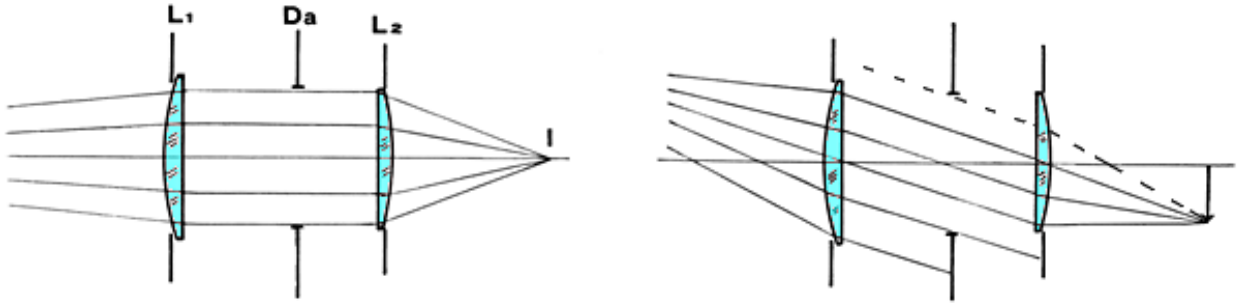


Fig. 25

À droite on représente par contre un faisceau oblique provenant d'un point objet extra-axial, c'est-à-dire des marges du champ objet.

Il peut arriver dans les systèmes réels ce qui est schématisé dans la figure: le faisceau utile que le diaphragme pourrait accepter est limité d'un côté ou de l'autre, ou des deux, par la monture des lentilles: telles montures agissent donc comme autant de diaphragmes qui peuvent ne pas avoir effet pour les faisceaux peu inclinés (à petit champ, figure 25 à gauche), mais peuvent différemment limiter le faisceau utile si on considère des points de l'objet très éloigné de l'axe, c'est-à-dire des grands champs (figure 25 à droite).

Cette limitation, asymétrique, de l'ouverture d'un système à œuvre de quelque monture mécanique pour les faisceaux inclinés s'appelle "**vignetage**".

Si le diaphragme **Da** est à iris, comme il arrive souvent dans les objectifs photographiques, le vignetage peut ne pas se vérifier quand le diaphragme d'ouverture est très fermé (étant donné que le faisceau utile est plus étroit), mais se présenter à diaphragme ouvert. En général, dans les objectifs photographiques, un certain degré de vignetage est toléré avec le diaphragme tout ouvert et pour les marges du format photographique; ceci au but de réduire les dimensions et par suite le coût et le poids du système.

Les conséquences du vignetage sont différentes, à la charge des aberrations, etc., mais il est évident qu'il produit une perte de luminosité aux bords de l'image à cause de la réduction de l'ouverture utile.

Dans le microscope, les vignetages sont soigneusement évités pour les graves conséquences qu'ils auraient sur la résolution, toujours à cause de la perte d'ouverture (voir le § 18.6), mais on ne peut jamais les exclure.

7 - Les CHAMPS

Comme aux pupilles est sous-tendu un angle qui est l'ouverture (angulaire ou autrement exprimée), aussi au diaphragme de champ objet ou image est sous-tendu un angle qui est l'"**angle de champ**" ou "**champ angulaire**".

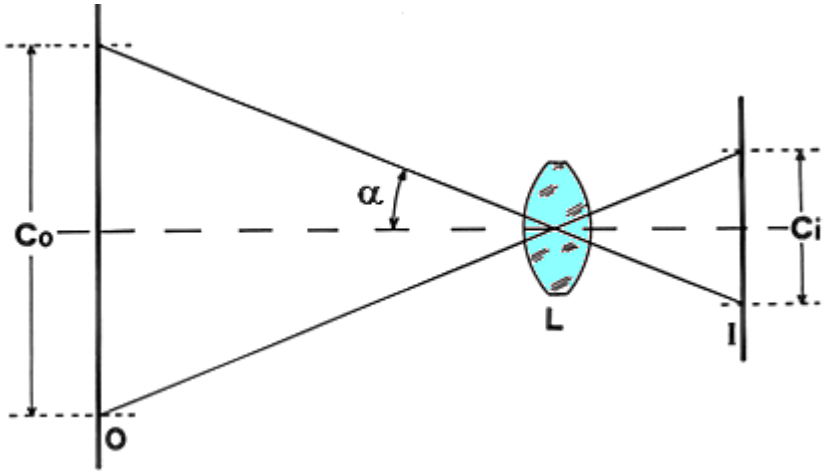


Fig. 26

Dans la fig. 26 est schématisé un système convergent **L**, et il est indiqué le plan objet **O** et le plan image **I.** En O ou I (peu importe dans lequel des deux – il se traite de plans conjugués) il existe un diaphragme de champ qui délimite la partie utile du plan objet ou du plan image. On peut définir telle partie "**champ objet**" (Co) ou "**champ image**" linéaire (Ci). Étant donné que les deux plans sont conjugués et par suite l'un est l'image de l'autre, il est clair qu'entre les diamètres des deux champs il existe un rapport égal à l'agrandissement M défini par les formules (13), (14) et (15) dans le § 2.6.2.2.

Il est clair aussi que nous avons jusqu'à présent parlé des **dimensions linéaires** transversales du champ: le diamètre (si le champ est circulaire) ou le côté (champ carré) ou les deux côtés (rectangle) ou la diagonale. On peut aussi appeler "champ" la **surface** du diaphragme de champ, mais cela se fait rarement; par ex., certaines jumelles de bas grossissement (et de basse valeur) sont offertes comme capables de donner, par ex., "un champ 16 fois plus grand de celui que vous verriez à l'œil nu". Ce numéro est un rapport de surfaces; par suite l'agrandissement normalement entendu (celui visuel) est en réalité la racine carrée de ce numéro, dans notre cas 4!

Dans un objectif de microscope, comme on a expliqué, le champ image est limité par le diaphragme de champ visuel de l'oculaire (DV); son diamètre peut être indiqué comme **index de champ**: **s' = 2 r** dans laquelle **r** est le rayon du diaphragme (pour les oculaires positifs, voir le § 20.4 1); en appliquant la formule (12)(§ 2.6.2.2), on déduit que le champ objet de l'objectif aura un diamètre de:

$$s = s' / Mob$$

Cette formule permet de calculer rapidement le diamètre du champ objet effectivement visible dans le microscope en partant de l'agrandissement de l'objectif, toujours connu, et de l'index de champ **s'**, d'habitude indiqué et mesurable (voir plus loin).[31]

Soit **r** le rayon du diaphragme de champ visuel d'un oculaire doué d'une focale **f** ; soit **α'** l'angle sous-tendu entre l'axe et le bord du diaphragme même; de la (26)(en peu plus loin) on a:

$$r = tg\ \alpha' f \qquad \text{et} \qquad s' = 2\ r = 2\ tg\ \alpha' f$$

Pour cela

$$s = 2\ tg\ \alpha' f / M_{ob}$$

[31] Dans le cas des oculaires négatifs (vois plus loin) l'index de champ ne coïncide pas avec le diamètre du diaphragme DV; il faut faire une mesure indirecte avec un réseau et un objectif d'agrandissement connu.

De la (60)(§ 18.12) on a:

$$f = 250 / V_{ok}$$

dans laquelle **Vok** est le grossissement visuel de l'oculaire; donc:

$$s = 2 \text{ tg } \alpha' \cdot 250 / V_{ok} \cdot M_{ob}$$

Pour la (33)(§ 12.7.1) on a: $V_{ok} \cdot M_{ob} = V_M$

(en négligeant le facteur de tube F_t) dans laquelle V_M est le **grossissement totale visuel du microscope**; on conclut que:

$$s = .500 \text{ tg } \alpha' / V_M$$

7.1 – CHAMP ANGULAIRE et INDEX de CHAMP

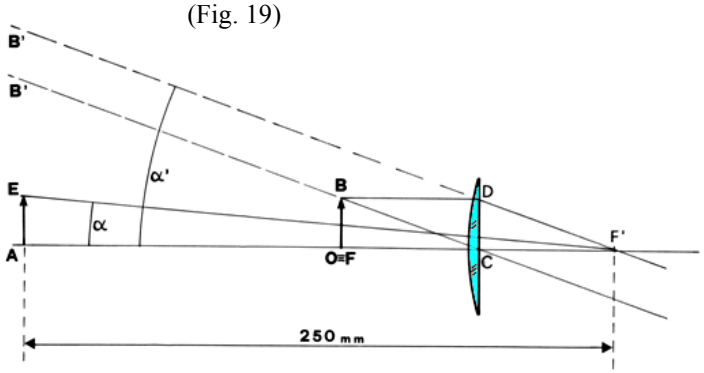
Comment on a déjà dit, le champ sous-tend aussi un angle (α dans la fig. 26); par suite on peut parler de "**champ angulaire**"; on veut parler avec ceci en général de "**demi-champ**"; comme champ entier alors on aura 2 α. L'angle α est tracé entre l'axe optique et les marges extrêmes du champ.

Quand le champ est rectangulaire, comme en photographie, on assume comme "**champ linéaire**" (image) (Ci dans la fig. 26) la diagonale du format. Par ex., dans un format "Leica" (24 × 36 mm) la diagonale est environ 43 mm et la demi-diagonale 21,5 mm; si la focale de l'objectif (la conjuguée image si l'objet est lointain) est par ex. 50 mm, le rapport 21,5 / 50 nous donne la tangente de α; dans notre exemple, tg α = 0,43 et α = 23,3 ° environ.

Normalement en photographie on indique comme "champ" ou "**angle de champ**" d'un objectif la valeur 2α, dans notre exemple 46,6° environ.

L'indication du champ avec un angle est nécessaire quand on a à faire avec des images virtuelles par ex. dans les oculaires, et il n'a pas de sens mesurer les dimensions linéaires de l'image. Par ex. dans la fig. 19 (§ 4.1, répétée ici) le semi-champ angulaire α' est l'angle (indiqué avec α dans la figure 26) entre l'axe et la droite B'-C ou B'-D, supposé que B' soit un point sur la marge de l'image.

(Fig. 19)



Pour calculer α' dans un cas comme celui de la fig. 19 (oculaire ou lentille de grossissement) on imagine un diaphragme circulaire DV centré sur l'axe, mis dans le plan de OB; il suffit de penser que:

tg α' = CD/CF'

Maintenant nous supposons qu'OB représente le rayon maximum de l'image intermédiaire, c'est-à-dire du diaphragme de champ visuel DV; en dessinant la figure 19 on a posé BD parallèle à l'axe, donc OB = CD = **r**, en étant **r** le rayon du diaphragme DV. En outre CF' = f = focale de l'oculaire; il en résulte:

$$\text{tg } \alpha' = r / f \qquad (26)$$

De ça on tire le demi-champ angulaire de l'oculaire α [32].

Pour connaître **f**, en pratique, il vaut mieux la tirer de la (21) (§ 4.3) étant donné que V est déclaré toujours par le constructeur. Et comme on mesure ou on calcule **r** ?

[32] D'habitude, à la place de α', le quel serait plus correct, étant en rapport à l'image, on indique simplement α.

Nous avons dit que **r** est le rayon du diaphragme de champ visuel DV. Supposons que DV soit visible en regardant par-dessous l'oculaire (s'il y a devant une lentille de champ, on retombe dans le cas des oculaires négatifs; voir plus loin). On peut en mesurer le diamètre avec un calibre. Mais les meilleurs constructeurs déclarent tel diamètre en le gravant sur la monture de l'oculaire, après la valeur du grossissement; par ex.: 10 × (18) ou 10/18 indique: grossissement visuel V = 10 × et diamètre de DV: s' = 18 mm.

Eh bien, le diamètre de DV exprimés en mm est indiqué dans les oculaires positifs comme "**index de champ**" («field number» ou FN pour les auteurs anglais) (**s'**).

s' est simplement le champ-objet linéaire de l'oculaire et: s' = 2 r.

Une fois connus **r** et **f**, avec la (26) on calcule **α'**, qui est utile pour évaluer l'amplitude du champ angulaire de l'oculaire.

On rappelle que les oculaires "normaux" ont un champ angulaire 2 **α** jusqu'à environ 40°; pour des valeurs de 2 **α** supérieures on parle de "**oculaires grand-angulaires**" (voir aussi le § 20.1). Par ex., un oculaire 16 × (15) a une focale:

$$f = 250/V = 250/16 = 15{,}6 \text{ mm}; \quad \text{environ:} \quad r = s'/2 = 15/2 = 7{,}5 \text{ mm};$$

et ainsi:

$$\text{tg } \alpha' = r/f = 7{,}5/15{,}6 = 0{,}48; \qquad \alpha' = 25{,}7°; \quad 2\alpha' = 51{,}4°$$

Cet oculaire est "**grand-angulaire**".

Ainsi, en tenant compte de la (26) et de la (21) (§ 4.3),

$$V_{ok} = 250 / f_{ok} \qquad \text{qu'on peut réécrire comme} \qquad 1/f_{ok} = V_{ok} / 250$$

On peut tirer aussi:

$$\text{tg } \alpha' = r/f = s'/2f = s' \, V_{ok}/500 \quad \text{(naturellement, } r = s'/2).$$

V_{ok} est généralement connu; **s'** est exprimé en millimètres.

7.2 – Les OCULAIRES NÉGATIFS

Quand l'agrandissement V d'un oculaire est inférieur à 8 et l'index de champ **s'** non supérieur à 18 (valeur très commune), le champ angulaire 2 **α** descend sous la valeur de 32° et ceci n'est pas agréable (on voit "la lune dans le puits"). Pour augmenter le champ angulaire des faibles oculaires on recourt alors à la soi-disant "**lentille de champ**", c'est-à-dire à une lentille convergente disposée sous le diaphragme de champ visuel DV. Ceci comporte que le premier plan focal de l'oculaire se trouve au milieu des lentilles au lieu de dessous, et on ne peut pas par suite utiliser un oculaire semblable comme lentille de grossissement, à moins de le renverser (le second foyer est toujours externe).

Les oculaires ainsi construits s'appellent **négatifs**; depuis longtemps ils sont considérés unités inséparables, au sens que chaque oculaire est solidaire avec une lentille de champ spécifique; pour quelques siècles cependant il y a eu des microscopes contenants une lentille de champ fixe dans le tube, valide pour tous les oculaires, et on substituait seulement la partie supérieure de l'oculaire.

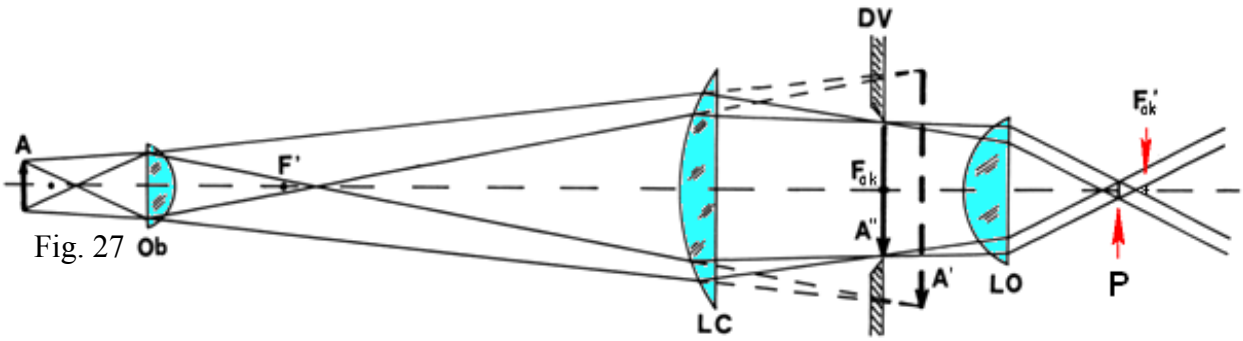


Fig. 27

Voilà leur fonctionnement (fig. 27): **Ob** est l'objectif comme d'habitude (à conjuguée finie), A est l'objet; LC est la lentille de champ, LO la lentille supérieure de l'oculaire ("**lentille oculaire**)". Comme on a expliqué, LC et LO font partie de l'oculaire négatif globalement interprété.

Eh bien, s'il n'y avait pas LC, l'objectif produirait une image intermédiaire normale (A') renversée, réelle et agrandie par rapport à A, et sur le plan de A' il devrait se trouver le diaphragme de champ visuel DV et le premier foyer de LO. Mais devant l'image intermédiaire se trouve la lentille convergente LC; chaque faisceau convergent qui concourrait en chaque point de A' (sont dessinés les faisceaux extrêmes de l'image intermédiaire) devient plus convergent comme effet de la puissance positive de LC; de telle manière son point de convergence se baisse jusqu'au plan d'une nouvelle image intermédiaire (A"). Naturellement, dans le plan de cette nouvelle image intermédiaire il doit se trouver le DV ainsi que le premier foyer de LO (F_{ok}).

Au-delà de cet abaissement de l'image intermédiaire, on a un autre effet de la lentille de champ LC: l'image intermédiaire devient plus petite par suite que les faisceaux partiels particuliers deviennent moins divergents entre eux ou même convergents; cette réduction du grossissement V aide dans le projet des faibles oculaires.

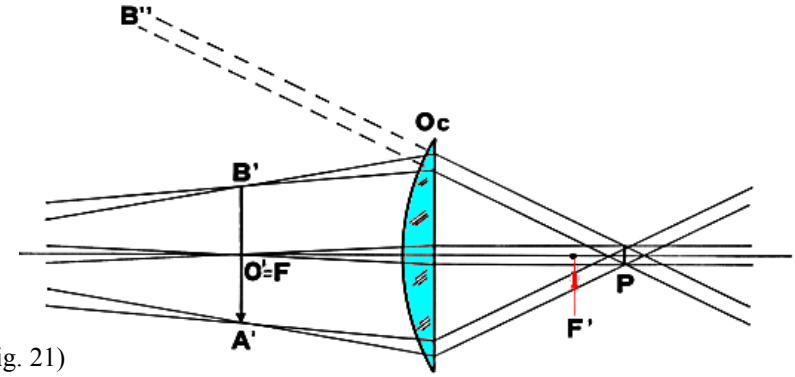
Mais l'effet le plus important de LC est celui-ci: si les faisceaux qui concourent dans les différents points de l'image intermédiaire deviennent moins divergent entre eux ou même convergents, il est clair que, en traversant la lentille oculaire LO, ils deviennent plus convergents qu'ils ne seraient en absence de LC. Ceci signifie qu'augmente le champ angulaire 2α de l'oculaire et cela était le but à atteindre. Pour se convaincre de l'utilité de LC, il suffit d'observer une préparation quelconque avec un objectif quelconque et un oculaire négatif. Puis on démonte la LC de l'oculaire et on observe de nouveau: on verra un angle visuel plus petit et le grossissement résultera plus grand. En outre il faudra retoucher la mise au point pour compenser le déplacement axial de l'image intermédiaire.

Encore, la LC porte une autre conséquence: si les faisceaux émergents de la LO deviennent plus convergents entre eux, leur point de convergence ("**disque de Ramsden**" - voir le § 4.4) se baisse. En effet, les oculaires négatifs ont en général la "**pupille basse**"; ceci est nuisible étant donné qu'il oblige l'œil à rester plus près de l'oculaire.

Mais en revanche la présence de LC peut aider à réduire les aberrations chromatiques de l'oculaire (voir le § 20.4.1) en tant qu'elle agit dans un certain sens en opposition à la LO et leurs effets peuvent se compenser, au moins sous cet aspect.

On peut faire une comparaison entre la fig. 27 et la 21 (§ 4.4); dans cette dernière il est montré un oculaire normal ("**positif**") sans lentille de champ, c'est-à-dire avec le premier foyer extérieur au système des lentilles. On voit que le disque de Ramsden (P) se trouve au-delà du second foyer (F') dans l'oculaire positif de la fig. 21 mais devant le second foyer de LO (F_{ok}') dans l'oculaire négatif de la fig. 27. On voit aussi que l'oculaire positif, même si très complexe, peut se reconduire à une lentille simple, pendant que le négatif est constitué toujours d'au moins deux lentilles avec différente fonction. En outre, si la LC a le diamètre maximum permis par les dimensions internes du tube, elle peut exploiter encore une image intermédiaire de plus grandes dimensions, étant donné qu'elle réduit les dimensions effectives de l'image intermédiaire en vertu de tout ce qu'on a dit plus haut.

Finalement, quand on définit l'index de champ **s'** d'un oculaire négatif on n'indique pas en réalité le diamètre de son diaphragme de champ visuel DV, mais le diamètre que l'image intermédiaire aurait sans LC, c'est-à-dire le diamètre de l'image intermédiaire effectivement utilisée.



(fig. 21)

8 - L'ÉCLAIRAGE de L'OBJET

On appelle "**système formateur d'image**" du microscope cette partie de l'instrument qu'on a à peine examiné, qui porte à l'image "finale" (§ 4.4) de l'objet, et qui est constituée dans les parties essentielles d'un objectif et d'un oculaire, plus éventuelles parties intermédiaires ("lentilles de tube", variateurs d'agrandissement, prismes, séparateurs, miroirs, etc.).

Ces parties se trouvent aux bouts (objectif et oculaire) ou à l'intérieur d'une structure fermé ou "**tube**" dans laquelle ne doit pas pénétrer ni lumière extérieure ni poussière.

Sur cette partie du microscope, une fois choisis les systèmes de lentilles plus opportuns, sont très peu les opérations à accomplir: essentiellement la mise au point, c'est-à-dire la variation de la distance entre objectif et objet ou peu d'autres qui concernent des cas spéciaux.

Par contre, en avant de l'objet, il existe un "**système éclairant**" qui, dans sa forme plus complète, est compliqué et demande des régulations continuellement variées. Dans ces régulations il est facile de commettre des fautes qui empêchent au système formateur d'image de fournir les meilleurs résultats: la qualité de l'image (résolution, contraste, etc.) empire rapidement à la moindre faute.

Les performances fondamentales du système éclairant sont trois:

A **-** Fournir un éclairage raisonnablement uniforme du champ objet, pour grand qu'il soit. Ce "raisonnablement"devient plus urgent dans le cas de la photographie, spécialement avec des pellicules "dures" et aux couleurs.

B - Le faisceau de radiation qui arrive sur l'objet doit avoir une ouverture semblable à celle du plus fort objectif qu'on prévoit d'utiliser. Telle ouverture doit pouvoir se réduire quand on utilise les objectifs les plus faibles.

C - La partie de l'objet qui est illuminée ("champ éclairé") doit être toujours égale ou de peu supérieure au champ objet de l'objectif qu'on a choisi.

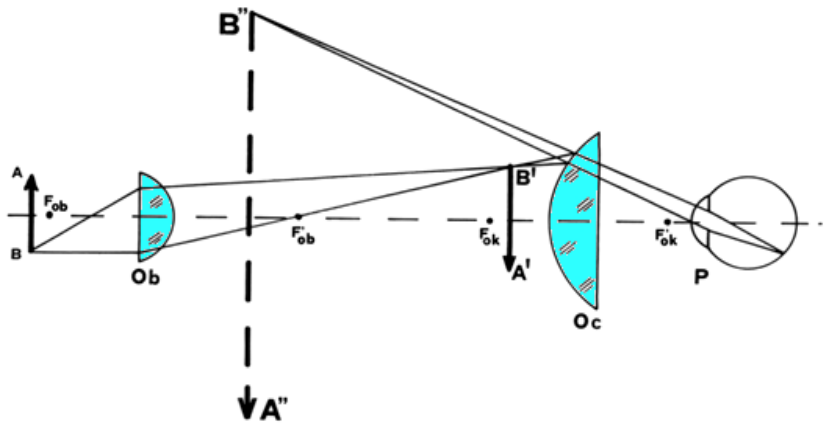
La condition A s'explique par soi même. Il est évident que tout dépend de la destination de l'image finale: pour une copie typographique il faudra être plus intransigeant que pour l'observation visuelle, où l'œil s'adapte très bien.

La condition B est exigée en base aux critères de contraste et de résolution, comme on verra dans le § 18.6, et on la réalise de manière différente selon le schéma du système éclairant, comme décrit dans la suite du présent chapitre.

La condition C a le but de ne pas éclairer les régions de l'objet qui ne rentrent pas dans l'image finale, soit pour ne pas éclairer inutilement les régions périphériques de l'objet (réduire la décoloration des colorants organiques, ne pas endommager les objets vivants, etc.), soit pour réduire la "lumière diffuse" et ne pas diminuer le contraste (voir le § 17.1.1). Cette dernière exigence ne se révèle cependant pas essentielle quand on a à faire avec des objets minces peu diffusants et bien colorés (sections histologiques, frottis, etc.).

8.1 – DIASCOPIE et FOND CLAIR

(Fig. 20)



Dans la fig. 20 (§ 4.4) où on a schématisé le système formateur d'image, tout part de l'objet comme si il était lui même une source de radiation. Ceci arrive seulement dans des rares cas (objets fluorescents). Dans les autres cas il faut éclairer l'objet ou par dessus, quand il est opaque ("**épiscopie**"), ou par-dessous quand il est transparent ("**diascopie**")[33].

Pour le moment, nous nous occupons du cas le plus général de la diascopie dans lequel on prévoit une source de radiation au devant de l'objet, c'est-à-dire à gauche d'AB dans la fig. 20. Le système éclairant avec tous ses composants (sources, lentilles, diaphragmes, etc.) est supposé centré sur le même axe de l'objectif (bien que replié à l'œuvre de quelque miroir plan).

Si les trois conditions citées sont satisfaites, en absence d'objet et en regardant dans l'oculaire, on doit voir un champ, c'est-à-dire un fond image, uniformément lumineux. S'il y a un objet mis au point, plus ou moins opaque ou de toute façon capable d'altérer l'état de la radiation qui pénètre dans l'objectif, on aura sur ce fond lumineux une image plus ou moins contrastée de l'objet. On exécute ainsi une observation en **"fond clair**". De la même façon, quand on observe une diapositive en la tournant vers une fenêtre, on exécute justement une observation en diascopie en fond clair.

Nous verrons (§ 30.1.1 et 30.2) que, soit en épiscopie qu'en diascopie, il est possible d'éclairer l'objet avec des rayons obliques qui ne pénètrent pas dans l'objectif et pour cela le fond de l'image apparaît sombre et l'objet apparaît clair en vertu de la radiation qu'il diffuse et que l'objectif recueille ("**fond noir**" "ou "**champ noir**").

8.2 - Les SOURCES

Sans décrire les caractéristiques techniques des sources intéressantes pour la microscopie, chose que nous ferons dans le § 22, nous appelons pour maintenant "**source**" le système capable de produire un faisceau de radiation avec des caractéristiques aptes à former le "fond clair" de l'image finale.

Quand un système convergent (nous verrons se traiter du "condensateur") produit dans le plan objet du microscope une image de telle source, cette "source" n'est pas souvent un corps lumineux en sens étroit, mais une lentille ou un diaphragme éclairé par le corps lumineux même (voir le § 22).

Au point de vue géométrique nous pouvons avoir trois types de sources:

--- ÉTENDUES (le ciel, un mur blanc éclairé, le bulbe d'une ampoule électrique dépolie ou rendue diffusante avec des autres moyens, lampes "opale" ou "couleur lait"). Les sources comme le ciel ou les nuages, c'est-à-dire celles naturelles, ont le désavantage d'être variables quant à l'intensité et à la composition spectrale, mais en revanche elles sont toujours disponibles "sur le champ", en absence de celle artificielles. Rarement il est possible d'utiliser la radiation directe du

[33] À la place de "diascopie" on dit souvent "**lumière transmise**" ou "**éclairage par transparence**".

soleil sans précautions spéciales, soit pour sa forte intensité, soit pour son étendue angulaire insuffisante. Mais de ça on reparlera.

--- ÉTENDUES mais PAS HOMOGÈNES: c'est le cas des ampoules électriques "à tension de réseau", d'habitude 230 V, dans lesquelles le filament incandescent est long 1 - 3 cm, de forme arquée ou à zig-zag, mais toujours mince par rapport à la longueur.

--- CONCENTRÉES: c'est le cas des lampes "à arc" ou de celles à incandescence à basse tension dans lesquelles le filament est court et recueilli, au sens qu'il est enroulé en hélice serrée avec peu de spires de façon à former comme une grille carrée ou rectangulaire de très peu de mm de côté.

On peut tirer profit de tous les types de corps lumineux, avec un schéma opportun de système éclairant dont nous verrons les exemples fondamentaux dans les paragraphes suivants.

8.3 - LE PRINCIPE DU CONDENSATEUR

On appelle condensateur ou condenseur (une fois il s'appelait "concentrateur") un système convergent simple ou complexe, mis sous la "platine" (d'où le nom anglais de "**sub-stage condenser**") c'est-à-dire sous le plan objet, et centré sur l'axe du microscope. On en parlera en détail dans le § 21.

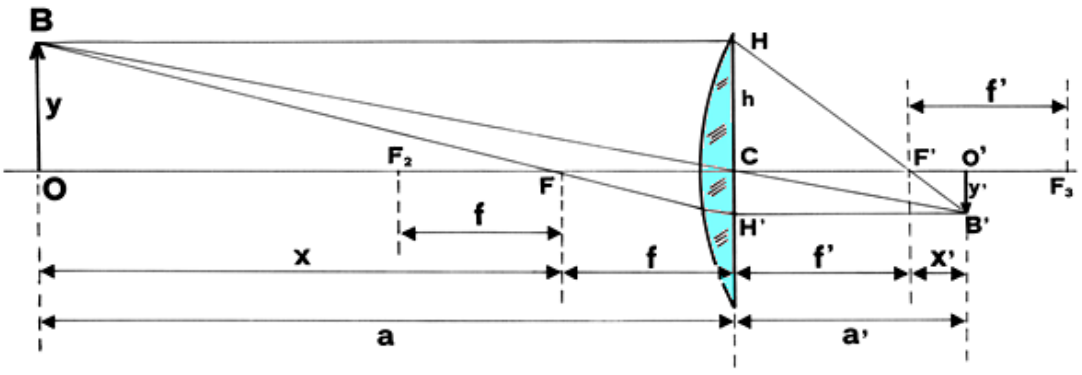
Le condensateur est la partie essentielle du système éclairant. Il a une focale courte (1 - 5 cm), ouverture forte du côté de l'objet, c'est-à-dire dans le faisceau qui émerge du condensateur vers le haut, pupille d'entrée ample (20 - 33 mm en général) située souvent au dessous des lentilles. En général telle pupille se trouve dans le premier plan focal du condensateur étant donné qu'on trouve ici d'habitude un diaphragme à iris avec lequel on règle l'ouverture du condensateur même. Tel diaphragme est appelé justement "diaphragme d'ouverture du condensateur" ou, plus brièvement, "**diaphragme d'ouverture**". Ce trouvant tel diaphragme dans le plan focal d'un système convergent, il rentre dans le cas "télécentrique" (§ 5.2.8).

En principe, le condensateur sert à projeter sur le plan objet (l'objet de l'objectif) une image rapetissée réelle d'une source qui se trouve à une distance beaucoup plus grande de sa focale. Il fonctionne donc sur le principe de la fig. 11 (§ 2.6.2.2). Et on se rappelle (§ 5.2.5) que, si l'image est plus petite que l'objet, l'ouverture côté image est plus grande dans la même mesure. Nous remarquons que l'objet du condensateur est la source; l'image de la source doit se trouver très voisine ou coïncider avec le plan objet du microscope. Par suite, quand nous voulons indiquer l'objet du condensateur, afin d'éviter confusion, nous disons "source"; "objet" indiquera par contre l'objet à observer, c'est-à-dire l'objet de l'objectif ou du microscope dans son complexe.

Le condensateur éclaire donc un champ-objet petit par rapport à la source, et d'ailleurs l'objet du microscope est en général petit; cependant le condensateur éclaire l'objet avec un faisceau d'ouverture beaucoup plus grande du faisceau qu'il reçoit de la source.

Dans la fig. 11, OB pourrait indiquer la source ou une partie d'elle; O'B' est l'image de la source projetée sur le plan de l'objet.

(fig. 11)



8.4 - ÉCLAIRAGE DIFFUS SIMPLE

Dans la fig. 28 est schématisé un objectif de microscope (Ob) avec l'objet O; est indiquée avec 2α l'ouverture angulaire de l'objectif; le faisceau éclairant (I) doit avoir une ouverture voisine à 2α pour obéir à la condition B indiquée dans le § 8.

D est une source étendue (un verre dépoli, par ex.), qui émet dans toutes les directions ou au moins dans un angle solide assez élevé, avec une luminance assez uniforme. Avec cette disposition on peut obéir à la condition A, mais pas à la C; en effet il n'y a rien qui limite le champ objet éclairé.

Le rendement photométrique sera petit étant donné qu'une bonne partie de la radiation émise par la source D, en étant en général diffuse, ira perdue puisqu'elle tombe au dehors du faisceau I.

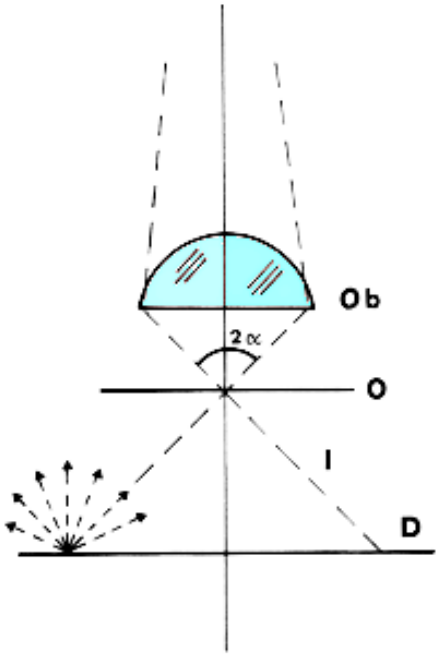


Fig. 28

Evidemment, le condenseur n'est pas prévu; le faisceau éclairant a quand même une grande ouverture à cause du pouvoir diffusant du verre dépoli.

Dans la condition B est prévu aussi que l'ouverture du faisceau éclairant I puisse être réduite; nous commençons en disant que les limites du faisceau I indiqués dans la figure sont les limites du faisceau effectivement utilisé par l'objectif mais la source D, comme on a dit d'abord, éclaire de manière diffuse et par suite avec un faisceau très ouvert. Si maintenant on met, à quelque millimètre ou centimètre sous l'objet, un diaphragme à iris ou une série de diaphragmes fixes interchangeables, on peut régler en quelque façon l'ouverture du faisceau I.

Eh bien, comme est elle réalisée la source D? On peut utiliser une ampoule électrique avec le bulbe dépoli ou, encore mieux, "couleur lait" ou "opale" placée immédiatement dessous la platine. Pour réduire l'effet de la chaleur produite par la lampe, on peut éloigner cette dernière, à 10 - 20 cm du microscope, mais il faudra évidemment par-dessous de la platine qu'il y aie un miroir orientable, la fonction duquel est évidente (voir aussi le § 22.1). On fasse attention que le miroir agisse comme diaphragme au sens qu'il peut limiter l'ouverture du faisceau qui, de la source, arrive à l'objet. D'autre part le miroir dont sont munis beaucoup d'instruments est plan d'un côté et concave de l'autre. Le côté concave a un pouvoir convergent pour lequel on augmente la convergence du faisceau que la source envoie en direction de l'objet. Ceci est un des rares cas dans lesquels on utilise le miroir concave (§ 22.1.4).

Si on ne dispose pas d'ampoule électrique, on peut utiliser le ciel comme source, naturellement avec le miroir, si possible concave. On rappelle que l'ouverture numérique d'un miroir concave du type usuel ne dépasse pas 0,3 et par suite elle est convenable seulement à des objectifs faibles.

Cette solution est utilisée avec des instruments très simples, par ce qu'ils ne demandent pas un condensateur. Elle peut donner des bons résultats avec des objectifs faibles et une ampoule opportune.

En principe on peut tout de suite régler le champ éclairé simplement avec un diaphragme centré, placé sous la platine. Une fois on utilisait les "diaphragmes à cylindre", des petits cylindres interchangeables avec un trou de diamètre différent ou les "diaphragmes à coupole", diaphragmes à iris avec des lames courbées vers le haut. Actuellement, dans les microscopes jouet il y a un disque tournant avec une couronne de trous de différent diamètre. Mais tels diaphragmes ne peuvent pas se trouver évidemment dans le même plan de l'objet; pour lequel leur efficacité est modeste.

Si on ne veut pas être lié à une ampoule avec bulbe diffusant, on peut réaliser la source éten-

due et diffuse (D dans la fig. 28) avec un filtre dépoli ou opale mis 1 - 3 cm sous la platine; on peut utiliser ainsi une ampoule normale à bulbe transparent. Beaucoup des "illuminateurs" économiques pour microscope sont constitués justement d'une enveloppe fixée au pied de l'instrument, contenant une ampoule normale à filament étendu, à tension de réseau, puissance 15 - 30 W. Vers le haut, il y a une fenêtre de 20 - 30 mm de diamètre, fermée par un verre dépoli.

8.5 – ÉCLAIRAGE DIFFUS AVEC CONDENSATEUR

Par rapport au schéma de la fig. 28 il y a de plus un condensateur, (K dans la fig. 29).

Reste la perte photométrique citée dans le cas précédent, étant donné que la source D est encore diffusante et beaucoup de son flux va par suite perdu. D peut être encore, et il sera en général, un filtre dépoli avec au-dessous une ampoule électrique quelconque (L), peut-être avec un miroir sphérique encore plus bas (S) pour renvoyer vers le haut une partie du flux qui irait perdu autrement.

Le condensateur K, en général, peut augmenter le flux qui traverse l'objet O par ce que il "concentre" le flux produit par D; il n'est pas possible de dessiner un schéma précis d'optique géométrique étant donné que le corps lumineux (le filament incandescent) est étendu et irrégulier et il y a au milieu un diffuseur, D.

On peut dire à la limite, que le condensateur K produit une image de D près de l'objet O, mais ceci ne doit pas être rigoureux étant donné que D a une structure discontinue, le "grain" du verre dépoli, et ses irrégularités ne doivent pas se trouver focalisées sur le plan objet.

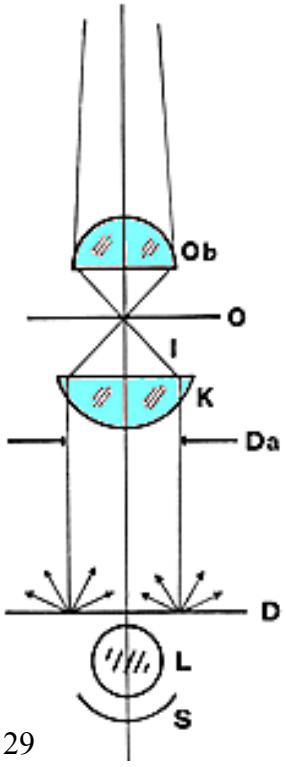
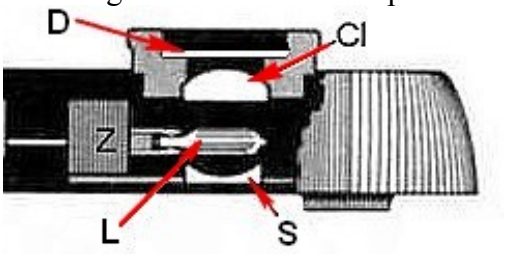


Fig. 29

Le condensateur peut porter un diaphragme d'ouverture (Da) dans son premier foyer et cela permet de contrôler l'ouverture du faisceau éclairant I (condition B cité au § 8). L'homogénéité du champ éclairé dépendra de l'efficacité du diffusant D (condition A).

Une autre adjonction peut être celle d'une lentille convergente de forte puissance, mise tout de suite au dessous du diffusant D et que nous pouvons appeler "**collecteur**". Sa fonction est encore une fois indéfinissable, étant donné que le diffuseur D empêche la formation de n'importe quelle image. Certainement le collecteur concentre sur D une partie du flux du corps lumineux L et il augmente le rendement photométrique du système. Autres illuminateurs économiques sont justement constitués par une ampoule à filament étendu, à tension de réseau (éventuellement avec un miroir sphérique par-dessous), un verre dépoli et une lentille convergente entre lui et l'ampoule.



Voilà un exemple d'éclairage diffus avec collecteur: l'ampoule L avec son socle Z se trouve prés du foyer du collecteur Cl. Au dessus de Cl on voit un filtre dépoli (D). Noter le miroir concave S.

Finalement il est possible de mettre près de D un diaphragme à iris, naturellement centré, qui limite les dimensions de la source (celle qui fait l'objet pour le condensateur K). À ce point on peut pas parler de formation d'image: si la position et la puissance de K sont bien choisies, K produit une image de ce diaphragme dans le plan de l'objet O. Le condensateur déroule donc pleinement sa fonction, décrite à son temps (§ 8.3); si le diaphragme est réglable, il est évident que changera aussi le diamètre de son image formée en O et, étant donné que telle image, réelle, peut

coïncider exactement avec le plan objet (il suffit de régler l'hauteur de K), on peut changer avec précision le champ éclairé, condition C cité dans le § 8. Le diaphragme mis près de D peut être appelé par suite "**diaphragme de champ éclairé**". Évidemment, il est distinct, et il déroule une fonction très différente, par rapport au diaphragme d'ouverture déjà cité.

Ce schéma est plus évolué: à part le miroir Sp, on voit un collecteur très raffiné à trois lentilles (Cl) et le diaphragme de champ éclairé (DC). Reste l'élément essentiel, le diffuseur (D).

Entre illuminateur et microscope il peut y avoir le miroir habituel pour éviter que l'illuminateur doive être comprimé dans un espace resserrée, entre platine et pied de l'instrument. Mais il s'agira ici toujours d'un miroir plan (Sp dans la figure précédente).

8.6 – ÉCLAIRAGE CRITIQUE (Brewster[34] 1832)

Nous abandonnons ici le champ des sources étendues et diffusantes pour nous dédier aux sources concentrées de forte luminance.

Regardons la fig. 30. Les symboles Og (objet), K (condensateur), Da (diaphragme d'ouverture) sont connus; **E** c'est le miroir (plan); **S** le corps lumineux.

Le principe est simple: le condensateur K donne une image réelle rapetissée de S dans le plan d'Og; l'ouverture du faisceau qui converge en Og se règle avec Da. Mais les problèmes sont nombreux: si le champ objet doit être éclairé uniformément, aussi la luminance de la source doit être uniforme; ceci était à peu près réalisé dans les sources à flamme (à pétrole avec mèche à ruban ou à gaz, en usage il y a un siècle), mais pas certainement dans les lampes électriques actuelles avec filament incandescent.

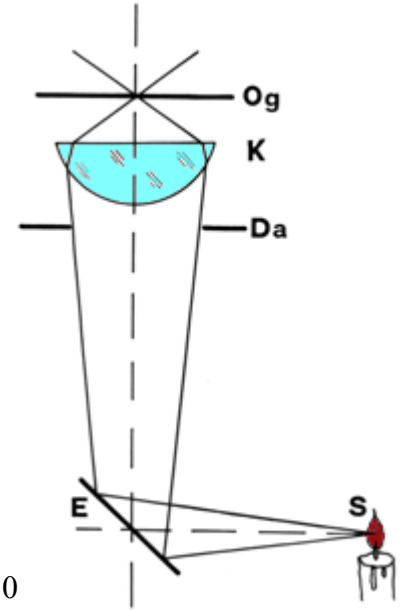


Fig. 30

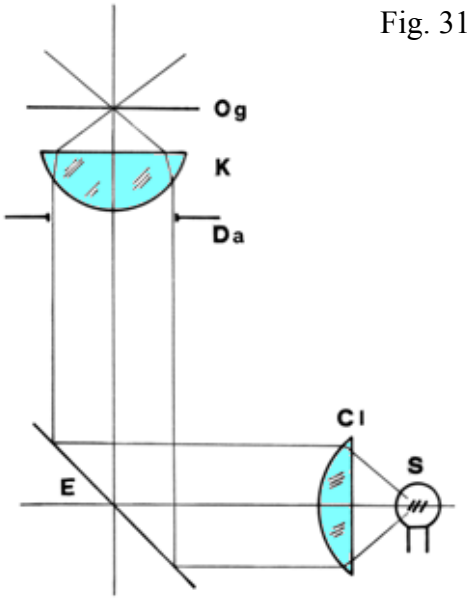
En outre, pour avoir un champ éclairé de quelques mm de diamètre (objectifs faibles) il faut des sources de grandes dimensions, qui n'existent pas dans le marché courant. Ce schéma est donc valide mais, avec quelque limitation, seulement pour des forts agrandissements.

En deuxième lieu il n'est pas possible de régler le champ éclairé, étant donné qu'on ne peut pas mettre un diaphragme à iris en S; on peut changer seulement chaque fois le condensateur ou sa focale. Le rendement photométrique est modeste, étant donné que le faisceau utile qui de S entre en Da est toujours étroit. Ce schéma a été donc abandonné à l'avantage du suivant.

[34] Sir David BREWSTER (pron. Brùuste), physicien anglais (1781-1868). L'attribution est donnée aussi parfois à Edward Nelson, lui aussi anglais.

8.7 - ÉCLAIRAGE CRITIQUE avec COLLECTEUR selon. Abbe[35]

Fig. 31



Par rapport au cas précédent, on ajoute un système convergent à forte ouverture, que nous pouvons appeler encore "**collecteur**" (Cl) près du corps lumineux S (fig. 31).

Cette fois S se trouve dans le premier foyer de Cl qui en produit une image « à l'infini ». Le condensateur K reçoit, pour chaque point de S, un faisceau parallèle qui est rendu convergent dans le second foyer de K; on trouve ici l'objet Og, qui est éclairé donc d'une image réelle de S; les dimensions de telle image, ou plutôt l'agrandissement du système Cl + K, dépend seulement du rapport de deux focales (de Cl et de K); mais l'image sera semblable en général à S, donc très petite; cette solution est encore convenable aux forts agrandissements.

Même dans ce cas le corps lumineux S doit avoir une luminance uniforme, à moins d'utiliser la lentille dépolie habituelle. Et il n'est pas possible ici aussi de changer les dimensions du champ éclairé.

Il y a cependant un avantage: le collecteur Cl accepte un angle solide de radiation de la part de la source S beaucoup plus ample que dans le cas précédent; il n'est pas difficile de faire quelque calcul en base aux dimensions essentielles du système, mais on peut tirer une idée intuitive de la comparaison entre la fig. 30 et la 31. Pour le plus grand rendement photométrique, ce schéma trouve encore quelque application aux forts agrandissements.

8.8 - ÉCLAIRAGE SELON les PRINCIPES d'A. KÖHLER[36] (1893)

Le développement des sources à filament incandescent, avec structure pas homogène, et les exigences photométriques de la photographie portèrent au développement, près des usines ZEISS, de ce système éclairant, qui répond aux trois conditions initialement décrites (§ 8). Il faut en parler diffusément étant donné qu'il constitue la base de la majorité des systèmes éclairants pour microscope, pour projecteurs, etc.

Dans la fig. 32 est dessiné le schéma général d'un microscope avec "**illuminateur de Köhler**" et nous l'examinerons en détail pour résumer tout ce qu'on a dit jusqu'ici. Dans l'illustration, pour simplicité, n'est pas indiqué le miroir ou les miroirs qui se trouvent normalement entre collecteur et condensateur; pour le même motif est représenté un objectif à conjuguée finie, mais ceci ne change pas beaucoup étant donné qu'un tel objectif déroule la même fonction d'un objectif à conjuguée infinie + lentille de tube (§ 3.2.3). Les symboles de la fig. 32 devraient être déjà tous connus. Avec des grosses flèches sont indiqués l'objet (O) ou ses images conjuguées; avec une ligne pointillée sont indiqués le corps lumineux Q et ses images conjuguées.

Les systèmes de lentilles (représentés comme lentilles simples) sont: Cl = collecteur; Ko = condensateur; Ob = objectif; LC = lentille de champ (l'oculaire représenté est négatif); LO = lentille oculaire. Les diaphragmes sont: Dc = diaphragme de champ éclairé; Da = diaphragme

[35] Ernst ABBE, physicien allemand (1840-1905), premier collaborateur scientifique de C. ZEISS, copropriétaire des usines Zeiss de Jena, grand innovateur en champ technique et social. L'optique moderne lui doit beaucoup.

[36] August KÖHLER (pron. Kööler), physicien allemand (1866-1948), collaborateur des usines Zeiss de Jena.

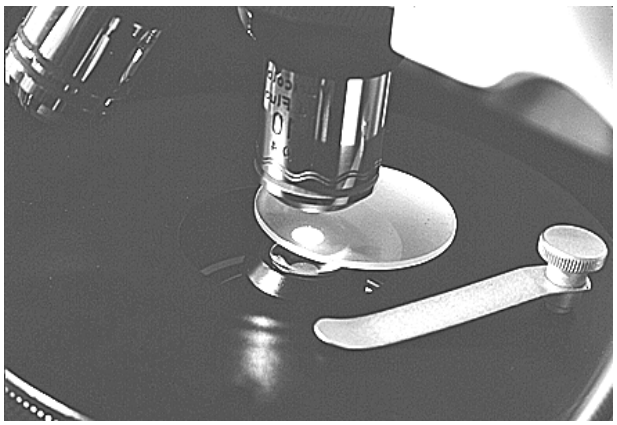
d'ouverture; PU = diaphragme ou pupille de sortie de l'objectif (en général tout près du second foyer d'objectif); DV = diaphragme de champ visuel; P = pupille de sortie de l'oculaire ou du microscope (disque de Ramsden, voir le § 4.4). R est la rétine de l'œil de l'observateur.

Dans la moitié gauche sont mis en évidence les plans conjugués de l'objet O, en indiquant un seul faisceau qui concourt en un seul point marginal de l'objet, pendant qu'à droite sont indiqués les plans conjugués de Q. Entre O et R se trouve le système formateur d'image; entre O et Q, le système éclairant. Nous sommes évidemment dans un cas de diascopie à fond clair.

Nous commençons par la gauche.

L'objectif forme une image d'O en DV; on peut dire qu'O est conjugué avec DV. En DV on trouve donc une première image agrandie, réelle, renversée, d'O, qui est l'image intermédiaire. En DV il y a aussi le diaphragme de champ visuel, tout ça dans le plan focal objet de LO (c'est-à-dire de l'oculaire). LO donne de DV et de l'image intermédiaire une image virtuelle à l'infini. Les milieux réfringents de l'œil donnent de l'image intermédiaire une image réelle (souvent rapetissée) en R (renversé par rapport à l'image intermédiaire même).

Maintenant, le condensateur Ko produit une image réelle rapetissée (inversée) de Dc en O, ou une image agrandie d'O en Dc; de toute façon O et Dc sont conjugués. Si la position de Ko est correcte, dans le plan d'O on voit au point l'image (rapetissée) de Dc (voir la fig. 81).



(Fig. 81)

Un verre dépoli disposé à la place de la préparation rend visible un petit cercle bien éclairé, qui est l'image du diaphragme de champ (**Dc**), produite par le condenseur**.**

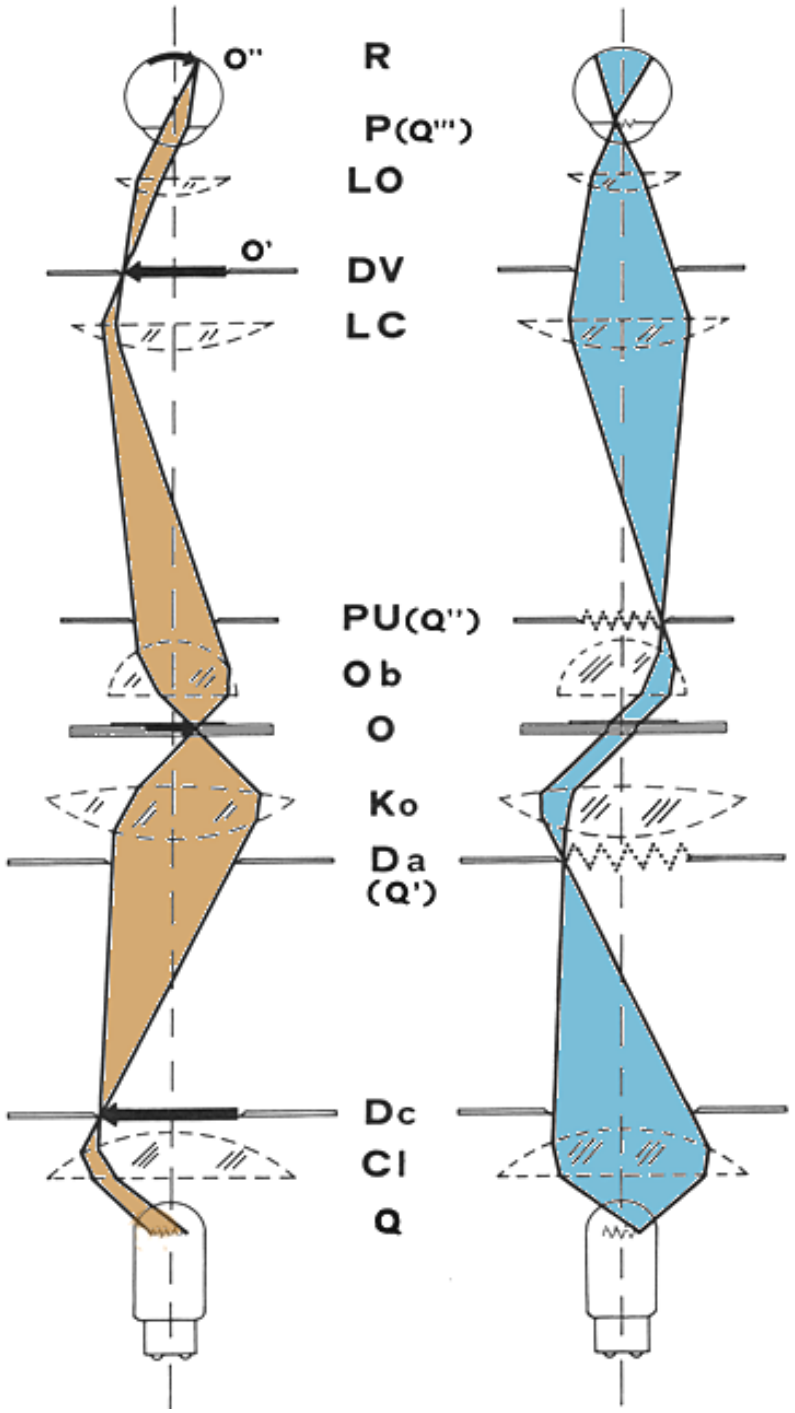


Fig. 32

En pratique, en regardant dans l'oculaire, on voit l'image virtuelle d'O, c'est-à-dire de l'image intermédiaire, on voit une autre image virtuelle de DV et finalement une image de Dc; ou au moins on peut voir les bords de Dc en fermant opportunément ce diaphragme. Donc de Dc on a les images suivantes:

1) réelle rapetissée en O; 2) réelle agrandie en DV (O');
3) virtuelle après LO; 4) réelle rapetissée en R (O'').

Il y a donc quatre plans conjugués réels et un virtuel par rapport à O ou à Dc[37].

[37] On tienne présent cette série de plans conjugués parce que, quand dans l'image apparaît un grain de poussière ou une autre tache sombre superposées à l'objet, cela signifie qu'un corps étranger se trouve sur la préparation ou sur le collecteur ou sur le réseau éventuel présent dans l'oculaire; plus nuancé apparaît un corps étranger sur la lentille oculaire ou ailleurs. Toujours pour réduire les surfaces conjuguées avec l'objet et avec l'image finale, il est bien que le diaphragme de champ soit plutôt loin du collecteur, justement parce que les éventuels corps étrangers sur Cl ne résultent pas au point dans le plan objet.

Avec DV on limite le champ visuel et par suite le champ de l'image intermédiaire et le champ objet. Avec Dc on règle le champ éclairé. On remarque que Dc, pour le collecteur Cl, agit comme un diaphragme d'ouverture, pendant que pour le condensateur Ko il représente un diaphragme de champ (objet).

Il peut arriver que les conditions mécaniques de l'instrument mettent Dc très loin de Ko pour quoi le champ éclairé en O devient trop petit pour les faibles objectifs. Dans tels cas, un des remèdes est de mettre au dessous de Da une faible lentille convergente ("**lentille à grand champ**"); elle fonctionne au point de vue de Ko comme une lentille d'agrandissement, au sens qu'elle renvoie au condensateur même une image virtuelle agrandie de Cl; telle lentille peut être fixe ou escamotable (dans le cas qu'on utilise des forts objectifs).

Pour obtenir des grands champs éclairés on peut recourir à d'autres expédients, comme nous verrons dans le § 21.1.

Maintenant nous voyons le côté droit de la fig. 32.

Nous partons du corps lumineux Q (par ex. le filament concentré d'une ampoule électrique à basse tension). À son égard, le collecteur Cl, qui est toujours un système convergent à forte ouverture et courte focale, agit comme fait l'objectif vis-à-vis de l'objet, et il crée une image de Q agrandie réelle en Da (Q') (schéma de la fig. 13); la distance entre Q et Cl doit être réglable, une espèce de mise au point, de manière que l'image de Q se forme dans le plan de Da.

L'illuminateur (Q + Cl + Dc) peut être fixe dans le pied de l'instrument et par suite precentré de la part du constructeur, ou externe ("**micro-lampe**"), uni plus ou moins rigidement au pied. Dans ce cas la microlampe sera montée en général avec un support articulé et elle sera orientée avec soin vers le miroir qui se trouve dessous le condensateur. À son tour le miroir sera orienté en manière que l'image de Q formée par le collecteur tombe exactement au centre de Da (instructions plus détaillées au paragraphe suivant).

De tout ce qu'on a dit plus haut, il résulte que l'ouverture maximum de Da consent au condensateur de fournir un faisceau éclairant au niveau d'O avec ouverture semblable à celle des objectifs forts. Tout au plus, si on ferme Da, on réduit l'ouverture du faisceau pour l'adapter à celle des objectifs faibles. Mais alors il en suit que l'ouverture maximum de Da doit être toute occupée par l'image de Q. Ceci comporte un équilibre délicat entre dimensions de Da et de Q et agrandissement de Cl (lié à sa focale et à ses conjuguées); il faut préter grande attention à ceci parce qu'il arrive souvent, même dans des instruments de grande valeur, de voir une image de Q beaucoup plus petite de l'ouverture maximum de Da; cela correspond à une fermeture de Da même, c'est-à-dire à une perte d'ouverture du condensateur, avec les conséquences que nous verrons.

Dans certains "**microlampes de Köhler**" on trouve une lentille dépolie entre Q et Cl ou une surface dépolie dans la première lentille de Cl; cela empêche la formation d'une image nette de Q, mais le champ éclairé est rendu évidemment plus homogène. La perte photométrique du verre dépoli est dans ces cas très petite, étant donné que Cl accepte un faisceau d'ouverture forte et bonne partie de la radiation diffusée par le dépoli est récupérée.

Mais nous continuons avec la partie droite de la fig. 32.

Il est indiqué un faisceau partiel qui émerge d'un point extrême de Q et traverse un point extrême de Q'; nous savons que Da et Q' se trouvent dans le plan focale de Ko ; donc le faisceau qui émerge d'un point quelconque de Q' par ex. un point sur le bord de Da, et qui est divergent, devient parallèle après avoir traversé Ko; chaque point de Q' produit un semblable faisceau parallèle; mais, si nous considérons les rayons principaux de tels faisceaux parallèles, ils sont différemment inclinés; en effet ils arrivent à Ko légèrement divergents entre eux et Ko les fait par suite converger un peu au-delà de son second foyer, c'est-à-dire dans le plan d'O, où se trouve l'image de Dc. Nous pouvons dire que l'objet est traversé par beaucoup de faisceaux singulièrement parallèles, mais que ces faisceaux dans l'ensemble forment un faisceau conique à forte ouverture. Telle ouverture se réduit évidemment en fermant Da.

On peut dire aussi que Ko conjugue Q' à l'infini, c'est-à-dire il en fournit une image virtuelle à l'infini (Q' est dans le premier foyer de Ko).

Eh bien, les infinis faisceaux parallèles, correspondants à tous les points de Q', de quelque façon inclinés sur l'axe, traversent l'objet et ensuite ils arrivent sur Ob; en étant divergents entre

eux, mais singulièrement parallèles, Ob les fait converger un par un dans son plan focale supérieur (PU). Se forme ici alors une deuxième image réelle de Q (Q"); on peut dire que Q" est conjugué de Q' et par suite de Q.

Q" se trouve dans le second plan focale d'Ob et on trouve d'habitude ici le diaphragme ou la pupille de sortie de l'objectif, étant donné que les objectifs sont souvent presque télécentriques (§ 5.2.8), mais celle-ci n'est pas une condition universelle. De plus Q' se trouve dans le plan de Da; il en suit que, dans le plan de PU, ne se trouve pas seulement Q" mais aussi une image renversée de Da; PU est conjugué donc de Q et de Q' comme de Da.

En regardant dans le tube du microscope, après avoir enlevé l'oculaire, on voit en effet la PU sous forme d'un disque éclairé et on peut y reconnaître une image un peu brouillée du filament de l'ampoule (Q), ainsi que les bords de Da; pour s'en convaincre, il suffit de manœuvrer Da et on verra le disque éclairé qui change de diamètre. On peut aussi mettre dessous Da la pointe d'un crayon et on verra son image renversée en PU.

Au dessus de PU il y a l'oculaire (la lentille de champ éventuelle ou la lentille de tube n'ont pas d'effet à ce point de vue) lequel, au-delà à produire l'image finale de l'objet, comme on a déjà dit, il produit une image rapetissée réelle de PU: c'est le "**disque de Ramsden**", cité à son temps, indiqué avec P dans la fig. 32. On a aussi expliqué que P se trouve un peu plus haut du second foyer de l'oculaire (dans les oculaires positifs) ou un peu plus en bas (dans les négatifs). Maintenant nous pouvons ajouter qu'en P, au-delà de la première image réelle de PU, il y a une deuxième image réelle de Da: en manœuvrant Da on verra le disque de Ramsden qui varie de diamètre; il y a aussi une troisième image réelle de Q (Q'"). L'image du filament est cependant difficilement visible dans cette position parce que trop petite et atteinte de trop d'aberrations. En P il faudra mettre la pupille de l'œil, autrement cette dernière "diaphragme" l'image finale, c'est-à-dire réduit le champ visuel (comme il devrait être évident de la fig. 33).

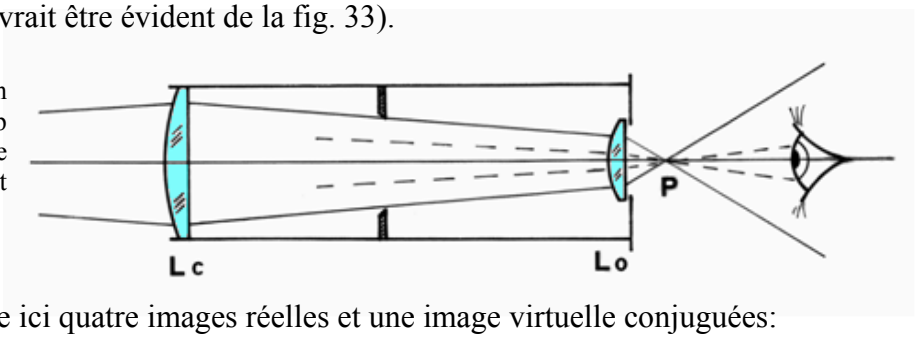


Fig. 33 – Schéma d'un oculaire négatif; si l'œil est trop éloigné de l'oculaire, sa pupille diaphragme le faisceau émergent et réduit le champ angulaire.

Nous avons donc même ici quatre images réelles et une image virtuelle conjuguées:

1) Q un peu avant le foyer de Cl;

2) Q' en Da = premier plan focale et pupille d'entrée de Ko;

3) Q" en PU, avec l'image réelle de Da, dans le plan focale supérieur de l'objectif, coïncidant souvent avec sa pupille de sortie;

4) Q'" en P, avec la deuxième image de Da et la première image de PU, le tout dedans la pupille de l'œil.

L'image virtuelle de Q se trouve à l'infini (entre Ko et Ob le faisceau est parallèle pour chaque point de Q').

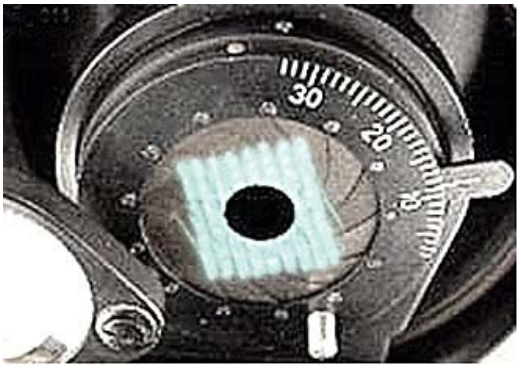
8.9 - ALIGNEMENT de l'ÉCLAIRAGE selon A. KÖHLER

De tout ce qu'a été dit il devrait être clair quelles sont les opérations nécessaires pour l'alignement du système éclairant. Mais nous voulons les résumer ici, en clarifiant tout de suite que les premières opérations sont superflues quand l'illuminateur est logé dans le pied du microscope ou de toute façon solidement fixé à lui.

1) Centrage du filament. Celui-ci est superflu quand le constructeur fournit des ampoules "precentrées", c'est-à-dire fixées solidement à un culot par lui même fourni (§§ 22.7 et 22.8); tel culot est conçu de façon à s'insérer avec une moindre tolérance dans un porte-culot prédisposé à ce but. Les culots des ampoules normales présentent des jeux, par rapport au porte-lampe, qui sont

excessifs pour l'usage en microscopie. Dans les ampoules "précentrées", le constructeur fixe d'une manière stable le culot originaire au culot additionnel de façon à neutraliser les imprécisions inévitables dans la position réciproque du filament par rapport au culot originaire.

Si l'ampoule n'est pas précentrée, il faut la centrer par rapport à l'axe du collecteur. Les modalités de cette opération doivent se déduire du § 22.8 ou du manuel d'instruction de l'instrument; en effet les différences mécaniques d'un statif à l'autre ne permettent pas de donner des règles générales.



2) Focalisation du filament. On doit pouvoir changer la distance entre corps lumineux Q et collecteur Cl. Même cette opération peut être impossible et inutile si l'ampoule est précentrée. Quand la focalisation est possible, en déplaçant axialement l'ampoule ou le collecteur (même ici les particularités mécaniques sont très variées) on doit voir l'image du filament le plus nettement possible dans le plan de Da (le fermer, comme dans la figure à côté). Si dans le collecteur il y a une surface dépolie, on ne verra pas une image nette et on cherchera l'éclairage maximal. Voir de toute façon le § 22.7.

3) Si la microlampe (ampoule + collecteur + Dc, etc.) est montée sur un support dénoué, il faut l'orienter en manière que l'image du filament tombe au centre du miroir interposé entre Cl et Ko et, ensuite, au centre de Da. Voir aussi le § 22.8.

4) S'il y a un miroir orientable, celui aussi doit être déplacé jusqu'à centrer l'image du filament en **Da** (voir la figure à côté). Pour mieux voir telle image, il convient fermer du tout Da. À ce point, on contrôle que l'image (Q') remplisse toute l'ouverture maximum de Da (dans la figure à côté cela n'est pas vérifié - voir plus haut et comparer avec le § 22.2).

5) Maintenant on insère sur la platine une préparation quelconque et un faible objectif. On regarde dans l'oculaire et on met approximativement au point la préparation. Dc doit être plus ou moins fermé. On doit voir une tache ronde lumineuse plus ou moins nette. En cas contraire, fermer Dc et/ou déplacer en hauteur le condensateur Ko. On règle l'hauteur de Ko jusqu'à quand le disque éclairé apparaît au point avec l'objet; celle-ci est la première image réelle de Dc.

Souvent, à cause de l'aberration chromatique d'un condenseur pas achromatique, cette image est entourée de bords colorés; focaliser Ko pour le meilleur compromis (bords cramoisis).

Cette opération va répétée quand on change la préparation pour tenir compte des variations d'épaisseur du porte-objet. Voir aussi le § 21.4.

6) Centrage du champ éclairé. Celle-ci et les opérations suivantes doivent être répétées chaque fois qu'on change l'objectif (ou aussi l'oculaire). On doit porter l'image de Dc en centre au champ visuel. Ce but peut être obtenu de manière différente selon le structure mécanique de l'instrument; il peut être mobile l'illuminateur entier ou le miroir interposé ou le condensateur ou une lentille intermédiaire, qui peut dérouler aussi les fonctions de "lentille à grand champ". Même ici on ne peut pas donner des règles générales (voir de toute façon les §§ 21.9, 22.1 et 22.9).

L'exigence de répéter ce centrage quand on change l'objectif dépend du fait que les différents objectifs montés sur l'instrument, en général sur un disque tournants nommé "**revolver**", ne se retrouvent pas sur le même axe à cause de différentes tolérances constructives: position des différents trous dans le revolver, position des encoches d'arrêt du revolver, position des systèmes optiques à l'intérieur des montures, etc. (voir le § 19.1.4).

7) Régulation du diaphragme de champ éclairé (Dc dans la fig. 32). En regardant dans l'oculaire, on règle, avec un levier, une roue ou autre, l'ouverture de Dc jusqu'à quand on voit éclairé tout le champ visuel, et pas plus. Une ouverture excessive de Dc porte à la perte de contraste à cause de la lumière diffuse à l'intérieur de la préparation et de l'objectif (§ 17.1.1). Probablement, à ce point il faudra retoucher le centrage du champ éclairé (point 6) et l'hauteur du condensateur (point 5). Dans certains cas, on peut voir dans le plan objet une image du "grain" de quelque surface dépolie présente dans l'illuminateur; il faut alors retoucher l'hauteur du condensateur.

La régulation du diaphragme Dc va répétée chaque fois que change le champ objet: changement de l'agrandissement de l'objectif, de l'index de champ de l'oculaire ou d'un facteur de tube.

8) Régulation du diaphragme d'ouverture du condensateur (Da dans la fig. 32). On enlève l'oculaire pour observer la pupille de sortie de l'objectif (PU) et l'image de Da présente en elle. Dans les meilleurs statifs on exécute cette observation en insérant plus confortablement entre objectif et oculaire la "**lentille d'Amici-Bertrand**" ou en remplaçant l'oculaire avec un "**microscope auxiliaire**" (accessoire normal pour le contraste de phase, dont on va reparler dans le § 19.5.5).

Quoi que se sois, pendant qu'on observe PU, on règle Da jusqu'à que son image apparaît un peu plus petite que PU. Il peut arriver que PU apparie trop sombre et on ne distingue pas ses bords: il est suffisant d'insérer une préparation très coloré ou avec des structures diffusantes.

Une fermeture excessive de Da, comme nous dirons plus loin, provoque une augmentation du contraste et de la profondeur de foyer (§ 14.1), mais elle diminue la luminosité de l'image et surtout la résolution. La régulation de Da doit donc être effectuée en relation à la nature de l'objet et aux résultats qu'on cherche; mais on rappelle que les objectifs de mauvaise qualité, affectés de forts aberrations, gagnent une amélioration de définition de la fermeture de Da au-delà de ce que serait demandé par la valeur optimale pour la résolution globale. Sur ce conflit entre définition et résolution nous reviendrons plus loin (§ 18.10).

8.10 - Le RENDEMENT PHOTOMÉTRIQUE du SYSTÈME ÉCLAIRANT

Comme sera répété en parlant de la "luminosité" de l'objectif et du condensateur, l'éclairement dans l'image finale est proportionnel au carré de l'ouverture du condensateur[38] (ou de l'objectif, si cette dernière est plus petite) et inversement proportionnel au carré de l'agrandissement total du microscope. De plus, il est proportionnel à la transparence globale du système (liée aux pertes pour absorption, pour réflexion sur les surfaces, etc.) et à la luminance ou brillance de la source. Voilà pourquoi, quand on cherche une forte luminance du faisceau qui éclaire l'objet (fluorescence, projection, etc.), on cherche des sources avec un corps lumineux à luminance élevée (sources à arc): la luminance du tungstène incandescent (sources à incandescence) ne peut pas augmenter sans augmenter la température et il y a par suite une limite dûe à la température de fusion du métal.

Pour réduire les pertes pour réflexion à la surface de tous les éléments transparents de l'instrument, on utilise depuis longtemps les "**traitements anti-réfléchissants**" (voir le § 17.1) mais ceux-ci ne sont pas dénués de contre-indications:

-- ils sont souvent délicats et ils supportent mal le nettoyage avec des moyens mécaniques;

-- leur efficacité dépend de l'angle d'incidence du faisceau qui les traverse; pour ça ils ne sont pas toujours efficaces sur toute la surface d'une lentille; et cette perte d'efficacité est évidemment plus grande avec les lentilles les plus recourbées;

-- dans les systèmes qui travaillent en UV ou IR (fluorescence, par ex.) ils ne sont pas toujours efficaces au dehors du spectre optique.

D'ailleurs, une évaluation du rendement photométrique d'un instrument suppose qu'on tienne compte aussi de la sensibilité spectrale du récepteur, spécialement quand il s'agit de systèmes de reprise électronique. Beaucoup de systèmes (lentilles, traitements anti-réfléchissants, miroirs, etc.) sont en général optimisés pour la région centrale du spectre optique, c'est-à-dire pour l'observation visuelle, et seulement pour celle-là.

On doit tenir compte en outre du fait que la transparence du système peut diminuer avec le temps pour différentes raisons:

-- ternissement des surfaces optiques par dépôt d'aérosol (goudron et autre, suspendus dans

[38] Quand on parle d'ouverture utile du condensateur, on suppose que toute sa pupille d'entrée (la surface utile du diaphragme d'ouverture) soit entièrement et homogènement éclairée par l'image de la source.

l’air), poussière ou autre saletés;

-- opacification des ciments des lentilles composées;

-- opacification de la surface interne de l’ampoule, spécialement si au tungstène (pas “aux halogènes”) ou à arc.

La transparence totale est le produit de la transparence des différents éléments.

On peut prévoir un vieillissement éventuel des composants électriques ou électroniques de l’alimentation de la lampe qui peut réduire la tension ou le courant de sortie (oxydation des contacts, dérive thermique ou vieillissement de composants, etc.).

9 – La PUPILLE de l'OCULAIRE

On fasse toujours référence à la fig. 32.

Il devrait être clair que P, c'est-à-dire la pupille de sortie de l'oculaire, au-delà d'être l'image de la pupille d'objectif PU, est elle même la pupille de sortie du microscope dans son complexe: comme on a expliqué, tout le faisceau émergent du microscope a comme son point plus étroit, comme son diaphragme, justement P. D'ailleurs, l'image intermédiaire et l'image finale sont formées de toute façon par les rayons qui passent par PU; donc, si PU est la pupille de sortie de l'objectif, P est la pupille de sortie de l'oculaire; en effet, l'oculaire n'aurait pas de soi même autre diaphragme d'ouverture que la monture de la lentille oculaire; mais ce qui limite le diamètre du faisceau qui traverse cette lentille n'est pas un diaphragme physique mais seulement l'image de PU. Étant donné qu'au-dessus de l'oculaire, en principe, il n'y a pas d'autres systèmes essentiels, la pupille d'oculaire est aussi celle du microscope.

Mais maintenant une autre considération: en PU (et par suite en P) il y a aussi une image de Da; le diamètre de PU est fixe (il est lié à la structure de l'objectif), mais le diamètre de l'image de Da dépend de:

1) la régulation de Da;

2) la focale du condensateur (f_k);

3) la focale de l'objectif (f_{ob}).

Ou mieux, entre Da et son image en PU on peut établir un rapport d'agrandissement:

$$M_D = f_{ob} / f_k \qquad (27)$$

ou MD est l'agrandissement de l'image de Da (dans PU) par respect à Da même et f_k est la focale du condenseur.

Même s'il est établi le type de condensateur et d'objectif plus convenable pour une certaine observation, la régulation de Da est toujours possible. Le diamètre utile de l'image de Da (dans PU) peut donc être réduit par la régulation de Da et autant on peut dire de P. Entre le diamètre de PU et celui de P, c'est-à-dire entre les diamètres des images de Da qui se forment en PU et en P, il est encore possible d'établir un rapport d'agrandissement, ou mieux de réduction, étant donné qu'il sera toujours plus petit de 1. Tel rapport est calculable aisément, étant connue la focale de l'oculaire et la distance objectif-oculaire (voir la formule (15) en 2.6.2.2). On peut aussi calculer directement le diamètre de P ($Ø_P$) à partir de l'ouverture de l'objectif (NA) et de l'agrandissement visuel total du microscope (V_M):

$$Ø_P = 500\ NA / V_M = 2\ NA\ f_{oc} / M_{ob} \qquad (28)$$

(on rappele: $V_{oc} = 250/f_{oc}$; donc: $f_{oc} = 250/V_{oc}$ et $V_M = V_{oc} \cdot M_{ob}$)

Alors: $Ø_P = 2 \cdot 250\ NA / V_{oc} \cdot M_{ob} = 2\ NA \cdot 250/V_{oc} \cdot M_{ob} = 2\ NA\ f_{oc}/M_{ob}$).

Mais il est plus simple de mesurer directement le diamètre de P, ou plutôt de l'image de Da qui se forme en P: il suffit d'éclairer bien le condensateur, en s'assurant que toute sa pupille, c'est-à-dire le diamètre maximum de Da, sois éclairé par l'image de la source et que l'ouverture du condensateur même ne soit pas inférieure à celle de l'objectif. Puis on pose une feuille de papier millimétré sur l'oculaire, en tâchant d'avoir sur le papier une image la plus nette possible du cercle de Ramsden (P). Pour chaque triade condensateur-objectif-oculaire, supposée l'absence d'autres systèmes intermédiaires, on pourra mesurer un diamètre maximum et minimum de P, à la suite de la manœuvre de Da. On verra que P sera plus petite avec les objectifs et les oculaires les plus forts; les raisons de cette affirmation sont à chercher dans la focale évidemment plus petite des systèmes plus forts.

Mais pourquoi nous nous intéressons tellement au diamètre de P ($Ø_P$)? En photographie, en ef-

fet, il n'y a pas en général des limites. Mais en vision ? En P, on a expliqué, on doit mettre la pupille de l'œil, étant donné que il n'aurait pas des sens ailleurs (fig. 33); non seulement, mais il faut que l'œil accueille entièrement le faisceau qui converge en P. Il faut donc que le diamètre de la pupille de l'œil soit au moins égal à celui de P. Maintenant il est bien connu que la pupille de l'œil change de diamètre quand change le flux de radiation qu'il reçoit et il y a en outre des variations individuelles, accidentelles, etc. Il faut donc partir d'un diamètre "moyen" conventionnel de 2 mm, qui est la valeur pour laquelle le système optique de l'œil "moyen" a la meilleure résolution. Il est évident que $Ø_P$ doit être toujours plus petit de 2 mm. En cas contraire, la pupille de l'œil "diaphragme" P, au sens qu'elle en limite le diamètre utile, et il résulte par suite réduit aussi le diamètre utile de PU, c'est-à-dire l'ouverture utile de l'objectif. Et nous verrons que ceci endommage l'image en beaucoup de sens.

De la formule (26) on peut tirer quelque valeur utile. Nous mettons le cas d'un faible objectif 10 / 0,30 (M_{ob} = 10:1 et NA = 0,30) et d'un objectif fort 100 / 1,25. Nous supposons d'utiliser toujours un oculaire très diffus: le 10×. L'agrandissement total V_M sera dans les deux cas:

$$V_M = 10 \times 10 = 100 \quad \text{et} \quad V_M = 100 \times 10 = 1.000$$

Nous aurons, toujours dans les deux cas (voir la (26) - $Ø_P = 500\ NA / V_M$):

$$Ø_P = 500 \cdot 0{,}3 /100 = 1{,}5 \text{ mm} \quad \text{et} \quad Ø_P = 500 \cdot 1{,}25 /1.000 = 0{,}625 \text{ mm}.$$

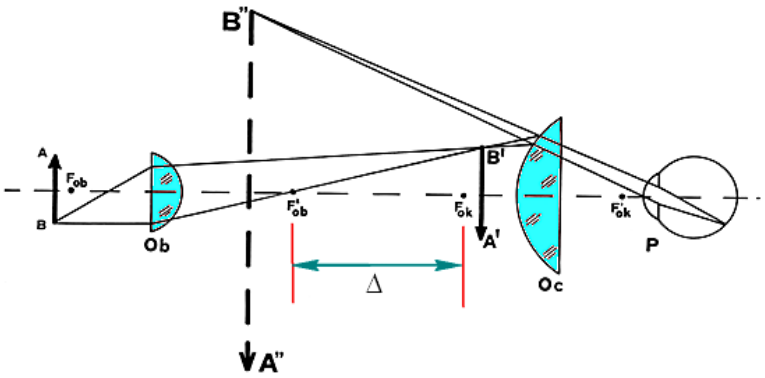
Comme on a déjà expliqué, voilà que les objectifs les plus forts et les oculaires les plus forts fournissent en général un diamètre plus petit de P, mais aussi les plus faibles font difficilement dépasser le diamètre conventionnel de 2 mm de la pupille de l'œil. Si telle valeur de $Ø_P$ en conditions spéciales venait dépassée, on peut en tirer de toute façon avantage dans la photographie, étant donné qu'il y n'a plus la limite imposée par l'œil.

Il semblerait en chaque cas qu'on ait tout avantage à avoir une petite valeur de $Ø_P$. Mais, pardessous d'environ 1 mm, il naît un nouveau problème, celui qui se présente quand on regarde le monde autour soi à travers un carton percé d'un trou d'épingle: l'ouverture de l'œil est réduite par P et ils résultent plus évidentes (au sens qu'elles produisent des ombres plus contrastées) toutes les irrégularités qui se trouvent dans l'œil ou dans les plans conjugués: égratignures, poussière, etc. sur la surface des lentilles, grains ou cellules suspendues dans les humeurs de l'œil, etc. Ces dernières se remuent lentement étant donné qu'elles sont suspendues dans un milieu liquide ou gélatineux et donc elles sont nommées "**mouches volantes**". Et l'expérience montre ainsi que, avec des petites valeurs d'$Ø_P$ (forts agrandissements totaux V_M, forte fermeture de Da) l'image se remplie de taches sombres et la propreté des lentilles de l'oculaire devient plus critique.

10 - La LONGUEUR du TUBE

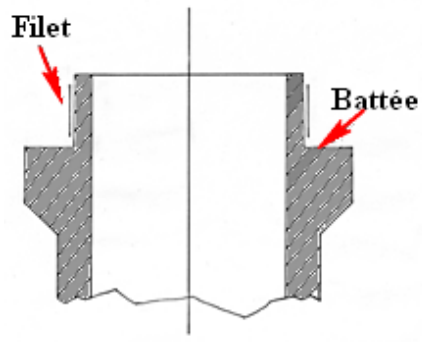
Nous reprenons la fig. 20 (§ 4.4). Nous évitons de reprendre la fig. 32 étant donné que dans cette dernière est représentée une lentille de champ qui complique les choses.

Dans la fig. 20 sont indiqués les foyers d'objectif et d'oculaire (F_{ob} et F_{ok}); en particulier le second foyer de l'objectif est F'_{ob} et le premier foyer de l'oculaire est F_{ok} (où doit se trouver l'image intermédiaire A'B' si l'instrument est correctement mis au point).



Eh bien, la distance F'_{ob} - F_{ok}, indiquée avec la lettre grecque **d** (delta) majuscule, c'est-à-dire avec Δ, est appelée "**longueur optique**" du tube du microscope. Elle correspond pour l'objectif au symbole **x'** de le la figure 11 ou 13 (§ 2.6.2.2) c'est-à-dire au "tirage" photographique. Cette grandeur Δ ou **x'** est utile pour calculer l'agrandissement M selon la formule (14)(toujours dans le § 2.6.2.2), mais en pratique elle est difficilement connue avec exactitude, en étant liée à la position des foyers ou des points principaux, qui n'est jamais expliquée par les constructeurs et qui ne peut pas être déterminée aisément. On peut déterminer seulement la position de F_{ok} avec des simples moyens (un calibre par ex.) dans les oculaires positifs - étant donné que F_{ok} se trouve dans le plan du diaphragme de champ visuel DV qui est accessible du bout inférieur de l'oculaire - mais est comprise entre les deux lentilles dans l'oculaire négatif.

La position de F_{ok} à l'intérieur du tube, pour un même constructeur, devrait être la même pour tous les oculaires; d'un constructeur à l'autre, cette position, c'est-à-dire la distance de $\mathbf{F_{ok}}$ du bord supérieur du tube porte-oculaires, varie de 10 à 20 mm, même si la tendance est pour une valeur standard de 10 mm. Celle-ci est la position nominale de l'image intermédiaire.



Maintenant nous parlons de la "**longueur mécanique**" du tube du microscope, indiquée avec **Lm,** qui est une grandeur mécanique: dans chaque "tube" de microscope il y a un trou inférieur avec un bord sur lequel s'appuie une "**battée**" spéciale de l'objectif quand on le vise, et il y a un bord supérieur sur lequel s'appuie une saillie proéminente de l'oculaire, aussi définissable comme "**épaule**", quand ce dernier est enfilé dans le tube.

Dans un tube simple et droit, sans systèmes interposés, ni lentilles, ni prismes, la distance entre ces deux bords est la longueur mécanique **Lm**.

Dans les microscopes avec des objectifs à conjuguée finie, la valeur de **Lm** change d'habitude de 160 mm, la valeur la plus diffuse, à 170 mm (Leitz et Meopta vieux modèles, Stiassnie, etc.) ou 185, 210, 240, 250 mm (certains microscopes métallographiques), etc.

Il est mieux tirer au clair que souvent, à l'intérieur du tube, il y a des parties optiques intermé-

diaires qui modifient le parcour des rayons, déplacent l'image intermédiaire et obligent à changer la position de F_{ok} et la longueur géométrique du tube sans cependant changer la conjuguée (virtuelle) de l'objectif et par suite la **longueur équivalente du tube Lm**. Il suffit de penser au TELAN, décrit dans le § 3.2.2.

En pratique, spécialement avec les tubes repliés, "coudées", bioculaires, etc. il est presque impossible de mesurer **Lm**, mais le constructeur la déclare toujours, quand il est sérieux. En effet, en absence des données du projet, il faudrait tenir compte du chemin optique à l'intérieur des prismes, donc de l'avancement d'image qui est lié à l'index du verre, etc.

Le **Lm** est normalement fixe. Il peut être variable dans trois cas:

1) instruments de vieille construction;

2) cas très spéciaux;

3) tube bioculaires du type "à glissières"; de ceux-ci nous parlerons plus loin (§ 24.1.3).

On tienne présent de toute façon qu'une variation de la longueur mécanique **Lm** équivaut à un déplacement de la position du foyer F_{ok} de l'oculaire et à une variation des conjuguées de l'objectif. Tout ceci est à éviter, parce qu'il produit quelques effets négatifs: perte de parfocalité des objectifs (§ 19.1.2); variation de l'agrandissement; apparition d'aberrations (§ 13.2.3). Pour ça il faut faire bien attention dans l'usage de certains instruments bioculaires ou dans la substitution des oculaires pour éviter les variations de **Lm** (voir aussi le § 19.1.2). Il est clair qu'un constructeur sérieux veille pour que, quelque soit la composition d'un instrument, qui est de plus en plus modulaire, et n'importe quel accessoire prévu par le projet soit inséré entre objectif et oculaire, le **Lm** équivalente ne change jamais; tous les accessoires donc doivent être toujours parfocales entre eux[39] et ne doivent pas altérer la parfocalité entre les objectifs (§ 19.1.2) ni l'agrandissement. En certains cas, un changement d'agrandissement est admis en vérité, mais jamais une perte de mise au point.

Pour les objectifs à conjuguée infinie, le tube ne peut pas être plus court que la focale de la lentille de tube (qui était de 250 mm traditionnellement, mais est réduite actuellement de la part de nombreux constructeurs). Mais, dans ce cas, la distance mécanique réelle ou équivalente entre objectif et oculaire peut changer entre amples limites sans altérer substantiellement le fonctionnement du système, parce que, comme on a expliqué au § 3.2.3, la distance entre objectif et lentille de tube n'est pas définie. Donc, dans les instruments "à conjuguée infinie" la longueur optique du tube doit être conçue seulement comme distance entre lentille de tube et F_{ok}, qui doit être égale à la focale de la lentille de tube même. La notion de longueur mécanique perd tout sens.

Si d'ailleurs on veut mesurer la longueur mécanique **Lm** d'un instrument inconnu à conjuguée finie, le procédé est simple: utilisez un oculaire positif - on mesure le diamètre du diaphragme de champ visuel (c'est-à-dire **s'**) avec un calibre (ne pas se fier de données nominales) - on mette en marche l'instrument avec cet oculaire et on mette au point un micromètre objet (§ 12.1) avec un objectif dont on connait la longueur **Lm** nominale - on mesure la longueur de la graduation du micromètre qui est comprise dans le diamètre du champ visuel (**s'**). Du rapport des deux grandeurs on tire l'agrandissement effectif de cet objectif sur le tube inconnu.

On compare telle valeur avec la valeur nominale d'agrandissement et de l'écart entre les deux valeurs on tire le rapport entre la **Lm** de l'objectif utilisé pour l'essai (qui est connue) et celle de l'instrument inconnu.

Si on veut une précision plus grande (les valeurs nominales de l'agrandissement sont sujettes à une tolérance qui peut arriver à 5 %) on répète la mesure avec tous les objectifs à disposition et on fasse la moyenne de valeurs obtenues.

[39] Nous entendons dans ce contexte que tous les accessoires doivent être quipollents au point de vue de la mise au point, de l'agrandissement, etc. Une perte de mise au point quand on éxtrait ou on insère un tube intermédiair ou autre chose (prévue par le projet) entre objectif et oculaire est un preuve d'une faute de projet ou d'assemblage (ou de simple négligence du projeteur ou du constructeur).

11 – Les PRISMES

Nous avons déjà expliqué que la grande majorité des lentilles (ou systèmes de lentille) d'un microscope est donné par des lentilles convergentes, et de toute façon par des lentilles sphériques centrées sur un axe commun.

On trouve des lentilles divergentes seulement dans certains objectifs «plans», dans certain systèmes intermédiaires (TELAN, variateurs d'agrandissement, etc.), dans des très rares oculaires forts et dans certains oculaires photographiques, aujourd'hui en désuétude (les "Homal" de Zeiss, par ex.). On trouve des lentilles asphériques seulement dans certains condensateurs ou collecteurs (voir plus loin).

Quand par contre on doit dévier un faisceau de rayons, sans en changer la convergence, on utilise des surfaces planes, rarement miroirs (dans le système éclairant ou dans certains tubes), plus souvent prismes à réflexion interne ou totale.

On a expliqué dans le § 2.3.2 comme opère la réflexion totale et il est calculé que, pour un verre léger normal, une incidence de 45° pour un rayon qui se propage dans le verre porte justement à la réflexion totale.

À ce point, il est clair comme opère un prisme à section de triangle rectangulaire isocèle comme celui qui est représenté en section dans la fig. 34 A; un faisceau d'ouverture modeste frappe perpendiculairement sur un des côtés du prisme. Le faisceau frappe à 45° sur la face hypoténuse et il frappe encore à 0° sur l'autre côté.

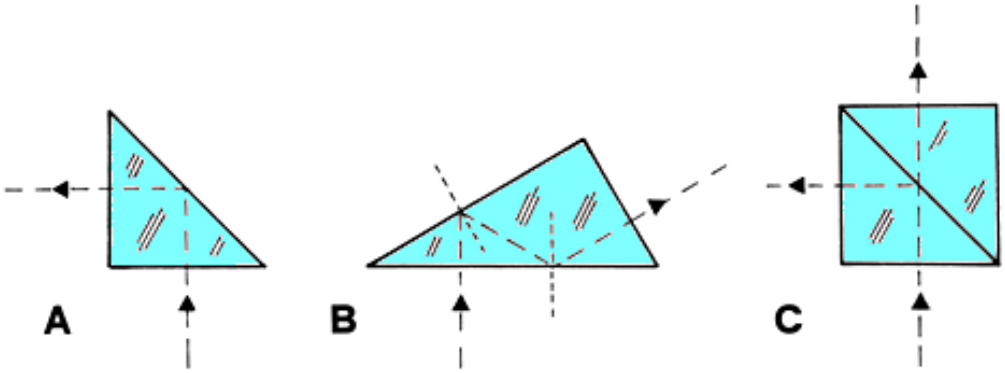


Fig. 34

Dans cette réflexion, le faisceau n'est pas dispersé (les lois de la réflexion sont achromatiques). Le prisme se conduit comme un miroir, avec quelque avantage pratique (voir plus loin).

En 34 B c'est le schéma d'un prisme qui, avec deux réflexions internes, incline la direction d'un faisceau, comme il est demandé dans les tubes inclinés "coudés" (§ 24)[40]. Ici la première surface n'opère pas en réflexion totale et elle doit être argentée ou aluminée. Pourquoi on utilise un prisme à deux réflexions au lieu d'un miroir simple est expliqué dans le § 24.

Un prisme comme celui de la fig. 34 C est un cube divisé en deux moitiés égales par une surface diagonale à 45° sur les faces du cube. Sur telle surface peut être déposée une couche métallique mince ou une série de couches interférentielles qui fonctionnent comme miroir semi-réfléchissant. Une partie du faisceau continue inchangé en sortant de la face opposée du cube, l'autre partie est déviée. En somme le faisceau est dédoublé en deux moitiés géométriquement identiques et photométriquement égales ou différentes.

Ces prismes **semi-réfléchissants** ou "séparateurs" sont utilisés souvent en microscopie pour avoir deux images intermédiaires identiques destinées à deux oculaires distincts ou à deux buts différents (par ex.: vision-photographie, ou photographie-esposimétrie, ou vision-canal TV, etc.). Ils vont sous le nom anglais de "**splitter**" ou aussi "**beam splitter**".

---

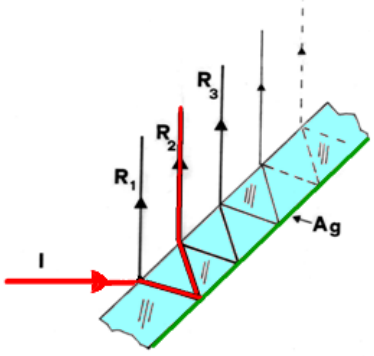
[40] Ce prisme est parfois attribué à J. J. von Littrow, astronome de Bohème (1781 – 1840).

Les splitter peuvent servir aussi, avec un sens inverse de propagation des faisceaux, pour superposer deux faisceaux différents, comme dans les "tube de dessin" (§ 27.7.2): une espèce de "mixeur optique". Il y a de plus des combinaisons de prismes ou des prismes complexes qui servent au redressement des images, comme dans les microscopes stéréoscopiques (§ 29.2), dans les viseurs photographiques et ailleurs.

Les miroirs et les prismes, malheureusement, altèrent l'état de la radiation polarisée qu'ils réfléchissent. En conséquence, les organes contenants des miroirs ou des prismes (tube porte-oculaires {voir le PS, en bas}, tubes intermédiaires, etc.), ne sont pas utilisables dans les microscopes polarisateurs sans des astuces spéciales.

Les avantages du prisme à réflexion totale par respect au miroir sont:

1) la réflexion est "totale", 100 %, sans pertes, à moins que la surface réfléchissante vienne métallisée, comme parfois on fait pour éviter la nécessité d'un nettoyage périodique;



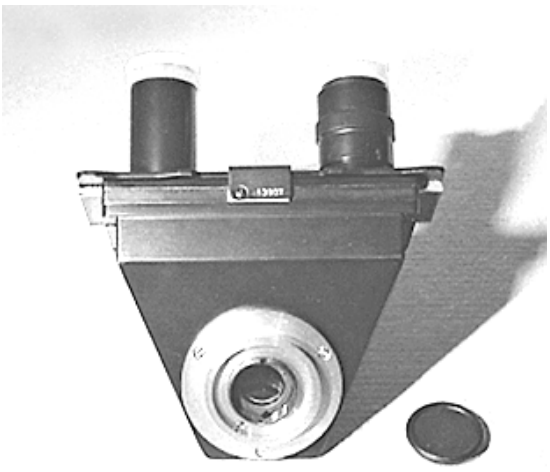
2) il n'ya pas de réflexions parasites, comme il arrive dans les miroirs "postérieurs" dans lesquels la surface postérieure d'une lame de verre est métallisée (miroirs normaux); en regardant l'illustration 91 (dans le § 22.1.1 ou ici à côté), on comprend que les réflexions multiples peuvent se superposer et ne pas être remarquées quand l'incidence est normale (perpendiculaire), mais elles se séparent quand l'incidence augmente. En autres mots, un miroir normal avec incidence 45° crée, à côté du reflet principal, une série de reflets plus faibles dus à la première surface non métallisée de la lame en verre: images multiples, perte de contraste;

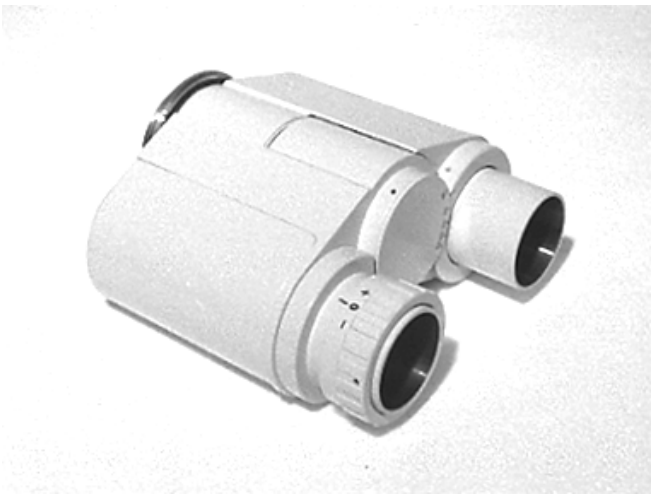
3) on peut éliminer le problème des reflets parasites en métallisant la surface antérieure de la lame de verre d'un miroir normal ("**miroirs de surface**", § 22.1), mais la couche métallisée est délicate et ne supporte pas un nettoyage par frottement; même une protection avec une couche de monoxyde de silicium vaporisé sous vide n'aide pas beaucoup; les surfaces d'un prisme par contre, en étant en verre, peuvent être nettoyées avec des moyens normaux.

PS: Dans le texte qui suit, on parle souvent de «tubes porte-oculaires». Dans le cas des tubes bioculaires, il y a deux tubes parallèles, un pour chaque oculaire, en général très courts, parfois réglables en longueur pour la compensation des anisometropies ou de la variation de la distance pupillaire.

Dans ce cas, chacun des deux tubes est appelé en allemand "Stutzen" (= raccord, embout) et en anglais "sleeve" (= manchon, douille).

Comme on dira dans le § 24.1.3, les tubes porte-oculaires sont de deux types principaux: à glissières (figure à gauche) ou du type Siedentopf (à droite). Dans le premier cas, la variation de la distance inter-pupillaire fait varier la longueur mécanique du tube (Lm) et par conséquence l'agrandissement, la parfocalité, etc.





12 - La MESURE de l'AGRANDISSEMENT

Dans les chapitres précédents on a vues les formules pour le calcul de l'agrandissement (ou **grandissement**), terme qui est utilisé pour les images réelles, indiqué par la lettre **M**, soit du **grossissement,** dans le cas des images virtuelles**,** indiqué par la lettre **V**.

Voyons comme il est possible d'effectuer ce calcul sur la base des données connues ou de mesures.

L'utilité de connaître le grossissement d'un microscope avec une bonne précision se présente quand on exécute des mesures géométriques sur les objets observés, quand on exécute des comptages de particules sur une surface donnée de la préparation, etc. Les données fournies par beaucoup de constructeurs modernes ne sont pas exactes (voir le § 12.8) et il y a des différences sensibles entre différents systèmes optiques, même s'ils viennent du même constructeur et avec le même agrandissement nominal; d'ailleurs nous savons déjà (voir la formule (13), la (14), etc.) comme l'agrandissement dépende de la longueur du tube et d'autres caractéristiques géométriques qui, dans l'instrument particulier, sont toujours affectées par quelque "tolérance" de construction. Il faut donc exécuter des mesures spéciales sur les objectifs particuliers, oculaires, etc. montés sur un statif donné avec des accessoires donnés.

12.1 – Les MICROMÈTRES, les LAMES et les LAMELLES

Les micromètres sont des graduations ou échelles graduées gravées sur une petite lame en verre à surfaces planes et parallèles.

Si la graduation doit être observée à travers le microscope entier, elle doit être déposée sur la "platine" et elle est gravée sur une normale "**lame porte-objet**" (dorénavant nous dirons simplement «**lame**»), avec les dimensions standard de 25 × 75 × 1 mm (environ 1" × 3"); telles petites lames représentent le support normalement utilisé pour les objets destinés à l'observation en diascopie au microscope. La graduation devient ainsi une normale "préparation" et s'appelle donc "**micromètre-objet.**" L'objet pour le microscope diascopique est protégé en général par une lame mince en verre, dite "**lamelle**" ou "verre **couvre-objet**" qui est plus petite que le porte-objet et qui a des buts différents: protéger l'objet des agents mécaniques, de la dessiccation et de l'oxydation; créer vers l'objectif une "fenêtre" d'observation optiquement plane et parallèle pour l'objet, etc. Même le micromètre-objet sera en général protégé par une lamelle. Nous verrons dans le § 13.2.3.3 l'importance optique de la lamelle et de son épaisseur.

Dans d'autres cas la graduation doit être observée à travers l'oculaire; elle sera posée donc dans le plan de l'image intermédiaire, c'est-à-dire du diaphragme de champ visuel, à l'intérieur de l'oculaire. Telle graduation sera déposée sur un petit disque en verre, de diamètre opportun, entre 16 et 26,5 mm dans la majorité des cas; elle ne sera pas normalement couverte d'une lamelle, mais elle peut être renfermée entre deux petits verres d'épaisseur pas négligeable (1 - 2 mm) non seulement comme protection, mais pour tenir l'inévitable poussière au dehors du plan focale de l'oculaire, et par suite éviter qu'elle vienne vue au point à travers l'oculaire même.

On parle dans ce cas de "**micromètre oculaire**".

La graduation d'un micromètre objet est constitué en général par des traits parallèles opaques (comme dans une normale réglette) de longueur même inférieure à 1 mm, larges quelque microns; le "**pas**", (c'est-à-dire la distance entre les traits) est en général de 10μ. La graduation est longue de 1 à 5 mm. Cette configuration est indiquée, par ex. 1/100 ou 2/200 (un ou deux mm divisés en 100 ou 200 parties, de manière que chaque écart mesure 10μ).

Ce type de micromètre objet, très diffus, est trop court pour les faibles objectifs. Mieux utiliser les graduations longues 5 mm, souvent graduées avec un pas de 10μ seulement dans la dernière partie et avec un pas de 100μ dans la partie résidue.

La précision de ces graduations est en général élevée; l'erreur globale est inférieure à un ou peu de μ.

Les micromètres-oculaire sont constitués souvent par une graduation de 5 ou 10 mm divisés en cent parties (5/100 ou 10/100) avec un pas de 50 ou 100μ. Pour des emplois spéciaux, que nous verrons, on utilise des graduations différentes ou des dessins spéciaux, quadrillages, fils en croix, etc.; tous ces systèmes de lignes opaques sur un fond transparent, de n'importe quelles façons utilisées, vont sous le nom générique de "réseaux".

Si le micromètre oculaire est mis dans le foyer objet de l'oculaire, son image virtuelle est à l'infini et elle est vue distinctement par un œil normal, emmétrope, ne pas «accommodé». Si cependant l'observateur est affecté par un défaut de convergence, c'est-à-dire par une amétropie sphérique (myopie ou hypermétropie) il est bien de disposer d'une image finale à distance finie, positive ou négative, c'est-à-dire sur ou sous l'oculaire, et pour faire ceci il faut que le micromètre se trouve un peu devant ou un peu derrière le foyer de l'oculaire et doit par suite changer la distance entre la lentille oculaire (dans les oculaires négatifs) ou le groupe des lentilles (dans les positifs) et le micromètre même. En pratique, on construit des "**oculaires micrométriques**" dans lesquels la lentille oculaire est réglable ("**oculaires réglables**") au sens que sa monture est à vis et on la déplace axialement en la tournant. Une référence indique en général la position normale, dans laquelle l'image finale se forme à l'infini.

Dans la mise au point des oculaires micrométriques il convient toujours partir de la position "tout dehors", ou complètement dévissée, de la lentille oculaire et puis, lentement, la viser pendant qu'on observe la graduation; dès qu'elle apparaît nette, arrêter immédiatement le mouvement. Ceci facilite la décontraction de l'œil, étant donné qu'on évite de partir d'une image finale virtuelle à distance rapprochée, qui stimulerait l'accommodation: l'"effet du tube" n'est pas évoqué (§ 4.2).

Il est clair que l'oculaire micrométrique doit prévoir pour le micromètre oculaire un siège spécial dans lequel le micromètre même est retenu en général par une bague métallique à vis ou à ressort[41].

12.2 - L'AGRANDISSEMENT de l'OBJECTIF (M_{ob})

Dans le § 3.2.3 on a vu comme on calcule l'agrandissement d'un objectif à conjuguée infinie (formule (17)). Cependant la formule relative suppose la connaissance de la focale de l'objectif (f_{ob}), normalement pas déclarée par le constructeur et difficilement mesurable.

En ce qui concerne les objectifs à conjuguée finie, la formule (15) au § 2.6.2.2 permet encore de calculer aisément l'agrandissement (linéaire transversale) de l'objectif: $\mathbf{M = f / x}$. Mais, comme on a à peine expliqué, la focale **f** n'est pas déclarée en général par le constructeur; la grandeur **x** (tirage) est elle aussi difficilement mesurable n'étant pas donné la position des foyers.

La formule (14): $M = x' / f$ souffre des mêmes inconvénients étant donné que (comme on a dit au § 10) la grandeur **x'** est la "**longueur optique**" du microscope (Δ) et elle n'est pas donné en général, et d'ailleurs change d'un objectif à l'autre.

Restent les formules (12) et (13):

$$M = a'/a = y'/y$$

Les conjuguées **a** et **a'** ne sont pas connues, étant donné que elles doivent être calculées à partir des points principaux, dont il n'est pas facile de mesurer la position. Il ne nous reste que mesurer **y** et **y'**.

Voilà la procédure, valide évidemment aussi pour les objectifs à conjuguée infinie: on met sur

[41] L'exactitude exige de préciser que l'introduction du micromètre oculaire provoque un léger avancement de l'image intermediaire (voir le § 3.2).

la platine un micromètre objet; on glisse dans le tube un oculaire micrométrique positif, du type prévu par le constructeur (ce qui est important est la position du premier foyer de l'oculaire qui influe sur la valeur d'**a')**. Si le tube porte-oculaires est réglable (pour les motifs illustrés aux §§ 10, 19.1.2 et 24.1.3), s'assurer que la graduation relative soit en position "0" et la longueur mécanique du tube soit celle nominale. Pour le même motif, il est bien d'éviter les tubes bioculaires, même si leur facteur de tube nominal est égal à 1×, et spécialement ceux-là dans lesquels la régulation inter-pupillaire est obtenue avec deux guides transversales (ancien système Zeiss), étant donné que telle régulation influe sur la longueur du tube (§ 11 et 24.1.3). On met au point le micromètre oculaire comme on a dit (partir avec la lentille oculaire toute dévissée) et puis le micromètre objet. Orienter les deux réseaux pour autant que leurs images se superposent. À ce point dans l'oculaire on voit (agrandi) le micromètre oculaire placé dans le plan de l'image intermédiaire et une image agrandie du micromètre objet dans le même plan. Le rapport dimensionnel entre les deux images est évidemment le rapport **M** relatif à cet objectif et à ce tube. L'oculaire observe simultanément le réseau oculaire et l'image du réseau objet formée par l'objectif. Les deux réseaux ont une dimension connue et il ne reste pas qu'à faire le rapport des longueurs correspondantes. En pratique: on considère la partie centrale du réseau oculaire (pas tout, pour réduire les effets de la distorsion), par ex. du 2° au 7° dixième. Dans le cas d'un réseau 10/100 on observe la partie, par ex., de 2 à 7 = 5 mm = 5.000 μ; puis on observe attentivement à combien de traits du réseau objet ceci correspond et on fait la comparaison des deux longueurs. Par ex., si le trait 2 - 7 dans l'oculaire correspond à 12,8 traits dans l'objet, c'est-à-dire à 128 μ, l'agrandissement M de l'objectif sera 5.000:128 = 39,06:1 (valeur nominale 40:1, on suppose).

Tout ce discours vaut si l'oculaire est positif, c'est-à-dire s'il y n'a pas la lentille de champ à rétrécir l'image intermédiaire. Les oculaires micrométriques négatifs, très utilisé dans le passé, servent seulement pour des mesures sur l'objet, comme on va voir plus loin.

On remarque que la mesure de l'agrandissement (et de la "valeur micrométrique" sous décrite) peut être exécutée avec des objectifs à immersion (voir le § 16) aussi sans l'huile: l'image résultera peu définie et il faudra fermer beaucoup le diaphragme d'ouverture du condensateur pour réduire les aberrations provoquées par l'omission de l'huile, mais l'agrandissement ne change pas.

12.3 - Les MESURES GÉOMÉTRIQUES au MICROSCOPE

Les oculaires micrométriques, de n'importe quel type, ont comme but principal d'exécuter des mesures géométriques sur l'objet au microscope.

En réalité, on mesure les images des objets, mais un calibrage opportun permet de transférer les mesures sur l'objet réel.

Nous commençons par les **mesures linéaires**, c'est-à-dire de longueurs. Pour le calibrage on utilise un micromètre oculaire comme celui qui a été décrit et un micromètre objet. On observe dans l'oculaire les deux réseaux et on les met parallèles entre eux. On procède ainsi: on considère un trait centrale du micromètre oculaire par ex. du 2° au 7° dixième, et on cherche, avec des interpolations opportunes et faisant la moyenne de mesures répétées, de calculer à combien de traits du micromètre objet correspond cette partie du micromètre oculaire. Par ex., si la partie choisie dans l'oculaire correspond à 50 traits et elle recouvre 85,5 traits du micromètre objet égaux à 855μ, nous pouvons dire que chaque trait dans l'oculaire correspond, en conditions de meilleure mise au point, à 855/50 = 17,1μ dans le plan objet. Cette valeur, qui marque l'équivalent de chaque trait visible dans l'oculaire reporté au plan objet, représente depuis ce moment l'unité de mesure du micromètre oculaire, qui devient comme un double décimètre superposé à l'objet. Telle unité s'appelle "**valeur micrométrique**" ou "**équivalent micrométrique**" de cet oculaire contenant ce particulier réseau et utilisé avec cette certaine configuration instrumentale et avec cet objectif particulier. Il est évident que la valeur micrométrique d'un certain oculaire change si on modifie l'image intermédiaire: changement de l'objectif, des systèmes intermédiaires, de la longueur du tube (comme dans certain tubes porte-oculaires réglables ou dans certain tubes bioculaires), etc. Il faut donc, avant de commencer une mesure, se procurer la valeur micrométrique de chaque équi-

pement prévu (objectif, lentilles, filtres et prismes intermédiaires, etc.) et contrôler la longueur du tube. Seulement certains tubes monoculaires et bioculaires ont une longueur fixe ou ils possèdent un mécanisme interne de compensation. Cette longueur est variable dans les tubes monoculaires télescopiques et dans certain tube bioculaires qui déplacent les oculaires le long d'une double coulisse perpendiculaire à l'axe optique ou qui possèdent une régulation à vis sur chacun des tubes porte-oculaires; le calibrage va fait dans ces cas avec une distance inter-pupillaire donnée et avec une régulation donnée des embouts porte-oculaires et la mesure est exacte seulement en reproduisant ces conditions. Voir aussi le § 24.1.3, point 1.

Quand la valeur micrométrique est connue, il suffit de superposer la dimension de l'objet à mesurer (par ex. le diamètre) au réseau oculaire, observer combien de traits correspondent à cette dimension et multiplier leur nombre pour la valeur micrométrique même.

Pour les **mesures de surface** d'objets de forme régulière, on peut mesurer certaines dimensions linéaires comme on a dit, et y arriver avec le calcul. Si l'objet est irrégulier, on utilise des réseaux constitués par un quadrillage orthogonal, par ex. 10 × 10 mm divisés en 20 × 20 parties. Avec la méthode habituelle on mesure l'équivalent micrométrique du côté de chaque maille élémentaire et on calcule sa surface équivalente en faisant le carré. ON A AINSI LA "VALEUR MICROMÉTRIQUE" DE SURFACE, RELATIVE À LA MAILLE ÉLÉMENTAIRE DU RÉSEAU. Puis on compte combien de mailles recouvrent l'objet à mesurer, en excluant les mailles recouvertes pour moins de la moitié et en incluant celles recouvertes pour plus de la moitié. Finalement on multiplie le numéro de mailles recouvertes pour la valeur micrométrique de surface.

Les mesures d'angles s'exécutent au moyen de réseaux circulaires, souvent gradué en degrés. En général il existe aussi un index tournant autour du centre du champ visuel. Le cercle gradué est centré. On dispose l'angle à mesurer avec le sommet au centre et on observe où ses côtés coupent le cercle. De cette manière, la distorsion de l'objectif (§ 13.1.2) n'influe pas sur la mesure étant donné que la faute qu'elle provoque consiste dans un déplacement des point-image dirigé en étoile. Il est même évident qu'ici il n'y a pas besoin de calibrage ou de valeur micrométrique.

Les mesures d'épaisseurs de l'objet, c'est-à-dire de longueurs parallèles à l'axe, se basent sur des moyens mécaniques ordinaires. On utilise des objectifs avec la meilleure ouverture possible, donc avec la moindre profondeur de foyer, pour rendre plus critique et par suite plus précise la mise au point. Pour le même motif il convient d'ouvrir tout le diaphragme d'ouverture du condensateur. On met au point l'extrémité inférieure de l'objet dont on veut mesurer l'épaisseur, puis l'extrémité supérieure. La variation de la distance entre objectif et objet dans ces deux positions exprime l'épaisseur de l'objet, sauf la correction sous décrite.

Pour mesurer cette variation on peut utiliser un micromètre à palpeur appuyé sur la partie mobile de l'instrument (platine ou objectif); il y en a avec résolution de 1μ ou moins. Pour une précision non pas élevées, on peut s'appuyer sur le mouvement fin de mise à point ou "**vis micrométrique**" (§ 27.2.2) qui est gradué en général avec résolution de 1-5μ. En autres mots, on lit la graduation dans les deux positions de la mise au point et on fait la différence des deux lectures. Pour éviter les fautes dues aux "jeux" et à l'hystérésis (§§ 26.5.2 et 26.5.3) du mouvement micrométrique il est bien d'arriver toujours à la position de meilleur foyer du même côté, c'est-à-dire en tournant le bouton dans le même sens.

Il y a cependant, dans les mesures de profondeur, une correction à apporter quand l'objet est plongé dans un milieu liquide ou solide transparent, comme dans les communes "préparations" avec lamelle, ou quand l'objet même est transparent et l'observation arrive à travers son épaisseur. La valeur d'épaisseur mesurée doit être multipliée par l'index **n** de l'objet ou du milieu transparent dans lequel il est plongé (si les deux index sont égaux). Ceci pour tenir compte de la réfraction: il s'agit d'un procédé sujet cependant à des erreurs. Pour l'exactitude, il n'a pas d'influence l'index de la lamelle, mais seulement celui du milieu qui inclut l'objet.

Si de plus l'objectif est à immersion (voir le § 16) on tient compte aussi de l'index du liquide qui se trouve entre lamelle et objectif (**n'**). Ainsi la profondeur vraie (Z) résulte:

$$Z = Z' \; n/n' \tag{29}$$

dans laquelle Z' est la mesure tirée de la graduation de la vis micrométrique ou du palpeur et **n**

l'index du milieu qui entoure l'objet (si l'objet est petit) ou, encore mieux, de l'objet même.

Quand on a des cellules ou sections minces de tissus "montées" dans un liquide quelconque ou en résine, on peut supposer que, à la fin de la préparation, le matériel biologique soit complètement imprégné du liquide ou de la résine et aie par suite un index très semblable à celui du medium de montage.

12.4 - L'AGRANDISSEMENT LONGITUDINAL ou AXIAL

On a jusqu'à présent parlé d'agrandissement transversal linéaire, interprété comme rapport entre des segments correspondants dans les deux plans: plan image et plan objet, tous les deux perpendiculaires à l'axe. Mais on peut considérer un **agrandissement longitudinal** ou **axial** entre segments parallèles à l'axe. En autres mots, si un objet est allongé en direction de l'axe, il aura au moins deux points A et B, un plus près et l'autre plus loin de l'objectif; celui plus près (A) produira une image plus éloignée de l'objectif (nous sommes en train de parler évidemment d'images réelles) et vice versa. A un segment objet AB parallèle à l'axe correspond ainsi un segment image A'B' également parallèle à l'axe, en supposant d'ignorer les distorsions. Le rapport A'B'/AB définit ainsi un agrandissement axial **m**.

Le calcul de **m** peut être très complexe, mais pour les cas les plus usuels on peut utiliser la formule simplifiée[42]:

$$m = M^2 = A'B'/AB \quad \text{et} \quad AB = A'B'/M^2 \tag{30}$$

valide quand l'agrandissement transversal M n'est pas trop élevé et l'objet est plongé dans l'air (autrement, appliquer aussi la (27)).

Cela signifie qu'un système capable de donner des images agrandies d'un objet (collecteur de la microlampe, objectif, etc.) l'agrandit beaucoup plus en direction axiale. Par ex., un filament concentré d'une ampoule électrique, de la forme à l'hélice de 2 × 2 mm, qu'un collecteur agrandit, transversalement, de 12 fois, de façon à former une image dans le diaphragme d'ouverture de 2 × 12 = 24 mm de côté, résulte longitudinalement agrandi de $12^2 = 144$ fois. Son image sera étendue donc en direction de l'axe pour 2 × 144 = 288 mm. Ceci explique pourquoi l'image du filament que nous avons vu se former "dans la pupille d'entrée du condensateur", c'est-à-dire dans le plan du diaphragme d'ouverture, se verra plus ou moins nette aussi où elle ne devrait pas être, c'est à dire dans le plan de la préparation. Ceci explique aussi le large usage de surfaces dépolies qu'on constate dans les microlampes.

12.5 – Le GROSSISSEMENT VISUEL de l'OCULAIRE (V_{ok})

Dans le § 12.8 on parlera des valeurs normalisées adoptées par beaucoup de constructeurs pour le choix des valeurs du grossissement nominal des oculaires.

Dans le § 4.3 (rappel aux figg. 15 et 19, formule (21)) on a défini et calculé le grossissement "conventionnel" d'une lentille de grossissement ou d'un oculaire, et on a expliqué que la (21) est approchée. En outre, la (21) se base sur la valeur de la focale de l'oculaire qui n'est jamais déclarée par le constructeur et qui n'est pas aisément mesurable.

Heureusement, est déclaré en général la valeur du grossissement V; d'ailleurs la valeur exacte de V sert rarement, étant donné que dans les mesures avec le micromètre oculaire le micromètre reste DEVANT l'oculaire (si il est positif) et par suite les caractéristiques de ce dernier n'influent pas sur la mesure: un micromètre oculaire donné, monté dans n'importe

[42] La formule exacte est: $m = M^2/(1 - M\,\Delta s/f)$, dans laquelle **Δs** est la longueur du segment AB et **f** est la focale de la lentille.

quel oculaire, pourvu qu'il soit positif, fournit toujours la même valeur micrométrique, supposé que la position de l'image intermédiaire soit constante.

Mais certains oculaires de vieille construction portent seulement un numéro de référence, et il peut être nécessaire une mesure, au moins approché. Voilà comme on procède.

12.6 – Le GRANDISSEMENT LINÉAIRE (images réelles) de l'OCULAIRE (M_{ok})

On suppose un microscope correctement au point, c'est-à-dire avec l'image intermédiaire dans le premier foyer de l'oculaire F_{ok}; l'image finale est à l'infini.

On soulève de quelques mm l'oculaire de manière que l'image intermédiaire se forme un peu avant de F_{ok}; maintenant l'oculaire se conduit comme un objectif à conjuguée finie (fig. 13 dans le § 2.6.2.4) et il fournit une image réelle agrandie renversée de l'image intermédiaire à une distance supérieure au double de sa propre focale (f_{ok}). Nous supposons de connaître la position du second foyer (F'_{ok}) de l'oculaire: il est très près du "disque de Ramsden" (voir les §§ 4.4 et 9) qui se met en évidence en mettant un bout de papier à 5 - 20 mm sur l'oculaire et en le déplaçant jusqu'à avoir l'image la plus nette du disque. Eh bien, à ce point on pose la feuille de papier à 250 mm sur l'oculaire, plus précisément à 250 mm de F'_{ok}, en pratique du disque de Ramsden. On déplace légèrement l'oculaire en direction axiale de façon à voir au point l'image intermédiaire agrandie (pendant cette opération, on suppose conservée la correcte mise au point).

Dans ces conditions l'oculaire, comme système grandissant de l'image intermédiaire aura un agrandissement linéaire M_{ok} donné par ex. de la (14) dans le § 2.6.2.2:

$$M = x' / f \tag{14}$$

Maintenant, le **x'** a été fixé à 250 mm, et alors:

$$M_{ok} = 250 / f_{ok} \tag{31}$$

Mais celle-ci est la même expression du grossissement visuel donnée par la (21) dans le § 4.3; donc nous pouvons dire que, dans ces conditions:

$$M_{ok} = V_{ok} \tag{32}$$

Ça suffit alors de mesurer M_{ok}. On insère un objectif dont on connaisse avec précision l'agrandissement M_{ob}, et on a vu comme on le mesure dans le § 12.2. On met sur la platine un micromètre objet et on le met au point avec l'oculaire en position normale. Puis on soulève l'oculaire pour avoir au point l'image du réseau sur un écran à 250 mm au dessus du disque de Ramsden. On mesure la longueur d'une partie de l'image qui correspond à la moitié du champ de l'oculaire. Par ex., 20 traits au pas de 10μ = 200μ, pourront apparaître longs 80 mm. Si l'objectif a un agrandissement de 40:1 (connu ou mesuré avec précision), ces 20 traits correspondent dans l'image intermédiaire à 200 × 40 = 8.000μ = 8 mm. Si ces mêmes traits apparaissent longs 80 mm dans l'image finale, l'agrandissement de l'oculaire est: $M_{ok} = V_{ok} = 80/8 = 10 \times$.

En autres mots, on utilise comme objet pour l'oculaire l'image intermédiaire créée par un objectif connu de façon à connaître les dimensions de tel objet. Puis on mesure la longueur de l'image finale et on fait le rapport (voir la formule (12), § 2.6.2.2).

La disposition que nous avons à peine décrite pour la mesure de M_{ok} est donc celle qui permet d'obtenir de l'oculaire et du microscope une image réelle, au lieu d'une virtuelle, comme demandé par l'observation visuelle. L'image réelle est par contre nécessaire quand on doit la projeter sur un écran (micro-projection) ou sur une émulsion photographique, sur un récepteur de télévision, etc. Celle à peine décrite est donc la disposition de base pour la photo-micrographie et autres techniques analogues.

Dans le cas général, cependant, la distance entre l'oculaire (son foyer supérieur) et l'image finale, c'est-à-dire **x',** n'est pas toujours égale à 250 mm; elle peut être aussi de beaucoup de mètres

dans le cas de la micro-projection. Dans ce cas ne vaut plus la (29) ni la (30), mais on calcule M_{ok} de la (14), en introduisant la valeur effective de **x'**, distance oculaire-écran. Il est évident que **x'** et $\mathbf{f_{ok}}$ sont exprimés avec la même unité de mesure.

12.7 – Le GROSSISSEMENT GLOBAL du MICROSCOPE

12.7.1 – Le grossissement visuel (V_M)

Nous considérons tout d'abord le cas de l'observation visuelle avec formation d'une image finale virtuelle.

On peut répéter tout ce qu'on a expliqué à propos de l'oculaire: il faut considérer un "**grossissement visuel**" donné par un rapport d'angles (voir la (18) dans le § 4.3) et nous l'appellerons $\mathbf{V_M}$.

On pourrait faire beaucoup de considérations sur la focale équivalente du microscope ou semblables; mais en pratique il est suffisant de connaître l'agrandissement de l'objectif et de l'oculaire et en faire le produit:

$$V_M = M_{ob} \times V_{ok} \times F_t \qquad (33)$$

dans laquelle $\mathbf{V_M}$ est le grossissement visuel global du microscope et $\mathbf{F_t}$ tient compte de systèmes éventuels interposé entre objectif et oculaire (tube, variateur d'agrandissement, prismes, etc.; voir le § 12.7.3); les autres deux termes sont gravés directement en général sur la monture de l'objectif ou de l'oculaire ou se mesurent comme on a à peine décrit.

On rappelle que les valeurs nominales pour Ft, M_{ob} et V_{ok} ne sont pas toujours précises. Si on veut une mesure précise de V_M, utilisez la même technique utilisée pour mesurer V_{ok} et M_{ok}, décrite au paragraphe précédent. Naturellement, le rapport se fera entre l'image réelle finale formée à 250 mm de l'oculaire (du disque de Ramsden) et l'objet (le micromètre habituel). Dans ces conditions $V_M = M_M$, en étant M_M l'agrandissement linéaire du microscope avec image finale à 250 mm de distance du foyer supérieur de l'oculaire.

On remarque que, quand on dit qu'un microscope "agrandit" par ex. 400 fois, cela ne signifie pas nécessairement qu'en quelque point au dehors ou dans l'instrument il existe une image <u>réelle</u> de l'objet 400 fois plus grande de l'objet même. Il signifie seulement que le microscope peut montrer une image (<u>virtuelle</u>) de l'objet sous un angle 400 fois plus grand de ce qu'on aurait en l'observant de 250 mm de distance.

12.7.2 - Grandissement linéaire (réel - M_M)

Si le microscope est focalisé de façon à produire une image finale réelle, pour la photographie, la projection, etc., alors on peut parler d'**agrandissement linéaire $\mathbf{M_M}$**, et encore une fois on aura:

$$M_M = M_{ob} \times M_{ok} \times F_t \qquad (34)$$

dans laquelle M_{ok} et F_t ont déjà été définis. Étant donné que nous savons déjà mesurer M_{ok}, de la même façon on mesure M_M et V_M, toujours en comparant l'image finale d'un micromètre objet (formée à 250 mm du disque de Ramsden) avec le micromètre même.

Si l'image finale est projetée à une distance différente de 250 mm, on peut mesurer toujours M_M en partant de la comparaison d'un micromètre objet avec son image; simplement, cette valeur ne sera plus égale à V_M. Si on renonce à la mesure précise, on peut calculer M_M des valeurs nominales de M_{ob} et V_{ok} (formule (31)) en ajoutant cependant le facteur **d/250**, en étant **d** la distance de projection, de l'oculaire à l'écran, exprimée en mm.

12.7.3 – Le facteur du tube

En beaucoup de cas, entre objectif et oculaire, il y a un ou plus systèmes intermédiaires qui peuvent introduire une variation du grossissement final, c'est-à-dire ils possèdent un "facteur d'agrandissement" différent de 1×. Avec les bons constructeurs, chacun de ces systèmes intermédiaires porte gravé le "**facteur de tube**" (par ex. 1,25×, 1,6×, etc.) et tel facteur (Ft) doit être introduit dans les formules (31) ou (32) pour le calcul du grossissement total.

Mais le facteur de tube n'est pas toujours indiqué ou, s'il est indiqué, il n'est pas toujours exact. Pour un contrôle, on mesure M_M, c'est-à-dire l'agrandissement total du microscope avec image finale réelle, comme décrit plus haut, sans système ou tube intermédiaire; puis on répète la mesure avec le tube intermédiaire et on fait le rapport entre les deux résultats. Celui-ci est le facteur particulier de ce "tube".

Il sera opportun d'exécuter les deux mesures de M_M avec une image finale à la même distance de l'oculaire (2 m par ex.) et remettant au point chaque fois; un constructeur avisé, comme déjà dit, fera de manière que l'introduction des systèmes intermédiaires n'altère pas la mise au point, mais quelque différence est inévitable à cause des tolérances de fabrication.

12.8 - L'AGRANDISSEMENT NOMINAL de l'OBJECTIF

Comme déjà précisé, l'agrandissement nominal déclaré par le constructeur n'est pas toujours précis, d'où l'utilité des méthodes de mesure décrits.

Pour quantifier la discordance entre valeur nominale et valeur réelle de l'agrandissement, nous reportons quelques données, publiées par la maison Zeiss (une des peu qui les déclare):

Objectifs achromatiques	
Grandissement nominal M_{ob}	Grandissement réel
10	10,2
40	40,8
40 HI, à immersion	40,0
40 HI - LD, à forte distance de travail	39,2
40 WI, à immersion dans l'eau	40,4
100 HI	98,8

D'autres maisons admettent dans la valeur de M_{ob} une vague tolérance de ± 5% et sur les facteurs de tube une tolérance de ± 2%.

En ce qui concerne les valeurs nominales de l'agrandissement, il n'y a pas des règles générales, mais les constructeurs les plus sérieux suivent des critères universels, appliqué aussi en d'autres champs comme les règles DIN 323. Pour espacer de manière rationnelle les séries de valeurs, comme les données caractéristiques des composants mécaniques, électroniques, etc., on utilise souvent les séries décimales géométriques ou "séries R." Voilà de qua il s'agit.

On peut diviser une série de valeurs en "décades"; une "décade" est la série de valeurs comprises entre une puissance de 10 et la suivante, par ex. entre 1 et 10 ou entre 10 et 100 et ainsi de suite. Les valeurs à l'intérieur d'une décade sont espacées entre elles en "série géométrique", pour faire de manière que le rapport entre chaque valeur et la précédente soit constant, à part les arrondissements. Si on désire avoir 6 valeurs à l'intérieur de chaque décade, comme on fait avec les composants électroniques quand la tolérance avouée est de ± 20%, on a la soi-disant "série R6" dans laquelle le rapport entre deux n'importe quelles valeurs contiguës est égal à la racine sixième de 10 = 1,4678 et la série R 6 typique est donné par (toujours en valeurs arrondies):

10 - 15 - 22 - 33 - 47 - 68 / 100 - 150 - 220 - 330 - 470 - etc.

Pour avoir 12 valeurs chaque décade, on utilise la série R12, et on a recouvrement entre valeurs contiguës quand la tolérance est ± 10%; le facteur de multiplication est la racine douzième de 10 = 1,211 et la série type est:

10 - 12 - 15 - 18 - 22 - 27 - 33 - 39 - 47 - 56 - 68 - 82

On a aussi la série R 24 (racine vingt-quatrième de 10 = 1,1007) pour valeurs atteintes d'une tolérance de ± 5%, etc.

Pour les agrandissements en optique (règles DIN 58886), on utilise la série R10 (racine dixième de 10 = 1,2589) avec les valeurs typiques (dix valeurs pour décade):

10 - 12,5 - 16 - 20 - 25 - 32 - 40 - 50 - 63 - 80

ou la R 5 avec les valeurs: 10 - 16 - 25 - 40 - 63 dans laquelle le facteur de multiplication est la racine cinquième de 10 = 1,585, ou encore une série plus raccourcies (non normalisée), avec 5 valeurs chaque deux décades:

2,5 - 6,3 - 16 - 40 - 100 ou des séries irrégulières: 2,5 - 10 - 40 - 100 ou: 4 - 10 - 40 - 100.

Si les séries de valeurs normalisées sont utilisées soit pour les objectifs soit pour les oculaires, on peut montrer qu'aussi les agrandissements totaux du microscope, obtenus par ces deux séries, viennent se trouver le long d'une série normalisée.

En métallographie, sont utilisés des valeurs spéciales de grossissement total égales à:

50 - 100 - 200 - 500 - 1.000 ×

Pour les obtenir, beaucoup de constructeurs introduisent des série d'objectifs avec des valeurs de M_{ob} dans la série presque-normalisée:

4 - 8 - 16 - 40 - 80

et par suite un système intermédiaire avec un facteur d'agrandissement propre de 1,25× pour lequel, avec un oculaire normal 10×, on a: 4 × 10 × 1,25 = 50, ou: 8 × 10 × 1,25 = 100, etc.

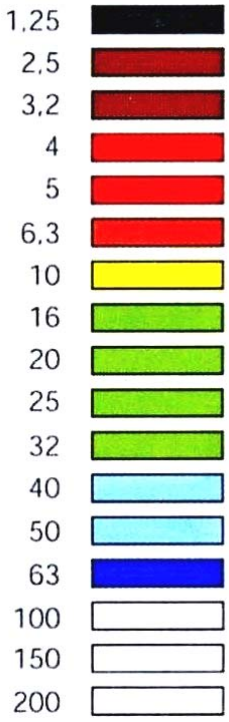
Pour les oculaires, une série complète de valeurs peut être (R 10):

(4× - 5×) - 6,3× - 8× - 10× - 12,5× - 16× - 20× - 25× - 32×.

En pratique: (4×) - 6,3× - 10× - 16× - 25× (R 5) ou semblables.

Quelques constructeurs marquent les objectifs avec des anneaux de différente couleur en relation à l'agrandissement selon le tableau suivant, qui cependant n'est pas d'usage universel:

1 - 1,5 = noir; 1,6 = gris; 2 - 3 = brun; 4 - 5 = rouge; 6,3 = orange; 10 = jaune; 16 = vert clair; 25 - 32 = vert foncé ou turquoise; 40 - 50 = bleu clair; 60 - 63 = bleu; 100 - 150 = blanc.



Sous l'anneau pour l'agrandissement, il peut y avoir un deuxième anneau (avec la possibilité de confusion) pour indiquer le type d'immersion:

Noir ou blanc = en huile; Blanc = dans l'eau; Orange = en glycérine; Rouge = indifférent.

Une troisième bague en haut (autre confusion) peut indiquer le type: Noir = standard; Rouge = Pol et DIC (contraste interférentiel); Vert = contraste de phase.

Ces dernières trois couleurs peuvent être utilisées aussi, avec le même sens, pour les autres notations en lettres ou chiffres.

13 - L'OPTIQUE NON GAUSSIENNE – Les ABERRATIONS

Tout ce que nous avons dit jusqu'à présent supposait que fussent vérifiées les conditions de l'"optique paraxial de Gauss", valides pour les "lentilles minces" (§ 2.5.1).

On peut résumer ces conditions en disant qu'il s'agit de systèmes optiques idéaux, centré sur un axe commun, avec des éléments simples limités par surfaces planes ou sphériques, avec des champs angulaires et ouvertures limitées à la zone paraxial, c'est-à-dire prochaine à l'axe optique, avec des épaisseurs négligeables des lentilles et des objets, utilisés avec une radiation monochromatique[43].

Le résultat de ces suppositions est que les images aussi jouissent de propriétés idéales:

1) l'image d'un objet étendu, plan et perpendiculaire à l'axe est semblable géométriquement à l'objet et encore plane, perpendiculaire à l'axe;

2) l'image d'un objet sans dimensions, c'est-à-dire d'un point, est encore un point.

3) les valeurs de l'agrandissement et de la focale, ainsi que la position des points principaux sont indépendantes des dimensions de l'objet, c'est-à-dire des valeurs du champ, de l'inclinaison des rayons sur l'axe (donc de l'ouverture), des longueurs d'onde utilisées, de la position du diaphragme;

4) le contraste dans l'image serait égal à celui dans l'objet.

Dans un mot, on aurait des images planes non déformées et avec résolution infinie, en tant que chaque point de l'objet aurait son correspondant dans l'image, et on pourrait retrouver dans cette dernière les structures et les détails de l'objet si petits qu'ils soient, avec un contraste inchangé.

Mais à cet état idéal s'opposent trois causes principales de déviation:

1) Causes techniques (irrégularités dans la préparation des surfaces, défauts dans l'homogénéité des matériels transparents, lumière diffuse par réflexions sur les parois latérales ou sur les montures des lentilles, lumière parasite par réflexions à la surface des éléments transparents, défauts d'assemblage et centrage, etc). Il y a aussi des défauts liés à l'utilisation (fautes de mise au point, de propreté, etc). En principe, il s'agit de "défauts" éliminables avec opportunes astuces techniques, en général avec une certaine augmentation de coûts de production.

2) Causes physiques, liées à la nature ondulatoire de la radiation optique et à ce qui en dérive, surtout à la diffraction. Nous en parlerons dans le § 18.

3) Causes géométriques, liées à la réfraction aux surfaces air-verre ou verre-verre[44], analysables sur la base de la notion de "rayon" (§ 2.3) et des lois de la réfraction (§§ de 2.3 à 2.6).

Eh bien, ces dernières déviations des conditions idéales de l'optique de Gauss, ces causes "géométriques", liées à la réfraction, sont importantes quand on considère des systèmes réels de lentilles épaisses, avec des angles de champ et d'ouverture pas négligeables, avec radiation pas monochromatique. Elles provoquent des déviations de l'image idéale décrite plus haut, appelées globalement "**aberrations**."

13.1 – Les ABERRATIONS du PLAN

Nous considérons encore un objet étendu, plan, sans épaisseur, perpendiculaire à l'axe d'un système optique réel formé par des lentilles sphériques épaisses, centrées sur un axe commun avec ouverture et champ pas négligeable.

Les aberrations du plan concernent la forme de l'image d'un tel objet.

---

[43] c'est à dire avec una radiation d'une seule longueur d'onde.

[44] ou, en géneral, à la surface de contact entre des milieux transparents avec différentes propriétes optiques.

13.1.1 - La courbure de champ

À cause de cette aberration, l'image d'un objet plan n'est pas plane, mais courbe, et la surface courbe représente une figure solide de révolution, avec un axe de symétrie de rotation qui coïncide avec l'axe optique du système.

Il ne s'agira pas en général d'une calotte sphérique. Dans une lentille simple convergente, la surface de l'image réelle courbe sera concave vers la lentille. Ceci s'explique en regardant la fig. 35 dans laquelle le point B de l'objet, loin de l'axe, est distant du centre C de la lentille plus du point axial O; donc l'image B' sera éloignée de C moins d'O et dans l'ensemble le champ image est courbe.

Cette considération géométrique simple, qui ignore l'astigmatisme (§ 13.2.5), porte à la considération d'une surface image idéale recourbée, dite "**surface de Petzval**".[45]

La mesure de la courbure de l'image, exprimable comme distance axiale entre un point image, B' et celui qu'on devrait avoir si l'image était plane et tangente sur l'axe à la surface réelle (B" dans la fig. 35), est en principe proportionnelle au carré du "champ", c'est-à-dire à la distance entre le point image et l'axe.

Dans ces conditions, on peut dire que tel objectif fournit une image plane à la condition que l'objet, la "**surface de meilleure focalisation**", soit courbe: il faut considérer une surface objet que garantisse "le meilleur foyer", c'est-à-dire une image plane[46], mais qui est pour soi-même courbe.

En microscopie, l'objet peut avoir une épaisseur ne pas négligeable (sections de tissus, couches liquides de cultures, etc.) et la surface courbe de meilleur foyer peut par suite se trouver contenue entièrement dans l'épaisseur de l'objet; dans ce cas la courbure de champ ne nuit pas et il est inutile de chercher les objectifs "**plan**" spéciaux dans lesquels cette aberration est plus ou moins corrigée (§ 19.2.3.2).

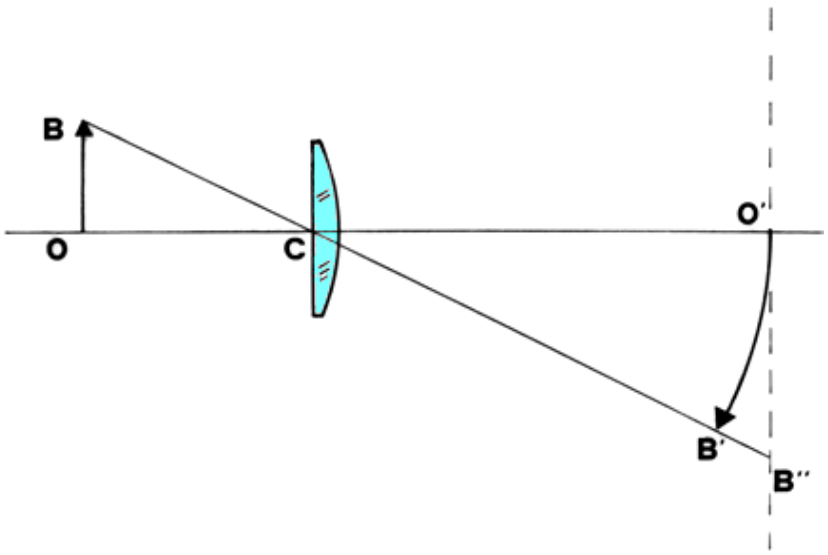


Fig. 35

Si l'objet est par contre très mince (frottis de sang, cellules ou bactéries, surface polie d'échantillons métallographiques ou de roches, etc.), alors la courbure nuit beaucoup: on verra au point seulement le centre du champ ou son bord ou quelque "zone" intermédiaire avec forme d'anneau centré, pendant que le reste du champ est défocalisé. La situation est cependant allégée par la profondeur de foyer" (voir le § 14) qui fait qu'on ne voie pas seulement au point une surface objet, plane ou courbe, sans épaisseur, mais une légère couche de l'objet sur et sous le "meilleur foyer"; ceci confère à la "zone" au point de l'image, donnée par un objectif non plan pour un objet plan, une largeur pas négligeable, en général au moins la moitié du rayon du champ image. Nous apprendrons à calculer et à mesurer la profondeur de champ, mais en regardant la fig 36 devient claire ce qu'on a dit.

---

[45] Joseph PETZVAL (pron. Pèzval), mathématicien autrichien (1807-1891).

[46] Image intermédiaire, dans le cas du microscope.

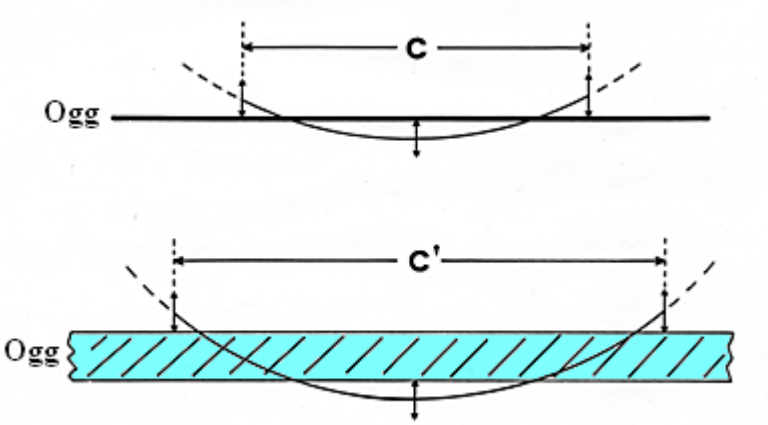


Fig. 36

En haut est indiqué en section un objet plan sans épaisseur (Ogg); l'axe du système est vertical et passe dans le plan et pour le centre de l'illustration. La courbe indique la section médiane de la "surface de meilleur foyer", qui coupe le plan objet le long d'un cercle. Avec trois flèches doubles est indiquée la profondeur de foyer, c'est-à-dire l'espace sur et sous le meilleur foyer dans lequel l'image peut être considérée encore focalisée. En opérant avec la mise au point, on peut faire de façon que dans le point le plus bas de la surface de meilleur foyer l'objet soit eloigné d'elle pas plus de la profondeur de foyer; pour cela on a une mise au point acceptable pour toute la partie inférieure de la surface de meilleur foyer. Quand cette dernière passe au dessus le plan objet, «on voit encore au point» pour autant que les deux surfaces ne sont pas éloignée plus de la profondeur de foyer. De cette manière, toute la partie du champ-objet indiquée avec C résulte en même temps au point malgré la courbure de champ de l'objectif.

Dans la partie inférieure de la fig. 36 on voit la même situation, mais l'objet a une épaisseur pas négligeable. Jusqu'à ce que la surface de meilleur foyer soit comprise dans l'épaisseur de l'objet, le foyer est assuré; au dehors des deux surfaces de l'objet il est encore possible d'exploiter la profondeur de foyer et, dans les conditions de l'illustration, on a encore un champ entièrement au foyer (C') plus large que dans le cas précédent à cause de l'épaisseur de l'objet.

La courbure de champ est indépendante des autres aberrations, au moins au point de vue conceptuel, sauf de l'astigmatisme (voir le § 13.2.5) dont elle représente un cas spécial.

Les lentilles divergentes simples ont une courbure de champ de signe inverse de celles convergentes; ceci offre au projeteur une méthode de correction. En effet, dans les objectifs plan, comme nous verrons, on utilise des lentilles divergentes pour la correction de la courbure, parfois plus qu'une.

Par le passé ont été produits des oculaires divergents, les "Homal" de Zeiss, par ex., utiles pour compenser la courbure de l'objectif, mais ils avaient une application seulement en photographie (§ 20.6).

En pratique, il y a deux moyens d'obtenir une mesure de la courbure de champ:

--- Pour une combinaison donnée: objectif-oculaire-systèmes intermédiaires, on observe un objet très mince (frottis de sang, micromètre objet) et on met au point le centre de l'image en faisant attention au sens de rotation du bouton avant d'atteindre la focalisation. À ce point on lit la position du bouton qui est d'habitude gradué chaque μ ou chaque 2 ou 5μ. Puis on met au point le bord de l'image, en arrivant à la meilleure focalisation avec une rotation dans le même sens; on lit de nouveau la position du bouton et on fait la différence entre les deux lectures. On a ainsi la flèche de courbure de la surface de meilleur foyer, exprimée en unité de longueur absolue.

Cette donnée cependant n'est pas significative, étant donné qu'elle doit être mise en rapport avec la dimension du champ et la profondeur de foyer, qui dépend de l'ouverture de l'objectif; elle est donc utile seulement pour comparer deux différents objectifs de même agrandissement et ouverture très semblable.

À la même manière, on peut approcher la surface de meilleur foyer à une sphère et en calculer le rayon de courbure (étant donnée la flèche et le diamètre du champ objet); on trouvera que, dans

un objectif non plan, tel rayon est semblable à sa focale. Mais il faut ici aussi rapprocher la courbure du champ à ses dimensions et à la profondeur de foyer.

--- Il est plus immédiat d'observer quelle partie d'un objet mince et plan est vue simultanément au point en cherchant le meilleur compromis. On trouve des valeurs de 40 - 60% dans les objectifs non corrigés, et de 60 -100% dans ceux «plan». Cependant de cette façon il faut définir la marge qui sépare la zone au point de celle défocalisée et le facteur subjectif devient prépondérant: qui peut dire qu'un point est "encore au point" ou "à peine défocalisé"?

Une évaluation quantitative de la courbure de champ est utile de toute façon pour définir une des qualités fonctionnelles de l'objectif, et elle contribue à l'étude comparative d'objectifs différents.

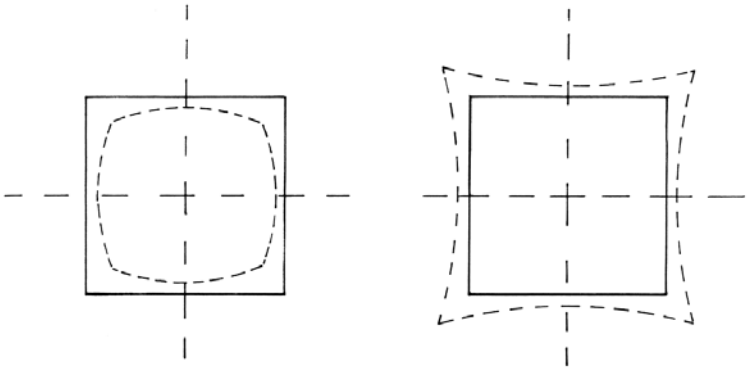
Aussi l'oculaire peut être affecté par la courbure de champ, mais toujours en mesure plus petite que l'objectif à cause de la plus petite puissance de ses lentilles. Les oculaires négatifs ont une courbure plus forte des positifs.

Dans tous les oculaires, la courbure s'ajoute algébriquement à celle de l'objectif.

13.1.2 - La distorsion

Maintenant nous ne nous occupons pas de la courbure du plan image mais de la forme de l'image et de sa similitude avec l'objet.

Deux figures planes sont semblables quand les angles correspondants sont égaux et le rapport entre des segmentes correspondants (c'est-à-dire l'agrandissement transversal linéaire) est constant. La distorsion, indépendamment de toutes les autres aberrations, consiste justement en une variation de l'agrandissement au grandir du champ, c'est-à-dire de la distance d'un point (objet ou image) de l'axe. Si l'agrandissement augmente avec le champ, l'objet semble se dilater vers la périphérie: un carré devient un coussinet et on parle de distorsion **positive** ou "**au coussinet**" (voir fig. 37, à droite); si l'agrandissement diminue avec le grandir du champ, l'objet semble se contracter et on parle de distorsion **négative** ou "**au barillet**" (fig. 37, à gauche).



L'objet est indiqué à plein trait; l'image en hachure (pas en échelle réelle).

Fig. 37

Dans une lentille mince, la distorsion dépend de la position du diaphragme, et s'annule quand le diaphragme coïncide avec la lentille. Dans un système complexe, on peut annuler la distorsion, par ex., quand le système est symétrique par rapport à un plan médian perpendiculaire à l'axe, le diaphragme se trouve dans ce plan et l'agrandissement est près de 1.

La distorsion d'une lentille mince est en général négligeable, mais elle est sensible dans les lentilles épaisses; une lentille épaisse convergente montre souvent une distorsion positive; si elle est divergente, négative. Si cependant le diaphragme dans une lentille convergente ne coïncide pas avec la lentille, la distorsion est positive («à coussinet») si le diaphragme est mis après la lentille (du côté de l'image), négative («à barillet») si le diaphragme est mis entre l'objet et la lentille.

En microscopie, la distorsion nuit seulement quand on doit exécuter des mesures de surface ou de longueur sur l'objet, mais elle est en général très contenue. On peut facilement la mesurer en observant un objet contenant une mince ligne droite lointaine de l'axe (un micromètre objet ou le bord d'une lamelle, par ex.) avec un oculaire contenant un micromètre oculaire, mieux si du type quadrillé. En déplaçant l'objet, on pourra mesurer la flèche de courbure de son image en différen-

tes positions du champ.

La distorsion, exprimée comme déplacement effectif d'un point-image par rapport à sa position idéale, est proportionnelle au cube du champ (entendu comme distance du point de l'axe). En faisant le rapport avec la valeur du champ, elle peut être exprimée en pourcentage. Dans une lentille non corrigée, la distorsion peut arriver à 5 ou 10 %.

On peut exprimer la distorsion aussi comme rapport $\Delta_M = (M_i - M_o) / M_o$ dans laquelle M_o est le grandissement linéaire sur l'axe et M_i est l'agrandissement aux marges du champ.

Dans un microscope normal, la distorsion est due en majorité à l'oculaire; celle de l'objectif ne dépasse pas en général 1-3 %.

Un système corrigé pour la distorsion et la courbure de champ s'appelle "rectilinéaire" ou "**orthoscopique**".

13.2 – Les ABERRATIONS du POINT - La DÉFINITION

Les aberrations du plan altèrent la forme d'une image étendue mais pas l'image des détails fins et par suite elles ne nuisent pas à la résolution.

Maintenant nous nous occupons au contraire des aberrations capables de déformer l'image d'un point objet, au sens qu'elles ne rendent jamais ponctuelle telle image (**aberrations du point**). Nous verrons plus loin (§ 18) qu'il y a d'autres facteurs qui élargissent l'image d'un point objet, mais pour maintenant limitons nous aux aberrations liées à l'optique géométrique. Dans l'ensemble, telles aberrations élargissent l'image idéale d'un objet sans dimensions jusqu'à la faire devenir une tache de forme et de profil photométrique très variable, qu'on peut appeler génériquement "**cercle de confusion**", considéré dans les conditions de meilleure focalisation.

Eh bien, tel "cercle" est un facteur certainement limitant de la résolution. Nous supposons pour simplicité que le "cercle" soit effectivement circulaire et qu'il ait des bords nets et un éclairage uniforme. Nous considérons dans la fig. 38 deux de tels "cercles de confusion" idéaux, correspondants à l'image de deux points-objet dans un système optique affecté d'aberrations du point.

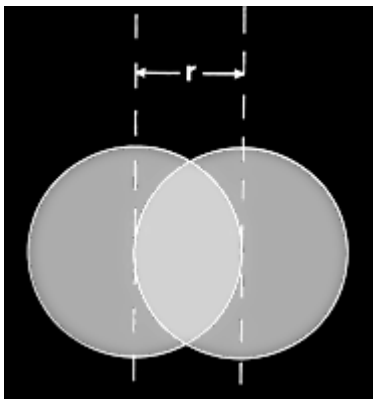


Fig. 38 – Deux point-image très rapprochés dans un fond noir.

Nous supposons aussi que tels points soient résolus quand leurs images, c'est-à-dire les deux cercles, sont éloignés d'une distance **d** égal au moins au rayon **r** des cercles mêmes. Nous reviendrons sur ce critère, qui est évidemment conventionnel, mais on peut dire qu'il est très utile en pratique. La limite de la résolution est donc **r**, c'est-à-dire que deux-points image sont considérés distinguables quand leur distance **d** n'est pas inférieure au rayon **r** de leur cercle de confusion. Et alors la résolution diminue quand le cercle s'élargit à cause des aberrations. Mais ce n'est pas seulement un problème de résolution.

En photographie, on appelle "**microcontraste**" la distribution photométrique de l'image d'un objet dans lequel une zone sombre et une lumineuse sont séparées par une ligne nette sans transitions. Si le "cercle" avait rayon nul, même dans l'image on aurait une séparation nette entre zone sombre et claire; mais sur cette ligne nette se superpose le cercle de confusion, qui la fait devenir "nuancée", indécise; on peut dire aussi que les points clairs plus voisins à la ligne de séparation envahissent la zone sombre avec une partie de leur cercle de confusion, et vice versa pour les points sombres. À ce point, dans l'image le passage clair-sombre n'est plus représentable avec une courbe à échelon, mais avec une pente plus ou moins régulière. Eh bien, ce bord nuancé baisse la "**netteté**" ou "**définition**" de l'image, au sens que ne sont pas nets ou "définis" les bords des différentes parties de l'image.

On peut donc penser la définition comme expression et mesure du contraire du rayon du cercle de confusion: l'une est autant plus grande que l'autre est plus petit; et celle-ci devient aussi la mesure du complexe des aberrations du point.

Voyons maintenant quels sont les causes de ces aberrations et quels remèdes sont disponibles.

13.2.1 - L'aberration chromatique longitudinale ou axiale

Cette aberration comme la suivante est liée à la longueur d'onde de la radiation et elle n'existerait pas avec une radiation à longueur d'onde unique, c'est-à-dire "**monochromatique**". On a vu en effet, en parlant de la réfraction et du prisme, le phénomène de la dispersion de l'index et de la différente déviation des rayons de différente longueur d'onde λ (voir les §§ 2.3.1 et 2.4). Si donc on utilise dans la formation de l'image la radiation "blanche" fournie par la plus grande partie des sources usuelles, nous aurons un entier spectre continu de radiations à l'interieur des limites du spectre optique, c'est-à-dire un numéro infini de longueurs d'onde entre 400 et 800 nm environ (voir le § 1.1). Pour chacune d'elles nous aurons une différente valeur de l'index **n** et par suite de la puissance et de la focale de chaque lentille. Cette variation de la focale au changer de λ provoque une variation de la conjuguée-image, et celle-ci est connue comme la "**chromatique axiale**": en autres mots. Un objet qui émet ou est traversé par de la "lumière blanche" fournit de soi-même une série infinie d'images de différente couleur, à différente distance de la lentille; on aura la distance maximum pour les longueurs d'onde plus grandes ("rouge") étant donné que l'index est plus petit et la focale plus grande; le contraire pour l'autre extrême du spectre optique (bleu-violet).

On a donc une succession d'images correspondantes aux valeurs de longueur d'onde présentes, et telle succession s'appelle "**spectre primaire**". L'image apparaît entourée par des halos colorés; c'est-à-dire qu'on peut mettre au point l'image "dans le bleu" et il reste un halo rouge, (image défocalisée) ou on met au point l'image "dans le vert" et il reste un halo pourpre (rouge + bleu), etc. (voir la fig. 76, § 19.5.4).

Les images correspondantes aux valeurs extrêmes de longueur d'onde sont éloignées entre elles, en direction parallèle à l'axe, d'une longueur qui peut servir de mesure de l'aberration. Mais en microscopie ce qui est important est d'obtenir le diamètre minimum du cercle de confusion, lequel on obtient en optimisant la mise au point. On peut mesurer tel diamètre au moyen du "star test" et d'un micromètre oculaire (voir le § 18.4); de toute façon, pour un système donnée et un résidu donné de l'aberration, le diamètre du cercle de confusion est proportionnel à l'ouverture et plus ou moins indépendant du champ, au sens qu'il est le même dans tout le champ (pour ce que concerne l'aberration chromatique longitudinale).

La fig. 39 donne une idée du phénomène.

Pour réduire l'aberration chromatique on exploite la différence existante dans la courbe de dispersion entre les différents verres optiques. Si on trace un diagramme cartésien avec l'index **n** en ordonnée et λ en abscisse, et relatif à un verre donné, on verra une courbe inclinée avec les moindres valeurs de **n** pour les maxima de λ. Telle courbe illustre la loi de la dispersion, c'est-à-dire la fonction $\mathbf{n}_\lambda$, pour ce matériel. Maintenant, pour différents matériels transparents, la courbe a une forme et une inclinaison différente. Pour exprimer synthétiquement le cours de la courbe, on utilise la grandeur "**numéro d'Abbe**" ou "inverse du pouvoir dispersif", indiquée avec la lettre grecque "nu" (**ν**) ou **n** minuscule: $\mathbf{\nu} = (n_D-1) / (n_F-n_C)$ dans laquelle paraissent trois différentes valeurs de l'index **n**, pour différentes valeurs de λ correspondantes à certaines "lignes" du spectre solaire: ligne C = 656 nm (rouge); ligne D = 589 nm (jaune); ligne F = 486 nm (bleu).

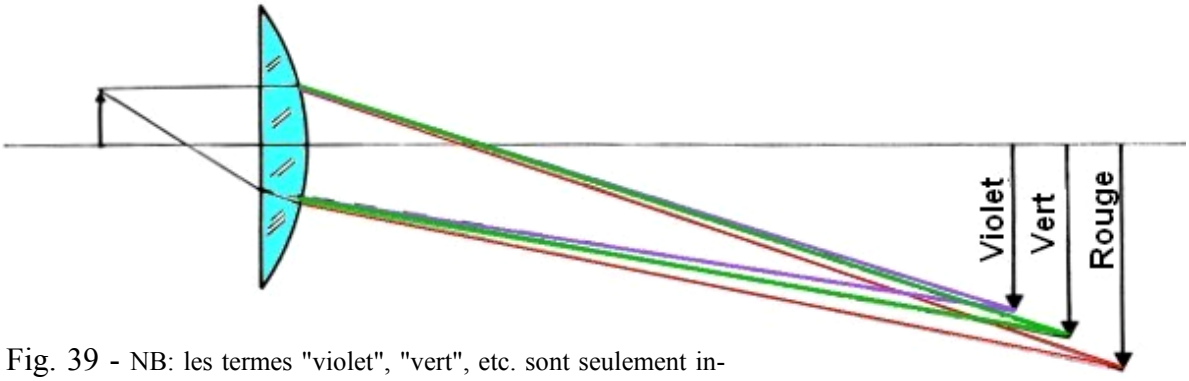


Fig. 39 - NB: les termes "violet", "vert", etc. sont seulement indicatifs et ils ne correspondent pas à des valeurs définies de longueur d'onde.

Pour les verres optiques usuels **ν** varie de 30 à 60; les valeurs les plus petites correspondantes aux verres les plus dispersifs, plus lourds, contenants du plomb ("**Flint**"); les valeurs les plus grandes aux verres normaux, légers, bore-silicates ("**Crown**").

Eh bien, en combinant des verres avec différent pouvoir dispersif, il est possible d'obtenir des systèmes convergents ou divergents dans lesquels la chromatique est réduite, au sens que les valeurs de focale et de conjuguée coïncident pour deux longueurs d'onde aux extrêmes du spectre optique, dans la région du "rouge" et du "bleu"[47].

Si nous construisons une courbe ayant en abscisse la valeur de la conjuguée image **a'** (c'est-à-dire la position d'un point image axial) et en ordonnée la λ, on obtient une courbe comme celle de la fig. 40 pour laquelle les droites verticales indiquent des valeurs de référence pour **a'**, et on voit que **a'** change au changer de λ. En A on voit la courbe relative à une lentille simple, ne pas corrigée: la conjuguée **a'** augmente quand augmente λ; la dispersion de la conjuguée image **a'** dans le cadre du spectre optique produit le déjà cité "**spectre primaire**", qui représente la succession des images dues aux différentes longueurs d'onde. Eh bien, en combinant même deux lentilles seulement, une de verre crown, convergente, et une de verre flint (divergente)[48], il est possible de "replier" la courbe au sens que **a'** est à son minimum pour le centre du spectre optique, (région du "vert") et elle grandit soit vers un extrême que vers l'autre du spectre; de telle manière, on peut trouver d'infinies couples de valeurs de λ pour lesquelles la conjuguée coïncide.

Dans la pratique, on optimise la mise au point de façon à faire coïncider les images dans le bleu et le rouge, et alors l'image apparaît entourée par un halo vert (conjuguée plus courte) quand on soulève l'objectif, et par un halo violet (plus longue) quand on le baisse.

Comme ça il existe encore un spectre résiduel, mais évidemment plus étroit, dit "**spectre secondaire**" (fig. 40 B).

Ce type de correction de la chromatique axiale est dit "**achromatisme**" et il est adopté dans les objectifs de microscope (ou de jumelle, longue-vue, etc.) classifiés comme "**achromatiques**" (voir le § 19.3) qui paraissent sur le marché dans les premières décennies de 1800 (Lister, 1829) peu après l'introduction, en Angleterre, des objectifs achromatiques pour longue-vue (Dollond, Londres, 1757)[49].

[47] En réalité la chose est plus complexe car doivent coïncider aussi les points principaux.

[48] Cette combinaison de deux lentilles en verre flint et en verre crown est dite "**doublet achromatique**" et elle peut être "collée" ou "décollée".

[49] La priorité de Dollond en vérité a été contestée par quelques artisans parmi ses contemporains. L'anglais J.J LISTER (1786-1869), peut-être le premier, utilisa les combinaisons de doublets pour corriger simultanément la chromatique et la sphérique dans le microscope (1829).

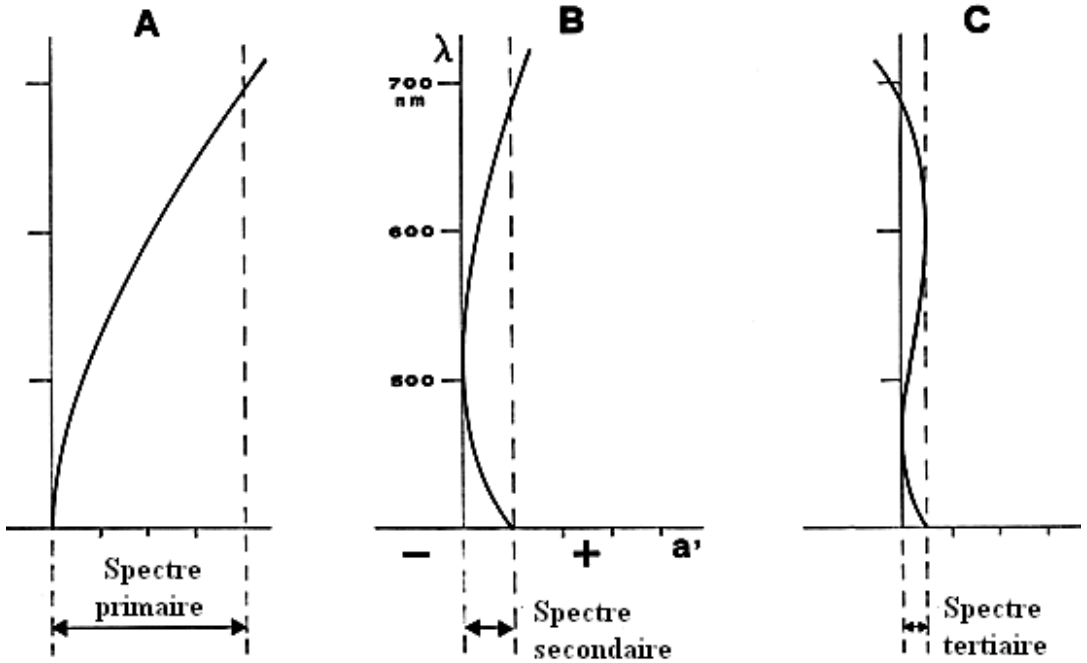


Fig. 40

En utilisant des verres spéciaux et aussi des matériels naturels comme la fluorine (fluorure de calcium, CaF_2), douée de dispersion minimale et de bas index, il est possible de réduire beaucoup le spectre secondaire. C'est ce que se fait dans les objectifs "**semi-apochromatiques**" ou "à la fluorine" (voir le § 19.3) projetés et construits par la maison milanaise F.lli Koristka à la fin du 19ème siècle, et puis largement imités.

Avec une encore plus grande complexité du système, et avec large usage de verres spéciaux et de fluorine, qu'on obtient aujourd'hui, heureusement, par un procès synthétique, on peut améliorer les choses en repliant ultérieurement la courbe de manière qu'il soit possible de faire coïncider la position de l'image pour trois différentes valeurs de λ (fig. 40 C). Le spectre qui reste ("**spectre tertiaire**") est très réduit.

Ce type de correction est dit "**apochromatique**" et il est utilisé dans les objectifs "apochromatiques" (§ 19.3) projetés dans les usines Zeiss de Jena en 1886 par Ernst Abbe. Ce résultat ne peut pas être obtenu par un "doublet" simple comme la correction achromatique.

Récemment, l'introduction de types de verre toujours nouveaux dans les instruments optiques et de nouveaux moyens de calcul électronique consentent à certains constructeurs de replier encore la courbe de dispersion de façon à faire coïncider la position de l'image pour quatre différentes valeurs de longueur d'onde à l'intérieur du spectre optique.

Nous verrons comment l'aberration chromatique est traitée dans les oculaires.

13.2.2 - L'aberration chromatique latérale ou transversale

Nous supposons d'ignorer, ou d'avoir corrigé, la chromatique axiale, au sens que la position de l'image soit unique pour tout le spectre. Malgré cela, la dispersion de l'index et de la focale porterait à un différent agrandissement pour chaque valeur de λ. Cela signifie, toujours en opérant en lumière blanche, que les infinies images (correspondantes aux infinies valeurs de λ) peuvent même se trouver sur le même plan, mais elles ont une différente dimension.

Celle-ci est la "**chromatique latérale**" (voir le § 19.3.1). Sur l'axe toutes les images évidemment coïncident, mais en allant vers les marges du champ, pour chaque point objet particulier, on a une série de points-image de différente couleur de plus en plus éloignés entre eux à mesure qu'on s'éloigne de l'axe, c'est-à-dire à mesure que augmente le champ. Cette succession de points image de différente couleur (correspondants à toutes les valeurs de λ présents dans la radiation uti-

lisée) représente un petit spectre et il fait que les marges de l'image apparient encore entourés par des halos colorés. Mais avec cette différence: les halos n'existent pas au centre du champ et ils augmentent de largeur si augmente la distance de l'axe, c'est-à-dire le champ; de plus, ils sont symétriques par rapport à l'axe. La chromatique latérale exprimée comme longueur du spectre, c'est-à-dire comme largeur des halos colorés, est proportionnelle au champ, mais indépendante de l'ouverture. Elle peut être mesurée au moyen d'un micromètre oculaire. Dans une lentille non corrigée, la position d'un point-image dans le "bleu" (436 nm) peut être éloignée du même point dans le "rouge" (630 nm) d'une longueur égale jusqu'à 1,5% du champ.

Cette aberration se déclare souscorrigée ou positive quand l'image apparaît plus grande à la longueur d'onde plus petite (un objet clair sur fond noir apparaît bordé de violet vers les bords du champ).

La fig. 39 schématisait l'effet superposé des deux types d'aberration chromatique. La fig. 76, § 19.5.4, montre l'effet pratique des deux aberrations.

Nous verrons comme la chromatique latérale est corrigée dans les différents types d'objectif et d'oculaire du microscope (§ 19.3.1).

13.2.3 - L'aberration sphérique ou "de sphéricité"

Jusqu'à présent on a envisagées les variations de quelques caractéristiques d'une lentille (focale, position des points principaux et par suite position et dimension des images) en relation à la longueur d'onde λ. Pour ça on a parlé de "**aberrations chromatiques**".

Maintenant nous voulons parler par contre d'aberrations du point "**achromatique**s", c'est-à-dire qui se présentent même en radiation monochromatique, en étant toutefois leur cours lié à la valeur de λ.

L'aberration sphérique est une variation de la focale et par suite de la position de l'image en fonction de l'ouverture. La fig. 41 illustre le phénomène: pour un même point objet (à distance infinie dans l'illustration, mais celui-ci est seulement un cas spécial) on a différentes images à différente distance de la lentille en fonction de l'ouverture, c'est-à-dire de l'inclinaison des infinis rayons convergents dans l'image. Nous pouvons distinguer un foyer "**paraxial**" P formé à la moindre ouverture, un foyer "**marginal**" M (à l'ouverture maximale) et un "**zonal**" Z, formé par les rayons appartenant à une "zone" intermédiaire[50].

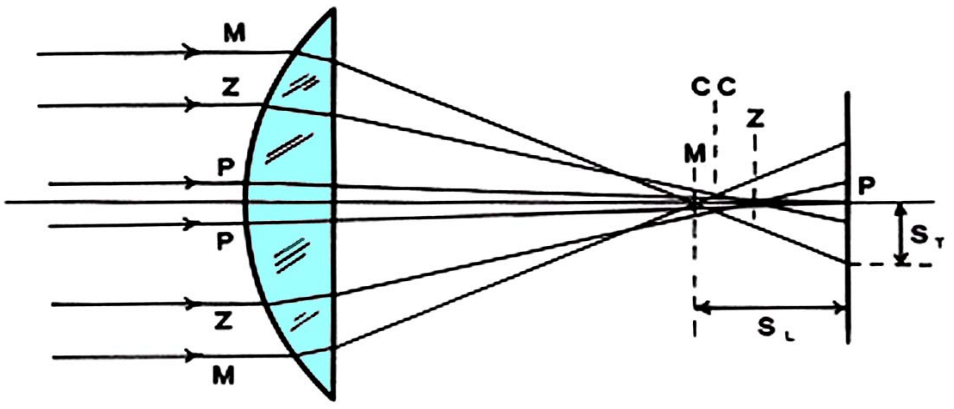


Fig. 41

Il est évident que, n'importe quel on choisisse des "foyers" sur cités comme meilleure image, il sera entouré toujours d'un halo dû aux rayons qui se dirigent dans un foyer plus près ou plus éloigné. Cet halo est toujours présent, on peut tâcher seulement de le minimiser. Ou mieux, en regardent la fig. 41, on peut imaginer que l'enveloppe de tous les rayons appartenant à toutes les zones de la lentille vienne constituer une figure caractéristique à forme à peu près de double cône

[50] On appelle en optique "**zone**" une region annulaire centrée d'une image ou d'une lentille quelconque douée d'un axe de symetrie.

avec le sommet commun et un arrondissement de la surface dans les alentours du sommet. Telle figure s'appelle "**caustique**" avec référence à la figure formée par les lentilles ou par les miroirs concaves utilisés pour concentrer les rayons solaires et allumer le feu.

La caustique, sectionnée avec un plan perpendiculaire à l'axe, fait voir toujours une figure circulaire, jamais un point. On peut donc minimiser cette figure en cherchant la meilleure focalisation, jamais l'annuler; elle représente le "cercle de confusion" dû à la sphérique et on cherchera toujours le "**cercle de moindre confusion**" (CC dans la fig. 41) en utilisant la mise au point. Tel cercle endommage évidemment la résolution (pour les motifs déjà dits dans le § 13.2) et de la même façon le microcontraste; on peut en mesurer le diamètre pour avoir une mesure quantitative de la sphérique, mais cette méthode n'est pas simple à cause de la superposition d'autres phénomènes. Plus loin nous verrons une méthode beaucoup plus facile.

La sphérique, exprimée comme diamètre du cercle de confusion, est indépendante du champ, mais elle est proportionnelle au cube de l'ouverture. Elle grandit donc très rapidement dans les systèmes forts. On peut exprimer la sphérique aussi comme distance axiale (SL dans la fig. 41) entre foyer marginal[51] et paraxial, mais ceci n'est pas utile en microscopie.

Le terme "sphérique" se réfère au fait que telle aberration est liée à la forme sphérique des surfaces des lentilles usuelles, et on pourrait l'éliminer en donnant aux surfaces une forme asphérique spéciale. Étant donnée la difficulté de construire les surfaces asphériques avec les tolérances nécessaires, telles surfaces sont utilisées seulement dans les collecteurs et les condensateurs, où les tolérances sont plus larges, ou dans certains objectifs photographiques. La sphérique se corrige par contre dans les microscopes avec la combinaison de lentilles sphériques de forme et index différent.

Un système corrigé de sphérique s'appelle "**aplanétique**". Mais on rappelle que la coïncidence du foyer paraxial et marginal ne comporte pas aussi nécessairement la coïncidence avec eux des autres, infinis, foyers "zonaux". Un système aplanétique peut comporter par suite un "résidu" de sphérique zonale (résidu de sphérique dans les zones intermédiaires quand elle est corrigée pour les zones marginales et paraxiales). De plus, l'aplanétisme peut être vérifié pour une ou plusieurs valeurs de λ, mais pas pour les autres ("sphérochromatisme"). Dans les objectifs achromatiques, la sphérique est corrigée pour le centre du spectre optique, dans le apochromatiques classiques, pour deux valeurs de λ ; aujourd'hui même pour trois.

Cette aberration est presque la seule qui peut être empirée sérieusement par un usage erroné de l'instrument et, étant donné qu'elle est une des plus grandes causes de perte de définition dans le microscope, il est bien d'examiner en détail les causes de son aggravation.

13.2.3.1 - La longueur du tube

Nous parlons ici génériquement de la distance entre objectif et oculaire, comme elle est prévue par le constructeur, sans faire distinction entre "longueur optique" ou "mécanique" (§ 10).

Cette distance influe sur la conjuguée image (et sur l'agrandissement) de l'objectif et par suite sur ses conditions de travail et elle influe sur le degré de la sphérique. Elle est fixée pendant le projet étant donné qu'elle constitue une des caractéristiques du système.

La longueur du tube était variable dans beaucoup de modèles de microscope jusqu'à environ 1950, spécialement si monoculaires. Il s'agissait des **tubes "télescopiques"**, formé par 2 ou 3 parties, une coulissante dans l'autre; la variation du "**tirage**", c'est-à-dire de leur longueur, avait comme but principal de modifier avec continuité l'agrandissement de l'objectif de façon à arrondir les "valeurs micrométriques" des objectifs (§ 12.3). Mais la même variation, en plus ou en moins, introduit un résidu de sphérique dans l'objectif, toujours en plus ou en moins. Nous expliquons ce que nous entendons avec "plus ou moins".

Une lentille simple agit comme décrit (fig. 41) et on peut la considérer "**souscorrigée**" (ou «non corrigée»). Si on fait coïncider le foyer marginal et celui paraxial, nous disons qu'elle est

[51] Foyer marginal comme point de convergence des rayons qui traversent la zone marginale de la lentille (**M** dans la figure 41).

corrigée (à part les résidus zonaux); mais elle peut être "**surcorrigée**" si l'aberration a un cours inverse, c'est-à-dire si le foyer marginal est plus long, plus loin de la lentille, de celui paraxial. En partant d'un système corrigé, l'addition d'un résidu de sphérique, causé par une variation Δt de la longueur du tube, peut porter donc à une légère surcorrection ou souscorrection. Vice versa, si l'objectif est affecté, pour des motifs de projet ou d'assemblage, d'un résidu de sphérique, voilà que le tube télescopique peut fournir un remède en ajoutant un résidu de signe opposé.

Pour quantifier, un faible objectif avec ouverture NA = 0,25 tolère une variation Δt de la longueur du tube de ± 30 mm environ; avec ouverture de 0,65 on a Δt = ± 10 mm; avec ouverture de 1,3, Δt = ± 6 mm.

Dans la majorité des statifs modernes, le tube n'est pas télescopique, mais dans les modèles bioculaires au moins un des deux embouts porte-oculaires est réglable en longueur (nous verrons pourquoi) et une régulation erronée est donc toujours possible. De plus, la variation de la distance interpupillaire, c'est-à-dire de la distance entre les axes des oculaires, dans certains cas, porte aussi à une variation de la longueur du tube (§ 24.1.3).

Dans d'autres cas, une variation de cette longueur peut être introduite par certains "tubes intermédiaires" ou accessoires interposés entre objectif et oculaire qui déroulent des fonctions différentes (§ 25).

13.2.3.2 - La distance entre les lentilles

La sphérique est sensible aussi à une variation de la distance entre les lentilles de l'objectif, en particulier entre la frontale (la lentille inférieure, en général la plus forte) et les autres. Sur cette situation le praticien n'a aucun moyen d'influer, sauf le cas des "**objectifs à correction**" (A. Ross, 1838[52]) dans lesquels une bague extérieure graduée permet de changer justement la distance entre les lentilles. Telle bague permet donc d'optimiser la correction de la sphérique de l'objectif et de compenser les résidus dus à une valeur erronée de la longueur du tube ou d'épaisseur de la lamelle (voir plus loin). La régulation de ce collier comporte, souvent, une légère altération de la mise au point.

Dans certains objectifs, le collier permet aussi de neutraliser, en partie, une valeur erronée de l'index de réfraction de l'éventuel huile pour immersion, ou bien d'utiliser des liquides différents (eau, glycérine, etc.). Comme ça on peut compenser aussi une valeur exceptionnelle de l'index de l'objet, si de grande épaisseur.

On remarque que ces objectifs à correction sont seulement les plus forts, avec ouverture NA > 0,7, étant donné, on a vu, que la sphérique est proportionnelle au cube de l'ouverture. Dans les forts objectifs sans correction, le constructeur ajuste d'une manière stable la distance entre les lentilles à la longueur du tube et à l'épaisseur nominale de la lamelle. Pendant l'assemblage, cette distance est optimisé par tentatives ou avec des retouches à l'usinage des parties mécaniques, ou en insérant entre les montures des différentes lentilles ("barillets") des bagues-espace spéciales en métal ou en plastique. Telles bagues sont très minces, parfois produites en plastique transparente presque invisible, et pendant le démontage des objectifs elles sont aisément déformées ou perdues. Voilà un autre soin à prendre quand on doit démonter un objectif fort.

13.2.3.3 - L'épaisseur de la lamelle

On a expliqué (§ 12.1) qu'en plusieurs cas l'objet du microscope est déposé sur une petite lame porte-objets et il est couvert d'un "couvre-objet" ou "lamelle".

[52] Andrew ROSS (1798 – 1859), constructeur londonien de microscopes, associé à J. J. Lister.

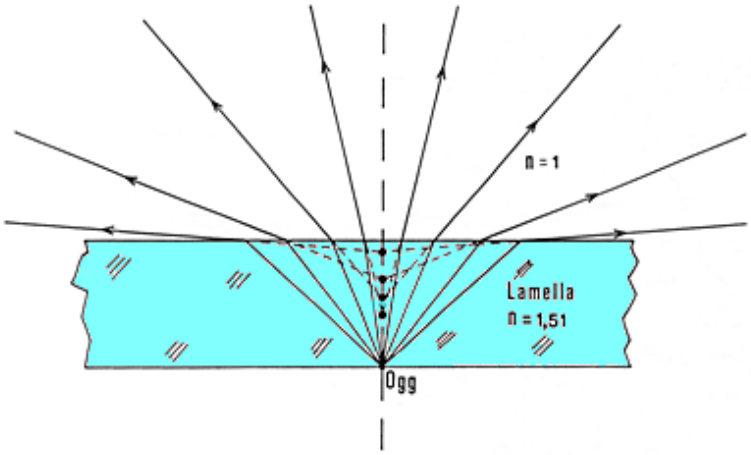


Fig. 42

Voyons quelle influence a la lamelle sur la formation de l'image de la part de l'objectif. On considère la fig. 42 dans laquelle est schématisée la section d'une lamelle; l'objet adhère à sa surface inférieure et nous en considérons le point axial (Ogg). De celui-ci émerge un faisceau de rayons divergents qui traversent l'épaisseur de la lamelle; à la surface supérieure de celle-ci, en entrant dans l'air, les rayons divergents s'éloignant de l'axe, selon la loi de Snell. Mais, si on fait les calculs exacts et on trace le prolongement des rayons réfractés à reculons (lignes hachurées), on constate que, avec le grandir de l'ouverture, leur point de rencontre se déplace de plus en plus en haut. On peut dire que, en regardent du haut l'objet à travers la lamelle comme fait l'objectif (non représenté), on ne voit pas l'objet mais une série d'images virtuelles du même, une pour chaque valeur d'ouverture considérée, à différente hauteur. De cette manière, si l'objectif était du tout corrigé de sphérique en soit même, en devant créer une image réelle d'une série d'images virtuelles à différente hauteur, il produirait à son tour une série d'images réelles à différente distance de soi même: les rayons marginaux produiraient une image à plus grande distance et l'objectif résulterait surcorrigé.

Nous disons aussi que la lamelle devient une partie intégrante du système formateur d'image au même titre des lentilles de l'objectif. Par suite, pour le projet de l'objectif et pour la correction de la sphérique (et d'autres aberrations, en plus petite mesure) l'épaisseur de la lamelle doit être déterminée et respectée avec une certaine tolérance, et ainsi son index de réfraction et sa dispersion.

En pratique, il n'est pas difficile de standardiser l'index et la dispersion de la lamelle en utilisant des verres légers de composition simple. Beaucoup plus difficile est avoir une certaine précision dans l'épaisseur **d** de la lamelle. La tolérance admissible sur **d** change évidemment avec l'ouverture:

Jusqu'à NA = 0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Δ_d > ± 50 mm	± 5 mm	± 0,7	± 0,2	± 70µ	± 25µ	± 15µ	± 8 µ	± 4µ

La valeur nominale de **d** est normalement de 0,17 mm saufs les cas spéciaux[53]. Dans les objectifs destinés à l'usage avec des platines chauffantes ou micro-four, on prévoit une lame de couverture plus épaisse, comme il est prévu dans la construction de la platine même, par ex. de 2 mm, et pas de verre normal, mais de silice ou autre matériel résistant à un large gamme de températures.

Quand on observe des préparations non couvertes par une lamelle (alliages métalliques, roches, etc.) où l'éclairage est épiscopique, c'est-à-dire du haut (§ 30.1), et la lamelle créerait des reflets nuisibles, on peut utiliser des objectifs spéciaux calculés pour une correction optimale en absence de lamelle (d = 0)(voir le § 19.2.5). Mais dans les cas normaux il faut confectionner les "préparations" avec des lamelles dans lesquelles **d** rentre dans les tolérances sur indiquées.

Comment vérifier l'épaisseur **d** des lamelles ?

[53] Selon les règles DIN 58878/ISO 8255/1, la valeur réelle de **d** doit être d = 0,17 + 0 / − 0,02.

Avant tout, acheter des lamelles dans lesquelles l'épaisseur est déclarée par le producteur. Parfois, l'épaisseur est indiquée par un numéro: 1 - 1,5 - 2, etc. Dans ce cas, seulement le numéro 1 ou 1,5 ou 1½, correspond, environ, à l'épaisseur de 0,17; les numéros suivants correspondent aux grandes épaisseurs, acceptable seulement en cas spéciaux[54]. Mais tout ça ne suffit pas.

À l'intérieur de la même boîte ou aussi d'un point à l'autre de la même lamelle on peut trouver des différences excessives. À ce point il ne reste qu'à mesurer les lamelles une par une avec un micromètre centésimal ("Palmer"). Ne voulant pas faire ceci, on rappelle que les objectifs les plus sensibles à la valeur de **d** sont les plus forts, et ces derniers sont fournis souvent du "collier de correction", comme on a déjà dit. Le collier est toujours gravé directement en valeurs de **d**, la graduation va normalement de 0,1 à 0,23 mm.

Récemment, ont été produits des objectifs à correction dans lesquels la régulation permet des variations de l'épaisseur de la lamelle entre 0 et 2 mm; ceci en vue de l'usage dans des statifs renversés pour diascopie dans lesquels l'objet (cultures de cellules ou micro-organismes) est observé par-dessous à travers le fond d'une cuvette ou petit bac, en verre ou résines synthétiques, dont l'épaisseur peut être très variable (voir le § 27.1.5 et la fig. 108).

En résumant, nous avons alors trois facteurs qui influent sur la sphérique, à disposition du praticien:

--- longueur du tube; celle-ci cependant irait tenue sur la valeur nominale, même quand elle est variable, pour éviter d'autres problèmes (parfocalité, changements de grandissement, etc.);

--- épaisseur **d** de la lamelle qui est supposée inconnue;

--- régulation de l'éventuel "collier de correction".

Sur ce dernier point, voilà comme on procède. Quand on suppose **d** inconnu, la graduation sur l'objectif est inutile. Alors il faut utiliser le collier de correction par tentatives à la fin d'obtenir la définition maximal. On apprécie ceci en choisissant dans la préparation une zone bien contrastée aux bords nets (granulations fines bien colorées, etc.). En changeant la préparation, il faut refaire la régulation parce que l'épaisseur de la lamelle sara certainement différente.

Da toute façon la suivante règle pratique peut être utile: *la sphérique est souscorrigée quand la lamelle est trop mince ou le tube trop court ou la distance entre les premières lentilles de l'objectif est insuffisante. Elle est surcorrigée dans les cas inverses. La correction de la sphérique est donc un fait global*[55].

La contribution de l'oculaire à la sphérique dans l'image finale est négligeable.

---

[54] # 1 = 0,13 – 0,17; # 1 ½ = 0,16 – 0,19; # 2 = 0,17 – 0,25 mm.

[55] Il existe un rapport entre l'erreur dans l'épaisseur **d** de la lamelle (Δ_d) exprimé en centièmes de mm, agrandissement de l'objectif (M_{ob}) et variation de la longueur du tube (Δ_t, exprimée en mm, comme différence entre longueur nominale du tube et longueur nécessaire pour compenser l'erreur Δ_d): $\Delta_t = \Delta_d \cdot M_{ob}^2 / 250$. Voir aussi la formule (89) dans le § 31.2.4.

13.2.4 - La coma

Le terme «coma» a la même racine étymologique de “chevelure” ou “comète” pour l’aspect caractéristique qu’elle présente de l’image d’un objet très petit.

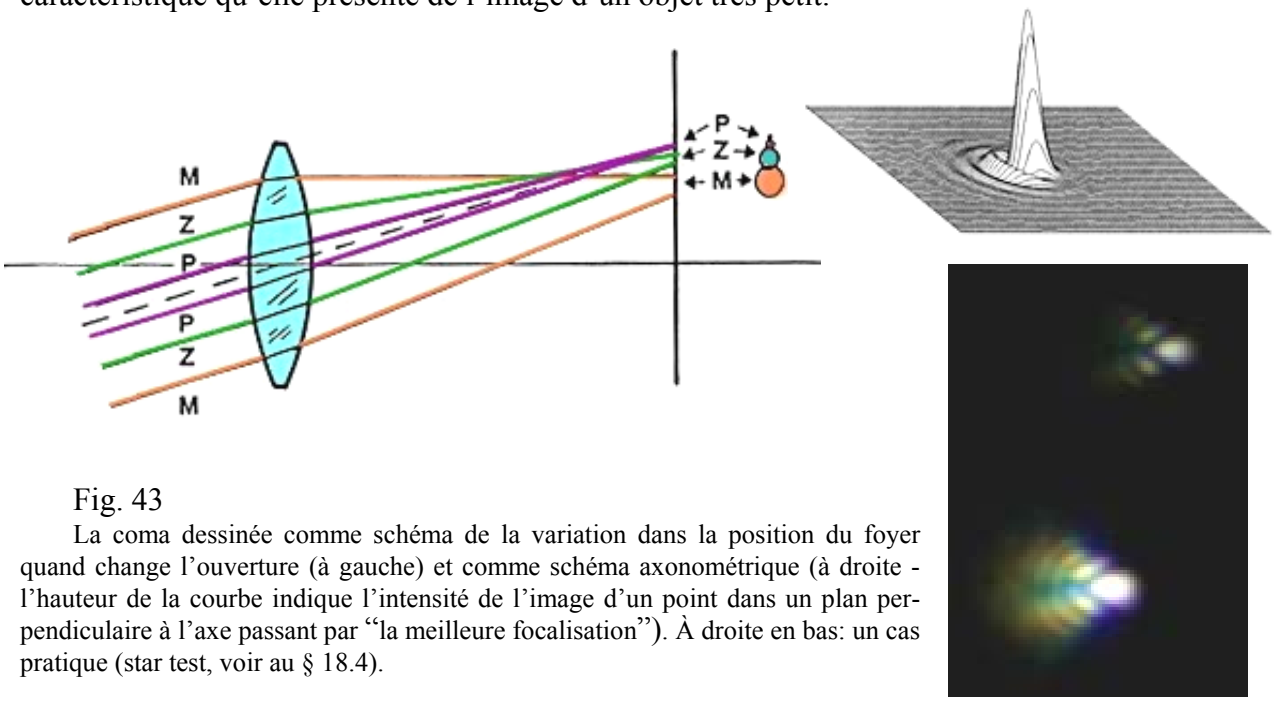


Fig. 43
La coma dessinée comme schéma de la variation dans la position du foyer quand change l’ouverture (à gauche) et comme schéma axonométrique (à droite - l’hauteur de la courbe indique l’intensité de l’image d’un point dans un plan perpendiculaire à l’axe passant par “la meilleure focalisation”). À droite en bas: un cas pratique (star test, voir au § 18.4).

Cette aberration est “extra-axiale”, comme la chromatique latérale, au sens qu’elle n’existe pas sur l’axe d’un système centré et elle grandit quand augmente le champ: en conséquence de cette asymétrie, le cercle de confusion provoqué par la coma ne peut pas être circulaire; il est en effet allongé en direction toujours radiale et présente un point très lumineux qui nuance dans une queue graduellement élargie: voir la fig. 43 qui indique le parcours de rayons paraxiaux (P), marginaux (M) et zonaux (Z). Il est possible d’évaluer la coma en mesurant la longueur et la largeur de la “queue” mais, étant donné son aspect nuancé, il faudrait exécuter une mesure photométrique point par point et cela en microscopie est difficile. La coma est proportionnelle de toute façon au carré de l’ouverture. Elle se corrige en choisissant opportunément la position du diaphragme et la forme des lentilles. La coma est absente dans un système symétrique avec le diaphragme au centre et de toute façon elle peut être corrigée seulement en respectant la “condition des sinus” d’Abbe (voir le § 19.3.1 et la formule (68)).

De tout ce qu’a été dit, il résulte évident que la coma sur l’axe ne peut pas exister. Si au centre du champ d’un microscope on observe un résidu de coma, la cause est souvent une seule: une ou plus lentilles de l’objectif ne sont pas centrées sur l’axe commun. Nous verrons comme on révèle un tel résidu de coma; mais entre temps nous pouvons dire que les constructeurs, étant donnée l’extrême criticité du centrage de l’objectif, assignent d’habitude une position fixe à toutes les lentilles de l’objectif sauf une, la deuxième ou la troisième du bas, qui est laissée flottante et permet un certain jeu entre le barillet de la lentille et son logement. À telle “**lentille flottante**” correspondent d’habitude dans la monture générale de l’objectif trois ou quatre trous; au moment de l’assemblage ou de l’entretien, tels trous permettent de pousser sur la lentille flottante et de la déplacer. De cette manière, s’il y a une erreur résiduelle de centrage dans les autres lentilles, celle flottante permet d’obtenir une compensation globale et de minimiser la coma sur l’axe (voir le § 19.5.2).

La figure de la coma peut montrer le point le plus lumineux dirigé vers l’axe (coma centrifuge ou positive) ou vers la périphérie (coma centripète ou négative), comme dans la fig. 43.

13.2.5 - L'astigmatisme

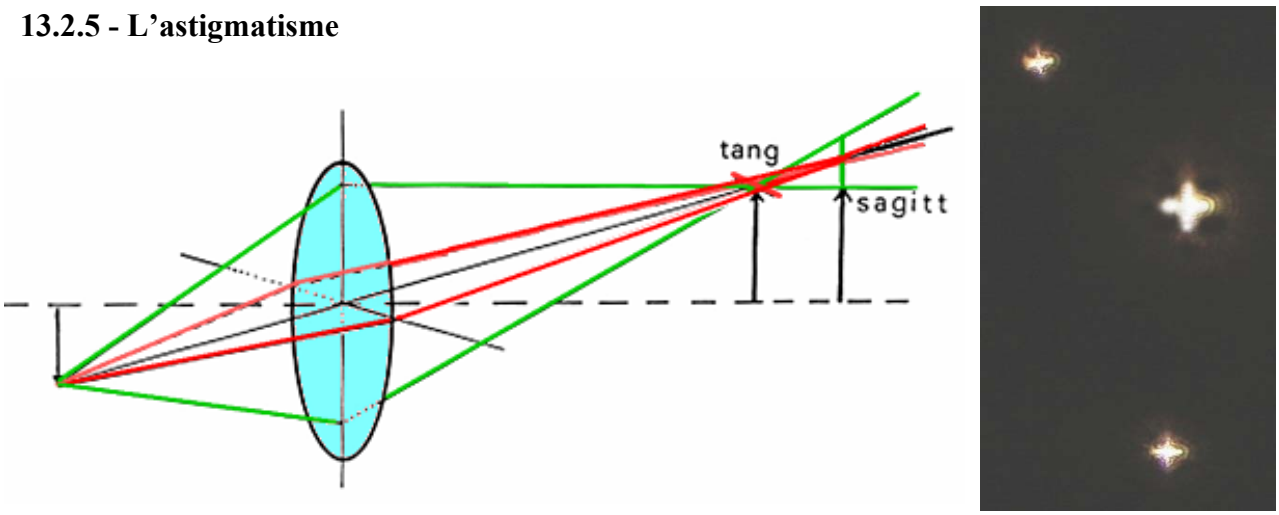


Fig. 44 – À gauche, un schéma. À droite, un cas pratique (star test dans "la meilleure focalisation": on voit les deux focalines superposées; le centre du champ est hors de l'image, à gauche).

En changeant la mise au point, la figure de coma, visible dans l'image d'un point objet, peut s'élargir, mais conserve sa forme, et la "queue" reste dirigée en étoile.

Ce caractère distingue la coma de l'astigmatisme qui présente une image dédoublée et déformée, bien reconnaissable, de chaque point objet. En particulier, le faisceau des rayons qui convergent dans l'image d'un point objet ne se recueille pas autour d'une zone de forme circulaire, mais autour d'un petit segment (dit "**focale astigmatique**" ou "**focaline**") dirigée tangentiellement, au moins dans une lentille simple. Après cette focaline, le faisceau prend une section de forme ovale, puis circulaire ("cercle de moindre confusion"); plus en avant, le faisceau revient à la section ovale, mais avec le plus grand axe dirigé en étoile) et finalement il s'appuie sur une nouvelle focaline, c'est-à-dire sur un segment, maintenant radial. Finalement il s'élargit de nouveau et il redevient circulaire. Ceci est schématisé dans la fig. 44, à gauche.

Ces caractéristiques de l'astigmatisme permettent de le reconnaître aisément au microscope ou dans d'autres instruments: en observant un très petit objet comme une étoile dans une longue-vue ou un télescope ou le "star test" au microscope (voir le § 18.4), et en modifiant la mise au point, on voit que l'image s'allonge en direction radiale ou tangentielle ou vice versa, pendant que la sphérique fournit une image toujours circulaire et la coma une figure allongée en étoile.

Même l'astigmatisme est nul sur l'axe et il grandit avec le champ comme la coma; soit la longueur des focalines que la distance entre elles augmentent avec le carré du champ; la distance est indépendante de l'ouverture, pendant que la longueur des focalines est directement proportionnelle à l'ouverture.

L'astigmatisme peut surgir par l'introduction dans le chemin optique d'une lame transparente aux faces planes et parallèles (prismes, etc.). Heureusement, dans la pratique, cette éventualité est improbable dans l'espace objet-objectif, à moins qu'on introduise des valeurs très anomales dans l'épaisseur de la lamelle, mais alors on aurait une sphérique très forte à cacher l'astigmatisme. Plus commune c'est l'introduction de prismes entre objectif et oculaire (séparateurs d'image, tube bioculaires, etc.), mais même ici il y a un avantage: on traite avec des faisceaux d'ouverture modeste et de petit champ pour lesquels l'effet des ces éléments est modeste.

Nous avons dit que pour chaque point objet on a un couple de focalines dans l'espace image; si on trace deux surfaces contenants respectivement toutes les focalines tangentielles et toutes les sagittales, on a deux surfaces concaves vers la lentille (au moins si la lentille est simple) nommées "**nappes**" ("nappe tangentielle" et "nappe sagittale", comme il est schématisé dans la fig. 45.

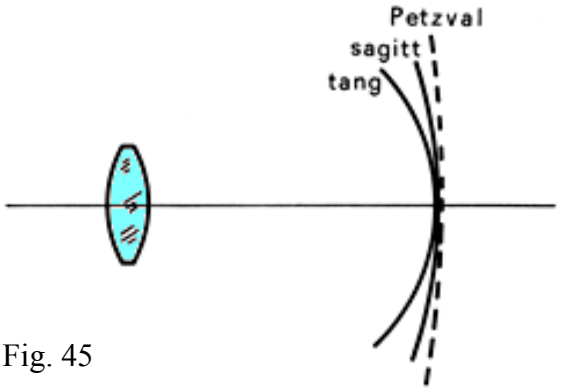


Fig. 45

Étant donné que l'astigmatisme n'existe pas sur l'axe, les nappes se touchent sur l'axe et elles divergent à mesure qu'augmente le champ, avec le carré du champ. Dans la fig. 45 est indiquée en section même la surface courbe due à la courbure de champ ("**de Petzval**") qui ne coïncide pas avec les nappes dans une lentille simple: l'astigmatisme consiste justement dans la non coïncidence des trois surfaces. Si les nappes sont concaves vers la lentille, l'astigmatisme est négatif ou souscorrigé; il est positif ou surcorrigé dans le cas opposé. Le devoir du projeteur est justement celui de diminuer le plus possible la distance entre les trois surfaces, si possible avec les deux nappes des côtés opposés de la surface de Petzval (§ 13.1.1).

Étant donné que l'astigmatisme se présente seulement aux marges du champ, il vient souvent négligé dans les projets les plus économiques; il est normal dans les objectifs achromatiques, mais aussi certains constructeurs en renom ne le corrigent pas du tout dans les objectifs apochromatiques. En outre il devient difficile à corriger quand on cherche le planage du champ (objectifs "plan", voir le § 19.2.3.2) pour lequel les objectifs plan doivent toujours être contrôlés par respect aux résidus d'astigmatisme. Il est possible de toute façon de corriger l'astigmatisme, aussi dans les objectifs plan, en ajoutant des autres éléments au système; et ceci explique le haut coût des objectifs les plus corrigés, en particulier des «plans».

Si dans l'usage pratique on relève de l'astigmatisme aussi au centre du champ, la cause peut être variée: inclinaison de quelque prisme ou de quelque lentille par rapport à l'axe, faute de centrage, faute dans la forme de quelque lentille. Si l'astigmatisme se présente sur l'axe seulement avec une objectif donné, on peut être presque certains qu'une de ses lentilles est monté avec une inclinaison incorrecte. S'il se présente avec tous les objectifs et avec un égal cours, la cause se trouve dans un élément extérieure à l'objectif (systèmes intermédiaires, tube porte-oculaires, inclinaison erronée du revolver ou d'autres supports mécaniques, etc.).

Un système corrigé pour l'astigmatisme s'appelle génériquement "**anastigmatique**"; s'il est corrigé aussi pour la courbure de champ il s'appelle "**planétique**" ou "**planéique**". Sur l'astigmatisme, plus que la forme des lentilles, influe la position du diaphragme et, de plus, une lentille divergente montre un astigmatisme de signe opposé à celui d'une convergente, de cela l'utilité d'augmenter le nombre des lentilles, avec toutes les contre-indications du cas (§ 17).

Il n'est pas difficile d'avoir une mesure approchée de l'astigmatisme en appréciant la longueur des focalines au moyen d'un micromètre oculaire. Comme unité de mesure on peut se servir de l'observation d'une centrique avec le star test (§ 18.4).

13.3 - CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES sur les ABERRATIONS du POINT

Nous avons classé telles aberrations en deux groupes:

1) chromatiques, longitudinale et latérale, dépendantes de la longueur d'onde, et:

2) achromatiques, qui se présentent aussi avec radiation monochromatique: sphérique, coma, astigmatisme, mais qui peuvent changer selon la valeur de **λ**.

Eh bien, il est utile en pratique de les distinguer d'une autre manière, encore en deux groupes:

1) **Aberrations axiales**, qui se présentent sur tout le champ, non seulement sur l'axe (chromatique longitudinale et sphérique). Sur l'axe, pour des raisons de symétrie, si le système est centré, le cercle de confusion doit être circulaire, symétrique par rapport à l'axe. Voilà parce que nous avons dit qu'un cercle de confusion allongé au centre du champ, pour coma ou astigmatisme, est toujours dû à un défaut de symétrie dans le système (erreur de forme, de centrage ou d'alignement). Les aberrations axiales s'appellent aussi **symétriques.**

2) **Aberrations extra-axiales**, qui ne se présentent pas sur l'axe (chromatique latérale, coma, astigmatisme). Elles donnent toujours un cercle de confusion ne pas circulaire et pour cela elles s'appellent même "**asymétriques**". Leur absence sur l'axe implique que pour un objectif avec un petit champ et une petite ouverture (longue-vue, jumelle, etc.) il est suffisant qu'il soit corrigé seulement pour la chromatique longitudinale et la sphérique.

Quoi que se sois, l'effet global de toutes les aberrations du point est celui de produire, pour chaque point objet, une image agrandie, le cercle de confusion, circulaire sur l'axe, allongé hors de l'axe. Et nous avons déjà dit que tel cercle endommage soit la résolution que le microcontraste.

Alors le but du projeteur sera de réduire le plus possible le diamètre de tel cercle. Et en effet, avec le passer du temps, les choses améliorent, soit pour la disponibilité de verres optiques avec des caractéristiques de plus en plus favorables, soit pour le développement des instruments de calcul automatique, qui abrègent non seulement les temps de calcul, mais permettent des solutions de plus en plus raffinées et optimisées.

Le calculateur d'objectifs de microscope jouit en outre d'un grand avantage: celui de travailler sur des systèmes de petites dimensions. En effet, le diamètre du cercle de confusion est proportionnel, à conditions égales, aux autres dimensions linéaires du système comme la focale et les conjuguées. En conséquence, un objectif de microscope, qui a une conjuguée image d'environ 150 mm, a un cercle de confusion, à égalité de correction et d'ouverture côté image, 10 fois plus petit d'un objectif de longue-vue avec focale, par ex. de 1.500 mm.

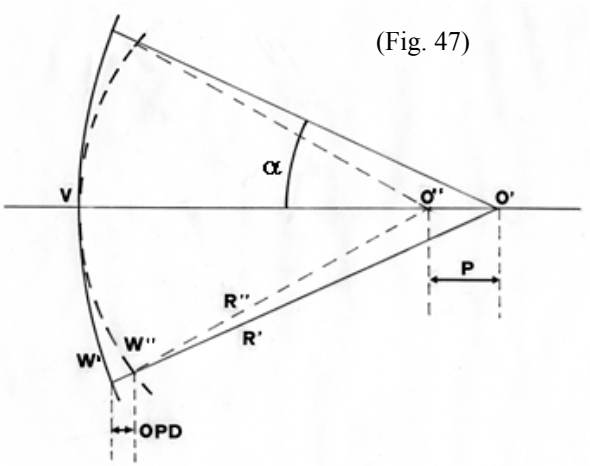
D'autres conditions facilitent l'optimisation de l'objectif du microscope du point de vue des aberrations et le rendent beaucoup plus corrigé de n'importe quel autre type d'objectif (par ex. photographique): •• l'agrandissement est fixe; •• l'ouverture est fixe; •• le champ angulaire est petit; •• les dimensions des lentilles sont petites et facilitent l'usage de matériels rares et chers comme la fluorine; •• le petites dimensions des lentilles réduisent les effets nuisibles des non homogénéités inévitables des verres optiques (voir aussi le § 19.2).

Mais, à part les difficultés pratiques et économiques, quel sens a tendre sans fin à la diminution du diamètre du cercle de confusion ?

Aucun. En effet chaque système optique, même en supposant d'annuler l'effet des aberrations, ne produit jamais une image ponctuelle d'un point objet étant donné que survient un phénomène fondamental, la diffraction, liée à la nature ondulatoire de la lumière, et par suite pas éliminable. De ceci nous parlerons dans le § 18.3, mais entre temps on peut dire qu'il est inutile de réduire le cercle de confusion par-dessous la "**figure de diffraction**". Dans les systèmes avec longue focale (objectifs photographiques, de longue-vue, etc.) ceci arrive seulement avec grande difficulté et en cas spéciaux; par contre dans le microscope, en vertu des avantages cités, c'est normal; pour ça on peut définir l'optique du microscope "limité par la seule diffraction" ("**diffraction limited**"). Parmi les autres objectifs, seulement certains types à courte focale pour macrophotographie, les objectifs spéciaux pour la photo-lithographie, etc. peuvent se rapprocher à cette limite.

13.4 - L'ABERRATION d'ONDE

En simplifiant beaucoup, nous mentionnons ici une autre manière de considérer les aberrations du point.



(Fig. 47)

Comme on a expliqué dans le § 2.3, dans un milieu homogène et isotrope le rayon optique est toujours perpendiculaire à la surface de l'onde. Maintenant nous considérons la fig. 47 au § 14, que nous utiliserons pour illustrer d'autres phénomènes. En elle est représentée une onde sphérique (W') qui émerge d'un système optique convergent, ne pas représenté, et va former une image ponctuelle en O' qui est son centre. Donc en O', selon tout ce qu'on a expliqué dans le § 2.3, se dirigent tous les rayons comme R', qui sont perpendiculaires à W'.

Un système sans aberrations, (à part la diffraction dont on parlera plus loin) produirait une onde W' exactement sphérique. En présence d'aberrations, l'onde s'écarte de la forme sphérique; si on imagine l'onde altérée (W") avec le point centrale V en commune avec l'onde idéale sphérique (W'), pour chaque valeur de l'ouverture du faisceau on peut mesurer la distance entre les deux ondes et la loi de variation de cette distance. Celle-ci est l'"aberration d'onde." La distance même peut être exprimée en longueurs d'onde, et quand sa valeur ne dépasse pas $\lambda/4$, on considère le système comme "**optiquement parfait**".

On exprime ainsi une aberration du point en fonction de la forme de l'onde qui converge dans un point image.

13.5 – REMÈDES CONTRE les ABERRATIONS

Nous ne parlons pas ici naturellement des habilités qu'on réalise pendant le projet, mais des (peu) opérations à disposition du praticien pour améliorer les performances de son instrument.

a) Distorsion: il y n'a pas de remède. Pour atténuer les erreurs qu'elle comporte pendant les mesures de longueurs sur l'objet, il y n'a pas que travailler dans la région la plus centrale possible du champ et éventuellement changer l'oculaire et/ou l'objectif.

b) Courbure de champ. Ici vaut la même considération faite pour la distorsion, mais avec l'avantage qu'une fermeture du diaphragme d'ouverture (du condensateur) porte une augmentation de la profondeur de foyer (voir le § 14), et cela atténue les effets de la courbure. On déclarera à son temps cependant quels sont les inconvénients de cette fermeture.

c) Aberration chromatique longitudinale. Le diamètre du cercle de confusion diminue en fermant le diaphragme d'ouverture avec la même réserve à peine citée. Telle aberration dépend beaucoup de la combinaison des systèmes optiques (objectif, oculaire, systèmes intermédiaires) comme nous dirons dans le § 19.3. Dans les cas les plus rebelles, spécialement avec les objectifs achromatiques ou de mauvaise correction, est utile un filtre vert, peut-être du type interférentiel à bande moyenne-étroite, capable d'éliminer les régions extrêmes du spectre optique. Dans la photographie en B - N, tel filtre ne pose pas de problèmes, mais il est intolérable évidemment dans la photographie aux couleurs, et il n'est pas agréable dans l'observation visuelle; il peut produire aussi des variations de contraste non souhaitées avec des objets colorés.

d) Chromatique transversale. La largeur des franges colorées produites par cette aberration ne dépend pas de l'ouverture du diaphragme. Il vient donc à manquer cette possibilité d'intervention.

Plus que la longitudinale, la chromatique latérale est sensible à l'accouplement objectif-oculaire (nous verrons plus en avant quelque critère de choix) et à la présence de systèmes intermédiaires. Reste valide l'opportunité de l'usage de filtres verts.

e) Sphérique. On a déjà vu quels sont les facteurs influents, à la portée du praticien: -- longueur du tube, éventuellement, régulation du tube bioculaire -- régulation des "objectifs à correction" -- épaisseur de la lamelle.

Même dans ce cas, l'aberration est très sensible à l'ouverture du condensateur; en plus, l'usage de quelque filtre peut être utile parce que le cours de la sphérique dépend de λ (on parle de "sphéro-chromatique") et dans tous les objectifs la sphérique est mieux corrigée dans les régions centrales du spectre optique. On conseille donc, en cas de doutes, un filtre vert.

f) Coma et astigmatisme. On peut intervenir seulement en réglant l'ouverture du condensateur. Rarement on peut tirer en cause l'oculaire (attention aux oculaires à grand champ et «photographiques»).

Si ces deux aberrations se présentent aussi au centre du champ, il faut réaligner l'objectif, et éventuellement quelque système intermédiaire et cela est possible en général seulement dans le cas de la coma (voir les §§ 13.2.4 et 19.5.2).

14 - LA PROFONDEUR de CHAMP

On peut traiter même ce sujet, en première approximation, avec les critères de l'optique géométrique utilisés jusqu'à présent, c'est-à-dire en traitant de ces entités abstraites que sont les "rayons" optiques.

La "profondeur" est cette propriété de l'image, obtenue par un système optique, de montrer au point, sans altérer les régulations de l'instrument, beaucoup de plans parallèles de l'objet, compris dans une certaine épaisseur, et perpendiculaires à l'axe. Cette épaisseur est la "**profondeur de champ**" ou "profondeur de foyer". Dans ce contexte on ignore la courbure de champ du système et on suppose l'image plane.

Le terme "profondeur de champ" est emprunté à la photographie, et on le réfère à la profondeur dans l'espace objet qui apparaît simultanément au point. Cependant on peut parler de "**profondeur de foyer**" comme profondeur dans l'espace image dans laquelle l'image est au point de façon acceptable, avec position fixe de l'objet, qui dans ce cas est supposé plan, sans épaisseur. Le terme "profondeur de foyer" est justifiée par le fait que l'image photographique se trouve dans ou près du foyer. Mais en microscopie l'objet se trouve près du foyer et l'image est éloignée du foyer, exactement le contraire de ce qu'arrive en photographie. Pour tout ça les termes "profondeur de foyer" ou "de champ" sont équivoques et il vaut mieux dire "**résolution axiale**" ou "longitudinale" ou "**pénétration**", en général avec référence à l'espace objet.

La pénétration se distribue en parties égales d'un côté et de l'autre de la position de meilleur foyer. Considérons la fig. 46; pour simplicité, nous parlons de l'espace image.

Ob est un objectif qui produit en O' l'image d'un point objet O (où qu'il se trouve). Dans la fig. 46 A, l'objectif est utilisé à pleine ouverture. En B il y a un diaphragme (Da) qui réduit beaucoup l'ouverture utile.

Eh bien, nous savons que, à cause des aberrations ou de leurs résidus, l'image O' n'est pas prive de dimensions, ce n'est pas un "point", mais elle se présente comme un "cercle de confusion" de dimensions finies.

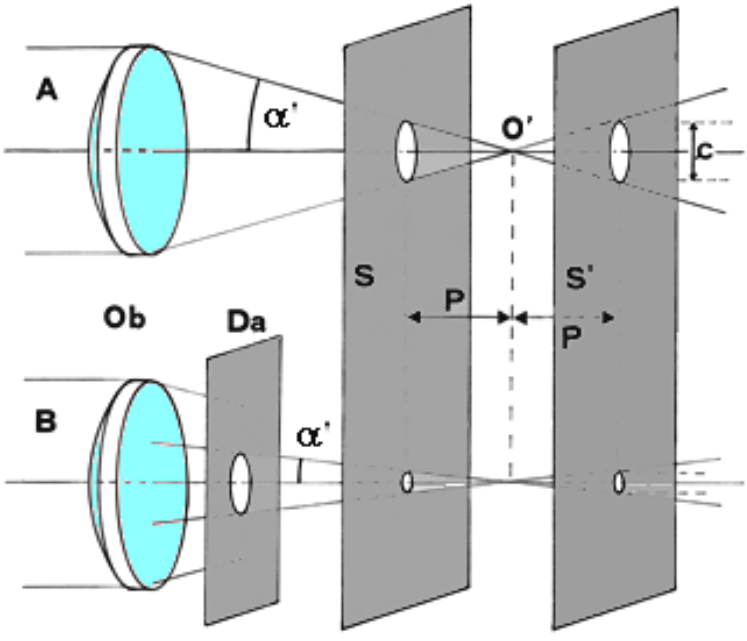


Fig. 46

À cela s'ajoute la "figure de diffraction" dont nous parlerons plus loin. Nous considérons de toute façon, O' comme l'image la plus petite possible d'un point objet, c'est-à-dire comme la moindre section possible du faisceau qui émerge de la lentille Ob. Eh bien, si nous recueillons l'image sur un écran S ou S', perpendiculaire à l'axe, qui est éloigné de Ob plus ou moins par respect à O', la section du faisceau, et par suite le diamètre de l'image, augmente; c'est comme dire que nous avons une image défocalisée.

Entre temps on peut deviner de la figure 46 tout ce qu'on a dit plus haut: que la "défocalisation" ou le diamètre du cercle de confusion augmentent symétriquement des deux côtés de la position de meilleur foyer (O'), c'est-à-dire ils ont la même valeur sur les écrans S et S' si ces derniers s'éloignent de O' de la même mesure. Nous appelons P cette distance; on peut l'identifier avec la

notion de "profondeur de foyer" ou de "**pénétration**", pourvu que les images défocalisées que nous obtenons en S et S' au lieu de O' puissent se considérer "acceptablement au point"[56], comme on a déjà dit.

La notion et la mesure de la pénétration P sont donc liées à la notion de défocalisation "acceptable", et cela est lié à l'usage qu'on veut faire de l'image et aux évaluations subjectives.

En champ photographique, on admet que le diamètre **c** du cercle de confusion causé par la défocalisation ne doive pas dépasser un millième de la focale **f** de l'objectif:

$$c = f / 1000 \tag{35}$$

De cette donnée, évidemment subjective, on peut tirer des valeurs de la pénétration P avec les formules qui suivent. Mais avant tout il faut préciser:

 de la fig. 46 il est évident que les valeurs de P sont entendues avec signe + et − au sens que le plan image peut être déplacé d'une distance P dans un sens ou dans l'autre par rapport au plan de meilleur foyer sur lequel se trouve O'.

 de la (24)(§ 5.2.5) il est connu que, en certaines conditions, f#= 1/2 NA et NA = 1/2 f# pour lequel les valeurs f# et NA peuvent s'échanger; en photographie on utilise en général la valeur f# (ouverture relative), pendant qu'en microscopie on utilise la valeur NA (ouverture numérique).

 Toutes les mesures linéaires utilisées dans les formules de ce chapitre (P, c, λ, etc.) sont exprimées avec la même unité de mesure.

Maintenant, selon différents auteurs, la pénétration P est calculée de manière différente. Voilà les principales formules:

$$P = c \cdot f\# = c / 2\,NA \tag{36}$$

Dans cette formule, qui est simplifiée, on ignore la valeur de la longueur d'onde (λ) qu'on suppose au centre du spectre optique; **c** est le diamètre maximum toléré du cercle de confusion (voir la (35)).

La formule (36) peut être tirée avec des simples considérations trigonométriques de la fig. 46:

$$c / 2 = P \cdot tg\alpha \approx P \cdot sen\alpha = P \cdot NA$$

Les valeurs de NA ou f# expriment l'ouverture de l'objectif côté image. Si on veut appliquer la (36), du côté de l'objet, il suffit de se rappeler que les ouvertures d'un système qui produit une image réelle peuvent être indiquées avec NA (côté objet) et NA' (côté image) et leur rapport est égal à M (agrandissement transversale) (voir la (23) dans le § 5.2.5):

$$NA / NA' = M \tag{25}$$

Naturellement, aussi **c** sera référé au côté objet.

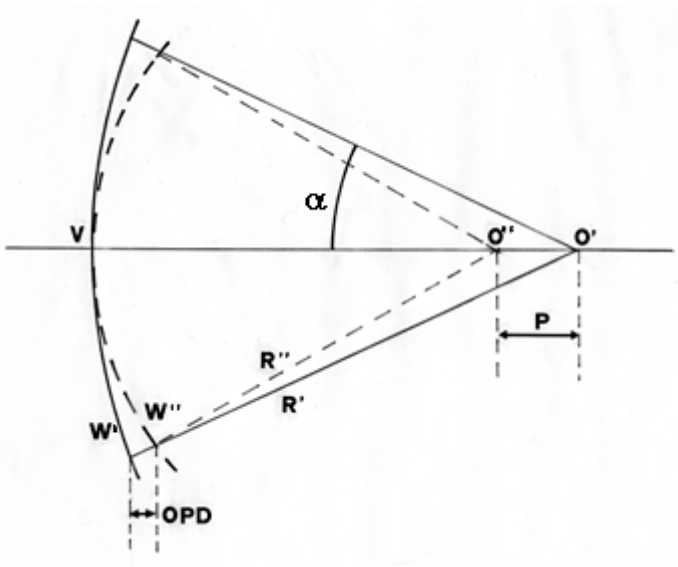


Fig. 47

[56] Dans le cas de la fig. 46, nous nous référons à l'espace image.

Maintenant voyons la fig. 47: soit W' l'onde (sphérique, si le système est exempte d'aberrations) qui émerge d'un système optique et se dirige vers un point image O' qui se trouve sur l'axe. Sont dessinés à ligne entière deux rayons (R') qui correspondent à la plus grande ouverture (**α**) du faisceau convergent en O'. Maintenant on suppose de vouloir recueillir l'image sur un plan (perpendiculaire à l'axe) qui passe pour le point O", éloigné de O' d'une longueur P, qui a la valeur d'une "défocalisation". Naturellement, l'image O', sur ce plan déplacé, s'est élargie et elle correspond à la section droite d'un cône qui a l'axe coïncident avec l'axe optique du système (V – O') et la base en W'. Ces considérations sont évidemment de nature seulement géométrique et elle traitent les rayons et les ondes comme entités géométriques; à ce point de vue alors on peut supposer que notre système optique soit denoué d'aberrations, que l'onde W' soit sphérique, que O' soit un point, et que l'image en O" soit un cercle. Nous verrons que beaucoup de problèmes optiques, pas seulement ceux de la pénétration, doivent tenir compte des phénomènes de diffraction (voir le § 18.3), mais les formules aux quelles nous voulons arriver peuvent pour maintenant être comprises et appliquées avec un approche simplement géométrique.

Revenons donc à l'image "défocalisée" en O". Si elle était bien focalisée (O" serait un point) à cette image correspondrait une autre onde sphérique (W") avec centre en O"; les rayons esquissés comme R" seraient encore ses rayons marginaux. Eh bien, entre l'onde convergente en O' (W') et la nouvelle onde W" il y a une certaine distance, qui grandit à partir du centre (V) jusqu'à la périphérie, et prend là la plus grande valeur (à pleine ouverture), indiquée avec OPD (Optical Path Difference). Il est évident que R" est plus petit de R', en supposant de ne pas changer l'index **n** du milieu optique dans lequel se propage l'onde W'. Pour l'exactitude, il faut faire les calculs en supposant que W' et W" se touchent sur l'axe, dans le point V. On peut montrer que:

$$OPD = (n\ P\ sen^2\alpha) / 2 \qquad (37)$$

Maintenant, au lieu de calculer la limite de la pénétration, c'est-à-dire de la défocalisation admissible (P), sur la base du diamètre du cercle de confusion admissible (**c**), on peut établir la limite de P sur la base d'une limite d'OPD. D'habitude on accepte pour cette limite le "**critère de Lord Rayleigh**"[57], selon lequel OPD ne doit pas dépasser λ/4. Alors, en mettant

$$OPD = (n\ P\ sen^2\alpha) / 2 = \lambda/4 \qquad \text{on a:}$$

$$P' = 2\ \lambda / (4\ n'\ sen^2\alpha') = n'\ \lambda / (2\ n'^2\ sen^2\alpha') = n'\ \lambda / (2\ NA'^2) \qquad (38)$$

Dans cette formule, **n** et **λ** ont le sens habituel, NA = n senα (ouverture numérique, voir le § 5.2.5). Si nous pensons à la fig. 47, tout le propos se réfère à l'espace-image, et ainsi NA; donc les symboles de **P, n, α** et NA devraient être utilisés avec l'apex (P', n', etc.).

Si nous voulons appliquer la (36) à un objectif photographique ou astronomique où on exprime l'ouverture avec $f_\# = 1/2\ NA$ et où n = 1, on peut écrire:

$$P' = 2\ \lambda\ f_\#^2 \qquad (39)$$

toujours en supposant d'ignorer les effets des aberrations, de la diffraction, etc.

Si on veut appliquer la (38) côté objet, on se rappelle de tout ce qu'on a dit à propos de la (36) ou tout ce qu'on dira à propos de la (40).

La (38) définit donc la pénétration P' sur la base d'un critère physique, mais la limite pour OPD est encore conventionnelle. Cependant elle est en bon accord avec un autre critère utilisé pour juger des altérations de l'image d'un objet ponctuel: c'est le "**critère de Strehl**". Il faudrait ici aussi tenir compte des phénomènes de diffraction, mais pour maintenant nous suffit ce qu'il suit: nous considérons l'image (par ex. O' dans la fig. 47) d'un objet ponctuel et l'intensité maximal au centre de telle image, obtenue dans les conditions de meilleure focalisation d'un certain système optique. Puis nous mesurons l'intensité au centre de la même image après un défocalisation (P dans la fig. 47); si cette dernière intensité n'est pas inférieure à 80% de celle obtenue en conditions de meilleure focalisation, on suppose la défocalisation "acceptable". La limite du 80%

[57] John William Strutt RAYLEIGH, fisicien anglais (1842-1919).

se réfère au fait que, avec la défocalisation, l'énergie qui concourrait dans l'image au point se distribue sur la plus grande surface de l'image élargie O" et donc l'intensité maximale au centre de l'image doit diminuer. Il s'agit encore d'une limite conventionnelle laquelle cependant porte de nouveau à un OPD d'environ λ/4.

On connait aussi que la limite de λ /4 pour la défocalisation (exprimée comme OPD) est la même considérée dans le § 13.4 pour définir le seuil maximum acceptable pour les aberrations du point, exprimées comme "aberration d'onde".

La valeur de P' donnée par la (38) ou (39) est dérivée par des considérations exclusivement géométriques et elle est valide pour les systèmes bien corrigés et pour ces images qui sont projetées sur un écran fixe comme une émulsion photographique. La P' des formules (38) ou (39) peut être considérée par suite comme la composante photographique de la pénétration et indiquée avec Pf'. Cette valeur de Pf' indique donc de combien l'on peut déplacer l'écran par rapport au plan de meilleure focalisation, d'un côté ou de l'autre, avant d'avoir une détérioration appréciable de l'image. L'espace de manœuvre est donc 2 Pf'. Cette valeur peut être transportée du côté objet, de façon à exprimer de combien l'on peut déplacer axialement l'objet, avec position fixe de l'écran sur laquelle on recueille l'image, avant d'avoir la même détérioration de l'image.

En microscopie, la pénétration côté objet indique quelle épaisseur de l'objet on peut voir au point simultanément, en étant fixe la position de l'image intermédiaire. Le rapport entre la pénétration côté image et côté objet peut être calculé en rappelant simplement la (30) au § 12.4. S'il y a agrandissement M < 1 (comme dans la photographie normale), la Pf' calculé pour le côté image sera divisé par M^2 pour en tirer le **Pf** côté objet, qui sera plus grand de **Pf'**:

$$Pf = Pf' / M^2 \qquad (40)$$

Si la distance de l'objet est très grande, la (40) perd sa validité et entre en jeu la notion de "**distance iperfocale**" (distance de mise au point nominale telle que de la moitié d'elle jusqu'à l'infini chaque objet apparaît au point). Mais ceci reste en dehors de notre sujet, étant donné qu'il concerne la photographie de panoramas.

La (40) vaut aussi en microscopie, où M > 1, mais il convient de l'exprimer en fonction de NA (de l'objectif, c'est-à-dire côté objet) étant donné que celle-ci est toujours une donnée connue. On rappelle la (25) dans le § 5.2.5 (NA/NA' = M) et la (38) (P' = n'λ/2 NA'^2) dans lesquelles NA se réfère au côté image et elle va donc indiquée avec NA':

$$Pf = Pf'/M^2 = n\lambda / (2NA'^2 M^2) = n\lambda / 2NA'^2 \times NA'^2 / NA^2 = n\lambda / 2NA^2$$

Cette fois Pf, **n** et NA se réfèrent à l'espace objet et évidemment à ces conditions même la (38) s'applique à l'espace objet.

Pour l'usage pratique, nous donnons ici de suite un tableau des valeurs:

TABLEAU I

NA_{obb} côté objet	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
Pénétration côté objet en **μ** (2 Pf)	55	14	6	4	2,5	1,6	0,9	0,8	0,6

Ces valeurs peuvent sembler très modestes, mais on rappelle qu'ils sont tirés de la (38), avec un critère simplement géométrique; dans les systèmes réels il y a beaucoup de facteurs (aberrations, diffraction, défauts constructifs du système, poussière, vibrations, "grain" des émulsions photographiques, défocalisation, etc.) en base desquels l'image globale d'un point objet est toujours considérablement plus grande de celle calculable géométriquement; donc, la tolérance sur la défocalisation est beaucoup plus grande de celle indiquée dans le tableau.

14.1 - L'EFFET de l'ŒIL

La valeur de Pf' ou de Pf, la pénétration, tirée par la (38), s'applique à une image réelle recueillie sur un écran fixe comme une pellicule photographique.

Mais dans l'observation visuelle il faut ajouter deux composantes, l'une (Pr) due au pouvoir résolutif limité de l'œil, l'autre (Pa) à son pouvoir d'accommodation.

Pour ça, la pénétration s'exprime avec une valeur global **Pt** égal à:

$$Pt = Pf + Pr + Pa \qquad (41)$$

 Composante **Pr**

Dire que l'œil humain a un pouvoir résolutif limité c'est comme dire que, pour chaque point image, supposée une image idéale formée par le microscope, se forme sur la rétine ou dans la représentation psychique de la vision un "cercle de confusion" ou de toute façon une image de dimensions pas nulles. Tel "cercle" s'ajoute donc à celui dû à une défocalisation éventuelle dans le système optique qui fournit l'image virtuelle à l'œil. Les respectives valeurs de pénétration, **Pr** et **Pf,** elles aussi doivent donc être additionnées entre elles.

Un calcul de **Pr** doit se baser nécessairement sur une valeur conventionnelle de résolution, correspondante à l'œil "moyen", et il y a disparité d'avis entre les différents auteurs qui se sont intéressés au sujet. De toute façon, une formule utile peut être la suivante (référée à l'espace objet):

$$Pr = 0{,}34\ n / NA \times V \qquad (42)$$

dans laquelle **n** est l'index du milieu dans l'espace objet et V est le grossissement visuel du microscope. Le facteur V ne paraissait pas dans la (38) pour la valeur de Pf' étant donné que sur ce dernier influe seulement l'ouverture côté image (ou côté objet pour Pf). **Pf** et **Pf'** s'appliquent seulement à l'objectif. Maintenant il faut par contre tenir compte aussi de l'oculaire à travers lequel on observe, et par suite de **V**. On remarque que **Pr** dans la (42) est exprimé en mm.

 Composante **Pa**.

Étant donné que l'œil "accommode", c'est-à-dire qu'il peut changer la puissance de ses moyens réfringents et par suite "mettre au point", il est clair que dans cette manière l'œil peut compenser en partie ou totalement une éventuelle défocalisation du microscope. Cet effet s'ajoute avec la pénétration et donc, dans l'expression de Pt (voir la (41)), nous avons ajouté le facteur **Pa**, qui peut devenir important aux petits agrandissements. En effet on peut écrire (en nous référant à l'espace objet):

$$Pa = n \times 250 / V^2 \qquad (43)$$

dans laquelle les symboles sont les mêmes de la (42).

Cette formule simplifiée est valide pour un œil emmétrope d'une personne adulte dans laquelle le point «lointain» (de vision distincte la plus éloignée) est à l'infini et le point «prochain» (moindre distance de la vision distincte) se trouve à 250 mm de l'œil même.

À titre indicatif, nous disons que **Pa** est inférieure à 1μ pour V = 450 ×, inférieur à 0,3μ pour V ≥ 1.000 × mais monte à 25 μ pour V = 100 × et à 150 μ pour V = 40 ×.

Évidemment, la **valeur minimum** de **Pt** se vérifie avec les objectifs d'ouverture maximale et dans la photographie, où **Pr** et **Pa** n'ont pas d'effet; on a dans ces conditions:

$$Pt = Pf = 0{,}4\ \mu$$

Dans les formules (36), (38) et (42), la valeur de NA ou NA' est celle de l'objectif; mais il peut arriver aussi que l'ouverture du condensateur, ou par ses caractéristiques constructives, ou par fermeture du diaphragme d'ouverture, ou pour des raisons particulières, sois inférieure à celle

de l'objectif. Dans le calcul de P il faut donc introduire une valeur de NA égal à la moyenne des deux valeurs de l'objectif et du condensateur, au moins pour autant que les deux valeurs ne sont pas trop différentes.

De cette manière il s'explique parce que la fermeture du diaphragme d'ouverture augmente la pénétration du microscope.

On connait aussi que la valeur de Pf', appliquée à l'image intermédiaire du microscope, indique la tolérance dans la position longitudinale de l'oculaire, avec objet fixe et infiniment mince. Pour donner un exemple, un objectif 10:1 avec NA = 0,25 a un Pf' de 880 μ = 0,88 mm; un objectif 100:1 avec NA = 1,3 a un Pf' de 5 mm. Il est donc clair qu'en soulevant l'oculaire on perd la mise au point pour un déplacement de quelques mm avec les forts objectifs et de moins de 1 mm avec le faibles.

Pour conclure, on rappelle que dans l'observation visuelle il est toujours possible d'explorer la profondeur de l'objet en actionnant la mise au point du microscope avec les boutons correspondants; pour ça il n'a pas beaucoup de sens en général de calculer la pénétration totale **Pt**. Par contre, il est bien toujours de connaître la valeur de **Pf** en photographie.

Quand l'objet est épais, il peut être utile de disposer d'une valeur élevée de Pf pour photographier au point simultanément une grande partie de l'objet même; à ce but on peut fermer le diaphragme d'ouverture du condensateur, comme on a déjà dit, ou choisir des objectifs d'ouverture plus petite; seulement en rares cas (voir le § 19.2.6) l'objectif contient un diaphragme d'ouverture.

Si l'objet est très mince (frottis) et l'objectif n'est pas corrigé de courbure de champ, on peut voir au point seulement une partie du champ; cette partie s'élargit et on peut augmenter la pénétration avec les moyens à peine cités (voir aussi le § 13.1.1).

D'autre part, une petite pénétration peut être utile: pour mesures des épaisseurs à l'intérieur de l'objet (voir le § 12.3) ou pour visualiser un seul plan défini à l'intérieur d'un objet épais; on utilise dans ce sens la notion de "**section optique**" (on voit au point seulement une mince tranche de l'objet).

Pour augmenter **P,** de toute façon, il est nécessaire de diminuer la NA, avec toutes les conséquences relatives (diminution d'éclairage dans l'image, augmentation du contraste, perte de résolution, comme nous verrons). Et nous rappelons aussi que, si la pénétration peut descendre à la valeur de 0,4 μ, comme on a dit tout à l'heure, ceci indique aussi la plus grande valeur admissible pour l'instabilité de la structure mécanique de l'instrument, c'est-à-dire pour les variations de la distance objet-objectif.

Causes de ces variations peuvent être les "jeux" dans les mouvements de focalisation et les fléchissements élastiques des supports. Mais aucun instrument réel ne réussit à être rigide jusqu'à ce point; en touchant la platine ou le tube porte-oculaires avec les mains, quand il est inséré un fort objectif, on a invariablement une perte de focalisation.

15 – La PERCEPTION

Nous avons défini à son temps la résolution (et nous reviendrons bientôt sur ce point) comme propriété d'un système optique de fournir une image dans laquelle sont distinguables, en conditions opportunes, des point ou lignes ou de toute façon des éléments de la structure optique de l'objet.

Mesure de la résolution est la moindre distance des éléments de l'objet (ou de l'image) qu'on peut encore percevoir comme distincts.

Mais maintenant réfléchissons sur ce problème: quels sont les moindres dimensions d'un objet isolé (un petit cercle ou une ligne, par ex.) qu'on peut percevoir au milieu d'un champ homogène dans l'image donnée par un système optique, indépendamment de sa structure ? Telles moindres dimensions mesureront la capacité de "**perception**" de ce système.

On voit donc que la perception concerne seulement la visibilité d'un objet isolé et elle est donc bien différente de la résolution qui concerne la possibilité de séparer des objets voisins.

Nous supposons pour simplifier les choses que l'objet soit plan et perpendiculaire à l'axe, que sa luminosité soit nulle, que la luminosité du fond environnant soit homogène et convenable à la sensibilité du récepteur utilisé (œil, émulsion photographique, photocellule, etc.), que l'objet ait des marges nettes et qu'il soit isolé dans le champ objet, que son image soit formée en conditions de meilleur focalisation, de meilleure réglage du système, etc.

Maintenant nous ne considérons pas avec ces préliminaires un objet lumineux, sur fond noir: en effet, quelles que soient ses dimension, il sera toujours visible ou photographiable, c'est-à-dire perceptible, pourvu qu'il soit suffisamment lumineux: c'est seulement un problème d'énergie. Occupons-nous plutôt d'objets opaques sur un fond clair.

En outre, nous ne considérons pas des systèmes optiques idéaux (capables de donner une image géométriquement parfaite de l'objet) mais des systèmes réels dans lesquels, à chaque point objet, correspond un "cercle de confusion" à cause des aberrations, diffraction, défauts constructifs du système, etc. En effet, si le système était idéal, il suffirait d'agrandir à suffisance et l'image d'un petit objet deviendrait de toute façon perceptible. La perception serait seulement fonction de l'agrandissement: en observant une pierrette, par ex., on pourrait voir aussi ses électrons, quark, etc.

Nous disons aussi qu'on peut exprimer la perception en valeurs linéaires; par ex. le moindre diamètre de l'objet perceptible; mais ceci a sens seulement si on définit la distance de l'objet. Autrement, on peut définir le moindre angle sous lequel doit apparaître le plus petit objet perceptible, vu par le centre du système optique en examen.

Pour l'œil humain "moyen" on peut accepter ces limites de perception:

- Pour un disque noir: 30 μ de diamètre à 250 mm de distance, égales à 25"
- Pour une ligne noire: 5 μ de largeur à 250 mm, égales à environ 4"

Dans un microscope, pour un disque, on a un diamètre minimum de:

$$d = 0{,}12\ \lambda / NA \tag{44}$$

Pour une ligne, la largeur moindre perceptible est:

$$l = 0{,}01\ \lambda / NA \tag{45}$$

Avec les plus forts objectifs de microscope, avec NA = 1,4, on a:
d = 0,045 μ et l = 0,0038 μ, toujours par rapport au plan objet. Dans les mêmes conditions, la limite de résolution est environ 0,22 μ. On remarque que dans ces formules paraît seulement **λ** et NA, c'est-à dire qu'on suppose un système bien corrigé, limité par la seule diffraction. Les valeurs

indiquées, comme celles pour la résolution, représentent donc une limite supérieure que peut toujours être empiré par les défauts de l'instrument, fautes de mise au point, etc.

On peut donc percevoir un objet beaucoup plus petit du pouvoir résolutif. En autres mots, nous pouvons percevoir la présence d'un petit objet sans "le résoudre", c'est-à-dire sans pouvoir observer s'il a une structure interne, s'il est fait de différents points voisins, s'il a une certaine forme ou une autre, etc.

Le fait qu'il y ait une limite pour la perception qu'on ne peut pas dépasser en agrandissant l'image avec des moyens supplémentaires (un fort oculaire par ex.) dépend de la présence du "cercle de confusion", quel qu'en soit la cause. En effet, pour un système optique réel donné, en diminuant les dimensions de l'objet, on arrive au point dans lequel son image géométrique devient plus petite du cercle de confusion; en réduisant ultérieurement les dimensions de l'objet, le seul résultat qu'on obtient c'est que l'image devient de plus en plus pale sans diminuer de dimensions: le diamètre du cercle de confusion dépend en effet des caractéristiques géométriques et optiques du système, de la diffraction, etc. et ces facteurs sont constants. À la fin, le cercle de confusion devient invisible non parce qu'il est devenu trop petit, mais trop pâle, c'est-à-dire pour des raisons photométriques.

La valeur de NA dans les (44) et (45) va entendu comme NA de l'objectif dans le cas que celle du condenseur ait une valeur très semblable. En cas contraire, comme déjà mentionné et comme nous verrons mieux en parlant de résolution, on peut pour beaucoup de buts pratiques calculer la moyenne arithmétique des deux valeurs de NA. Si ceux-ci sont trop différents, le calcul devient plus complexe.

16 - L' IMMERSION

Aussi pour ce sujet, on peut se limiter à une approche optique-géométrique en attendant de parler d'optique ondulatoire.

Pour "**immersion**" on veut parler de la présence d'un liquide dans l'espace qui sépare deux éléments d'un système optique.

En microscopie, l'objet est souvent "immergé" quand il est "monté" dans une suspension liquide entre porte-objet et lamelle (sections minces, cellules, micro-organismes, poussières, fibres) ou quand le "**montage**" se fait dans un liquide qui durcit avec le temps ("Baume du Canada" ou ses correspondants synthétiques). Dans ce dernier cas, cependant, les liquides utilisés ont un index semblable à celui du verre et l'objet en résulte englobé, au point de vue optique, à l'intérieur d'une lame transparente aux faces planes et parallèles, les faces extérieures de laquelle sont constituées par lame et lamelle.

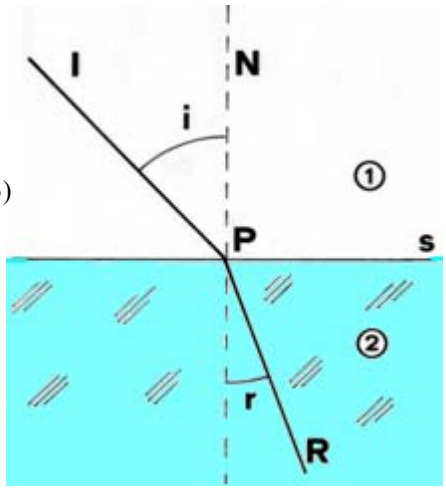
On peut "immerger" aussi l'objectif, en mettant une goutte de liquide entre sa lentille inférieure ("frontale"), et la surface supérieure de la lamelle, ou bien le condensateur, en mettant le liquide entre la surface supérieure du condensateur (de sa lentille supérieure, dite "frontale") et la surface inférieure de la préparation.

Dans beaucoup des formules utilisées jusqu'à présent, comme la (23) sur l'ouverture numérique, la (38) ou (42) ou (43) sur la pénétration, etc., nous avons vu paraître le facteur **n** comme valeur de l'index de réfraction du milieu traversé par la radiation, en particulier du milieu qui se trouve entre objectif et objet.

Mais maintenant il convient être plus précis, et nous revenons à la fig. 3 (§ 2.3.1); si nous appelons $\mathbf{n_2}$ l'index du milieu (2) dans lequel pénètre le rayon I, nous pouvons appeler $\mathbf{n_1}$ l'index du milieu (1); si puis le milieu (1) est l'air et $n_1 = 1$, n'importe pas. À ce point la loi de Snell (formule (6)) peut être réécrite ainsi:

$$\text{sen } i / \text{sen } r = n_2 / n_1 \qquad \text{de laquelle:}$$

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r \qquad (46)$$



(Fig. 3)

Mais, en pensant à la (23), celle-ci est l'expression de l'ouverture numérique NA. De la (46) on conclue par suite que **la réfraction sur une surface plane n'altère pas la NA** et le facteur **n** dans la (23) et la (46) tient compte de ce qui arrive à la surface de séparation entre deux milieu transparents. Tout cela ne serait pas possible en utilisant l'idée d'ouverture angulaire ou relative (§§ 5.2.3 et 5.2.4).

Mais voyons quoi ceci signifie dans le cas d'un objectif de microscope.

On a déjà parlé à plusieurs reprises des "objectifs forts" avec une NA plus grande que 1. À son temps on fit observer (§ 2.2.1) que **sen α** ne peut pas être > 1 pour lequel, quand NA = n sen α est > 1, ne peut qu'être: n > 1; c'est ce qui arrive dans les "**objectifs à immersion**" dans lesquels l'espace objet est occupé par un liquide, avec **n > 1**.

Nous considérons la fig. 48 dans laquelle on voit, en section, un objectif ou au moins sa lentille frontale (Ob), une préparation avec le porte-objet (P) et lamelle (C). Soit O un point axial de l'objet. Nous considérons un rayon marginal qui vient du bas et qui frappe sur la surface supérieure de la lamelle avec un angle d'incidence **β**. Si ceci est un objectif normal, entre lamelle et objectif il y a de l'air, avec n = 1, et l'objectif s'appelle "**à sec**". Donc l'angle de réfraction sera plus grand de **β** (**α** dans la figure) et nous pourrons écrire, en base à la (46):

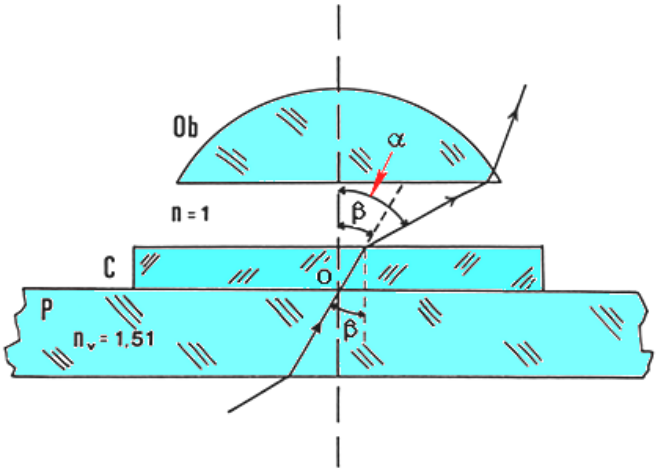


Fig. 48

$$n \text{ sen } \boldsymbol{\alpha} = n_v \text{ sen } \boldsymbol{\beta}$$

dans laquelle $\mathbf{n_v}$ est l'index qu'en général on suppose commun à lame, objet et lamelle et **n** est égal à 1 (air).

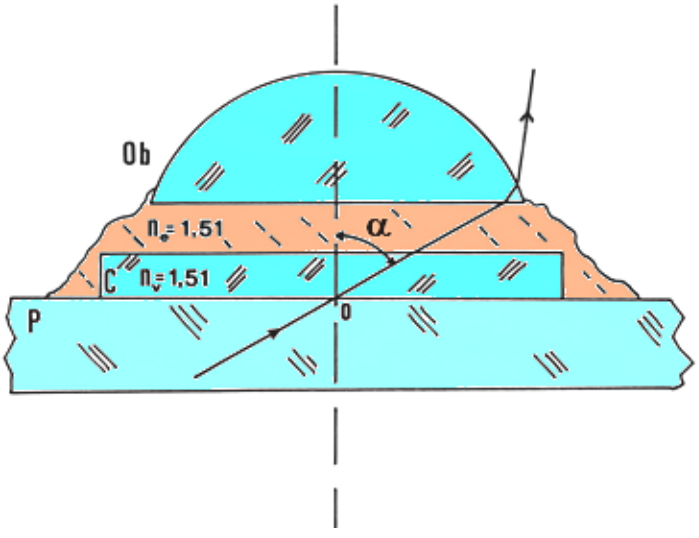
Eh bien, même si l'objectif a une ouverture angulaire élevée, même la plus grande possible théoriquement (**α** = 90°), l'ouverture effective dans l'objet (**β**) est plus petite, en mesure telle que sen **β** = sen **α**/n_v. En théorie, l'angle de plus grande ouverture dans l'espace objet (**β**) que l'objectif réussit à utiliser c'est l'angle limite (voir la (7) au § 2.3.2); en pratique, cependant, l'objectif ne peut pas adhérer à la lamelle et il faut laisser un certain espace entre eux au dessus de la lamelle pour lequel la NA d'un objectif à sec ne dépasse pas 0,95, et **α** ne dépasse jamais 72°; ainsi **β** (supposé n_v= 1,515 pour les verres normaux) ne dépasse pas 39°.

Maintenant nous regardons la même situation dans un objectif à immersion (fig. 49); il est représenté ici le cas le plus commun de l'"**immersion homogène**" dans laquelle le liquide entre la lentille frontale (Ob) et la lamelle (C) a le même index des parties en verre. Le milieu «objet-lamelle-liquide-lentille» a donc un index constant: il n'y a plus de réfraction, et **α** = **β**. Ainsi NA = n sen **α** pourrait en théorie arriver à la valeur de: $n_v = n_l =$ 1,51 (dans laquelle $\mathbf{n_l}$ est l'index du liquide d'immersion), en supposant **α** = 90° et sen **α** = 1 . En pratique, on ne dépasse pas la valeur de NA = 1,4 qui correspond à un angle **α** de 68° environ, mais cette valeur est bien supérieure à la limite de **β** = 39° des objectifs à sec, comme on a vu tout à l'heure.

De toute façon, quand l'ouverture NA d'un objectif dépasse 0,95, on peut être certains qu'il est à immersion.

La même chose on peut dire d'un condensateur. Et de ça on reparlera (§ 21.5).

Fig. 49



16.1 - L'HUILE d'IMMERSION

Maintenant nous revenons à l'immersion "homogène" des objectifs.

Pour ce qui concerne "**l'huile à immersion**" on peut répéter tout ce qu'on a déjà dit de la lamelle: les deux font partie du système optique "formateur d'image" et par suite leurs caractéristiques optiques (index, dispersion, transparence, homogénéité) doivent être contrôlées rigidement. Sont importantes aussi d'autres caractéristiques physiques (viscosité, tension superficielle et par suite tendance moussante, tension de vapeur et par suite tendance à se vaporiser de certains composants et à durcir d'autres, solubilité dans les solvants usuels {d'habitude, xylol}, etc.) et chimiques (toxicité, agressivité chimique vers les parties optique-mécaniques du microscope, etc.). En fait de toxicité, sont maintenant répandu les huiles "**PCB free**", c'est-à-dire exemptes des polychlorobiphényles.

Aujourd'hui, les huiles normales d'immersion sont de nature synthétique; chaque constructeur en fournit un type différent, et il est optiquement nuisible d'utiliser l'huile d'un certain fournisseur avec un objectif d'un autre et de mélanger l'huile d'un certain fournisseur avec l'huile d'un autre: peuvent se former des émulsions très troubles. Les huiles naturelles comme l'huile de bois de cèdre sont complètement en désuétude parce qu'elles tendent à durcir et elles sont fluorescentes.

Selon les règles ISO (International Standards Organisation), n° 8036, l'huile d'immersion "normale" doit avoir pour la ligne D du sodium un index: $n_D = 1{,}515 \pm 0{,}0005$ et une dispersion[58] $\nu = 44 \pm 3$, à la température de $23 \pm 0{,}1°$ C.

Près de certains constructeurs, le calcul de l'objectif prévoir une huile avec un index pas identique à celui de la lentille frontale; on a ainsi une **immersion presque-homogène**, qui offre au projeteur un autre degré de liberté au sens de disposer d'une autre caractéristique à changer pour optimiser le calcul. Naturellement, avec ces objectifs il est plus que jamais nécessaire d'utiliser seulement l'huile prévue par le constructeur.

Comme huile volatile, qui ne laisse pas de résidu, le benzoate de méthyle a été proposé ($n_D = 1{,}517$); comme succédané, faute de mieux, on peut utiliser un mélange d'huile de ricin (10 parties) et d'essence d'œillet (14 parties) avec $n_D = 1{,}50$.

En autres cas on peut exiger de l'huile des autres caractéristiques: dans la technique de la fluorescence, par ex., l'huile ne doit pas être fluorescente. Quand on opère en radiation pas optique (UV, IR), l'huile devra être transparente à ces radiations, et trouvera place la glycérine[59] et d'autres matériels. Dans ce dernier cas, il peut arriver que le liquide n'ait pas le même index de la lentille et l'immersion ne sois plus "homogène": on peut utiliser le n-hexadécan ou un mélange eau-glycérine dans le rapport 1:10 (pas glycérine pure étant donné qu'elle est hygroscopique et elle changerait lentement son index en absorbant l'humidité atmosphérique) pour la bande UV; huile de paraffine pour l'IR et aussi pour l'UV, etc. Aussi en épiscopie on peut utiliser des huiles à index différent de celui de la lentille (dans ces cas à index plus élevé, voir les §§ 16.2 et 30.1).

Dans d'autres cas encore, pour l'observation de suspensions de micro-organismes ou de plancton[60], on fabrique des objectifs "**à l'eau**"[61] qui peuvent plonger directement dans la suspension aqueuse. Ici aussi l'eau ($n = 1{,}333$; $\nu = 55{,}6$) ne produit pas l'immersion homogène. Certains objectifs "à l'eau" sont prévus pour une huile normale entre objectif et lamelle (lamelle déposée sur la suspension aqueuse).

Les premiers objectifs à immersion introduits en 1847 par le botaniste Giovan Battista AMICI (de Modena, mais en activité à Florence, même dans le champ de l'astronomie), puis de Hartnack

---

[58] Pour la dispersion **ν**, voir le § 13.2.1.

[59] L'immersion en glycérine a été très précoce; le premier cas pourrait être celui présenté en 1867 par Ernst Grundlach (1834-1908).

[60] Le plankton est l'ensemble des organismes aquatiques, pas toujours petits, incapables de contrarier les courants de l'eau, qui vivent suspendus et traîné par elle.

[61] Les premiers objectifs à immersion dans l'eau semblent avoir été produits par Amici en 1853 et présentés à Paris en 1855. Suivit Robert Tolles (1858), Edmund Hartnack (1859), Hasert, Kellner, Schroder (1860), ecc.

et Zeiss, utilisaient comme liquide l'eau et l'huile d'olive. Ils furent repris par le constructeur français Chevalier, père et fils, puis par l'anglais J.W Stephenson, qui introduisit l'immersion homogène, et furent porté à perfection élevée par E. Abbe à Jena en 1878. L'idée initiale semble venir de sir David Brewster en 1812.

Un fournisseur connu de liquides pour microscopie (Cargille Laboratories Inc., New Jersey) fournit différents types d'huile d'immersion: les types A et B diffèrent pour la viscosité (respectivement, 150 et 1250 centistokes); le type NHV (High Viscosity) a une viscosité de 21.000 centistokes et elle est précieuse quand la distance entre lamelle et objectif est élevée (objectifs LWD, voir plus loin) ou quand la platine est inclinée ou le statif est renversé; le type DF est destiné aux observations en fluorescence quand une luminosité de fond (verdâtre) est utile; le type FF est exempte de fluorescence propre.

Actuellement, afin d'augmenter l'ouverture et la résolution, certaines firmes produisent des objectifs prévus pour l'immersion en huile de silicone.

16.2 - Les AVANTAGES

Par rapport à l'objectif à sec, l'immersion produit de toute façon une série d'avantages.

Les avantages de l'immersion, plus sensibles si elle est homogène, ne sont pas seulement ceux déjà cités d'une augmentation de NA, et par suite de luminosité et de résolution. Il y en a encore des autres.

-- La correction de l'aberration sphérique: la surface plane de la lentille frontale d'un normal objectif à sec donne une forte contribution à la sphérique totale du système; avec l'immersion homogène, cette surface optiquement disparaît et la surface suivante peut réaliser le "**cas aplanétique**" dans lequel sont absentes soit la sphérique que la coma (§19.2.3.1).

-- La radiation qui traverse l'objet frappe en premier lieu sur la surface supérieure de la lamelle et puis sur la surface inférieure de la lentille frontale de l'objectif. Ces deux surfaces, dans un objectif à sec, séparent le verre de l'air et dans telles conditions, avec les verres normaux, la perte photométrique par réflexion va de 4% (incidence normale) à 100% (incidence rasante, c'est-à-dire ouverture maximale). La radiation réfléchie ne produit pas seulement une perte photométrique, mais elle contribue à la lumière diffuse interne au système, qui baisse le contraste (§ 17.1.2). La perte photométrique, de toute façon, est importante pour les techniques dans lesquelles l'image est généralement peu lumineuse, par ex. la fluorescence.

Eh bien, l'immersion homogène efface optiquement les deux surfaces réfléchissantes à peine citées, à cause de l'égalité de l'index.

-- Quand on opère en épiscopie, c'est-à-dire on observe des objets opaques en "lumière réfléchie" en les éclairant du haut à travers l'objectif même, on a un recouvrement de l'image des structures de l'objet avec la radiation réfléchie par sa surface (qui est en général polie et qui devient spéculaire) et avec celle réfléchie par la surface externe de la lentille frontale. On a ici encore un fond de lumière diffuse et perte de contraste. Et encore une fois, la réflexion sur ces surfaces est très réduite par l'immersion. La lumière réfléchie par les surfaces des autres lentilles n'est évidemment pas intéressée par l'immersion. Il y a cependant un problème: beaucoup d'objets opaques (roches, cristaux) ont un index plus élevé de la lentille, jusqu'à 1,8, et une bonne élimination des reflets demande l'usage de liquides à index élevé: iodure de méthyle ou de méthylène, monobromonaphtalène, etc. Il faut ici des objectifs calculés exprès (voir aussi le § 19.2.5).

-- S'il y a une faute dans l'épaisseur ou dans la planéité de la lamelle, cela ne produit pas d'effet, au moins si l'immersion est homogène, justement pour l'homogénéité de l'index entre objet-lamelle-huile-lentille frontale.

-- Si la préparation observée en diascopie (lumière transmise) est sans lamelle (frottis, etc.) ça suffit la goutte d'huile pour réaliser les conditions optiques d'homogénéité de l'index en évitant la

nécessité de la lamelle[62]. Si cependant l'immersion est "presque-homogène" (§ 16.1) il faut utiliser pour les préparations non couvertes des objectifs à immersion (indiqués avec d = 0) et des huiles prévus à cette fin.

16.3 – Les DÉSAVANTAGES

L'immersion a aussi quelque inconvénient pratique.

Pour des raisons qui deviendront claires plus loin, l'immersion s'applique surtout aux objectifs forts; sur un revolver[63] on monte souvent, près de l'objectif à immersion, un objectif à sec fort; les objectifs forts ont en général une petite "distance de travail" (distance libre entre objectif et lamelle). Il peut arriver que, après l'usage de l'objectif à immersion, on veuille revenir à l'objectif fort à sec. Le mouvement le plus logique serait d'éloigner la préparation en la faisant glisser sur la platine, la nettoyer (nous verrons comme), insérer l'objectif fort à sec, remettre la préparation propre sur la platine. Le fait de devoir ajouter ou enlever l'huile à chaque changement d'objectif est déjà un embarras. Mais le pire arrive quand distraitement on tourne le revolver et on insère l'objectif fort à sec avant d'enlever la préparation pour le nettoyage: l'objectif à sec va se baigner dans la goutte d'huile qui subsiste sur la préparation et il devient inutilisable; il faut le démonter et le nettoyer avec soin. Ce nettoyage peut être très difficile avec certains objectifs plans qui ont une lentille frontale très creuse: après le nettoyage, il est très probable que des poils ou de la poussière (ou un résidu d'huile) restent dans le creux de la lentille.

Pour éviter cet inconvénient, on peut mettre des deux côtés de l'objectif à immersion, dans les deux trous contigus du revolver, un faible objectif à forte distance de travail. Si ce dernier est porté sur la préparation sale d'huile, il n'arrive pas à toucher la couche d'huile.

Un autre remède est offert par quelques maisons (Zeiss, Nikon) les objectifs à immersion des quelles sont rétractables, au sens qu'ils peuvent être poussés vers le haut avec légère rotation et là rester bloqués. De cette manière ils ne peuvent plus toucher la préparation. Pour les utiliser de nouveau, il n'y a qu'à les replacer dans la position initiale. Ça suffit cependant une brève distraction pour que ce mécanisme devienne inefficace.

Une autre méthode, plus chère, consiste à utiliser une série complète d'objectifs tous à immersion: près de quelques constructeurs il y en a pour tous les grandissements. De cette manière la préparation reste toujours à bain d'huile et tous les objectifs peuvent être échangés sans dégât. Ceci peut être précieux quand on observe des frottis de cellules, chromosomes, etc. où il faut passer souvent de l'objectif 10 ou 20, pour la recherche de l'élément intéressant, à l'objectif le plus fort, pour un examen détaillé. En faisant ainsi on a aussi l'avantage que la lamelle n'est jamais nécessaire.

Pour finir, la majorité des microscopes modernes ont la platine horizontale. Mais si elle est inclinée, dans les vieux modèles, l'huile aura la tendance à couler, peut-être en dégouttant sur le condensateur. Qu'on cherche alors les huiles à haute viscosité, déjà cités.

16.4 – Le NETTOYAGE

De toute façon, pour enlever l'huile de la préparation ou de l'objectif il faut quelque précaution.

Il vaut mieux utiliser le solvant conseillé ou fourni par le constructeur: xylol (le plus souvent),

---

[62] En réalité, même quand l'immersion est "homogène", la dispersion (§§ 2.3.1 et 13.2.1) n'est pas la même entre huile et lamelle. En conséquence, les constructeurs les plus rigoureux gravent sur l'objectif à immersion (HI) le sigle 0 (0,17) pour avertir qu'il est préférable d'utiliser l'objectif SANS lamelle, ou bien 0,17 (0), pour indiquer qu'il est préférable de l'utiliser AVEC lamelle; les deux modèles donc ne sont pas identiques car le projeteur a tenu compte dans les calculs de la présence ou absence de la lamelle.

[63] Comme nous verrons, le revolver est un dispositif tournant discoidale qui permet la substitution rapide de l'objectif.

alcool éthylique (vieux Leitz) ou autres. L'usage d'un solvant différent peut endommager l'objectif ou ne pas dissoudre l'huile. Comme support au solvant, convient une toile douce (vieux coton déjà lavé beaucoup de fois), "papier optique", ou aussi papier doux pour serviettes. Éviter le papier qui pèle trop (pour mouchoirs, etc.). Avec un "premier coup" on enlève le plus gros; on utilise très peu de solvant, suffisant à humidifier le papier. Puis on enroule un petit bout de papier de façon à créer une pointe; on l'humidifie encore avec le solvant, et on passe sur la lentille avec mouvement circulaire pour nettoyer les anfractuosités (la lentille frontale est généralement encaissée dans la monture métallique). À la fin, on contrôle le résultat en observant la lentille frontale avec une bonne lentille de grossissement, si possible avec un microscope stéréoscopique (§ 29) et on incline la surface de la lentille jusque à quand elle réfléchit directement la lampe utilisée pour l'observation.

Le nettoyage des objectifs à immersion doit arriver tout de suite après l'usage. En effet l'huile tend toujours à pénétrer à l'intérieur de la monture; quand l'objectif ne vient pas nettoyé et il reste perpétuellement humide d'huile, au cours d'un ou de quelques ans il se rempli d'huile. Le démontage et le nettoyage interne peut être exécutées seulement par une personne experte en mesure de procéder à un nouveau centrage.

En outre, depuis le soir au matin après, l'huile non éliminée tout de suite peut durcir et elle change ses propres caractéristiques optiques; en ajoutant de l'huile fraîche, on peut avoir un mélange pas homogène. Pour la même raison il ne faut jamais mélanger des huiles différentes ou huiles du même type mais provenantes de récipients différents. Dans des cas limite, de solubilité insuffisante entre les deux huiles, il peut se former une émulsion laiteuse qui empêche l'observation.

16.5 – La LAMELLE et l'IMMERSION

On a expliqué dans le § 13.2.3.3 que la lamelle fait partie du système formateur d'image et la même chose on a expliqué pour l'huile d'immersion (§ 16.1).

Si l'immersion était exactement "homogène", c'est-à-dire l'huile fût optiquement comparable au verre, un objectif à immersion donnerait les mêmes résultats avec les préparations couvertes par la lamelle ou découvertes. Mais ceci ne peut pas être du tout vrai, spécialement pour l'immersion "presque homogène" (§ 16.1) pour laquelle il vaut mieux utiliser l'immersion avec des préparations couvertes. Dans la pratique, cela est souvent oublié, surtout avec les préparations utilisées pour l'observation de routine sans lamelle (frottis). Mais les meilleurs constructeurs offrent des objectifs à immersion opportunément calculés pour l'usage avec (d = 0,17) ou sans (d = 0) lamelle.

Il est évident, en outre, qu'on ne peut pas utiliser un objectif à sec avec l'huile, ou un à immersion sans huile: les conséquences sont essentiellement trois:

-- Le contraste et la définition de l'image empirent beaucoup étant donné que surgissent des fortes aberrations, surtout sphérique.

-- La distance de travail change (se raccourcit, en absence d'huile) et on perd la parfocalité, (voir le § 19.1.2).

-- Dans le cas d'objectifs à immersion utilisés sans huile: on baisse l'ouverture avec les conséquences déjà décrites.

-- Dans le même cas: la luminosité se baisse.

Par le passé, ont été produits des forts objectifs à immersion avec une distance frontale si petite à ne pas permettre l'introduction d'une lamelle d'épaisseur normale.

16.6 – La NOTATION de l'IMMERSION

Les objectifs à sec ne portent pas une légende spéciale.

Ceux à immersion se reconnaissent pour l'indication d'une ouverture d'habitude NA > 0,95, mais, comme on a expliqué, ils existent aussi des objectifs à immersion faibles, avec NA beaucoup plus petite de 0,9.

L'immersion homogène est indiquée normalement avec les indicatifs HI (**Homogeneous Immersion**) ou "Oil" ou "Öl" ou "Oil immersion" ou "Imm". L'immersion "presque homogène" n'est pas en général indiquée par une notation spéciale; on donne pour cela une forte recommandation à utiliser seulement l'huile conseillée par le constructeur.

La notation VI (Variable Immersion) indique les objectifs (de moyenne ouverture) capables de fonctionner avec un liquide quelconque.

L'immersion dans l'eau est d'habitude indiquée par l'indicatif "W" ou "WI" ou "Wasser"; en glycérine, avec "Glyz" ou "Glyc"; en iodure de méthyle ou autres liquides: indicatifs différents pour les différents constructeurs.

Les objectifs à immersion viennent souvent marqués avec une bague colorée dans la partie basse de l'enveloppe, d'habitude noire, rarement blanche ou autre couleur. On remarquera aussi qu'ils sont en général les plus forts (de 50 à 150:1); donc la focale est très petite, même moins de 2 mm; le diamètre de la lentille frontale peut être lui aussi inférieur à 2 mm; la distance de travail moins de 0,1 mm.

Finalement nous faisons remarquer que le procédé de l'immersion, avec ses avantages déjà décrits, est exclusif de la microscopie: il ne serait pas pratique de "plonger" l'objet dans un liquide dans le cas d'une photographie de panorama ou de portrait, ou dans le cas d'une observation astronomique.

Pour la notation des objectifs en général, voir le § 19.1.5.

17 – Le CONTRASTE

Maintenant, nous examinons en général une image ou un objet du point de vue de la distribution de l'intensité optique sur sa surface.

Nous supposons encore de traiter des objets ou des images idéales, plans, à deux dimensions, c'est-à-dire sans épaisseur, et perpendiculaires à l'axe.

Intuitivement, on conçoit le **contraste** (C) d'un objet ou image comme différence entre la valeur maximal d'intensité présente dans son plan (I_{max}) et la valeur minimal (I_{min}), en autres mots comme "**clair-obscur**". Plus exactement:

$$C = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \qquad (47)$$

La valeur d'I_{max} ou I_{min} n'a pas de limites supérieures, parce qu'elle dépend seulement des caractéristiques de l'objet et de la source qui l'éclaire. I_{max} devra évidemment être supérieur à 0, pendant qu'I_{min} sera compris entre I_{max} et 0. Ainsi $I_{max} - I_{min}$ est compris entre I_{max} et 0; $I_{max} + I_{min}$ est compris entre 2 I_{max} et I_{max} et C est compris entre 0 et 1. En multipliant pour 100, le contraste s'exprime en pourcentage.

Le contraste dans l'image a une considérable importance dans la lecture des détails de la même; en effet, n'importe quel récepteur n'est pas sensible au-dessous de certaines valeurs de contraste; l'œil humain est considéré insensible pour des contrastes inférieurs à 3 - 5%.

Maintenant nous supposons de mettre un objet avec contraste C devant à un objectif qui en forme une image réelle; nous mesurons dans cette dernière avec une technique photométrique opportune les valeurs de I_{max} et I_{min} et nous calculons C' (contraste côté image) avec la (47). Entre les deux valeurs de contraste il y aura évidemment une quelque différence et il sera toujours C' plus petit de C. Le rapport

$$A = C'/C \qquad (48)$$

toujours compris entre 0 et 1, exprime la perte de contraste introduite par le système optique, et s'appelle "**fonction de transfèrement**" du contraste (CTF = Contrast Transfer Function, quand il est exprimé en fonction de la "fréquence spatiale" de l'objet {voir le § 18.11}).

Maintenant cependant nous devons distinguer deux idées de contraste:

a) pour objets étendus;
b) pour petits objets.

17.1 – Le CONTRASTE pour OBJETS ÉTENDUS

Si les régions de l'image dans lesquelles on exécute la mesure d'I_{max} et I_{min} sont beaucoup plus étendues que le "cercle de confusion" créé par le système optique, quelle on soit la cause, alors le cercle de confusion n'influe pas sur le contraste.

Tout au plus, les frontières qui séparent les zones claires et les sombres apparaîtront nuancées, et ce sera un problème de définition ou de "microcontraste", mais au centre des zones claires et sombres on aura une mesure correcte de l'intensité maximum ou minimum. On suppose pour simplicité naturellement qu'à l'intérieur de chaque région claire ou sombre de l'objet on ait une intensité constante.

Les causes qui peuvent baisser la valeur de C' (et de A) dans l'image donnée par un certain objectif, et en particulier par un objectif de microscope, peuvent être reconduites en grande partie au recouvrement d'un voile de "**lumière diffuse**" sur les zones sombres de l'image, que nous avons supposé "étendues". Il s'agit de radiation parasite qui ne rentre pas dans les lois géométri-

ques en base à laquelle se forme l'image.

Voilà les principales causes de telle "lumière diffuse" dans le microscope optique.

17.1.1 – Champ éclairé excessif

Il s'agit de rayons qui viennent d'un champ éclairé plus grand du champ objet effectivement utilisé. Tels rayons ne contribuent pas au faisceau utile formateur d'image et tôt ou tard, peut-être après réflexion sur quelque surface de verre, à cause de leur inclinaison, ils frappent sur les montures des lentilles, sur la surface interne du "tube" et si ailleurs. Les constructeurs tâchent de réduire cet effet avec le noircissement (peintures spéciales satinées), avec des diaphragmes ("**light baffle**"), etc., mais on ne peut pas avoir une élimination totale étant donné que certains objectifs et oculaires utilisent un faisceau plus ample d'autres et il faut laisser quelque marge.

Le praticien peut opérer une réduction efficace de cette cause de radiation diffuse en fermant le plus possible le diaphragme de champ (voir le § 8.9, alinéa 7). Ceci est un des avantages de l'éclairage d'après Köhler qui le rendent préférable aux autres systèmes décrits au § 8.

17.1.2 – Les reflets

Il s'agit de radiation réfléchie par les surfaces air-verre.

Un faisceau qui frappe sur une surface air-verre est partiellement réfléchi; nous supposons que la surface soit polie, optiquement sujette à la réfraction mais pas à la diffusion, et parfaitement nettoyée. La fraction réfléchie (R) va d'un minimum de 4% à 9 % environ selon l'index de la lentille (R augmente quand augmente **n**) dans le cas d'incidence 0°, c'est-à-dire avec des rayons perpendiculaires à la surface. En augmentant l'incidence de 0° à 90°, la valeur de R monte avec une loi complexe (formules de Fresnel[64]) jusqu'à 100%. La radiation réfléchie à la surface des lentilles est donc importante; si le champ angulaire d'un objectif ne dépasse pas quelque degrés et celui d'un oculaire les 30°, cependant est forte l'ouverture (de l'objectif et du condensateur, surtout) et la courbure des lentilles; l'angle d'incidence peut se rapprocher de 90° avec les objectifs et les condensateurs les plus forts.

Contre ce phénomène le praticien n'a pas de remède sauf le choix d'objectifs à immersion (seulement pour la première surface de l'objectif même) et d'objectifs simples, avec peu de lentilles comme les achromatiques (§ 19.3). Mais il y a une échappatoire: en fermant le diaphragme d'ouverture (condensateur), comme indiqué dans le § 8.9, alinéa 8, on réduit l'ouverture du faisceau et par suite l'inclinaison des rayons; on élimine en particulier les zones marginales du faisceau qui frappent sur la périphérie des lentilles, où les angles d'incidence sont supérieurs. Celle-ci est une des raisons pour lesquelles, en fermant le diaphragme d'ouverture, augmente le contraste. Mais cette manœuvre a différents inconvénients, comme on a déjà mentionné (perte de luminosité) et comme nous verrons plus loin (perte de résolution); de toute façon, au-delà d'une certaine limite, la fermeture du diaphragme d'ouverture provoque une nouvelle réduction de contraste; en effet les rayons marginaux, même si ils gravent sur les lentilles avec des angles plus forts, ils provoquent cependant des rayons réfléchis avec grande inclinaison, qu'en bonne partie sont absorbés par les parois internes de l'instrument. Par contre les rayons paraxiaux, même s'ils produisent des reflets plus faibles en vertu d'angles d'incidence plus petits, ils produisent par contre des rayons réfléchis qui restent contenu à l'intérieur du faisceau utile.

On a donc le meilleur contraste pour les valeurs intermédiaires de l'ouverture du condensateur. À l'œil, le contraste semble augmenter si on ferme de plus en plus le diaphragme d'ouverture, mais c'est une illusion; en effet l'œil juge en base à la diminution de luminosité de l'image,

[64] Augustine Jean FRESNEL (1788-1827), physicien et mathématicien français; il développa les problèmes lié à la nature ondulatoire de la lumière.

surtout de ses zones plus sombres, sans s'apercevoir que diminue beaucoup plus la luminosité des zones claires et avec cela le contraste.

Le constructeur a par contre un moyen de réduire la radiation réfléchie sur les lentilles: les "**traitements anti-reflets**". Le mécanisme de ces traitements repose sur des phénomènes interférentiels dont nous parlerons plus loin, mais nous pouvons dire que le "traitement" consiste à déposer à la surface des composants en verre une ou plusieurs couches minces de matériels transparents d'index opportun. L'épaisseur de ces "couches minces" est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ de la lumière (une fraction de μ) et telles couches sont réalisées par déposition sous vide de vapeurs de substances spéciales réchauffées électriquement.

Les reflets sur la lentille de champ d'un oculaire: mauvais traitement (A, B et C) – moyen (D) – parfait (E).

Les couches minces produisent une multiplicité de faisceaux réfléchis qui interfèrent entre eux et, quand les rapports de phase entre les différents faisceaux sont opportuns, ils réduisent et éventuellement ils annulent l'énergie réfléchie. Cette interférence négative cependant est liée à la valeur de λ; pour cela le "reflet" est plus faible en certain parties du spectre qu'en autres. En général on cherche la réflexion minimale pour la région centrale du spectre pour laquelle l'œil est plus sensible (région du "vert"), et par suite le reflet est globalement atténué mais en majorité formé par les régions extrêmes du spectre (régions "violette et rouge") et par suite coloré; la couleur apparente doit être par suite pourpre ou cramoisie foncé (justement un mélange de violet et de rouge). Les lentilles "traitées" d'autre couleur (bleus, verte ou même orange) n'ont pas le moindre de réflexion à la position correcte, comme il arrive dans beaucoup de produits commerciaux de basse alliage, qui suivent les exigences de l'application militaire (protection des lasers en IR). La coloration du reflet des lentilles traitées justifie le terme de "**lentilles bleutées**"[65].

Avec une seule couche mince, la réflexion (R) peut être réduite à 1%, au moins dans une certaine région du spectre; avec des couches multiples, on peut descendre encore plus en bas, avec la plus grande uniformité dans le spectre entier.

Malheureusement, le fonctionnement des couches anti-reflets minces est lié à l'angle d'incidence de la radiation; cela signifie qu'un faisceau, même s'il est parallèle, en frappant sur une surface courbe, produit des angles d'incidence variables et le "traitement" peut être efficace sur une certaine zone de la lentille mais pas sur toutes.

En outre, les surfaces extérieures des systèmes optiques, qu'on nettoye souvent, ne sont en général pas traitées, étant donné que le traitement est souvent plus délicat du verre et tout de suite on le raierait.

En conclusion, le phénomène des réflexions non souhaitée reste toujours, au moins en partie.

17.1.3 - L'ouverture excessive

Nous nous référons ici à la radiation réfléchie sur les montures ou à l'intérieur de l'instrument pour un excès d'ouverture. Si l'ouverture du condensateur est plus grande de celle de l'objectif, les rayons de grande ouverture peuvent tomber sur la monture des lentilles de l'objectif et ici ils viennent irrégulièrement réfléchis.

Ces rayons, inutiles au point de vue de la formation de l'image, traversent en outre à reculons l'objet en subissant une diffusion plus ou moins forte et en créant de l'autre radiation diffuse qui se superpose à l'image utile.

Le praticien a même ici intérêt à fermer le diaphragme d'ouverture.

---

[65] Les traitements anti-réfléchissants furent créés par A. Smakula des usines Zeiss en 1935.

17.1.4 - Les imperfections

Nous parlons ici de la radiation diffuse à cause des imperfections des surfaces ou des verres optiques.

Dans les imperfections des surfaces on peut comprendre la poussière et aussi chaque forme de saleté ou de corps étranges.

Il est évident qu'un pépin de poussière, même s'il tape-à-l'œil, a une surface négligeable par rapport à celle de la lentille sur laquelle il est déposé, et il est inutile de s'acharner à l'enlever, à moins qu'il se trouve tout près d'un plan conjugué avec l'image finale, et apparie plus ou moins au point en regardent dans l'oculaire.

Vice versa sont très nuisibles certains voiles diffusants qui se forment à la surface des lentilles, constitué par la condensation d'aérosol suspendu dans l'air, spécialement goudron. Dans une ville de moyenne grandeur, une surface de lentille exposée à l'air apparaît voilée après quelques heures seulement. Ces voiles se remarquent avec difficulté étant donné que ils sont très homogènes, mais ils sont très nuisibles parce qu'ils occupent la surface entière des lentilles (voir aussi le § 19.5.1).

Nous nous occuperons encore du nettoyage des parties optiques du microscope et des astuces relatives (§ 19.5.1).

Contre les imperfections dans le polissage des surfaces et dans l'homogénéité des verres, il est clair que le praticien n'a pas de remède. On rappelle cependant que certains verres optiques sont chimiquement instables et la surface de certaines lentilles peut s'opacifier si l'instrument est exposé longtemps à l'humidité, à des vapeurs corrosives ou aussi spontanément. La seule humidité peut suffire en tant qu'elle favorise la prolifération de champignons microscopiques à la surface du verre qui résulte avec le temps corrodée[66] (voir le § 27.6). On ait donc le plus grand soin de l'instrument.

17.1.5 – Les ciments (voir dans ce site l'article n° 40, en italien)

Maintenant nous parlons de la radiation diffuse par les imperfections des ciments des lentilles.

Les ciments présentent rarement des irrégularités dans les instruments nouveaux; mais avec le temps sont possibles différents types d'altération, décollages, cristallisations. Au-delà de la formation de lumière diffuse, on peut arriver à une véritable opacification.

Aussi dans ce cas, seulement le constructeur peut mettre remède, mais souvent, après un certain nombre d'années, il n'est pas capable de fournir les pièces de rechange. Le praticien peut tenter le démontage de la lentille composée (très risqué si la lentille est rivée (§ 19.1): il faut enlever au tour le rivetage) et le décollage au moyen d'un traitement thermique, par ex. bouillissage dans l'eau ou réchauffement avec un pistolet à air chaude.

Ensuite, il faut nettoyer les résidus du vieux ciment et coller les éléments séparés avec du Baume du Canada ou d'autres ciments transparents pour optique. Le baume du Canada a l'avantage qu'il peut rester mou pour longtemps et on a la possibilité de corriger quelques erreurs de centrage au moyen du "star test" (§ 18.4).

[66] Certains auteurs indiquent ce phénomène de corrosion des verres comme "fungus".

17.2 – Le CONTRASTE pour OBJETS "PETITS"

On veut parler ici d'un "**petit objet**", celui dont l'image géométrique a des dimensions pas supérieures au cercle de confusion du système optique qui forme l'image de l'objet même.

Alors, quand on détermine le contraste de l'image d'un tel objet, il est clair qu'il y entre tout ce qui contribue à former le cercle de confusion comme en on a parlé au § 13.2 (aberrations, diffraction, etc.). Le cercle même prévaut sur l'image géométrique.

La notion de "contraste pour petits objets" se rapproche de celle de "**microcontraste**" et de "**définition**" (toujours au § 13.2); en effet, la présence du cercle de confusion détermine le cours du contraste dans les alentours du passage d'une partie claire à une sombre de l'image, correspondant à une frontière nette entre une partie claire et une sombre de l'objet. Mais le cercle de confusion (d'un objet ponctuel) n'est jamais un simple disque avec des bords nets et avec une intensité uniforme. À ce moment-là il devient important de considérer la distribution de l'intensité, c'est-à-dire le **profil photométrique**, dans le cercle de confusion. Le développement complet du sujet est très complexe, mais il est intuitif que, si l'objet présente une marge blanc-noir nette et on en étudie l'image, à chaque point de cette marge se superpose un "cercle" dont le profil détermine le cours de l'intensité dans l'image, c'est-à-dire son microcontraste. En supposant de traverser dans l'image la marge blanc-noire de l'objet, selon une ligne perpendiculaire à la marge même, le tracé de l'intensité le long de cette ligne ne sera pas une courbe en gradin, comme il est dans l'objet, mais il aura une certaine forme arrondie avec une pente variable, en relation au profil du cercle de confusion.

Ce tracé peut être donc une mesure du "microcontraste" et de la" "définition" de l'image donnée par un certain système optique, c'est-à-dire une mesure du profil photométrique du cercle de confusion produit par ce système, et par suite de sa qualité optique.

Mais en pratique on préfère utiliser une autre méthode de mesure du microcontraste.

On met devant le système optique en examen un objet formé par des lignes claires et sombres parallèles de même largeur: ce qui s'appelle en argot un "**réseau**"; naturellement, un objet plan d'épaisseur négligeable, perpendiculaire à l'axe du système. Le profil photométrique du réseau peut être en gradins (lignes claires et sombres séparées par des marges nettes; transparence uniforme à l'intérieur des lignes claires et si possible nulle dans les lignes sombres) ou bien variable avec une autre loi comme la fonction sinusoïdale (voir la (1) dans le § 1.1).

En allant mesurer le contraste dans l'image d'un tel objet avec des moyens électroniques normaux, on tirera une certaine valeur C' (voir la (47) un peu plus au dessus). Cette valeur C', en supposant une mise au point parfaite, propreté totale du système, absence de lumière diffuse, etc., dépendra des caractéristiques du système optique, de son ouverture, donc de la diffraction, de ses aberrations du point, en particulier de celles chromatiques, donc de λ; et naturellement dépendra de la largeur des lignes du réseau, c'est-à-dire de son "**pas**" **d** (largeur totale d'une ligne claire + une sombre)[67].

On peut par suite établir et mesurer, après avoir fixé toutes les autres conditions, une fonction $C'_{(d)}$, c'est-à-dire "contraste en fonction du pas" ou "de la fréquence" ($C'_{(\nu)}$). Mais plus que la valeur de C', pour évaluer les performances d'une lentille, on étudiera la variation de A (voir la (48)) en fonction de la fréquence du réseau: $A_{(\nu)}$. Ici nous aurons donc une fonction de transfèrement du contraste (CTF), mais dépendante cette fois de $\boldsymbol{\nu}$ et de $\boldsymbol{\lambda}$; étant donné que le contraste dans l'image est appelée aussi «**modulation»,** on parle de **"modulation transfer function**" (**MTF**)[68].

---

[67] On peut indiquer le pas avec **d** ; $\mathbf{1/d = \nu}$ (49) sera le numéro de lignes par unité de longueur ou "fréquence spatiale". Si **d** est exprimé en mm, $\boldsymbol{\nu}$ s'exprime en lignes/mm.

[68] Dans un objectif "diffraction limited", le MTF est égal à: $MTF = 2\,(\Phi - \cos\Phi \operatorname{sen}\Phi) / \pi$ dans laquelle:
$\Phi = \arccos(\lambda\boldsymbol{\nu}/2\,NA)$ et $\boldsymbol{\nu}$ est la "fréquence spatiale" de l'objet, exprimée en lignes/mm.

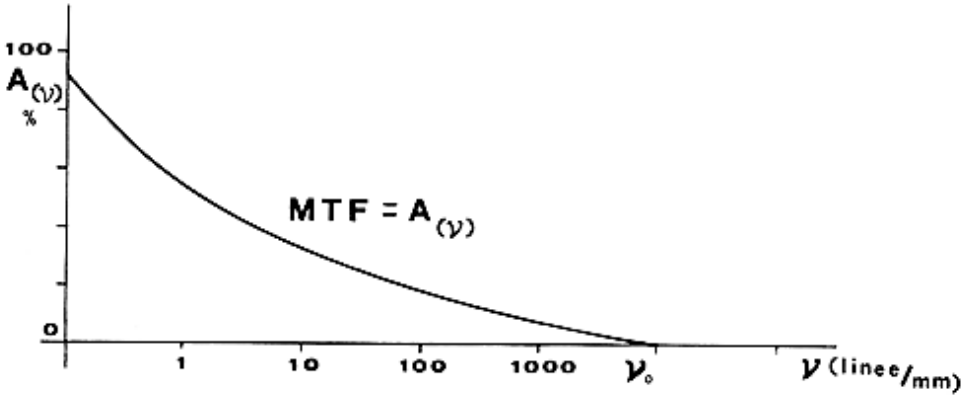


Fig. 50

Dans la fig. 50 est montré un exemple de graphique du MTF; la fonction n'arrive pas au 100% non plus avec $\nu = 0$ (lignes de largeur infinie, **d** tendent à l'infini) étant donné que nous avons vu dans le § 17.1 que, même avec des objets étendus, la valeur de A est toujours inférieure à 1. En augmentant la fréquence, c'est-à-dire avec des réseaux au pas de plus en plus fin, la modulation $A_{(\nu)}$ diminue pour devenir 0 quand ν atteint une valeur limite dite "cutoff frequency" (ν_o). Plus que ν_o est haut, le plus fines sont les structures qui peuvent être présentées dans l'image et par suite ν_o est une mesure de la résolution du système.

Pour un système "diffraction limited", comme on dira tout de suite, $\nu_o = 2\ NA / \lambda$ (50)

La courbe de la fig. 50 est celle obtenue par un système bien corrigé dans les meilleures conditions. Tout ce qu'augmente les dimensions du cercle de confusion (aberrations, diffraction, défocalisation, défauts du système, etc.) provoque une diminution de ν_o , pendant que les causes de lumière diffuse vues dans le § 17.1 baissent la courbe au sens que, pour chaque valeur de ν, on a une diminution de C' et de A.

Pour un système près de la condition "diffraction limited" (voir les §§ 13.3 et 18.3) on peut calculer aussi la valeur de ν_o, c'est-à-dire de la plus grande fréquence de réseau capable de produire dans l'image un contraste supérieur à 0; on peut exprimer cette valeur en fonction de l'ouverture numérique $NA = n \sin \alpha$ et il résulte ce qu'on a déjà vu:

$$\nu_o = 2\ NA / \lambda \qquad (50)$$

Étant donné que $\nu = 1/d$ (voir la (49) dans la note 57), on peut écrire aussi:

$$d_o = \lambda / 2NA \qquad (51)$$

dans laquelle d_o est la valeur du pas du réseau au dessous duquel le contraste dans l'image devient nul.

Nous verrons le sens de cette formule en parlant de la diffraction.

En observant encore comme se baisse la courbe de la fig. 50 au grandir de la défocalisation, on peut admettre que la perte est acceptable quand la défocalisation, exprimée comme différence de chemin optique (OPD, voir le § 14 et la fig. 47), ne dépasse pas la valeur de $\lambda /4$. Il est significatif que la méthode du MTF porte aux mêmes conclusions du critère conventionnel de Lord Rayleigh, discuté au § 14 en relation à la profondeur de foyer, c'est-à-dire à la défocalisation admissible.

En concluant, si on examine la fonction de transfèrement du microcontraste, nous pouvons mieux évaluer les rapports entre la définition d'un système optique (liée à l'hauteur de la courbe) et sa résolution (lié à la position de ν_o); on évalue ainsi l'influence de ses aberrations du point.

Il est donc évident que les systèmes les plus corrigés donneront un grand contraste et une grande définition à l'image pour "petits objets" et il est clair que nous parlons ici de correction de sphérique et chromatique longitudinale pour tout le champ et de coma, astigmatisme et chromatique latérale pour sa périphérie. Pour objets étendus, par contre, un système mieux corrigé, qui contient d'habitude un plus grand nombre de lentilles, peut présenter une grande quantité de radiation réfléchie à la surface des lentilles et par suite un plus petit contraste pour des objets étendus.

Aux causes de perte de microcontraste on ajoute donc les causes de perte de contraste pour objets étendus, sur considérées, qui influent essentiellement sur l'hauteur de la courbe de la fig. 50.

17.3 – Les REMÈDES

Il faut dire que les caractéristiques de l'image finale, même par respect à définition et contraste, dépendent en bonne partie de l'objectif, du nombre de ses lentilles, de leur courbure, de leurs traitements anti-réfléchissants, de la transparence des ciments, de la propreté, etc.

Et ici se présente une contradiction: les objectifs les plus simples, avec ouverture modeste et plus petit nombre de lentilles (achromatiques, pas «plan») produisent normalement une plus petite quantité de lumière diffuse et donc donnent le meilleur contraste pour objets étendus. Les objectifs les plus complexes (plan-apochromatiques), avec grand nombre de lentilles, sont à l'extrême contraire. Par contre, quand on observe des très petits objets et la courbure de champ n'importe pas, on a le meilleur contraste avec des objectifs bien corrigés (apochromatiques pas plan).

Cette règle générale peut subir naturellement des exceptions selon les solutions pratiques adoptées par les différents constructeurs. Il peut arriver par ex. qu'un objectif apochromatique avec la meilleure ouverture ne soit pas le meilleur en fait de microcontraste, au moins à la périphérie du champ, à cause de résidus d'aberrations extra-axiales (il est bien de ne pas faire le nom des producteurs).

C'est inutile de dire que le microcontraste empire toutes les fois que se présente une des causes qui empirent la sphérique (§ 13.2.3): épaisseur erronée de la lamelle - longueur erronée du tube (tubes porte-oculaires à glissières, par ex.) - régulation erronée de l'éventuel collier pour l'épaisseur de la lamelle, etc.

Pour ce qui concerne les remèdes contre les pertes de contraste dans le cas d'objets étendus (fermeture des diaphragmes, propreté, etc.), on en a déjà parlé dans le § 17.1. On peut maintenant ajouter un autre conseil: chaque pièce optique interposée entre objectif et oculaire donne une contribution à la perte de contraste, soit pour les inévitables reflets à ses surfaces, soit pour les autant inévitables imperfections, poussière, etc. Au point de vue du contraste il est bien donc d'éliminer tous les possibles accessoires intermédiaires (changeurs d'agrandissement, filtres, prismes, tube bioculaires, réseaux, etc.). Le contraste pour très petits objets sera amélioré aussi quand on met à exécution les précautions contre les pertes de contraste pour objets étendus, mais il ressentira beaucoup de tous les facteurs qui influent sur la résolution (ouverture, etc.), et sur la définition (aberrations du point, etc.). Mais de ça on a déjà parlé dans les §§ de 13.2 à 13.5.

En ce qui concerne les aberrations chromatiques, nous répétons tout ce qu'on a déjà dit: aussi au point de vue du contraste, il peut être utile un filtre vert. Si par contre l'objet est de soi même coloré, on peut en augmenter le contraste en interposant dans le système éclairant un filtre de couleur complémentaire. Mais de ça on va reparler.

18 - OPTIQUE ONDULATOIRE, DIFFRACTION et RÉSOLUTION

Nous avons jusqu'à présent examiné beaucoup de phénomènes optiques, qui se vérifient dans le microscope, en nous servant d'une approche géométrique et de quelques simplifications. Même en abandonnant l'approximation de Gauss (lentilles minces, ouvertures et champs réduits, radiation monochromatique), et en traitant de lentilles épaisses avec des grandes ouvertures et des grands champs, radiation pas monochromatique, etc. nous avons cependant considéré la radiation optique comme représentable avec une entité géométrique abstraite, les "rayons". Sur la base de la déviation des "rayons" selon les lois de la réfraction (voir les §§ 2.3 jusqu'à 2.6) nous avons expliqué beaucoup de phénomènes, en particulier la formation des images, l'agrandissement, les aberrations, la pénétration, etc. On a vu dans ce contexte que, étant donné un objet ponctuel, un système optique réel ne produit jamais une image ponctuelle, au moins à cause des "aberrations du point".

Mais maintenant nous supposons d'opérer avec un système idéal dans lequel les aberrations et les défauts constructifs soient complètement corrigés. Eh bien, aurons-nous de ce système une image ponctuelle ?

L'expérience et le calcul montrent que ceci n'est pas possible. En effet, la radiation électromagnétique ne peut pas être réduite toujours aux "simples" rayons, c'est-à-dire à des lignes droites de propagation qui obéissent seulement à des lois géométriques. Il s'agit d'un phénomène ondulatoire (voir le § 1.1) sujet aux lois des champs électromagnétiques. Le développement mathématique est complexe[69], mais pour nos buts il nous suffit de décrire quelque phénomène essentiel.

18.1 – DIFFRACTION par une ARÊTE

On considère une source ponctuelle (Q dans la fig. 51, à gauche) qui éclaire un écran S. Une partie du faisceau soit oblitérée par un autre écran opaque P doué d'arête vive, interposé entre Q et S. Selon le point de vue géométrique, en S on devrait voir une zone claire, vers le haut dans la figure, séparée, par rapport à la zone ombragée en bas, par une ligne définie, de largeur nulle; enfin, une ombre vive, sans nuances, dont le profil photométrique peut être représenté par la courbe 1 dans la fig. 51 en bas (courbe "à gradin").

En réalité les choses ne vont pas ainsi: on constate que le passage entre zone éclairée et ombragée est nuancé et la zone éclairée présente une série de "franges" c'est-à-dire de lignes nuancées claires et foncées parallèles à l'arête, la largeur et le contraste desquelles sont supérieurs du côté de la zone noire. Le profil photométrique de ce système de franges peut être donné par la courbe 2 de la fig. 51. Les franges claires et sombres rentrent dans le phénomène général de la "diffraction" et s'expliquent seulement en étudiant la distribution du champ électromagnétique au-delà de l'arête de P; elles sont liés à la nature ondulatoire de la radiation optique et donc elles ne peuvent pas être éliminées par aucun artifice technique. Cette inéluctabilité vaut aussi pour les autres manifestations de la diffraction que nous allons à examiner.

Dans la fig. 51 on voit le schéma du dispositif (à gauche, en haut), la courbe photométrique de l'éclairement sur l'écran S (à gauche, en bas) et ce qui arrive dans la réalité si on utilise un faisceau laser (rendu divergent par une lentille divergente) bloqué en partie par l'arête d'une lame métallique (à droite).

---

[69] En ordre de temps, les premières études sur la diffraction sont dues à Johannes Marcus Pourris de Kronland (1595-1667), au bolonais jésuite Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), à l'hollandais Christiaan Huygens (1629-1695), au savant polyédrique anglais Robert Hooke (1635-1703), et au jésuite français Ignace-Gaxeton Pardies (1638-1673).

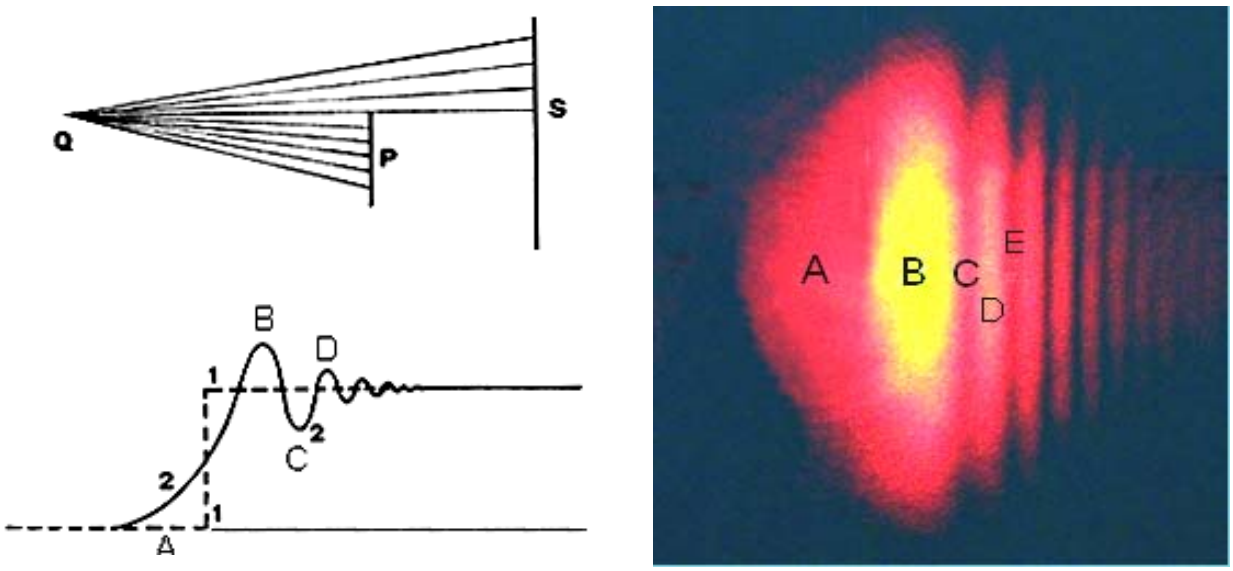


Fig. 51 – Les lettres A, B, C et D de la courbe 2 (à gauche) correspondent aux mêmes points de la figure à droite, qui représente l'effet réel de la diffraction d'un faisceau laser qui frôle le bord d'une lame de rasoir. La zone jaune en B est due à la saturation du système photographique.

18.2 - DIFFRACTION par une OUVERTURE CIRCULAIRE

Encore ici, le développement théorique du phénomène est très complexe, mais il nous suffit de regarder le résultat final.

Dans ce cas, le semi-écran opaque P de la fig. 51 est remplacé par un écran avec un trou circulaire.

Si le diamètre de l'ouverture est beaucoup plus grand que la longueur d'onde employé, on observera un système de franges circulaires concentriques, plus larges et plus contrastées près du bord de l'ombre géométrique du trou. La zone éclairée circulaire produite par l'ouverture tend à devenir homogène près du centre. On suppose naturellement que l'écran percé et l'écran sur lequel on recueille l'ombre du premier soient parallèles et que la source ponctuelle se trouve sur l'axe du trou.

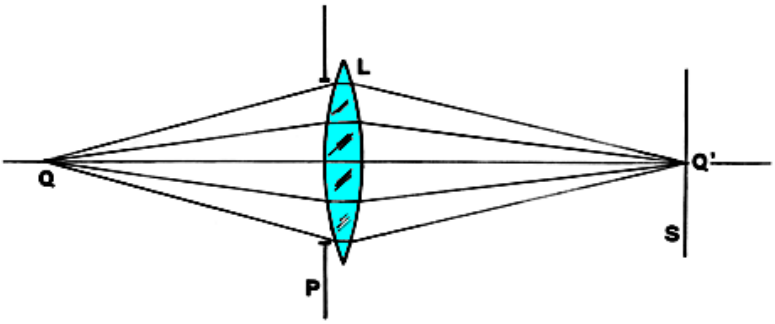
Ce cas peut être considéré comme un cas spécial du précédent et en microscopie on trove tous les deux, quand on observe le bord d'un objet, éclairé par un faisceau plus ou moins ouvert.

18.3 – DIFFRACTION dans une LENTILLE CONVERGENTE – La CENTRIQUE

Comme on a schématisé dans la fig. 52, on considère le cas d'une source ponctuelle Q, mise devant à un écran percé P mais, contrairement au cas précédent, à l'intérieur de l'ouverture de P on trouve une lentille convergente L; les choses soient disposées de manière que la lentille produise sur l'écran S une image géométrique Q' (image réelle de Q).

On varie la position de l'écran S dans le voisinage de Q' de façon à avoir sur l'écran le plus petit diamètre du faisceau, c'est-à-dire la meilleure focalisation. Nous supposons que Q, P et L soient centrés sur le même axe; P et S soient perpendiculaires à cet axe. On remarque que l'ouverture de P se conduit comme un diaphragme d'ouverture pour la lentille L. D'ailleurs, chaque lentille a de toute façon un diaphragme constitué par sa monture ou par ses bords: en autres mots, son ouverture est toujours limitée.

Fig. 52



Maintenant nous supposons que la lentille soit prive d'aberrations, ou au moins de celles "du point": dans ce cas, le cercle de confusion dû à ses aberrations aurait diamètre nul.

Eh bien, en Q' on observe dans ces conditions une figure caractéristique, dite "**figure de diffraction**" ou "**figure d'Airy**"[70] ou "**centrique**", qu'on peut penser comme la condition de meilleure contraction de l'ombre du trou circulaire (voir cas précédent, § 18.2), contraction opérée par la lentille.

Cette figure a un aspect caractéristique (voir la fig. 53) et elle est constituée par un disque central d'intensité maximal, aux bords nuancés ("**disque d'Airy**"), entouré par une bague sombre, puis une bague claire, toujours nuancée, une bague sombre, une claire, etc. Les bagues sont d'intensité décroissante, de diamètre croissant et toutes concentriques. Le profil photométrique de la centrique (l'intensité que se mesure le long de n'importe quel de ses diamètres) est représentée dans la fig 54.

Si NA est l'ouverture numérique (côté image) de la lentille L, et λ la longueur d'onde de la radiation utilisée, on a les valeurs suivantes pour le rayon des différentes parties de la centrique:

TAB. II

1e bague noire (bord extrême du disque d'Airy)	: 0,61 λ / NA
1e bague claire	: 0,82 λ / NA
2e bague noire	: 1,12 λ / NA
2e bague claire	: 1,33 λ / NA

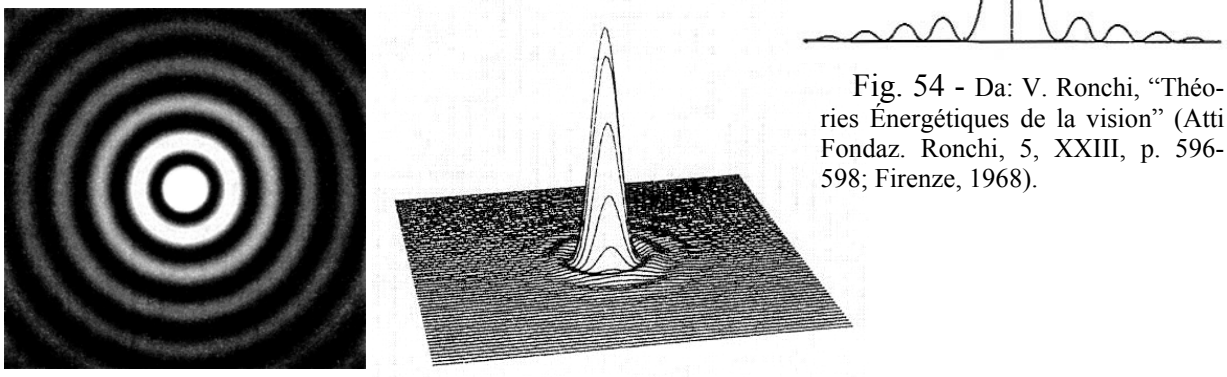


Fig. 54 - Da: V. Ronchi, "Théories Énergétiques de la vision" (Atti Fondaz. Ronchi, 5, XXIII, p. 596-598; Firenze, 1968).

Fig. 53 – La figure de diffraction en condition particulières (à gauche), en représentation axonométrique (au centre) et son profile photométrique (fig. 54). NB: Le disque d'Airy, la première bague et peut-être la seconde semblent de la même intensité, mais ceci est dû à la non linéarité de la réponse de l'émulsion photographique qui ne réussit pas à enregistrer les forts contrastes présents dans la centrique; voir le TAB: III

Dans le tableau II on trouve inutile d'aller au-delà de la deuxième bague, étant donné que les autres bagues sont trop pâles pour être appréciables. L'intensité décroît en effet rapidement et l'énergie totale contenue dans les différentes zones de la centrique est de plus en plus petite, comme il résulte du tableau III.

Au microscope, raremente on arrive au delà du deuxième anneau, en particulier dans les objectifs à immesrion: il s'agit de systèmes trop critiques.

[70] Sir George AIRY, physicien anglais (1801 - 1892).

TAB. III

Disque d'Airy	:	84 % de l'énergie de la figure totale
1° bague claire	:	7,1 % " "
2° bague claire	:	2,8 % " "
3° bague claire	:	1,5 % " "

Donc, un système optique idéal, même en absence d'aberrations, ne donne pas une image ponctuelle d'un objet ponctuel mais une espèce de cercle de confusion, ne pas dû aux phénomènes géométriques, c'est-à-dire à la réfraction et aux aberrations qui en dérivent, mais aux phénomènes ondulatoires, c'est-à-dire à la diffraction.

La distribution photométrique à l'intérieur de la centrique, sommairement décrite, s'explique en calculant la distribution du champ électromagnétique à l'intérieur de l'onde sphérique concave qui émerge de la lentille et se dirige dans la centrique: de chaque point de cette onde se produit une onde élémentaire sphérique, selon l'interprétation de Huygens, et la centrique est le résultat de l'interférence, dans le plan image, de toutes ces ondes élémentaires.

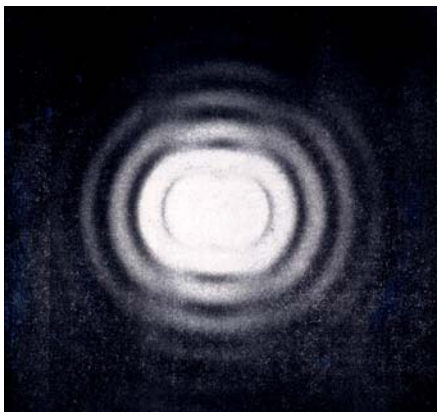
De ce nouveau cercle de confusion, c'est-à-dire de la centrique, maintenant nous voyons les effets.

On a expliqué (TAB. III) que la plus grande partie de l'énergie de la centrique, égal à 84%, est concentrée dans le disque d'Airy; nous pouvons ignorer les bagues et faire donc coïncider le "cercle de confusion" dû à la diffraction avec le disque D'Airy. Ce dernier a un rayon (TAB. II) égal à:

$$r = 0{,}61\ \lambda / NA \qquad (52)$$

En supposant toujours d'opérer avec un système optiquement idéal dépourvu d'aberrations, nous rappelons tout ce qu'on a dit dans le § 13.2 et la fig. 38, relatif à la notion de résolution: si les images de deux point-objet peuvent s'assimiler chacune à un cercle de rayon **r**, alors la résolution de ces points sera assurée quand la distance entre les centres de leurs images (**d**) est égale ou plus grande du rayon **r**. Donc, la limite à la résolution c'est-à-dire la moindre distance des points qui peuvent encore être résolus (**d**) est donnée par **r** (reporté au plan objet, c'est clair).

Si ce critère, dû encore à Lord Rayleigh s'applique au disque d'Airy, nous aurons que la moindre distance résoluble dans un système privé d'aberrations et d'autres causes de perte de contraste (lumière diffuse, défocalisation, etc.), c'est-à-dire dans un système limité par la seule diffraction ("**diffraction limited**"), nous aurons **d = r,** en étant **r** calculé avec la (52). Si NA est référée à l'espace objet (ou image, NA'), aussi **r** se réfère à l'espace objet (ou image).



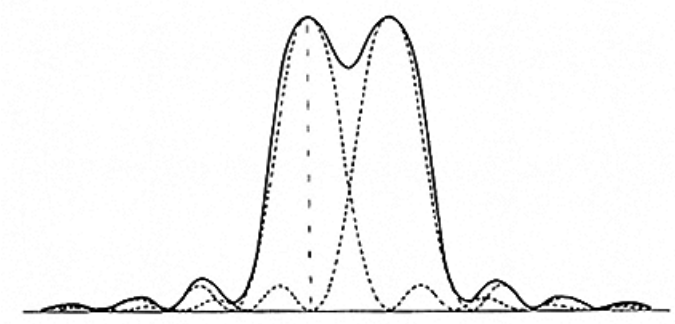
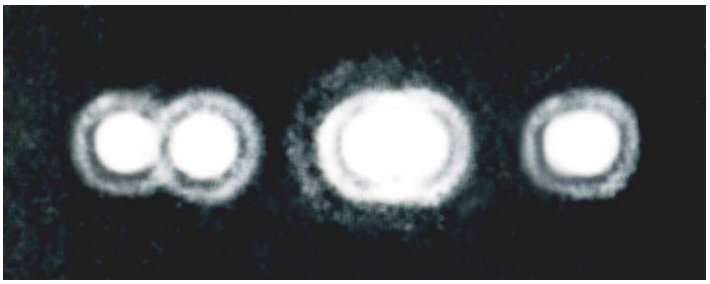


Fig. 56 - de: V. Ronchi, "Théories Énergétiques de la vision", Atti Fondaz. Ronchi, 5, XXIII, p. 596-598; Florence, 1968.

Fig. 55 de: V. Ronchi, "Théories Énergétiques de la vision, Atti Fondaz. Ronchi, 5, XXIII, p. 596-598; Florence, 1968.

Dans la fig. 55 on voit superposées deux centriques comme celle de la fig. 53; la distance entre leurs centres est justement égale au rayon de la première bague noire, c'est-à-dire du disque d'Airy.

Dans la fig. 56 on voit le profil photométrique de la fig. 55 tracé le long d'une droite qui passe par les deux centres. On remarque que le maximum d'intensité de chacune des centriques, au centre du disque, tombe au centre de la première dépression de l'autre courbe, c'est-à-dire de la première bague noire. La courbe d'intensité globale (ligne entière dans la fig. 56) montre une dépression entre les deux pics d'environ 20%. On peut aussi adopter le "**critère de Sparrow**" selon lequel le facteur 0,61 de la (52) devient 0,5 (plus exactement 0,47) et la courbe d'intensité globale ne montre plus aucune dépression au centre. On baisse ainsi la moindre distance résoluble nominale, mais la résolution devient évidemment plus difficile.



Voilà deux centriques, séparées par différentes longueurs: le diamètre du cercle d'Airy (à gauche: résolution parfaite) – le rayon du même cercle (au centre: limite de résolution conventionnelle selon Rayleigh) – la moitié du rayon du cercle (à droite: résolution presque impossible).
(56b)

Tout ceci suppose naturellement que les deux centriques soient idéales, de même intensité, sans causes d'altérations ou défauts du système, que l'éclairage soit incohérent, etc.

Observons maintenant: la valeur de **r** dépend seulement de **λ** et de NA. Le facteur **λ** comporte que la centrique n'est pas achromatique mais, en lumière blanche, elle montre des bords colorés. Cet effet en pratique, au moins dans les systèmes optiques du microscope, est difficilement perceptible.

Tout au plus, en base à la (52), on pourrait penser que la résolution augmente (c'est-à-dire **r** diminue) en utilisant des radiations avec une plus petite **λ**. On peut penser au bout inférieur du spectre optique (région "bleu-violet"), à l'ultra-violet, etc., et effectivement on a ainsi des améliorations; mais les difficultés techniques sont telles (pour l'opacité des verres normaux à l'UV, pour l'insensibilité de l'œil, etc.) que ces radiations son utilisées rarement, et seulement pour d'autres motifs (mesures d'absorption sélective, systèmes spéciaux pour la micro-lithographie, etc.).

Le facteur NA comporte que la résolution, **d = r** dépend de l'ouverture du système. Dans le microscope, en conditions normales, **r** dépend de l'ouverture de l'objectif (NA). Naturellement, étant donné que la NA d'un objectif s'entend d'habitude référée au côté objet, aussi la résolution qui dérive se réfère au plan objet.

Donc la (52) nous permet de calculer la résolution maximale d'un objectif. Et nous disons "maximale" étant donné que telle limite est infranchissable et d'autre part elle peut être empirée par beaucoup de causes: pertes de contraste (voir le § 17) et élargissement du cercle de confusion (ce dernier dû aux aberrations, défocalisation, défauts de tout genre, etc.).

Maintenant nous considérons un objectif réel pour microscope, affecté d'aberrations. De l'oculaire nous ne parlons pas étant donné que, au moins "dans l'axe", au centre du champ, il n'est pas normalement capable d'altérer le cercle de confusion donné par l'objectif.

En parlant des aberrations du point, nous avons vu à son temps qu'elles grandissent avec l'ouverture; lui sont proportionnelles la chromatique longitudinale, exprimée naturellement comme diamètre du cercle de confusion et l'astigmatisme; est proportionnelle à son carré la coma et à son cube la sphérique. Donc, *en diminuant l'ouverture d'un objectif, l'effet des aberrations se réduit et la résolution peut augmenter*. Cependant le disque d'Airy s'élargit comme il est indiqué par la (52) et la résolution diminue. Quoi faire ?

Dans un objectif photographique les aberrations sont toujours appréciables pour différents motifs (focales relativement élevées, impuissance d'optimiser le système pour la variabilité de l'agrandissement et de l'ouverture, grand champ angulaire, etc.); pour ce fait la fermeture du diaphragme porte en général une amélioration de la résolution et du contraste. Mais entre temps la centrique s'élargit et, tôt ou tard, il arrive le moment, dans lequel cette dernière devient plus grande que le cercle de confusion lié aux aberrations et il ne convient plus fermer ultérieurement le diaphragme.

En pratique, la majorité des objectifs photographiques présente la meilleure résolution à la

demi voie, avec des valeurs d'ouverture relative (f#, voir le § 5.2.4), compris entre 4 et 8.

Mais l'œil juge autrement, et se base surtout sur le micro-contraste qui tend à augmenter jusqu'aux valeurs élevées de f#, même 22. De cette manière, si la résolution d'un objectif photographique est maximale, par ex., avec f# = 4, l'œil préférera l'image obtenue avec f# = 16, par ex., étant donné que les nuances liées aux aberrations seront plus contenues et il ne s'apercevra pas de la perte de résolution, qui doit être évaluée avec des méthodes objectives.

Pour l'objectif du microscope les choses sont différentes. Il jouit de beaucoup d'avantages dont nous parlerons au § 19.2 (pag. 164). En conséquence, au moins près de l'axe, où il n'y a pas ni coma ni astigmatisme, il possède un cercle de confusion dû aux aberrations du point sensiblement plus petit que la centrique. Ainsi son fonctionnement, sa résolution, est limitée par la seule diffraction; il est "**diffraction limited**" ou "**optiquement parfait**". N'importe quelle perte d'ouverture marque donc une perte de résolution.

La qualité la plus grande d'un objectif de microscope, c'est-à-dire sa résolution, au moins dans sa valeur maximale possible, est liée donc presque exclusivement à son ouverture (NA), qui devient la référence la plus importante pour en apprécier la valeur. On parle d'objectifs de bonne qualité évidemment, en excluant les instruments jouet, et en considérant le centre du champ image.

Il faut beaucoup de prudence, naturellement; en effet un objectif de forte ouverture peut être affecté de fortes aberrations extra-axiales et par suite mauvaise définition aux bords du champ; il peut souffrir en outre de forte courbure de champ, mauvais contraste pour les motifs cités à son temps, etc.

En concluant, pour un objectif de microscope il n'a pas sens diminuer l'ouverture, étant donné que ceci porte toujours à une perte de résolution (et de luminosité). Seulement en cas très spéciaux (photographie aux petits agrandissements) on utilise des systèmes doués de diaphragme; aussi le champ obscur avec des objectifs à immersion demande des objectif doués de diaphragme, à fin que l'ouverture de l'objectif soit sensiblement inférieure à celle du condensateur qui doit être, lui aussi, à immersion. Mais il s'agit de cas spéciaux.

Et la résolution maximal réalisable d'un microscope dans son complexe, en supposant éliminées les causes de détérioration citées (défocalisation, pertes de contraste, etc.) dépend essentiellement de l'ouverture de son objectif (selon la (52)).

Pour finir, on remarque que la résolution augmente quand diminue la moindre distance résoluble qui est d = r, (voir la (52)). On peut par suite indiquer **d = r** comme mesure de la résolution, pourvu qu'on se rappelle que les deux grandeurs sont inversement proportionnelles.

18.4 - L'OBSERVATION de la centrique – Le STAR TEST

S'il est vraie tout ce qu'on a à peine dit, il ne doit pas être difficile d'observer la centrique dans un microscope. En réalité elle est en général très petite et il faut un oculaire moyen-fort, au moins 15 ×.

Mais la difficulté la plus grande consiste à disposer d'un **objet "ponctuel"**.

Avec le terme "ponctuel" à ce moment il n'est plus nécessaire, ni en pratique possible, indiquer un objet sans dimensions. Il est suffisant de s'adresser, et chercher, un si petit objet que son image géométrique donnée par le système en examen (image dont le diamètre sera donné par le diamètre de l'objet multiplié par l'agrandissement) soit sensiblement plus petite que la centrique produite par le système même.

L'image globale d'un point objet ne peut pas être jamais plus petite que la centrique (qui dépend, comme on a vu, seulement de λ et de NA). Si le cercle de confusion donné par les aberrations du point est plus petit que la centrique, le système sera, comme indiqué plusieurs fois, "**diffraction limited**" ou "**optiquement parfait**". Si, de plus, même l'image géométrique de l'objet est plus petite que la centrique, cet objet est optiquement sans dimensions ou "**ponctuel**" par rapport à ce système optique. Le mètre de mesure est toujours la centrique qui n'est pas liée aux ca-

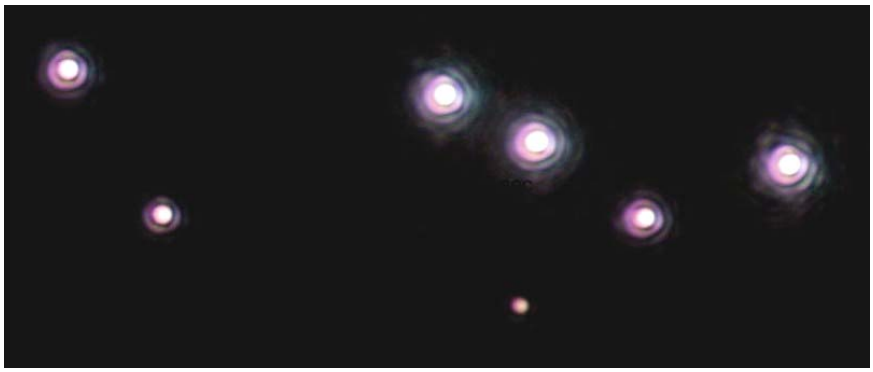
ractéristiques constructives de l'objectif ni à celles de l'objet, mais seulement à l'ouverture.

Trouver un objet ponctuel au sens à peine indiqué n'est pas facile. En astronomie on cherche une étoile pas trop intense et cela peut suffire; tout au plus les problèmes naissent de la turbulence de l'air, des vibrations dans le système, etc. Si le système optique du télescope rentre dans les limites de l'"optiquement parfait", on doit pouvoir observer une centrique régulière. Et celui-ci est le soi-disant "**star test**" ou "contrôle de l'étoile".

En microscopie, on peut avoir un objet avec ces caractéristiques de beaucoup de manières. La plus simple est de diluer dans l'eau ou dans un solvant opportun une suspension de particules très fines comme la détrempe, une peinture "métallique", etc. Avec la suspension, qui devra être très diluée, confectionner une "préparation" en mettant une goutte du liquide entre un porte-objet et une lamelle. Telle préparation sera éclairée avec une lumière rasante, c'est-à-dire en champ obscur, de manière qu'on puisse observer quelque grain solide éclairé sur un fond noir.

Plus efficace est le "star test" obtenu en déposant sur un porte-objet une couche mince de métal, d'habitude aluminium. Ce dépôt est effectué sous vide, par évaporation du métal chauffé électriquement dans un creuset spécial. Et telle opération doit être exécutée par une industrie spécialisée.

Eh bien, pendant la déposition métallique, pour la présence inévitable de poussière et autres irrégularités, se forment toujours des petits trous dans la couche métallique. On observe ce star test en transparence, c'est-à-dire en l'éclairant par-dessous avec la meilleure intensité et la meilleure ouverture disponible; on observera au microscope des trous de toutes les dimensions et de toutes les formes. En cherchant les trous les plus petits, on s'apercevra qu'on ne peut pas aller au dessous d'une certaine limite, au sens que les moins lumineux (c'est-à-dire ceux pour lesquels l'image géométrique est plus petite), apparaissent toujours avec l'aspect caractéristique de la centrique avec diamètre fixe.



Un group de centriques produites par un objectif de bonne qualité au centre du champ, observées avec un fort oculaire (32 ×). Leur luminosité est très différente mais les moins lumineuses semblent plus petites à cause de la réponse non linéaire du capteur photographique et de l'œil. (56c)

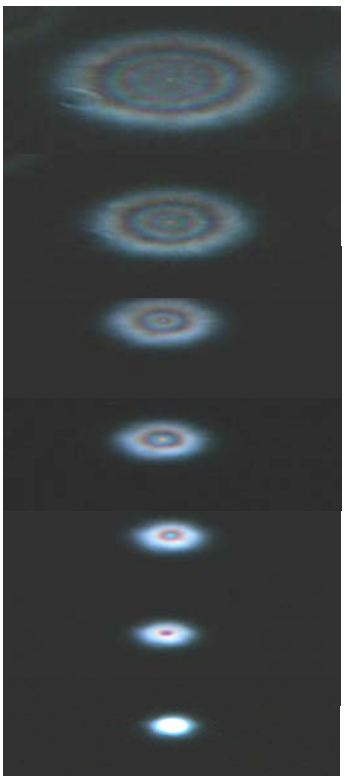
Au centre du champ ("dans l'axe") la centrique doit ressembler à la fig. 53 (voir le § 18.3 et la figure ici dessus), et elle doit jouir de symétrie rotatoire (elle doit être symétrique autour de son centre). Cette affirmation dépend du fait que le système optique est supposé centré en toutes ses parties autour d'un axe commun, et il jouit lui-même de symétrie rotatoire.

Si près de l'axe la centrique apparaît déformée, avec une espèce de queue, on aura "coma sur l'axe", laquelle dépend souvent d'une faute de centrage de quelque lentille de l'objectif; dans ce cas, la figure est allongée avec un point plus lumineux d'un côté, et la direction de son allongement reste constante au changer de la focalisation. On aura astigmatisme sur l'axe si la figure est allongée et sa direction d'allongement se déplace de 90° en changeant la mise au point (voir les figures 43 et 44 à la page 100/101).

Quand on observe le star test aux bords du champ ("hors de l'axe"), à part les fautes d'assemblage de l'objectif, il faut s'attendre quelques résidus de coma, astigmatisme et chromatique latérale pour lesquels la centrique sera difficilement parfaite, et les variations que peut assumer sa forme sont infinies. Un œil expert réussira à apprécier l'état de correction et de centrage de l'objectif d'un simple coup d'œil.

Jusqu'à présent on a implicitement supposé que la mise au point de l'instrument soit parfaite. Quand on l'altère, aussi le profil photométrique de la centrique s'altère. Dans le cas le plus simple (système privé d'aberrations du point, aucune perte de contraste, etc.), la défocalisation provoque tout d'abord une diminution d'intensité du disque d'Airy et une augmentation de celle des bagues;

parallèlement, le disque s'élargit.



En procédant avec le défocalisation, le disque d'Airy disparaît et la centrique montre au centre une zone sombre; son énergie se concentre dans les anneaux, surtout dans les premiers, et ses dimensions générales augmentent en portant une perte de résolution, de définition, et par suite de micro-contraste. En défocalisant encore, une zone claire au centre de la centrique réapparaît, mais avec des bagues beaucoup plus intenses, puis encore une zone sombre, etc. En peu de mots, la centrique doit être considérée une figure à trois dimensions dans laquelle on obtient le moindre diamètre du "cercle de confusion" dans les conditions de meilleure mise au point et on observe, dans le plan image, la distribution photométrique déjà décrite (disque d'Airy + anneaux). Par contre, dans des plans sur et sous le meilleur foyer, la figure apparaît avec la forme d'un double cône avec les bases de côtés contraires, sur l'axe duquel s'alternent zones claires et sombres, comme on a dis plus haut, entourées par des bagues toujours plus larges. Le double cône, en absence d'aberrations, est symétrique par rapport au plan de meilleure focalisation[71].

Alors, supposé un objectif idéal, dépourvu d'aberrations du point, ces figures dérivées par altération de la centrique pendant le défocalisation sont les mêmes, sur et sous la position de meilleure focalisation.

Dans le cas cependant que l'objectif soit affecté d'un résidu de sphérique on a ces effets:

•• Dans les conditions de meilleure mise au point, la centrique apparaît très semblable à celle théorique, simplement avec le disque d'Airy légèrement plus grand et avec les bagues plus intenses (fig. 57 - 2 et schéma axonométrique au dessous – 57b) (perte de résolution !).

•• Avec la focalisation déplacée d'un côté, le disque se fait plus petit mais moins intense et il est entouré par un ample halo nuancé d'intensité décroissante vers la périphérie ("IMAGE NUANCÉE") (fig. 57 - 1).

•• Avec la focalisation déplacée du côté opposé, le disque peut se faire plus petit et moins intense jusqu'à disparaître, mais il sera entouré d'une série de bagues très intenses, de diamètre croissant au grandir de la défocalisation et de largeur croissante vers la périphérie. Et celle-ci est la soi-disant "IMAGE aux ANNEAUX" (voir la fig. 57 - 3).

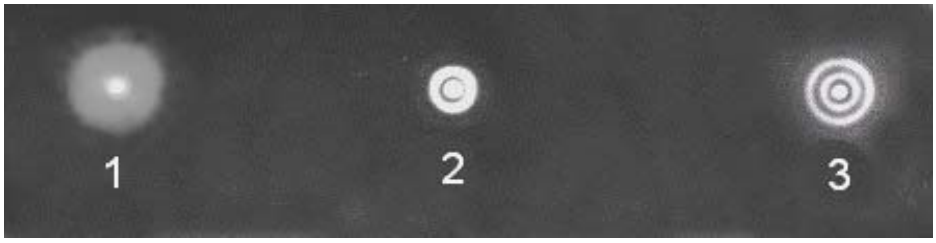


Fig. 57

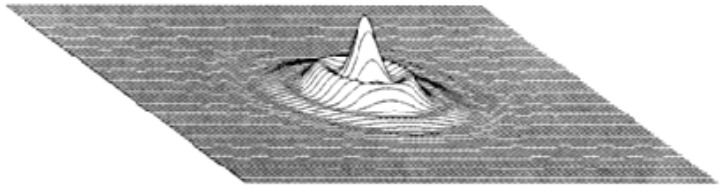


Fig. 57b

Ces faits rendent claire la notion que les résidus de sphérique provoquent toujours un élargissement de la centrique et par suite une perte de résolution. Les mêmes faits permettent en outre de révéler et évaluer tels résidus; en effet, en observant le star test, il est possible de vérifier l'aspect altéré de la centrique sur et sous la meilleure focalisation. Si les deux figures sont différentes

[71] Voir, dans la même section, les articles n° 21 et, éventuellement, n° 11 et 18 (en français).

comme dans la fig. 57, cela signifie qu'il y a de la sphérique et, avec un peu d'expérience, on peut évaluer aussi le montant du résidu.

On peut aussi définir le signe du résidu et en déterminer la cause en base à cette règle pratique: *si l'image "aux anneaux" se présente quand l'objectif se rapproche de l'objet ("focalisation courte"), la sphérique est souscorrigée, et ceci dépend d'une lamelle trop mince, d'une longueur du tube insuffisante ou d'une distance trop petite entre les deux premières lentilles de l'objectif. L'image aux anneaux avec la "focalisation longue" (quand l'objectif s'éloigne de l'objet) signifie qu'il y a un résidu de sphérique surcorrigé qui dépend de causes opposées à celles citées.*

La star test permet donc de révéler:

--- sphérique et son montant,

--- signe du résidu de la sphérique.

--- décentrage de l'objectif (ou, au moins, de sa lentille flottante), si on a coma sur l'axe,

--- inclinaison ("tilt") de quelque lentille, si on a astigmatisme sur l'axe,

--- présence de coma, astigmatisme ou chromatique latérale aux bords du champ (pour la chromatique latérale, choisir un trou plus grand),

18.5 - La DIFFRACTION et la RÉSOLUTION des RÉSEAUX

Nous avons jusqu'à présent considéré les phénomènes de diffraction et les critères de résolution pour les objets "ponctuels", c'est-à-dire sans étendue, ou plutôt "plus petits que la figure de diffraction".

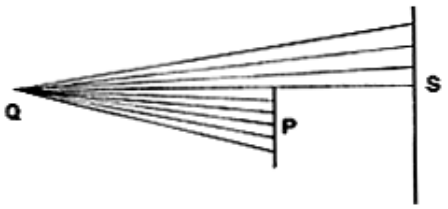
Si on examine un objet étendu, on peut le considérer constitué par un nombre élevé, théoriquement infini, de points; à chaque point correspondra une centrique, d'intensité plus petite ou plus grande, et l'image globale sera donné par le recouvrement de toutes les centriques. À ce point le sujet devrait être approfondi en considérant les phénomènes de **cohérence**, c'est-à-dire de rapports de phase dans la radiation qui traverse les différents points de l'objet, mais pour nos fins on peut s'arrêter ici.

Vice versa on peut examiner la formation de l'image d'un objet étendue d'un autre point de vue: on peut réduire beaucoup d'objets usuels à des systèmes de lignes parallèles équidistantes (fibres, fibrilles, sections de couches fines, etc.). Pour clarifier l'analyse, on peut reconduire un objet contenant des structures allongées parallèles à un "**réseau**", entendu comme objet plan sans épaisseur, formé par des lignes parallèles opaques et transparentes alternées. Si les lignes sont de même largeur, on peut définir comme "**pas**" du réseau (**d**) la largeur constante d'une ligne opaque + une transparente[72].

Maintenant, si un tel réseau est éclairé par transparence à partir d'une source ponctuelle éloignée (c'est-à-dire par un faisceau visé, de rayons parallèles), selon un schéma semblable à celui de la fig. 51 (voir ici dessous) dans laquelle P pourrait être le plan d'un réseau, chacune des lignes transparentes ou fentes représente un espace traversé par une onde et limité par deux arêtes. Pour chaque arête on a des phénomènes de diffraction et chaque fente produit, sur un écran éventuel, mis au-delà du réseau (S), une image constituée par une bande éclairée avec bords nuancés accompagnée des deux côtés d'une série de lignes ou franges nuancées d'intensité décroissante (voir la fig. 57c, à la page suivante).

Les détails de la diffraction causée par les fentes mériteraient encore une fois une étude mathématique complexe mais, aux buts de la compréhension des phénomènes de résolution dans le microscope, on peut se limiter à la simplification suivante.

[72] Comme on a dejà dit, le pas **d** peut être exprimé avec son inverse, c'est-a-dire come "fréquence spatiale": **v** = 1/d, qu'on peut exprimer en "lignes par millimètre" si **d** est donné en millimètres.



(Fig. 51)

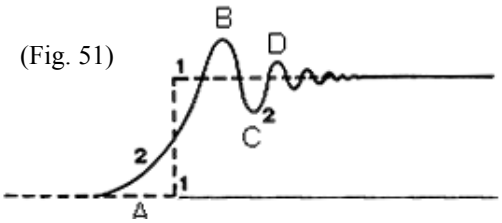
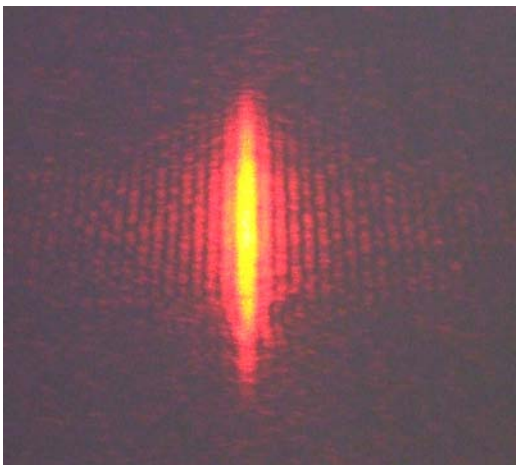


Fig. 57c



Qu'on considère la fig. 58 dans laquelle "Ret" matérialise le plan du réseau vu en section; ce plan coïncide avec le plan objet d'un objectif, non pas indiqué dans la figure. L'axe de l'objectif est évidemment vertical. F indique un faisceau parallèle (onde plane) provenant du condensateur, comme on obtient en fermant à peu près complètement le diaphragme d'ouverture.

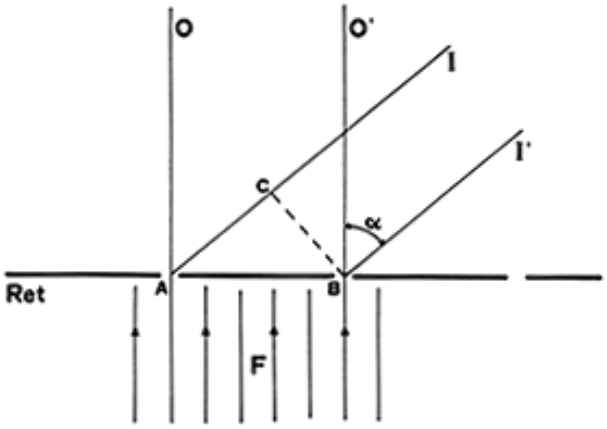


Fig. 58

Dans ces conditions les ondes partielles en A et B sont en phase entre elles, c'est-à-dire cohérentes, vu qu'elles sont causées par une même source plus ou moins «ponctuelle» (et virtuelle) à distance infinie.

Nous supposons pour simplicité que les fentes A et B soient très minces (largeur semblable à la longueur d'onde employée, λ); leur distance sera le "pas" **d** du réseau, constant pour toutes les lignes; tout ce que nous dirons du couple de fentes A - B, on peut le répéter d'une autre couple quelconque de fentes contiguës.

Maintenant nous considérons la direction A - O (ou B - O'), qui est perpendiculaire au plan du réseau **Ret** et par suite parallèle aux rayons du faisceau incident F et à l'axe de l'objectif, ne pas indiqué. Selon le principe d'Huygen[73], des deux fentes A et B naissent des séries d'ondes élémentaires qui, en ayant centre en A ou B, sont cylindriques concentriques, de dimensions croissantes et avec l'axe coïncident avec A ou B. Telles ondes se propagent en toutes les directions en conservant la forme cylindrique. À une distance du plan **Ret** beaucoup plus grande de la distance AB nous supposons de disposer un écran opaque, parallèle à **Ret** (en haut, hors de la figure). Les deux directions AO et BO', si d = AB est petit, rencontreront l'écran en deux points très voisins, que nous pouvons assimiler à leur point médian (P, ne pas représenté, mais situé dans le plan de la figure). P est distant en égale mesure d'A et de B. Les ondes en phase (en phase étant donné qu'elles sont engendrées par l'onde F qui est plane), qui naissent d'A et de B, atteignent donc P après avoir parcouru le même trajet, donc encore en phase. Ici elles interfèrent.

Pour "**interférence**" nous entendons la somme des effets de deux ou plusieurs phénomènes ondulatoires qui s'influencent réciproquement quand ils se rencontrent dans un endroit donné. En particulier, dans le point P (à distance infinie) de notre cas se joignent deux ondes électromagnétiques, avec centre en A et B, qui sont cohérentes, comme déjà dit. Si elles sont **cohérentes** cela signifie que leurs rapports de phase sont constants; dans notre cas, elles sont non seulement cohérentes, mais aussi en concordance de phase: ceci signifie que, quand une des ondes atteint une valeur déterminée (par ex. le maximum) du champ, aussi l'autre se trouve dans le même état. Les ef-

[73] Christiaan HUYGENS, physicien, mathématicien et astronome hollandais (1629-1695).

fets des deux ondes en concordance de phase peuvent alors s'additionner; l'intensité de l'onde **résultante** est la somme des intensités des ondes composantes; dans ce cas l'interférence s'appelle "**constructive**" ou "positive". Si les ondes composantes sont en opposition de phase, c'est-à-dire l'une atteint le maximum quand l'autre se trouve avec une valeur maximum du champ en sens opposé, leurs effets se soustraient l'un de l'autre, et la résultante est moins intense du membre plus intense ou même nulle. On parle d'interférence "**destructive**" ou "négative".

En revenant à la fig. 58, dans la direction AO (ou BO'), on aura infinis points équidistants d'A et de B dans lesquels se joignent deux ondes en phase et on a interférence constructive. Dans la direction AO/BO' se propage donc une onde avec la plus grande intensité; on a ainsi un «**maximum»** d'intensité, dénommé "d'ordre zéro" ou "**maximum 0**".

Mais maintenant nous considérons une autre direction, par ex. AI (ou BI' dans la fig. 58)[74]. Les ondes qui se propagent le long des droites AI et BI' ne sont plus en phase; en effet, la AI parcourt par rapport à BI' un petit trait en plus, égal à AC, et elle est en retard. Pour calculer ce retard, c'est-à-dire la longueur d'AC (on suppose d'opérer en air ou dans le vide, avec n = 1), il suffit de rappeler la définition de la fonction sinus (§ 2.2.1) et observer que l'angle CBA est égal à **α** en étant **α** = O'BI' = OAI; on a: sen **α** = AC/AB et par suite (étant donné que AB est égal au pas **d**):

$$AC = d \text{ sen } \boldsymbol{\alpha} \qquad \text{ou} \qquad d = AC/\text{sen } \boldsymbol{\alpha} \tag{53}$$

Eh bien, dans la direction AI, quand on aura interférence positive, c'est-à-dire un "maximum" d'intensité? Il est clair que, avec **α** croissant à partir de 0, on s'éloigne de la condition de concordance de phase qu'on avait dans la direction AO et l'intensité décroît par suite. Quand AC = λ/2, les ondes AI et BI' se trouvent en opposition de phase, au sens que, quand l'une arrive à un maximum d'amplitude, l'autre se trouve à la moitié de la période, et par suite en phase opposée, c'est-à-dire avec un maximum d'amplitude de signe opposé: on a interférence négative avec annulation (ou forte réduction) de la résultante. Donc, quand AC = λ /2 on a un "minimum" d'intensité. En augmentant AC, c'est-à-dire l'angle **α,** c'est-à-dire l'inclinaison du faisceau AI/BI', on arrivera tôt ou tard à la condition pour laquelle AC = **λ**; alors les deux ondes sont en concordance et on aura un nouveau maximum dénommé "d'ordre I" ou "**maximum I**." Si on continue à augmenter la valeur de **α**, on aura une succession de directions de moindre intensité toutes les fois que AC est égal à un numéro impair de moitiés de longueurs d'onde (AC = (m + ½) **λ**, avec **m** entier); en effet dans ces directions les deux ondes seront en opposition de phase. Quand par contre AC = **m λ** (toujours avec **m** entier), les ondes seront en phase et on aura un "maximum"; les maxima suivants seront indiqués avec l'ordre II, III, etc. Ainsi, la (53) devient: d = m**λ** / sen **α**

La formation des "maxima" ne s'arrête pas naturellement, quand **α** = 90° (faisceaux rasants) et se répète du côté opposé du réseau, mais en microscopie nous intéressent seulement le maxima que l'objectif peut accueillir et qui se trouvent sur le côté supérieur de la fig. 58 et 59.

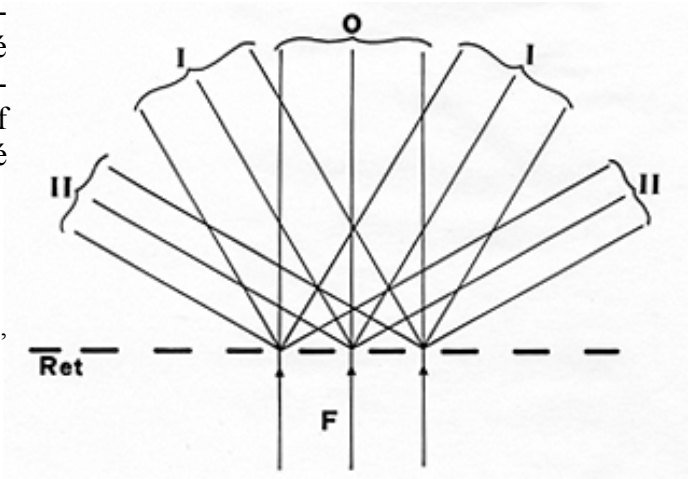


Fig. 59

(Ce schéma clarifie ce qu'on a vu dans la fig. 58, deux pages plus haut).

[74] Ce que nous dirons de la direction AI ou BI' se peut répéter pour la direction opposée, symétrique par respect à AO – BO'. Tous les phénomènes de diffraction et interférence que nous décrirons se répètent des deux côtés du faisceau direct AO – BO'.

Donc, au-delà du réseau frappé par le faisceau F de la fig. 59, se propage une auréole de "maxima" dont celui d'ordre 0 ("**faisceau direct**") a la même direction du faisceau incident et les autres sont toujours plus déviés au grandir de leur ordre et symétriques par rapport à celui d'ordre 0.

Maintenant nous considérons la fig. 60 qui illustre les phénomènes illustrés jusqu'à présent, comme ils arrivent dans un microscope dans lequel l'objet (O) est constitué encore par un réseau.

Avant tout, un réseau ne sera pas constitué par deux fentes seulement mais par beaucoup de fentes (il suffit de penser à un faisceau de fibrilles musculaires). Cependant le schéma considéré jusqu'à présent pour deux fentes reste valide pour un nombre illimité de fentes. Tout simplement, chaque "maximum" sera constitué par l'interférence de beaucoup d'ondes toutes en phase: il est suffisant que le pas **d** du réseau soit constant.

En deuxième lieu, la condition qu'on a supposée, que le faisceau incident sur le réseau soit parallèle, se réalise comme nous avons dit en fermant presque tout le diaphragme d'ouverture (indiqué dans la fig. 60 par L et par le symbole d'une bougie). À la limite, si tel diaphragme se réduisait à un point, étant donné qu'il se trouve dans le premier plan focale du condensateur, le faisceau divergent qui vient de ce point viendrait rendu rigoureusement parallèle par le condensateur même, supposé dépourvu d'aberrations.

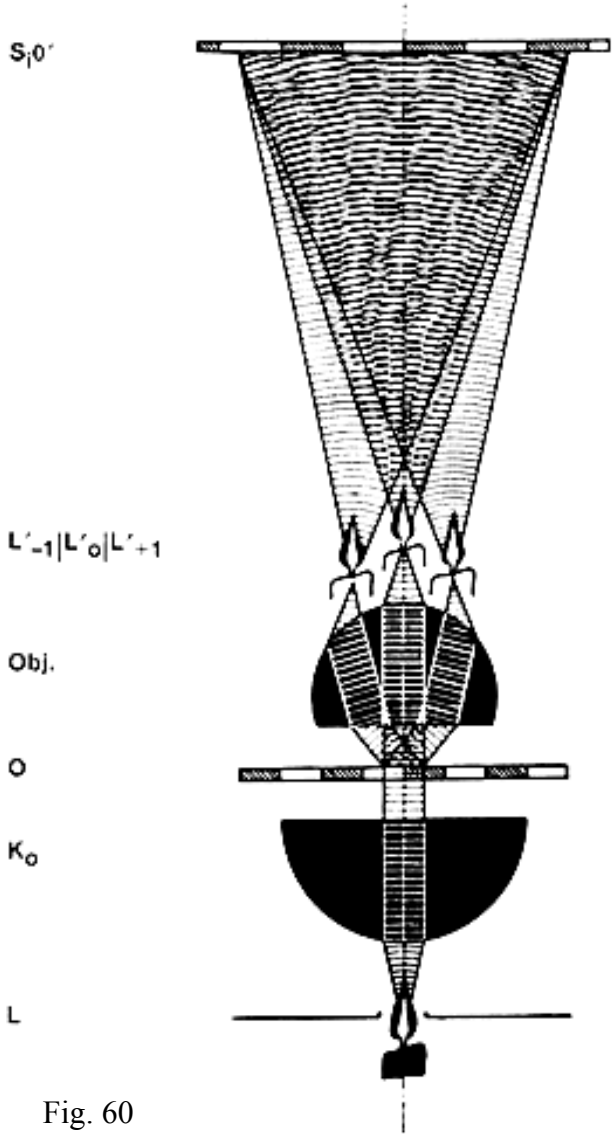


Fig. 60

De: A. Schaefer, "Problèmes posés par l'éclairage de le préparation microscopique", "Mikroscopion", n°10, 1967; et Wild Heerbrugg, S. Gallen (Suisse)

Cette situation est schématisée dans la fig. 60. Si de plus le faisceau incident sur le réseau a une ouverture pas nulle (diaphragme d'ouverture avec diamètre pas négligeable), même les maxima causés par la diffraction et par l'interférence ne seront pas des faisceaux parallèles comme schématisé dans les figures 58, 59 et 60, mais ils auront une ouverture pas nulle, c'est-à-dire ils seront formés par un faisceau divergent.

Nous continuons dans l'examen de la fig. 60. **Obj.** schématise évidemment l'objectif; les différents maxima produits par le réseau (schématisés comme faisceau parallèles) viennent rendus convergents par l'objectif dans son plan focal supérieur; dans ce plan nous aurons donc autant d'images du diaphragme d'ouverture L combien sont le maxima produits par le réseau et recueillis par l'objectif; trois d'entre eux sont représentés sous forme de bougies, indiquées avec L'_{-1} et L'_{+1} (maxima d'ordre I) et avec L'_0 (maximum 0). Le plan contenant ces images diffractées du diaphragme fut appelé par E. Abbe "**image primaire**". Au-delà de cet plan, les trois faisceaux convergents divergent de nouveau et s'élargissent sur le plan de l'image intermédiaire, qu'Abbe appela "image secondaire" (qui est indiquée dans la fig. 60 avec S_i0'); l'image de l'objet est donc formé par le recouvrement (et l'interférence) de tous les faisceaux divergents provenant de

l'objectif et donc correspondants à d'autant de maxima diffractés à l'œuvre de l'objet.

Ce schéma est applicable à n'importe quel type d'objet qui contienne des irrégularités et qui d'une façon ou d'une autre opère la diffraction du faisceau éclairant provenant du condensateur. Dans le cas réel, la disposition des faisceaux diffractés sera en général complexe et irrégulière; le schéma illustré représente une simplification, mais les principes restent valides.

18.6 – Le SENS de l'OUVERTURE

Nous réfléchissons encore sur la fig. 60.

Sur l'objet O frappe un faisceau éclairant unique, schématisé comme parallèle, mais nous avons vu que le discours vaut aussi avec des faisceaux convergents. Après l'objet, nous trouvons le même faisceau (L'_o) sous forme de "maximum 0", mais atténué, soit par l'absorption ou la réflexion, opéré par les lignes opaques du réseau, soit grâce à la diffraction. À côté du maximum 0, pas diffracté, ou "**direct**", nous trouvons en effet aussi les faisceaux diffractés.

Nous faisons maintenant cette considération: si l'objet était constitué par un filtre gris, c'est-à-dire par une lame absorbante homogène, dépourvue de structure interne, on n'aurait pas de diffraction, mais seulement un faisceau direct atténué, identique au maximum 0 considéré jusqu'à présent. Si l'objet présente des irrégularités (de transparence, d'index ou d'épaisseur), la diffraction par contre arrive et se forment les maxima diffractés.

Donc le maximum 0 tout seul ne fournit aucun renseignement sur la structure éventuelle de l'objet et il est capable de fournir seulement une image intermédiaire homogène comme un filtre gris. Les maxima diffractés sont par contre les seuls à pouvoir déterminer si et comme l'objet est structuré, ce sont eux qui contiennent les renseignements nécessaires pour reconstruire l'image de l'objet.

Vers la fin 1800, E. Abbe suggéra et exécuta une série d'expériences qui montrent la valeur des maxima diffractés. Par ex., en éliminant tous les faisceaux diffractés avec un diaphragme opportun mis dans le plan focal supérieur de l'objectif, le champ visuel apparaît homogène et la structure de l'objet disparaît. Si on supprime par contre seulement les maxima d'ordre impairs (I, III, etc.), en laissant les autres, la structure de l'objet apparaîtra plus fine que la réalité, le "pas" de ses lignes apparaîtra en particulier réduit de moitié.

Une restitution fidèle de la structure de l'objet exigerait donc que l'objectif accueillît toute la radiation diffractée par l'objet même, chose évidemment impossible étant donnés les limites théoriques et pratiques de l'ouverture (voir les §§ 5.2.5 et 16). Cependant, on peut dire qu'on obtient une indication sur l'existence d'une certaine structure dans l'objet quand une petite partie seulement de l'énergie diffractée est accueilli par l'objectif. Dans le cas élémentaire d'un réseau, il est suffisant que l'objectif accueille une partie des maxima I, c'est-à-dire des premiers faisceaux diffractés; cela signifie qu'**on a "résolution", c'est-à-dire une quelque représentation, dans l'image, de la structure périodique du réseau, quand l'ouverture NA de l'objectif est égale à au moins la moitié de l'ouverture du maximum I**. Il est clair que dans ces conditions on ne verra pas dans l'image la structure fidèle de l'objet (par ex. les arêtes vives des lignes du réseau), mais seulement une structure approximative comme une alternance de lignes claires et sombres nuancées[75].

À ce point, si $NA = n \text{ sen } \alpha$ est l'ouverture de l'objectif qui est en train d'observer un certain réseau avec un pas **d**, on se rappelle de la (53) dans le § 18.5:

$$d = AC/\text{sen } \boldsymbol{\alpha} \qquad (53)$$

dans laquelle AC est le déphasage entre les deux ondes qui se propagent au-delà du réseau en for-

[75] On peut avoir une résolution aussi quand vient supprimé le maximum 0, comme il arrive dans le fond noir, mais alors l'objectif devra accueillir au moins une partie d'autres deux maxima. Un maximum seul ne suffit pas car il ne peut pas créer tout seul ces phénomènes d'interférence qui causent les clair-obscurs dans l'image intermédiaire.

mant un angle **α** par rapport au maximum 0 et interférent entre elles pour former un "maximum" ou un "minimum" (fig. 58). On a déjà vu dans le § 18.5 qu'on a le premier minimum quand AC = λ /2; donc, pour ce minimum, on a:

$$d = \lambda /2 \text{ sen}\cdot\alpha \qquad \text{c'est-à-dire} \qquad d = 0{,}5\ \lambda / \text{sen}\cdot\alpha$$

alors, dans le cas le plus général, en supposant que l'ouverture NA de l'objectif doive être au moins égale à l'ouverture du premier minimum (sen **α**), on aura:

$$d \geq 0{,}5\ \lambda / NA \tag{54}$$

Si alors la NA de l'objectif coïncide ou dépasse de peu sen **α**, on peut dire que la valeur de **d** dans la (52) représente la limite de la résolution de cet objectif, c'est-à-dire la plus petite valeur du pas **d** d'un réseau que l'objectif réussit à résoudre, donc son meilleur pouvoir résolutif.

Maintenant nous comparons trois formules, examinées dans les pages précédentes et rapportées en chaque cas au pouvoir résolutif:

--- au § 17.2 (formule (51)):

$$d = \lambda / 2\ NA = 0{,}5\ \lambda / NA \tag{54bis}$$

Cette formule exprime le plus petit pas du réseau qui est rendu visible dans son image, donnée par un certain objectif, calculé sur la base du contraste dans l'image. Dans la (51) on met en relation la limite de résolution d'un réseau avec la valeur du contraste dans son image;

--- dans la (54) à peine considérée on exprime par contre le pouvoir résolutif d'un objectif, qui observe un réseau en considération des phénomènes de diffraction opérés par le réseau et du contenu de renseignement de la radiation diffractée. On trouve pour le plus petit pas résolu du réseau (**d**) la même valeur.

Cette coïncidence des deux expressions du pouvoir résolutif, obtenus avec des procédés logiques très différents (contraste dans l'image ou diffraction dans l'objet), a une grande importance;

--- si de plus on se rappelle de la (52), dans le § 18.3:

$$r = 0{,}61\ \lambda / NA \tag{52}$$

on trouve une expression très semblable; cependant, elle traite la résolution d'objets ponctuel, et alors **r** n'exprime pas le pas du réseau mais la distance des points. À l'égard du facteur 0,61 à la place de 0,5, il faudrait l'expliquer sur la base d'une analyse mathématique da la formation de la centrique, mais nous pouvons penser intuitivement que la résolution d'un réseau, contenant des structures allongées, soit plus facile que la résolution des points, et il est par suite logique que pour ces derniers la plus petite distance résoluble (**r**) soit un peu plus grande.

En tout cas, les trois formules donnent une valeur du pouvoir résolutif maximum en fonction des deux mêmes facteurs: λ et NA, laquelle chose nous dit quelles sont les possibilités pratiques d'influer sur le pouvoir résolutif et confirme l'importance de l'ouverture. On se rappelle toujours qu'il s'agit d'une valeur maximum, qui peut être empiré par une infinité de facteurs, déjà rappelé plusieurs fois (défauts constructifs, résidus d'aberrations, saleté, défocalisation, contraste pas optimal dans l'objet, etc.).

18.7 – La DIFFRACTION dans la PUPILLE de l'objectif

Toujours avec référence à la fig. 60, il est clair que, en observant la pupille de l'objectif, ou plutôt son plan focale supérieur, et l'**"**image primaire" d'Abbe (voir le § 18.5), on doit voir une série d'images du diaphragme d'ouverture, une pour chaque **"**maximum" recueilli par l'objectif. Si le diaphragme d'ouverture est fermé à la limite inferieure, comme indiqué dans la fig. 60, on verra beaucoup de taches lumineuses, une pour chaque maximum.

Mais il y a une complication: en revenant à la fig. 58 (dans le § 18.5) il résulte que les rayons qui forment le maximum 0 (AO – BO' dans la fig. 58) sont toujours en phase entre eux, étant don-

né qu'ils parcourent des chemins identiques avant d'interférer. Cette concordance de phase ne dépend pas de la longueur d'onde et par suite le maximum 0 ne subit pas de dispersion, c'est-à-dire il apparaît blanc, ou au moins de la même couleur de la radiation qui grave sur le réseau. Par contre, pour les maxima diffractés, l'interférence se vérifie avec un déphasage relatif des deux rayons AI - BI', égal à AC; mais AC doit être exprimé en longueurs d'onde et par suite, en changeant la valeur de **λ,** change aussi cette valeur d'AC pour laquelle on a concordance de phase, et donc change l'angle de déviation (**α**) du maximum diffracté. En autres mots, un maximum est en réalité constitué par une série de faisceaux avec différentes directions, une direction pour chaque valeur de λ comprise dans le faisceau incident. En lumière blanche, le maximum 0 apparaîtra blanc, mais les maxima d'ordre supérieur apparaîtront dispersés, c'est-à-dire ils apparaîtront comme un petit spectre avec toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Si le diaphragme d'ouverture est centré, dans la pupille de sortie de l'objectif on verra une tache centrale blanche (maximum 0) accompagnée sur les deux côtés d'une série identique de maxima colorés (voir les figures de 61 à 64, qui se réfèrent à des objets avec des rayures disposées en trois séries à 120° l'un de l'autre, et qui produisent donc trois séries de maxima avec une figure globale d'étoile à six pointes, comme expliqué ici dessous).

18.8 - L'OBSERVATION des MAXIMA

On peut exécuter plus aisément l'observation pratique des maxima et de la diffraction justement dans la pupille d'objectif, comme on a à peine décrit.

On doit mettre sur la platine et focaliser un réseau spécial, c'est-à-dire un objet contenant des structures périodiques (lignes ou points) qui se répètent à une distance (avec un **"**pas") plus ou moins constant. Si l'objet est trop petit pour pouvoir remplir tout le champ visuel, on ferme le diaphragme de champ jusqu'à quand seulement l'objet, mis au centre du champ, soit éclairé. Si l'objet a un pas (relativement) très grand, par ex. de plusieurs microns, les maxima seront très rapprochés, se superposeront partiellement, et dans la pupille d'objectif on verra seulement une tache centrale confuse.

Pour trouver des réseaux très fins, il convient recourir aux objets naturels comme écailles d'ailes de papillon, frustules de diatomées, etc. Ces dernières sont des algues marines unicellulaires et d'eau douce, douées d'une fine coque siliceuse, formée par deux valves qui se coincent l'une dans l'autre et elles ont des dimensions légèrement différentes. Ce sont ces valves les soi-disant **"**frustules". Souvent les frustules portent des minces sculptures en forme de lignes ou point ("perles"). Les points sont d'habitude alignés en files régulières. Dans la fig. 61 on voit, en partie, une frustule de *Pleurosigma angulatum* agrandi environ 850 fois, qui porte des **"**perles" ordonnées en trois systèmes de files, qui forment entre elles des angles de 120°. On peut comparer cet objet à un recouvrement de trois réseaux à lignes parallèles avec le même pas. Chacun de ces trois réseaux doit produire une série complète de **"**maxima"; les maxima 0 des trois réseaux coïncident et produisent au centre du champ une tache blanche lumineuse: les maxima I apparaissent aux bords de la pupille d'objectif, disposés comme les sommets d'un hexagone: en numéro de six étant donné que s'en forment deux pour chaque réseau élémentaire. La figure totale qui apparaît est montrée dans la fig. 62. En ayant compris le mécanisme de la diffraction, il serait possible aussi, en observant la fig. 62, calculer la structure de l'objet qui l'a produite et par suite reconstruire l'image de l'objet sur la base de l'**"**image primaire" d'Abbe (§ 18.5) présente dans la pupille de l'objectif.

Si maintenant nous considérons la fig. 63, on voit une frustule d'une autre diatomée, le *Triceratium favus*, agrandi environ 340 fois, qui a encore une structure à base hexagonale, mais avec un pas très supérieur. On peut identifier encore trois directions selon lesquelles se répètent périodiquement les éléments structuraux; l'image primaire aura encore une symétrie hexagonale mais le nombre des maxima visibles sera très supérieur, étant plus grand le pas des réseaux. On peut voir cela dans la fig. 64.

En substance, toute la radiation qui forme l'image primaire dans la pupille d'objectif est la

même que ensuite forme l'image intermédiaire de l'objet (l'image "secondaire" d'Abbe) étant donné qu'il n'y a pas des diaphragmes interposés entre les deux plans. Donc, aussi toute l'information qui concourt à former l'image intermédiaire se retrouve dans la pupille d'objectif; elle est simplement distribuée de manière différente. Et de l'observation de cette distribution on peut remonter à la structure de l'objet. Sur cette base on peut exécuter des analyses d'image et autres manipulations optiques ("analyse de Fourier" par ex.).

Il faut remarquer que l'image "primaire" d'Abbe a les caractéristiques d'un hologramme dont l'image intermédiaire peut représenter l'objet correspondant.

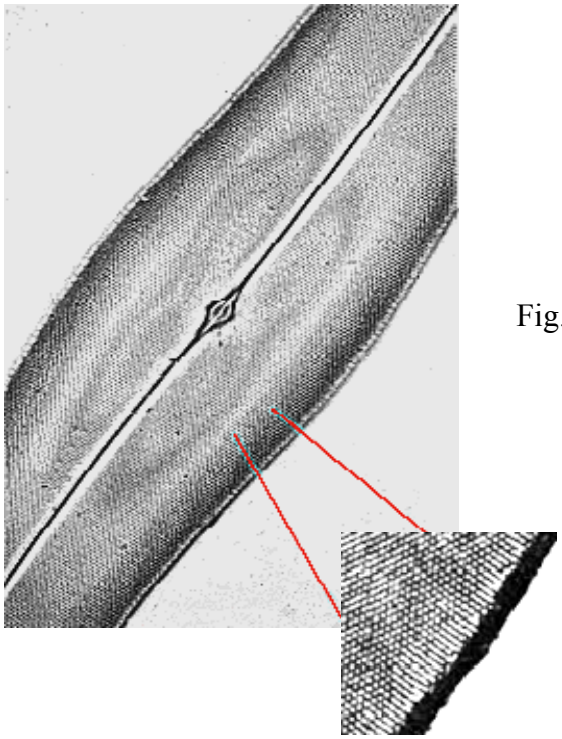
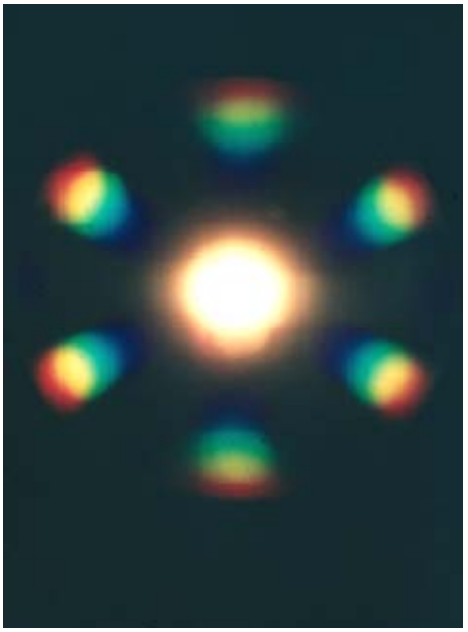


Fig. 61 et 62



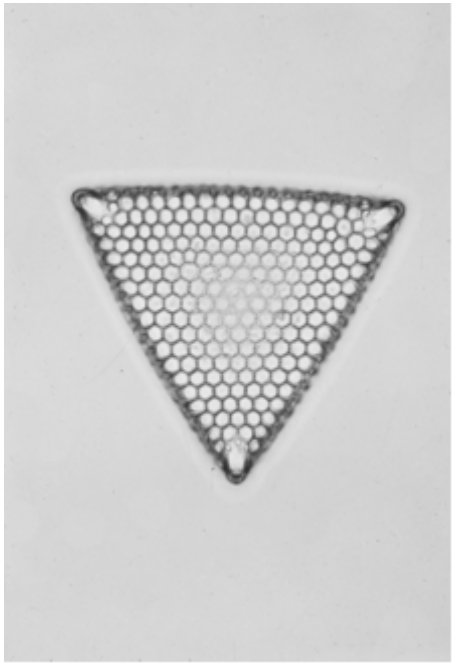
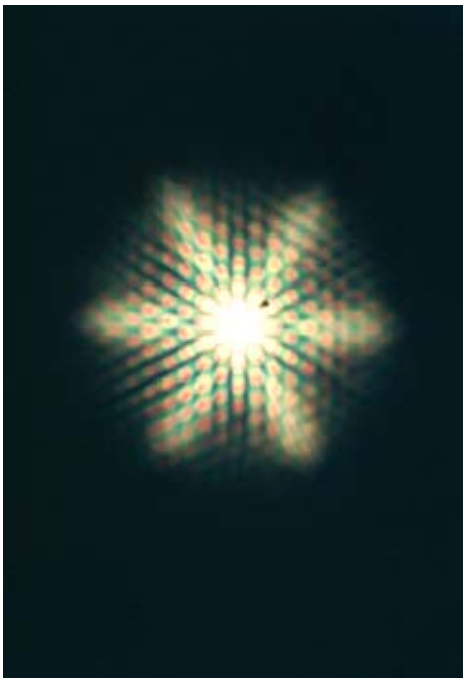


Fig. 63 et 64



18.9 - L'OUVERTURE du CONDENSATEUR et l'ÉCLAIRAGE OBLIQUE

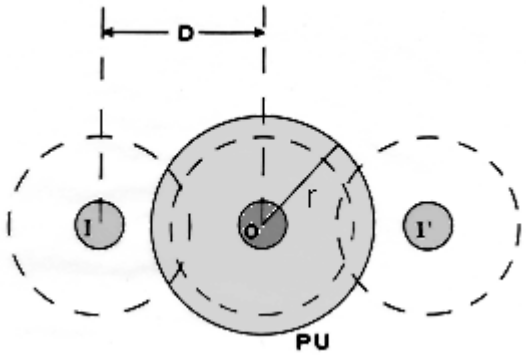
Jusqu'à présent, et en particulier avec la fig. 60, on a parlé de la diffraction opérée par les objets à structure périodique, assimilables à un réseau, en supposant que le faisceau qui éclaire tels objets soit perpendiculaire au plan objet et soit formé par des rayons parallèles (ouverture près de 0).

On a dit cependant (dans le § 18.5) que rien ne change quand le faisceau éclairant a une ouverture pas nulle: les maxima aussi auront cette ouverture et, au lieu d'être constitués par des rayons parallèles, ils seront formés par un faisceau divergent.

Pour mieux nous comprendre, nous observons la fig. 65: le grand cercle central à ligne entière (PU), de rayon **r** , représente le plan focal supérieur de l'objectif, vu par l'oculaire. Le rayon **r** exprime l'ouverture de l'objectif. Dans ce plan focal, comme on a expliqué dans le § 8.8 en commentant la fig. 32, apparait une image réelle du diaphragme d'ouverture. Le petit cercle indiqué avec O représente l'image d'un diaphragme très fermé et en même temps il représente la section du maximum 0, c'est-à-dire du faisceau direct qui a traversé un objet-réseau (voir les figg. 58, 59 et 60). À côté du maximum 0 on doit voir, symétriquement des deux côtés, les deux séries des maxima diffractés[76].

Dans la fig. 65 sont représentés seulement les deux maxima d'ordre I, mais on suppose que le réseau ait un si petit pas (ou que l'objectif ait une si basse ouverture) que les deux maxima I (les deux petits cercles marqués I et I') tombent au dehors de la pupille d'objectif. La distance entre les maxima I et le 0 (D dans la figure) est un peu inférieure à **2r**. En base à ce que nous avons dit, la structure du réseau qui a donné lieu aux phénomènes schématisés dans la fig. 65 est résolu avec de la difficulté par l'objectif. En effet, étant donné ce qu'on précisa au § 18.6 ("… on a résolution ... quand l'ouverture de l'objectif est égale à au moins la moitié de l'ouverture du maximum I …"), on voit dans la fig. 65 que la pupille d'objectif PU enlace une ouverture qui va un peu au-delà du premier minimum, c'est-à-dire un peu au-delà du point médian entre O et I.

Fig. 65



Mais maintenant nous voyons ce qu'il arrive en ouvrant le diaphragme d'ouverture; nous supposons de l'ouvrir pour autant que son image dans le plan focale supérieur de l'objectif (cercle centrale esquissée dans la fig. 65) devienne un peu plus petite du même plan focale PU. C'est celle-ci la régulation conseillée dans la plus grande partie des cas pour le diaphragme d'ouverture.

Eh bien, si on élargit l'ouverture du faisceau direct, on élargit aussi les faisceaux diffractés, dans notre cas les maxima I, et ceci est indiqué par les deux cercles esquissés latéraux, concentriques à I et I'. À ce point, les faisceaux diffractés d'ordre I envahissent partiellement la pupille d'objectif et la résolution ne peut par suite qu'améliorer. De ceci il dérive que, **du point de vue de la résolution, il convient ouvrir le plus possible le diaphragme d'ouverture du condensateur** de façon à augmenter la section des maxima diffractés et faire de façon qu'ils envahissent le plus possibles l'ouverture de l'objectif PU.

Nous verrons dans le prochain chapitre que ceci n'est pas dépourvu d'inconvénient.

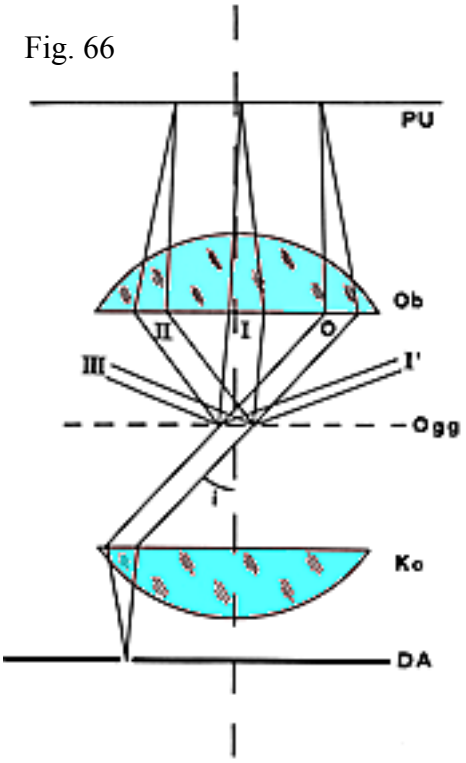
Pour le moment nous faisons remarquer que tous les discours qu'on a fait jusqu'à présent supposent que le diaphragme d'ouverture, et par suite le faisceau éclairant, soient centré; et en effet, dans la fig. 65, le petit cercle O est centré par rapport au grand cercle PU, et les maxima diffractés

[76] On suppose que l'objectif soit focalisé sur un réseau de pas convénient.

comme I et I' sont par suite de toute façon symétriques par rapport à PU.

Mais nous faisons un autre cas: le condensateur et l'objectif sont centrés par rapport à l'axe optique du microscope, mais le diaphragme d'ouverture est décentralisé. Pour obtenir ça ils existent, et ils étaient communs en passé, des condensateurs dans lesquels le diaphragme était monté sur une petite glissière avec crémaillère de façon à pouvoir être déplacé en direction radiale. En manque d'une telle glissière, on peut placer au dessous du condensateur, par ex. dans le porte-filtre, une carte avec un trou de quelque mm de diamètre, en la déplaçant le plus possible loin de l'axe (diaphragme tout ouvert).

Fig. 66



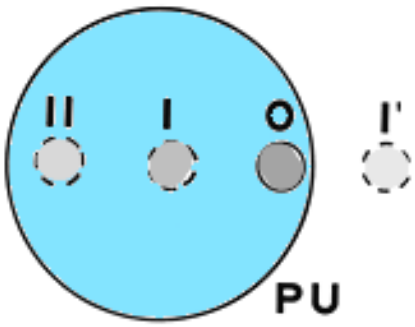
La fig. 66 montre schématiquement la section d'un groupe condensateur-objectif, éclairé par un faisceau oblique au moyen d'un diaphragme excentrique (supposé pour simplicité très fermé: DA). Le faisceau oblique produit un maximum 0, lui aussi oblique, qui converge dans le plan PU (plan focale supérieur de l'objectif, conjugué avec le plan du diaphragme), et forme ainsi une image excentrique du diaphragme; dans la fig. 67 la section du maximum 0 est indiqué avec O; dans cette figure la pupille de l'objectif (PU) est schématisée comme elle apparaît du point de vue de l'oculaire; la fig. 67 montre dans la pupille de l'objectif ce que dans la fig. 66 apparaît en section.

Eh bien, symétriquement aux côtés du maximum 0, se forment les maxima diffractés. Étant donné que O est déjà à la marge de la pupille vers la droite, de ce côté on aura une série de maxima (seulement le premier est indiqué avec I') qui tombent au dehors de PU; mais il y a à gauche l'entier diamètre de la pupille à disposition des faisceaux diffractés (pas seulement le faisceau I comme dans la fig. 65).

Dans la fig. 66 et 67 sont représentés le premier (I) et le deuxième (II); le troisième tombe au dehors de l'objectif.

Donc l'éclairage oblique élimine toute la radiation diffractée d'un côté du maximum 0, mais il l'accueille avec une ouverture double (de celle de l'objectif) de l'autre côté. Si le maximum 0 est tangent au bord de la pupille, on peut dire que l'ouverture utile de l'objectif est doublée. Inconvénient: la radiation diffractée accueilli par l'objectif se trouve toute d'un côté du maximum 0; sans entrer dans les détails, il est intuitif que dans la formation de l'image intermédiaire on aura des asymétries:

Fig. 67



si une structure de l'objet est allongée plus ou moins perpendiculairement à la direction d'excentricité du diaphragme, c'est-à-dire à la direction II - I - 0 de la fig. 67, on aura un contraste différent des deux côtés de la structure, plus clair d'un côté, plus sombre de l'autre, de façon à simuler un grisé.

Si la structure de l'objet est allongée par contre en direction parallèle à l'excentricité du diaphragme, elle apparaîtra avec un contraste inférieur.

En concluant, l'**éclairage oblique** produit (à égalité de toute autre condition) la plus grande résolution et un contraste plus marqué que l'éclairage normal, avec diaphragme centré. L'amélioration du contraste est plutôt la raison principale pour laquelle l'**éclairage oblique** a toujours été conseillé, spécialement quand les techniques de contraste modernes comme le contraste de phase et le

contraste interférentiel n'existaient pas encore. Il est en effet réalisable avec des moyens techniques très simples.

D'autre part il a été très contesté justement pour le fait de fournir un contraste pas homogène, directionnel, lié à une direction préférentielle.

18.10 - L'OUVERTURE et le CONTRASTE – Le CHAMP NOIR

On a expliqué dans le chapitre précédent que l'élargissement du diaphragme d'ouverture porte à un élargissement des faisceaux diffractés et il facilite par suite leur acceptation de la part de l'objectif et il en améliore la résolution[77].

En pratique, donc, pour calculer la résolution d'un objet assimilable à un réseau, il ne vaut plus la (54) (voir le § 18.6):

$$d = 0{,}5\ \lambda / NA \tag{54}$$

mais il faut introduire dans la formule aussi la valeur de l'ouverture du condensateur (NA_k) au-delà de l'ouverture de l'objectif, que maintenant nous indiquerons avec NA_o.

Un calcul exact n'est pas facile, mais en pratique on peut se limiter à cette formule:

$$d = 0{,}5\ \lambda / [(NA_k + NA_o) / 2] = \lambda / (NA_k + NA_o) \tag{55}$$

Dans la (55), on considère la moyenne arithmétique des deux valeurs d'ouverture; elle est raisonnablement valide quand ces valeurs ne sont pas trop différentes. En effet, le problème de la résolution se superpose à ce point avec celui du contraste.

Maintenant nous devons abandonner les cas théoriques simplifiés (star test, réseaux) et nous considérons un objet réel formé par un grand nombre de structures de toutes les dimensions et de toutes les formes possibles, avec une disposition réciproque très variable. Un tel objet produira un faisceau diffracté très complexe et, si les dimensions de ses structures fines sont assez différentes, dans ce faisceau diffracté il ne sera plus possible de distinguer maximum ou minimum, mais nous pouvons parler de la radiation diffractée dans tout l'espace au-dessus de l'objet. Dans ces conditions, on peut dire que l'objectif, indépendamment de l'ouverture NA_k du condensateur, reçoit toute la radiation diffractée qui lui est possible: en autres mots, sa pupille de sortie en est totalement remplie.

À ce point, en réfléchissant sur la fig. 65, on doit imaginer une pupille d'objectif (PU) dans laquelle ne se distinguent plus les faisceaux diffractés, mais on a un recouvrement d'un grand nombre d'eux; au centre de PU on aura par contre, de toute façon, le faisceau direct (O).

Et maintenant nous pouvons reprendre les considérations du § 18.6 sur le sens informatif de la diffraction: les renseignements sur la structure de l'objet viennent de la radiation diffractée par lui même; le faisceau direct par contre produit seulement un fond homogène.

Maintenant, si l'objet a une structure hétérogène et la radiation diffractée remplit toute la pupille de l'objectif, le rapport entre la radiation diffractée (qui crée les structures dans l'image) et le faisceau direct (qui crée une image sans contrastes) augmente d'autant plus qu'on réduit l'ouverture du maximum 0, c'es-a-dire du condensateur.

En simplifiant, on peut conclure que **le contraste améliore en fermant le diaphragme d'ouverture, même seulement parce qu'il augmente le rapport entre la radiation diffractée et celle directe**.

En réalité, on a vu au § 17.1 (en particulier, les §§ 17.1.2 et 17.1.3) que la fermeture du diaphragme d'ouverture provoque une augmentation du contraste pour des motifs différents liés à l'optique géométrique et à la "lumière diffuse". Maintenant nous savons qu'aussi la diffraction

[77] Quand on considère des objets lumineux ponctuels, assimilables au star test, l'ouverture du condensateur a une importance presque exclusivement photométrique; mais pour des structures allongées il faut considérer aux buts de la résolution les faisceaux diffractés et leur ouverture, liée à l'ouverture utile du condensateur.

rentre dans ce rapport entre ouverture du condensateur et contraste.

Ainsi: en fermant le diaphragme d'ouverture, on diminue la luminosité de l'image et la résolution, pendant qu'augmente la pénétration et le contraste; en l'ouvrant, on a exactement les effets contraires.

Pour finir, nous faisons une autre hypothèse sur la situation de la fig. 66: l'ouverture maximum du condensateur (NA_k) soit plus grande que celle de l'objectif (NA_o); le diaphragme d'ouverture soit très excentrique et très fermé; le maximum 0 (O) soit tellement incliné à échapper à l'objectif; dans la pupille de celui-ci alors on verra seulement les maxima diffractés. Le fond de l'image apparaîtra sombre, justement parce que manque le faisceau direct, et l'objet apparaîtra clair sur ce champ noir: l'image de l'objet sera produite seulement par la radiation diffractée. En base aux raisonnements faits plus haut, le rapport entre la radiation diffractée et celle directe tend à l'infini (puisqu'il manque le faisceau direct) et le contraste devra être maximum. Et en effet il ne peut pas y avoir un contraste plus grand de celui quand le fond est sombre. En pratique, il y aura toujours une perte de contraste à cause de la radiation diffuse et le fond de l'image ne sera jamais noir; mais cette technique est de toute façon la technique d'observation qui produit les contrastes les plus forts.

À côté de l'éclairage oblique, sur décrite, ce "**fond noir**" ou "**champ noir**" est une des techniques de contraste plus faciles à réaliser. Il est suffisant de disposer d'un condensateur avec une ouverture plus grande de celle de l'objectif et d'un diaphragme decentrable. En particulier, cette technique s'appelle "**fond noir unilatéral**".

On peut avoir cependant même le "**fond noir omnilatéral**"; en effet, pour éviter l'effet directionnel du contraste lié à l'éclairage oblique, on peut éclairer l'objet de tous les côtés en remplaçant le petit trou excentrique discuté jusqu'à présent avec un diaphragme annulaire centré. Le faisceau éclairant aura ainsi la forme d'un cône creux. C'est la forme la plus utilisée de fond noir, et elle fournit une image plus lumineuse étant donné que le faisceau éclairant a une grande section. Pour les forts agrandissements, ils existent des condensateurs à fond noir spéciaux, à miroirs, aussi pour les objectifs à immersion. Voir à ce propos le § 21.8 (fig. 90) et le § 30.2.

18.11 – La MESURE de l'ouverture et de la RÉSOLUTION

On a vu depuis le début que la performance essentielle du microscope est la résolution (pas l'agrandissement) et maintenant nous sommes en mesure de comprendre que le facteur essentiel pour la déterminer est l'ouverture de l'objectif et du condensateur.

Une manière directe, optique-géométrique, de mesurer l'ouverture a été mentionné dans le § 5.2.9, à propos des apertomètres. Mais maintenant nous pouvons penser à une mesure indirecte, basée sur la formule (54); il s'agit de mesurer le plus petit pas résolu d'un réseau (**d**) et de celui-là remonter à NA. Il faudra éliminer avec soin toutes les causes de perte de résolution (défocalisation, lumière diffuse, saleté sur les lentilles, etc.), optimiser le système éclairant, utiliser un fort oculaire pour éliminer l'influence des éventuels défauts visuels de l'observateur, etc.

Mais la difficulté la plus grande consiste dans la nécessité de trouver un objet-test. En principe, il faudrait disposer d'un réseau de pas variable, d'environ 10 μ jusqu'à 0,2 μ (le meilleur pouvoir résolutif des objectifs à immersion). Pour réaliser tels réseaux avec des moyens optiques il faudrait disposer de systèmes avec résolution supérieure à celle d'un objectif à immersion, mais ceci n'est pas possible pour les raisons théoriques dites à son temps, à moins d'utiliser des systèmes spéciaux. On été produits jadis des réseaux très fins avec des moyens mécaniques comme les célèbres "plaques de Nobert"[78], mais elles ne sont plus en commerce.

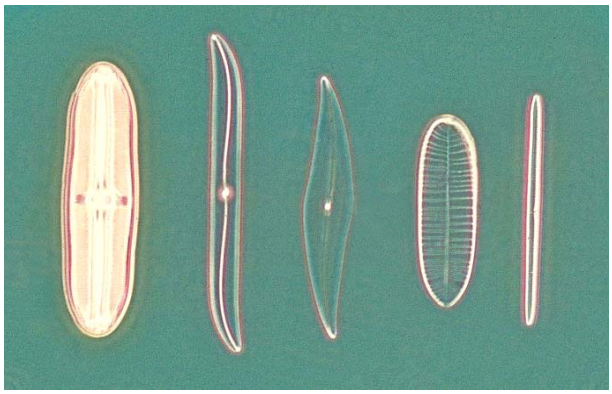
Il ne reste que recourir aux réseaux naturels. Nous citons les petites écailles qui recouvrent l'exosquelette de beaucoup d'insectes (moustiques, "poissons d'argent" ou lépisme, papillons,

[78] F. Adolf NOBERT, tecnicien allemand (1806 - 1881).

etc.). Les plus utilisées sont les écailles des ailes du papillon *Pyrameis (Vanessa) atalanta* Fab, avec des rayures longitudinales de pas 2 μ, rayures transversales de pas 1 μ et ponctuations très fines ("perles") de pas 0,5 μ ou moins.

Plus utilisé, même si pas aisément trouvables, sont les préparations-test contenants des frustules de Diatomées (voir le § 18.8, les figures 61 et 63 et la figure à côté) disposés en petites séries, avec un pas de plus en plus petit.

Dans le tableau qui suit sont indiqués le pas (et la valeur équivalente exprimée en lignes pour mm) et la plus petite ouverture qu'il faut pour résoudre la structure d'une série de frustules de différentes espèces.



(Frustules de Diatomées avec raies de pas de plus en plus petit – Contraste de phase Varicolor selon Locquin)

On peut voir qu'avec 5 - 10 frustules choisies opportunément parmi les espèces recensées il est possible de couvrir toute la gamme des communs objectifs de microscope. On dispose, au moins idéalement, les frustules en ordre décroissant de pas; on cherche ceux avec le pas le plus fin qui peut être résolu avec un objectif donné. Du pas de la frustule, au moyen du tableau, on remonte au pouvoir résolutif de l'objectif même et de celui-ci, avec précaution, à son ouverture. Les précautions se réfèrent à tous les facteurs qui peuvent baisser la résolution sans évidemment altérer l'ouverture qui est une donnée constructive de l'objectif. Très important pour déterminer la résolution est en effet le contraste qui est en général très bas dans le cas des frustules des Diatomées, qui sont constitués par de la silice transparente. Pour augmenter le contraste, on «monte» en général les frustules, c'est-à-dire on les conserve entre porte-objet et lamelle après les avoir plongés dans un liquide transparent qui, avec le temps, peut durcir et qui n'a pas le même index de la frustule. Si la silice des frustules a en moyenne un index de 1,434 , on obtient un préparation permanente avec bon contraste en utilisant comme **milieu de montage** celui d'index au moins 1,6 (Hyrax, n = 1,650; Aroclor 5442, n = 1,662; Naphrax, n = 1,700; Realgar, n = 2,400). Il est possible aussi de «monter» dans l'eau ou l'air, qui ont un index plus petit de 1,434.

Avec ces méthodes et d'autres analogues on peut donc mesurer la résolution d'un système condensateur-objectif-oculaire.

Mais nous avons jusqu'à présent traité toujours, sans le dire ouvertement, de la résolution dans le plan de l'objet. Parfois il peut être par contre utile de connaître la résolution dans le plan de l'image. Le cas le plus commun dans lequel se présente cette nécessité est quand l'image finale est réelle et elle doit être projetée sur une surface sensible comme un capteur de la télévision ou une émulsion photographique. Ces systèmes sensibles, pour leurs caractéristiques constructives, possèdent une propre résolution, définie comme le plus petit pas de l'image d'un réseau, image qui puisse venir enregistrée avec ces capteurs. Normalement, au lieu du pas **d**, exprimé en mm, on utilise la grandeur "fréquence spatiale" exprimée en" **lignes par mm**" (l/mm), déjà citée, qui est l'inverse de **d**, et exprime le plus grand nombre de lignes du réseau qui puisse venir enregistré sur un mm de la surface sensible[79].

De plus, en connaissant les dimensions de la surface sensible, exprimées en mm, et en multipliant par la résolution, en l/mm, on obtient le numéro total maximum de lignes enregistrables sur ce particulier capteur. Cette valeur peut être utile dans les systèmes de télévision, où souvent le constructeur déclare justement le nombre total de "lignes".

Eh bien, de la résolution **d** exprimée en mm on peut calculer la résolution en lignes/mm (l/mm) ou en "**lignes totales**". Mais comme on calcule **d** du côté de l'image ?

Il est suffisant de penser que le plan de l'image (dans ce cas l'image finale) et le plan de l'objet sont conjugués; en conséquence tous les phénomènes et les idées décrites à propos du plan ob-

[79] On veut parler d'un mm linéaire en direction perpendiculaire aux lignes du réseau et perpendiculaire à l'axe optique du système.

jet (cercle de confusion, centrique, résolution, etc.) peuvent être transférées d'un plan à l'autre, en tenant compte de l'agrandissement. Ainsi la valeur **d** que nous avons appris à calculer et mesurer sur le plan objet peut être transféré au plan de l'image finale, réelle, en le multipliant par l'agrandissement (linéaire, transversale) total du microscope (M_M).

Quant à M_M, on en a parlé dans le § 12.7.

Dans tout ce qu'on a dit jusqu'à présent, on a fait référence à la résolution de réseaux ou d'objets à structures allongées. Pour les objets ponctuels, on a vu qu'il y a quelque différence (le facteur 0,5 de la (54) devient 0,61 dans la (52)), mais cela ne change pas beaucoup. Il doit être précisé par contre que, dans le cas du microscope, en étant en général l'objet et l'image à des petites distances et sur plans accessibles, il convient exprimer la résolution en longueurs absolues, référées au plan objet ou image, comme nous avons fait jusqu'à présent. La valeur de **d**, qu'on l'exprime en mm ou en **μ**, représente une distance, une longueur, comme aussi **r** dans la (52).

Dans d'autres instruments, destinés à observer des objets éloignés (jumelles, télescopes), étant donnée l'inaccessibilité du plan objet, il n'a plus sens parler de longueurs dans ce plan; on peut seulement se référer à l'angle sous lequel apparaît une certaine longueur existante dans le plan objet. Le pouvoir résolutif d'une longue-vue ou d'un télescope alors n'est plus linéaire mais angulaire: il exprime le plus petit angle au dessous duquel se trouvent deux-points dans l'objet quand ils peuvent apparaître encore à peine distingués par un observateur qui regarde à travers l'instrument.

En passant, la formule qui permet de calculer le pouvoir résolutif angulaire d'une longue-vue est:

$$\text{sen } \varepsilon = 1{,}2\ \lambda / d \qquad (56)$$

dans laquelle **d** est le diamètre utile de l'objectif (**λ** et **d** exprimés en mm).

Si on se rappelle de la (22): $f_{\#} = f / d$

et de la (24): $NA = 1 / 2\ f_{\#}$

c'est-à-dire: $f_{\#} = 1 / 2\ NA$

avec quelques transformations, la (56) devient identique à la (52), et cela est significatif.

Avec quelque arrondissement et quelque simplification, la (56) peut être exprimée directement comme angle de résolution en fonction du seul diamètre de l'objectif:

$$\boldsymbol{\varepsilon = 150 / d}$$

(**d** toujours exprimée en mm, **ε** en secondes d'arc) et celui-ci est la "limite de Dawes".

TABLEAU IV

Espèces de diatomées les frustules desquelles peuvent servir de réseau pour le contrôle du pouvoir résolutif et de l'ouverture. Les valeurs d'ouverture sont calculées pour λ = 500 nm et conditions d'observation optimisées. Beaucoup de valeurs sont arrondies.

NOM	Pas équivalent (μ)	Lignes par mm (l/mm)	Ouverture minimum demandée pour la résolution
Triceratium favus Ehrbg .	5 - 6	180	0,06
Navicula dactylus (rayures transversales)	2,2	450	0,15
Pinnularia nobilis	1,90	520	0,20
Pinnularia opulenta Hust	1,5	660	0,23
Pinnularia viridis	1,33	750	0,25
Nitzschia brebissoni	1,00	1000	0,35
Synedra pulchella	0,83	1200	0,4
Stauroneis phoenicenteron	0,7	1400	0,45
Navicula lyra Ehrbg. (perles)	0,7	1400	0,45
" " " (rayures)	1	1000	0,35
Gyrosigma (Pleurosigma) balticum Ehrbg	0,7	1400	0,45
Nitzschia ungarica	0,62	1600	0,55
Pleurosigma attenuatum	0,62	1600	0,55
Grammatophora marina	0,62	1600	0,55
Nitzschia amphioxys	0,55	1800	0,6
Grammatophora serpentina	0,55	1800	0,6
Pleurosigma angulatum W.Sm.	0,51-0,6	1960-1660	0,65-0,6
Nitzschia sigma	0,50	2000	0,65
Grammatophora oceanica	0,46	2200	0,70
Nitzschia paradoxa	0,46	2200	0,70
Surirella gemma Ehrbg.	0,41-0,44	2350	0,9
Grammatophora macilenta	0,38	2600	0,95
Nitzschia sigmoidea	0,38	2600	0,95
Nitzschia obtusa Sm.	0,36	2800	1,0
Nitzschia linearis	0,33	3000	1,1
Navicula rhomboides	0,33	3000	1,1
Nitzschia vermicularis	0,31	3200	1,2
Nitzschia tenuis	0,31	3200	1,2
Nitzschia palea	0,29	3450	1,25
Nitzschia curvula	0,28	3570	1,3
Grammatophora subtilissima	0,26	3800	1,35
Amphipleura pellucida	0,24-0,25	4000	1,4

(De: Langeron, Van Heurck, etc.)

18.12 – Le GROSSISSEMENT "UTILE"

Maintenant nous considérons l'œil humain. Son pouvoir résolutif angulaire, pour l'œil sain en conditions optimales, est d'environ une minute première (1'), le soixantième du degré; le sinus de cet angle est 0,00029; si nous considérons la distance conventionnelle habituelle d'observation (250 mm, égal à 250.000 μ), à cette distance un angle de 1' correspond à une longueur d'environ 73 μ, égale à 14 lignes/mm dans le plan objet.

Pour tenir compte de quelque défaut éventuel de l'œil, nous considérons une plus grande limite, comprise entre 100 et 200 μ. Maintenant nous comparons ce pouvoir résolutif linéaire conventionnel de l'œil avec celui du microscope, toujours par rapport au plan objet, à la distance conventionnelle de 250 mm. Nous supposons alors que l'image finale du microscope soit virtuelle, à 250 mm de l'œil de l'observateur.

Nous pouvons à ce but rappeler la formule:

$$r = 0{,}61\ \lambda / NA \qquad (52)$$

et adopter pour λ la valeur moyenne du spectre optique (0,55 μ); si on exprime donc la plus petite distance résolue **r** en μ, on aura:

$$r = 0{,}61 \cdot 0{,}55 / NA = 0{,}34 / NA \text{ (valeur arrondie)} \qquad (52bis)$$

Maintenant nous avons les éléments pour évaluer lequel est le **grossissement "utile"** (Vu) du microscope. Nous entendons avec ce terme le grossissement qui permet d'exploiter pleinement le pouvoir résolutif de l'instrument, c'est-à-dire les contenus d'information, les détails, présents dans l'image, sans cependant excéder pour ne pas empirer la définition de l'image. En autres mots, un grossissement inférieur à celui "utile" produirait une image contenant des détails trop fins, que l'œil ne pourrait pas cueillir; le pouvoir résolutif du microscope résulterait excessif par rapport à celui de l'œil. Un grossissement supérieur est par contre inutile ("grossissement vide", "empty magnification" pour les auteurs anglais) en tant que l'œil "moyen" a déjà saisi tous les détails présents dans l'image et une augmentation du grossissement n'en fait pas paraître des nouveaux. C'est comme trop agrandir un négatif photographique: le seul résultat est de perdre de la définition et l'image apparaît "pas bien nette".

Pour calculer le grossissement utile il est suffisant de faire le rapport entre le pouvoir résolutif conventionnel de l'œil (de 100 à 200 μ à 250 mm de distance) et celui du microscope (0,34μ / NA); on en tire les valeurs suivantes: de 100 NA/0,34 à 200 NA/0,34, c'est-à-dire de 294 NA à 588 NA.

En pratique, on élargit encore la marge de sûreté et on considère le grossissement utile (Vu) compris entre ces extrêmes:

$$500\ NA < Vu < 1000\ NA \qquad (57)$$

C'est clair que nous parlons du grossissement visuel total (image virtuelle) du microscope.

Maintenant nous calculons les limites de **Vu** pour quatre objectifs usuels, en appliquant la (57):

$$4 / 0{,}10 : 50 < Vu < 100$$
$$10 / 0{,}25 : 125 < Vu < 250$$
$$40 / 0{,}65 : 325 < Vu < 650$$
$$100 / 1{,}25 : 625 < Vu < 1250$$

Voilà entre temps clarifié que le plus grand grossissement utile total du microscope est: V = 1250 ×, qu'on peut augmenter à la limite à 1450 × avec les objectifs apochromatiques avec NA = 1,45. Un grossissement plus grand peut rendre certains détails plus visibles à un œil du visus modeste, mais il n'ajoute pas de résolution. Il faut donc se méfier du sérieux des constructeurs qui of-

frent des grossissements supérieurs.

Maintenant nous considérons quel est le grossissement d'oculaire qui permet de ne pas dépasser les limites de Vu. Nous avons pour V_{ok} (grossissement visuel de l'oculaire):

$$V_{ok} = Vu / M_{ob} \tag{58}$$

dans laquelle M_{ob} est l'agrandissement, linéaire, de l'objectif.

Pour les quatre cas cités auparavant nous avons, étant donné les valeurs maxima pour Vu:

Obj. 4/0,10 : $V_{ok} = 100/4 = 25$ ×
Obj. 10/0,25 : $V_{ok} = 250/10 = 25$ ×
Obj. 40/0,65 : $V_{ok} = 650/40 = 16$ ×
Obj. 100/1,25 : $V_{ok} = 1250/100 = 12,5$ ×

Comme on le voit, les objectifs les plus faibles peuvent tolérer un oculaire plus fort étant donné qu'ils possèdent une "marge" de résolution, au sens que leur rapport ouverture/grandissement est plus fort. Tous les micrographes experts savent que les objectifs faibles donnent une image "plus nette" et ils sont donc à préférer aux forts objectifs à ce point de vue.

On voit aussi que les oculaires pour les forts objectifs ne doivent pas dépasser la valeur de V_{ok} = 12 - 13 ×, saufs cas spéciaux, et il est sous-entendu que dans le calcul du grossissement utile de l'oculaire doit être incluse l'influence des systèmes intermédiaires éventuels doués d'un "**facteur de tube**" (f_t) différent de 1 (voir le § 12.7.3).

Maintenant nous considérons le cas de la photographie. Le récepteur est ici une émulsion photographique la résolution de laquelle, pour les types commerciaux, peut aller de 30 à 100 lignes/mm (plus élevée pour les pellicules en blanc et noir et pour celles «dures»). Nous considérons indicativement une valeur moyenne de 50 l/mm pour laquelle: d = 1 mm / 50 = 1000 μ / 50 = 20 μ. Nous calculons maintenant le rapport habituel entre la résolution du récepteur (20μ) et celle du microscope que nous avons déjà dérivé de la (52) et qui résulte égale à 0,34μ/NA. Nous aurons pour l'agrandissement utile en photographie: M_f = 20 NA / 0,34 = 59 NA. Il convient ici aussi de tenir un facteur de marge d'au moins 2 ×, pour lequel on arrive à la:

$$100 \text{ NA} < M_f < 500 \text{ NA} \tag{59}$$

et il est sûr qu'aucun détail de l'image ne résultera pas submergé par le grain ou d'autres limitations de la pellicule.

Comme on voit, en photographie l'agrandissement total doit être beaucoup inférieur à celui qu'on utilise dans l'observation; ceci signifie qu'il devra être plus faible. En appliquant encore la (58) on a pour la photographie et pour les quatre objectifs type cité auparavant, toujours en tenant compte de la valeur maximum de M_f:

Obb. 4/0,10	: M_{ok} = 50/4 = 12,5: 1	(500 NA = 50)
Obb. 10/0,25	: M_{ok} = 125/10 = 12,5: 1	(500 NA = 125)
Obb. 40/0,65	: M_{ok} = 325/40 = 8 : 1	(500 NA = 325)
Obb. 100/1,25	: M_{ok} = 625/100 = 6,2 : 1	(500 NA = 625)

On voir que l'agrandissement utile maximum de l'oculaire (y compris un éventuel "facteur de chambre" ou un facteur de tube différent de 1) est en photographie environ la moitié de celui utilisable dans l'observation visuelle. En chaque cas, il convient de donner à M_{ok} et à M_f la plus petite valeur possible, non seulement pour les problèmes de définition, mais aussi pour rendre moins visibles dans la photographie les effets des vibrations inévitables, qui sont agrandies au même temps de l'objet et produisent un effet de "bougé". On doit tenir présent cet effet quand on prépare un système photomicrographique, étant donné que les constructeurs offrent normalement pour la photographie des oculaires (ou les correspondants "projectifs") d'agrandissement excessif; cet excès de M_{ok} porte au résultat que sur le format photographique résulte utilisée seulement une petite partie de l'image intermédiaire.

En faisant ces considérations il faut cependant rappeler tout ce qu'on a expliqué dans le § 12.6 à propos de la formation d'une image finale réelle à distance finie, comme il arrive en photographie: de la (14) on peut calculer le grossissement linéaire de l'oculaire M_{ok}:

$$M_{ok} = x' / f \tag{14}$$

Pour commodité, étant plus aisément connu le grossissement visuel $V_{ok} = 250/f_{ok}$ (voir la (21)), on substitue f_{ok} avec V_{ok}; on peut transformer ainsi la (21):

$$f_{ok} = 250 / V_{ok} \tag{60}$$

et la (14):

$$M_{ok} = x' \, V_{ok} / 250 \quad \text{ou bien} \quad M_{ok} = V_{ok} \cdot x' / 250 \tag{61}$$

dans laquelle **x'** est le "tirage" de la microcaméra, c'est-à-dire la distance entre émulsion et foyer supérieur de l'oculaire.[80]

Eh bien, beaucoup de microcaméras commerciales, surtout pour le "petit format" ou "format Leica" (24 × 36 mm) présentent un tirage **x'** inférieur à 250 mm pour lequel $M_{ok} < V_{ok}$; l'agrandissement photographique (linéaire) est ainsi plus petit de celui visuel.

Souvent **x'** est égal à 125 mm pour lequel:

$$M_{ok} = V_{ok} \cdot 125/250 = V_{ok}/2$$

on dit ainsi que la microcaméra présente un "facteur de chambre égal à 0,5 ×". De cette façon, un oculaire avec $V_{ok} = 10$ × fournit un agrandissement linéaire $M_{ok} = 5{:}1$: ceci signifie que, sur l'émulsion, l'image intermédiaire résulte agrandie 5 fois.

En tout cas, chaque fois on calculera la diagonale du format photographique utilisé (environ 43 mm pour le format Leica) et on aura soin qu'elle soit inférieure, mais pas trop, au diamètre de l'image finale. Ce dernier sera donné par l'index de champ de l'oculaire (§ 7.1) multiplié pour M_{ok} (voir la (61)).

Nous voulons finalement affronter le problème du grossissement utile dans l'observation visuelle (Vu) du point de vue de la pupille de sortie de l'oculaire (P) et de son diamètre (Øp).

On a expliqué dans le § 9 que tel diamètre devrait être aux environs de 1 mm ou de peu inférieur. On a aussi proposée la (28) pour calculer Øp:

$$Øp = 500 \, NA / V_M \tag{28}$$

dans laquelle V_M est le grossissement visuel total du microscope. Si **Øp** doit être 1 mm environ, on peut calculer pour V_M une valeur "normale":

$$V_M = 500 \, NA / Øp = 500 \, NA / 1 = 500 \, NA \tag{62}$$

Comme on voit, cette valeur coïncide avec celle indiquée plus haut, dans la (57).

Tous les raisonnements faits sur les limites et sur les valeurs optimales de l'agrandissement sont, comme il est évident, seulement indicatifs. Ils tendent à donner la possibilité à l'œil "normal" ou à une émulsion photographique d'exploiter au mieux le contenu, les détails, de l'image finale. Mais en chaque cas spécial entrent en jeu des facteurs difficilement quantifiables et prévisibles: le "visus" de l'observateur, le contraste, les caractéristiques de l'émulsion ou de la surface sensible, la nature des détails qui plus intéressent à ce moment-là, etc.

[80] Ce point est aisement identifiable, comme on a déjà dit, car il est très proche du "disque de Ramsden" (voir le § 4.4).

19 – Les OBJECTIFS pour MICROSCOPE

Il résulte de tout ce qu'on a dit jusqu'à présent que les systèmes optiques essentiels du microscope composé sont l'objectif et l'oculaire.

L'objectif est si nommé étant donné que c'est le système qui plus s'adresse, qui est plus près, de l'objet. De plus, il fournit souvent la plus grande contribution au grossissement total de l'instrument. Il devrait résulter clair aussi que les phénomènes de diffraction, aberrations, radiation diffuse, etc., qui limitent la qualité de l'image finale, se vérifient en majorité dans la formation de l'image intermédiaire, c'est-à-dire dans l'objectif. En conséquence, l'objectif est la partie du microscope qui détermine la limite supérieure de la résolution, de la définition, du contraste, de la planéité de l'image.

Seulement en rares cas (voir plus loin, les oculaires "compensateurs","complanétiques", etc., certaines "lentilles du tube") les autres parties de l'instrument peuvent donner une contribution déterminante à la qualité de l'image ou même compenser plus ou moins certains résidus d'aberrations de l'objectif. *Mais en général tout le système optique du microscope doit permettre seulement la pleine manifestation des performances de l'objectif sans les empirer.*

19.1 – La MONTURE MÉCANIQUE

Comme tout le système optique du microscope, aussi l'objectif est constitué par des lentilles limitées par des surfaces sphériques ou planes, toutes centrées sur un axe optique commun.

Chaque lentille, qu'elle soit simple ou composée par deux ou trois éléments collés (doublet ou triplette), est montée dans un petit cylindre métallique dit **barillet** et sur le même elle est fixée avec des adhésifs (voir dans ce site l'article n 40) ou des moyens mécaniques. Les moyens mécaniques peuvent être réversibles (par ex. bagues filetées qu'on peut démonter), mais les lentilles de l'objectif sont le plus souvent bloquées par un **matage** du bord du barillet: le bord de la lentille est émoussé; le bord du barillet est laissé dépasser légèrement sur le bord de la lentille; après l'introduction de la lentille, cette partie proéminente vient comprimée et repliée de façon à s'appuyer sur le bord émoussé de la lentille même.

Le matage est une opération irréversible, au sens que, pour démonter la lentille, il faut détruire le bord rabattu du barillet. Le démontage de la lentille peut être demandé, par ex., en cas d'altération du ciment qui unit les doublets, de façon à pouvoir remplacer le ciment opacifié.

Les barillets de chaque lentille sont fixés entre eux dans l'ordre prévu.

Ils étaient anciennement visés directement l'un sur l'autre, mais tel système assure difficilement la précision nécessaire pour le centrage réciproque parmi les différentes lentilles (voir la figure à côté).

Fig. 67c - Les barillets B2 et BF sont visés tous les deux sur le barillet B1, lequel est visé sur la monture générale MG.

Depuis décennies il est devenu presque obligatoire de donner aux barillets une surface extérieure de forme cylindrique dont le diamètre est travaillé avec la précision d'un ou peu centièmes de mm (il fait exception le barillet de la lentille "flottante", dont on parle au § 13.2.4, qui a un diamètre plus petit de 0,1 - 0,3 mm par rapport à celui des autres barillets).

Tous les barillets sont logés dans une **monture générale** (voir la fig. 68) de forme cylindrique ou conique, qui a intérieurement une surface cylindrique (avec un diamètre d'une paire de centièmes de mm supérieur au diamètre extérieur des barillets des lentilles).

Fig. 68 – On voit la série des quatre barillets coniques serrés dans la monture générale par un anneau à vis (à droite).

On remarque le mince anneau transparent sur le troisième barillet, qui a le but de régler la distance entre deux barillet et avec ça corriger au mieux la sphérique.

Derrière, la boite métallique pour la conservation de l'objectif.

(Objectif à fluorine «Galileo» 8^{Fl} - 64×/0,82)

Telle monture générale peut représenter la charpente même de l'objectif au sens qu'elle contient les lentilles et porte le dispositif de fixation (filetage ou autre, qui la collègue au statif, voir plus loin) comme dans la fig. 68.

Ou bien la monture générale des barillets peut être un simple petit cylindre avec une mince paroi qui contient les lentilles, mais ne se fixe pas directement au statif (voir BG, à droite dans la fig. 69). Alors il s'agit d'un **barillet général** (BG) qui contient le système des lentilles (c'est-à-dire les différents barillets) mais qui doit être logé à son tour dans une vraie monture qui sera fixée au statif ou au revolver porte-objectifs (voir MG dans la fig. 69, à gauche).

Le paquet des lentilles, ou des différents barillets, est serré dans le barillet général, d'habitude au moyen d'une bague à vis interne (As dans la fig. 69), et il peut par suite venir désassemblé.

Le barillet général peut être fixé rigidement à son tour à la monture, avec un pas de vis ou autre. Plus souvent, le barillet général a une forme cylindrique et il coule à l'intérieur de la monture comme un piston dans le cylindre. Étant donné que la position axiale du paquet des lentilles, c'est-à-dire la distance entre lui et l'objet, doit être déterminée avec un erreur pas trop supérieure à la profondeur de foyer de l'objectif, donc même moins d'un centième de mm, le barillet général peut être poussé par un ressort (M dans la fig. 69) contre une saillie qui fasse de référence: le ressort pousse le barillet en direction de l'objet jusqu'à l'épaule qui est tirée par le bord inférieur de la monture (S dans la fig. 69); il peut y avoir aussi une fente dans laquelle coule une petite vis vissée sur le barillet même ou autre mécanisme.

L'épaule S même peut parfois être réglable en hauteur, c'est-à-dire permettre de changer la position axiale du paquet des lentilles, parce qu'elle est due à une bague ou un petit cylindre qui se vise plus haut ou plus en bas sur la monture. Telle bague permet ainsi de changer la "longueur mécanique" de l'objectif et de perfectionner le "parfocalité" (§ 19.1.2).

Fig. 69 - Fr, 2, 3, et 4 forment le paquet des lentilles, qui est glissé dans le barillet général (BG) et serré par la bague à vis As.

Le petit tube Ds guide le ressort M et lui sert d'épaule pour le pousser vers le bas.

Les petits trous dans les barillets 2, 3 et 4 (flèches rouges) servent au passage de l'air pendant l'assemblage des barillets.

Si le barillet général est poussé par le ressort vers l'objet jusqu'à toucher la battée, il peut aussi rentrer dans la monture s'il est poussé de la part de l'objet. Un contact entre objectif et objet provoque ainsi difficilement des dégâts, étant donné que le groupe des lentilles rentre pour beaucoup de millimètres avec le barillet général. Les objectifs ainsi protégés s'appellent "**à pompe**" ou "à ressort" ou "**à monture télescopique**" ou "à protection" ("spring loaded" en anglais)(fig. 70, à gauche normal, à droite comprimé); ils furent introduits par C. Zeiss en 1950.

En autres cas, le ressort est remplacé par un petit cylindre creux rigide; celui-ci est excellent pour bloquer le paquet des lentilles d'une manière stable, mais par suite il empêche sa rétraction et l'objectif n'est pas protégé des chocs avec la préparation.

Certains objectifs, surtout ceux à immersion, sont fournis d'un spécial mécanisme "rétracteur" ("retraction stopper"): un ressort permet de pousser en haut le barillet général mais de plus, à la fin de cette course, le barillet peut être tourné d'un petit angle et avec ceci rester bloqué en position rétractée. En tournant le barillet en sens opposé, il revient dans la position normale. Ceci est précieux quand on passe de l'immersion à un objectif à sec, étant donné qu'avec l'objectif à immersion rétracté on ne court pas le risque de répandre l'huile sur le reste de la préparation pendant la rotation du revolver.

Souvent, la monture de l'objectif porte directement les différentes notations qui indiquent les caractéristiques de l'objectif (voir le § 19.1.5); autres fois la monture est recouverte d'un mince cylindre métallique ou "**chemise**", fixé en général avec un filetage, qui porte les notations et il recouvre certaines structures internes de l'objectif (voir la figure à droite: on voit le ressort du mouvement «à pompe», le barillet général (à gauche), la monture générale (au centre) et la chemise (à droite)).

Il n'y a pas des règles générales sur la structure mécanique de l'objectif ou d'autres parties du microscope.

Fig. 69b – Objectif Apochromatique HI de Leitz.

La lentille la plus externe de l'objectif, celle tournée vers l'objet, s'appelle "**frontale**"; la plus lointaine de l'objet s'appelle "**émergente**".

La lentille émergente, surtout dans les forts objectifs de type classique, est en position baissée à l'intérieur de la monture et elle est difficilement visible de l'extérieur. Ceci en rend difficile le nettoyage. Dans autres cas, surtout dans les objectifs très faibles et en certains «plan», la lentille émergente peut dépasser le bord supérieur de la monture.

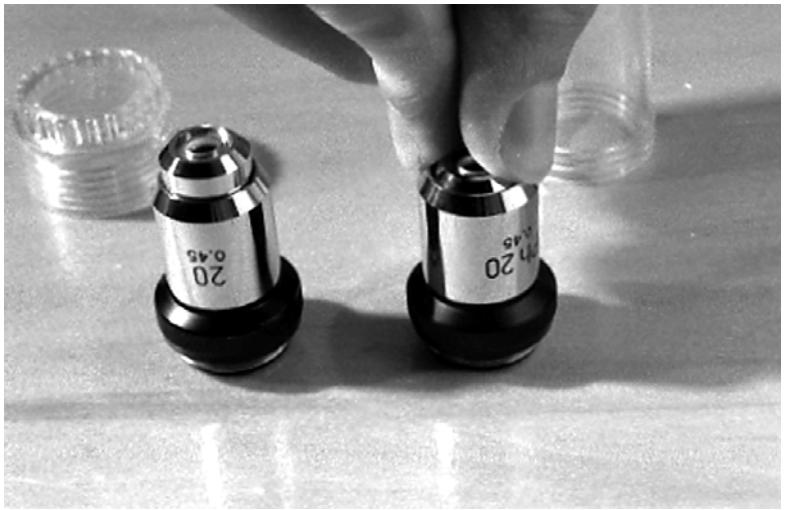


Fig. 70 – Exemple d'objectif «à pompe» avec un barillet général rétractable.

La lentille frontale, en certains objectifs très faibles de type classique, peut être très enfoncée dans la monture et par suite bien protégée des traces de doigts et de chocs avec l'objet; mais en général, surtout dans les «plan», elle se trouve très prés du bord de la monture du côté de l'objet. Ceci arrive parce que l'espace libre lentille-objet, dans ces cas, peut être très petit et on tâche de ne pas le diminuer ultérieurement par faute d'une saillie de la monture.

En général, la monture du côté objet est amincie, ou au moins rendu de forme conique pour faciliter l'accès et la visibilité de l'objet. En certains objectifs destinés à l'épiscopie (éclairage latéral d'objets opaques) la monture est tout à fait pointue pour faciliter l'éclairage d'un seul côté.

Malgré tout ca, il n'est pas conseillable en général que la surface extérieure de la lentille frontale représente la surface la plus proéminente de l'objectif côté objet pour éviter un écrasement possible de la lentille même sur l'objet pendant la mise au point. Dans la grande majorité des cas, en effet, la lentille frontale est entouré d'un bord métallique qui dépasse par rapport à la lentille de peu centièmes ou dixièmes de mm. Cette saillie, même si moindre, est suffisante à protéger la lentille frontale en cas de contact de l'objectif avec la préparation.

Dans les objectifs classiques, la surface extérieure de la lentille frontale est plane, et ceci en facilite le nettoyage. En rares cas (faibles objectifs, même plan) elle est convexe. Dans les objectifs plan à sec, moyens et forts, par contre, elle peut être concave, et le rayon de courbure de cette surface peut être même inférieur à 1 mm, avec le résultat qu'elle apparaît terminé par un minuscule puisard (§ 19.2.3.2). Dans cette petite évidure sphérique se cache aisément la poussière, nuisible au point de vue du contraste et nuisible quand on opère en radiation polarisée, étant donné qu'elle est constitué en général par des matériels biréfringents et elle réduit le degré d'extinction. Encore pire il arrive quand dans ce creux pénètre de l'huile d'immersion, baume du Canada ou autres fluides. Dans ces cas la formation de l'image est contrastée et il faut un nettoyage soigné, éventuellement au moyen de solvants comme le xylol.

Certains constructeurs évitent cet inconvénient en fixant la lentille frontale concave à une lame de verre plan-parallèle mince qui limite ainsi vers l'extérieur le paquet des lentilles. Entre cette lame et la surface extérieure concave de la lentille on crée une petite place pleine d'air.

Dans les objectifs à immersion la surface extérieure de la frontale est toujours plane: en conditions d'immersion homogène, c'est-à-dire d'égalité d'index, une surface concave ou convexe se conduirait comme une plane. En conséquence, si un objectif expose une lentille frontale avec la surface extérieure creuse, on peut être certains qu'il est «à sec».

19.1.1 – La fixation de l'objectif

L'objectif doit être fixé rigidement à la partie mécanique du microscope (dite "**statif**"), ou directement sur le bout inférieur du tube (modèles très simples, cas spéciaux), ou par un dispositif pour l'échange rapide, en général du type du "**revolver**" (disque tournant qui porte deux ou plus objectifs), ou à coulisse.

En chaque cas, les dispositifs de fixation de l'objectif au tube ou au revolver doivent assurer un positionnement rigide, répétable et rapide de l'objectif même – (le mot "répétabileté" n'est pas commun, il est utile dans notre cas pour exprimer la capacité d'un système mécanique-optique de retrouver les mêmes conditions de fonctionnement après une série de régulations réversibles).

La rigidité et la répétabileté dans la position de l'objectif doivent permettre seulement des déviations élastiques ou stables contenues à l'intérieur d'une petite fraction du rayon du champ objet de l'objectif le plus fort (quelques centièmes de mm), perpendiculairement à l'axe, ou à l'intérieur des limites de la pénétration (quelques millièmes), parallèlement à l'axe.

Ces dispositifs de fixation sont essentiellement de deux types:

□□ à coulisse: il s'agit de patins en "queue d'aronde" (assemblage trapézoïde) ou cunéiformes, qui permettent un répétabileté de positionnement élevée.

Les coulisseaux permettent la fixation d'un seul objectif à la fois et en quelque cas ils comprennent des vis de centrage.

Dans ce dernier cas, le centrage se fait sur un objectif donné et seulement sur celui là, et il ne doit pas être altéré par le démontage et le remontage du coulisseau.

La fixation à coulisse est utilisée quand le centrage est critique (certains microscopes polarisateurs) ou quand l'objectif a des dimensions plus grandes que l'habitude (quelques microscopes métallographiques avec des objectifs épiscopiques à fond noir).

Un objectif (1) entouré par le condensateur à fond noir pour l'épiscopie (2). Fixation à coulisse.

□□ à vis: il s'agit d'un filet de vis présent sur la partie basale de la monture, du côté de la lentille émergente, qui se vise sur un analogue filetage femelle, tiré dans les trous au bout inférieur du tube ou sur le revolver.

Les modèles des filetages des objectifs sont très changés historiquement, tant que, en 1858, la "Royal Microscopical Society" de Londres définit et put rendre très répandu le "**pas anglais**" ou "**pas RMS**"[81] ou "**Society screw**" ou "standard screw". Il s'agit d'un pas anglais avec diamètre 0,797" et 36 filets par pouce (environ 20,24 × 0,706 mm), encore bien diffus[82]. Pour des cas spéciaux, afin d'éviter l'échange d'objectifs de type différent, ont été utilisés des autres pas, comme le M 19 × 0,75 mm (Jena).

Les choses changent avec les objectifs "à **conjuguée infinie**". En effet ces derniers travaillent associé en général avec une lentille de tube de focale f = 250 mm ou un peu inférieure, et telle focale se conduit comme la deuxième conjuguée d'un système convergent: dans les objectifs à "conjuguée finie", par contre, la deuxième conjuguée est d'habitude autour de 160 mm. En rappelant que dans un objectif de microscope avec conjuguée finie la conjuguée image (**a'**), est très semblable au tirage (**x'**), et en rappelant la (14) (M = x'/f), il est clair que, à égalité d'agrandissement de l'objectif (**M**), avec une conjuguée et un tirage (**x'**) plus grands, même la focale (**f**) doit être plus grande. En autres mots, à égalité d'agrandissement, un objectif à conjuguée infinie a une focale de l'objectif supérieure au correspondant objectif à conjuguée finie. Le rapport entre les focales des deux types d'objectifs est souvent 250/160 = 1,56.

Tout de même, en rappelant la (22) (f#= f/d), il est clair que, à égalité d'ouverture (f#), une plus grande focale (**f**) implique un plus grand diamètre (**d**) des lentilles.

En concluant, à égalité d'agrandissement et d'ouverture, un objectif "à l'infini" a souvent un plus grand diamètre d'un objectif à conjuguée finie.

Donc, pour les séries modernes d'objectifs "à l'infini", ont été introduits des nouveaux pas de vis avec des diamètres supérieurs à 20 mm jusqu'à 30 mm. Le plus diffus c'est le pas M 25. Dans le cas d'objectifs épiscopiques à champ noir, on a de plus une structure plus complexe dans laquelle le système optique principal est entouré d'un condensateur annulaire. Ceci impose des filets de vis encore plus grands, comme M 27 (Lomo), M 30, etc. (la lettre M indique filets à mesures métriques).

19.1.2 – Longueur mécanique et parfocalité

La vis de fixation de l'objectif à peine décrite termine avec une surface annulaire (perpendiculaire à l'axe) qui fournit une référence rigide et précise pour la position axiale de l'objectif même. Telle surface est dite "**battée**" (fig. 71).

Quand on serre la vis de fixation (Filet, dans la figure), c'est-à-dire on tourne l'objectif en

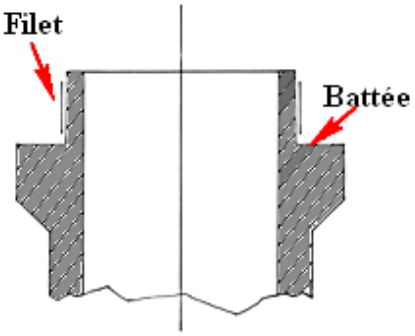
[81] RMS = Royal Microscopical Society.

[82] Plusieurs constructeurs ont récemment adopté un pas métrique trés proche du pas RMS: 20 × 0,7 mm.

sens horaire (vu par la lentille frontale), étant donné qu'il s'agit toujours d'une vis "droite", la battée va s'appuyer sur une battée correspondante tirée autour du trou destiné à accueillir l'objectif. Tel trou est tiré dans le bord inférieur du tube du microscope, dans les modèles les plus simples, ou dans la coulisse ou sur le "revolver".

Si la vis a un jeu suffisant, le contact entre les deux battées, celle de l'objectif et celle du trou, porte à une coïncidence de leurs plans et de ceci on obtient:

Fig. 71



1) l'axe de l'objectif (perpendiculaire à sa battée avec bonne tolérance) coïncide avec l'axe du microscope, supposé perpendiculaire à la battée du trou;

2) la position axiale de l'objectif est bien définie.

Si la battée des différents trous présents sur le revolver était toujours à la même hauteur, aussi la position axiale des différents objectifs serait la même et un échange des objectifs sur le revolver n'altérerait pas telle position axiale.

Nous supposons pour maintenant que ceci soit vrai.

Devant l'objectif se trouve l'objet que nous supposons comme d'habitude plan, dépourvu d'épaisseur et perpendiculaire à l'axe. Comme nous avons déjà dit, on recouvre souvent l'objet avec une "lamelle" (ou "lame couvre-objet", voir le § 13.2.3), qui est une lame de verre aux surfaces planes et parallèles, d'épaisseur modeste, d'habitude 0,17 mm.

Eh bien, supposé que le système des lentilles ait la position correcte à l'intérieur de la monture et que la focalisation soit parfaite, la distance axiale entre battée de l'objectif et plan-objet devient une caractéristique importante de l'objectif, et elle est appelée "**longueur mécanique de l'objectif**". Telle caractéristique est indiquée avec l'indicatif **Lo** et elle ne va pas confuse avec la "longueur mécanique du tube" qui est dénotée avec **Lm** et est décrite au § 10.

La **Lo** est importante étant donné qu'elle détermine la distance entre le plan objet et les plans principaux de l'objectif, c'est-à-dire sa conjuguée-objet et par suite la position de l'image (voir la formule (10)) et l'agrandissement (voir la (13)). En supposant que la structure de l'instrument établisse rigidement la distance entre l'image intermédiaire (et les lentilles de l'objectif) et la battée, il est évident que la **Lo** dépend des caractéristiques optiques et de la position des lentilles à l'intérieur de l'objectif.

Pour chaque objectif monté sur une statif donné, c'est-à-dire avec une position donnée de l'image intermédiaire, est fixée la longueur mécanique **Lo** de l'objectif, donc la position nominale de l'objet, c'est-à-dire la position de meilleure focalisation.

Cette longue introduction pour expliquer la notion de **parfocalité**.

Nous considérons le cas d'un statif sans revolver, avec fixation à vis pour les objectifs. Remplacer l'objectif signifie l'éloigner de l'objet, le dévisser, en visser un autre, le rapprocher de l'objet. Le meilleur foyer va ainsi perdu, il faut de toute façon focaliser à nouveau, et à ce point la valeur de **Lo** n'a pas beaucoup d'importance pour le praticien.

Par contre, dans le cas de fixation à coulisse de l'objectif (voir le § 19.1.1), il est possible parfois de remplacer l'objectif sans l'éloigner de l'objet. La même chose arrive avec les normaux revolvers. Dans ces conditions (la presque totalité des cas) c'est très agréable de retrouver la mise au point après la substitution de l'objectif. Cette caractéristique du microscope s'appelle "**parfocalité**" ou "**équilibrage**", et elle fut introduite par les usines C. Zeiss à Jena en 1911 d'après la suggestion d'A. Köhler.

Ses avantages sont:

□□ après l'échange de l'objectif, on ne doit pas répéter la mise au point; une retouche sera en général nécessaire, mais l'image de l'objet est encore perceptible après l'échange, soit-il défocalisée. Si la focalisation était complètement perdue, on perdrait non seulement du temps, mais en ab-

sence d'image reconnaissable on ne saurait pas de quel côté tourner le bouton, on agirait au hasard et on pourrait écraser l'objectif sur la préparation;

□□ on ne risque pas d'écraser un nouveau objectif contre la préparation à cause d'une différence de **Lo**: pendant la rotation du revolver, l'objectif exécute en général un mouvement incliné par rapport à la préparation (à cause de la forme recourbée du revolver), et on a l'effet multiplicateur du coin: un petit mouvement rotatoire du revolver produit une pression très supérieure sur la préparation, si elle est touché. Pour éviter ceci, il n'y a que donner à tous les objectifs la même longueur Lo, c'est-à-dire les rendre parfocales.

Étant donné que la parfocalité est si utile, tous les constructeurs sérieux l'offrent, même dans les modèles économiques. Pour obtenir ceci, le projeteur doit évidemment déterminer tous les caractéristiques géométriques de l'objectif, en particulier la Lo, avec des tolérances de peu supérieures à la profondeur de foyer des forts objectifs.

Les valeurs de la longueur mécanique de l'objectif ont été dans le passé très variable d'un constructeur à l'autre: de 25 à 40 mm, et aussi variables d'un objectif à l'autre du même constructeur. La valeur la plus fréquente était peut-être 37 mm ou 36,65, mais certains objectifs épiscopiques forts, au but de laisser plus de place à l'objet (échantillons de roches, essais métalliques, etc.) étaient raccourcis jusqu'à 10 mm.

Aujourd'hui on tend à une valeur standard, au niveau mondial, de 45 mm, aussi pour les objectifs "à l'infini" (voir le § 3.2), mais ils existent aussi des objectifs avec Lo = 60 mm (constructeurs japonais), ou Lo = 75 mm (objectifs catadioptriques {Jena}), 85 mm (épiscopiques {Mitutoyo}) et spéciaux. Une plus grande valeur de la longueur de parfocalité est souvent utile dans le projet des objectifs "à seconde conjuguée infinie" (§ 3.2.3) qui, à égalité d'agrandissement, ont une focale supérieure à celle des objectifs à conjuguée finie.

Pour connaître la Lo d'un objectif donnée, au-delà à consulter les catalogues du constructeur, on peut procéder à une mesure directe: on met au point un objet mince (une lame) avec l'instrument équipé des accessoires normaux; on tourne le revolver sans toucher la mise au point; on démonte l'objectif et on ramène le trou vide en position de travail; avec un compas on prend la distance entre la lame et la battée du revolver et on la reporte sur un calibre, une règle millimétrée ou semblables.

Avec cette méthode on prend une mesure par défaut à laquelle doit être ajouté l'épaisseur **d** de la lamelle qui couvre l'objet; cependant telle épaisseur doit être corrigée pour l'index de la lamelle (environ 1,51) en vertu du phénomène de l'avancement de l'image opérée par les lames plan-parallèles (voir le § 3.2 et la formule (17)). En autres mots, la valeur de Lo doit s'entendre comme distance entre battée de l'objectif et plan-objet, compte tenu de la présence de la lamelle et de l'avancement de l'image opérée par celle-ci.

Maintenant nous voyons, en pratique, quelles sont les causes de perte de parfocalité:

□□ les trous du revolver ne sont pas tous à la même hauteur; on le vérifie en inversant la position de deux ou plus objectifs sur le revolver et en contrôlant que la différence de mise au point ne s'inverse pas. Il y n'a pas remède, à moins de modifier le revolver;

□□ la battée des objectifs n'est pas bien travaillé: la différence de mise au point s'inverse en inversant deux objectifs; il faudrait ici aussi modifier la battée au tour;

□□ la longueur du tube (**Lm -** § 10) n'est pas correcte. Rarement sont prévus des dispositifs de correction (voir le § 24.1.1). Cette faute se répercute naturellement sur la position de l'image intermédiaire, donc sur la conjuguée côté image et sur celle côté objet, et par suite sur la mise au point, en mesure croissante avec le grandir de la focale de l'objectif;

□□ mécanisme analogue et conséquences analogues peuvent se présenter quand on introduit dans l'instrument certain "tubes intermédiaires", c'est-à-dire des accessoires interposés entre revolver et oculaires pour des différentes fonctions (épiscopie, fluorescence, lumière polarisée, etc., § 25). En principe, le constructeur devrait veiller à ce que ces tubes n'altèrent pas la longueur optiquement équivalente du tube, soit-il en altérant la longueur mécanique; en autres mots tous ces tubes devraient être, eux aussi, "parfocales". Mais la variété de tels accessoires est si grande que quelque inconvénient est toujours possible;

□□ toujours à une altération de la longueur du tube on doit attribuer l'effet d'une substitution

du tube porte-oculaires, par ex. mono- ou bi-oculaire; il vaut encore tout ce qu'on a déjà dit pour les tubes intermédiaires: tous les tubes porte-oculaires du même constructeur devraient être équivalents, c'est-à-dire parfocales; mais ici aussi les mauvaises surprises ne sont pas rares. Il y a aussi des tubes mono-oculaires et surtout bi-oculaires dans lesquels le manchon particulier dans lequel on introduit l'oculaire a une longueur variable. Cette régulation a le but de compenser des éventuelles amétropies sphériques de l'observateur, mais son effet est d'altérer la longueur totale du tube et par suite la parfocalité (§ 24.1.6). Dans d'autres tubes bi-oculaires (à glissières) la variation de la distance entre les deux oculaires, nécessaire pour adapter l'instrument à la distance interpupillaire de l'observateur, comporte encore une variation de **Lm** et une perte de parfocalité (§ 24.1.3);

□□ encore une altération de la longueur du tube et de la parfocalité naît d'un oculaire non correct dans lequel le premier foyer et l'image intermédiaire ne se trouvent pas à l'hauteur prévue. Tous les oculaires prévus pour un instrument donné devraient être contrôlés avec soin aussi à cet égard; on peut parler de parfocalité des oculaires (voir le § 20.2), mais ici aussi il y a toujours à s'attendre quelque surprise, surtout dans des instruments de vieille date;

□□ il y a encore des oculaires "réglables" (voir le § 12.1) dans lesquels la position de la lentille oculaire peut changer en direction axiale. Même cela comporte une variation de la position de l'image intermédiaire avec les conséquences habituelles. Si cependant l'oculaire réglable contient un réseau, l'observateur sera emmené à focaliser ce dernier et par suite à déplacer l'image intermédiaire dans la position correcte, à fin que l'objet lui apparie au point avec le réseau;

□□ finalement il peut arriver, que, dans les objectifs «à pompe» (voir le § 19.1), le barillet général ne coule pas bien dans la monture, ou pour durcissement de la graisse, ou pour pénétration de poussière, ou pour déformation de la monture, etc. Dans ces cas, il peut arriver que le groupe des lentilles rentre dans la monture et le ressort intérieur ne réussisse plus à le reporter en position correcte. Évidemment, ceci comporte une diminution de **Lo**, et adieu parfocalité.

19.1.3 - Distance de travail

En optique, on appelle génériquement "**distance frontale**" d'un système optique la distance axiale entre le plan objet (ou image) et la surface extérieure de la première lentille du côté de l'objet (ou de l'image).

Telle distance frontale, selon la structure du système, peut être plus grande ou plus petite de sa longueur focale; nous reviendrons sur ce point dans le § 19.2.3.2.

En microscopie, la notion de distance frontale est utile pour connaître la distance libre, en air ou en huile d'immersion, existante entre objectif et objet (mise au point correcte), en tant qu'elle indique quelle liberté d'accès à l'objet on a pendant l'observation. On parle ainsi de "**distance libre de travail**" ou "**distance de travail**" ("working distance"), et on l'indique avec WD. Mais il faut quelque précision.

La distance vraiment "libre" n'est pas la distance frontale en sens étroit, mais la distance entre le bord de la monture de la lentille (on a précisé qu'en général la surface de la lentille frontale est protégée par une légère saillie de la monture métallique) et la surface supérieure de la lamelle. Pas tous les constructeurs cependant ne se conforment à ces précisions et il faut de la prudence quand on interprète les données du catalogue. Si la lentille frontale est concave, la WD se considère par rapport au bord de la lentille, ou de sa monture. On établit que la valeur nominale de WD vaut avec mise à point correcte et avec lamelle d'épaisseur correcte. S'il s'agit d'un objectif épiscopique ou de toute façon destiné à travailler sans lamelle, la distance de travail se mesure par rapport à la surface réelle de l'objet.

Il faut aussi que la longueur du tube **Lm** soit correcte, étant donné qu'elle influe sur la longueur **Lo** de l'objectif et par suite, sur la WD.

Finalement, on suppose que l'objet adhère à la surface inférieure de la lamelle au sens qu'il n'y ait pas des épaisseurs imprévues du matériel de montage de la préparation entre lamelle et objet.

Naturellement, une valeur élevée de la distance de travail WD peut être très utile quand on doit exécuter des manipulations sur l'objet ou quand on doit explorer en profondeur un objet épais et transparent; ou encore quand on doit éclairer obliquement du haut un objet opaque, ou quand l'objet est contenu dans des "chambres" chauffées ou congelées ou sous vide ou sous pression. Telles chambres sont fermées le plus souvent par une fenêtre de verre ou silice d'épaisseur considérable, souvent 2 mm (voir le § 27.7.4).

En général, plus élevés sont l'agrandissement et l'ouverture de l'objectif, plus petit c'est la distance de travail WD. Dans les normaux objectifs forts (à partir de 40:1), la WD peut descendre à moins de 0,1 mm; dans des objectifs forts spéciaux, même à immersion, elle peut monter à environ 2 mm. Mais un fort objectif avec distance de travail supérieur à 2 mm est construit souvent avec des recettes complètement différentes, c'est-à-dire avec des miroirs (objectifs catoptriques) ou avec des combinaisons de miroirs et lentilles (catadioptriques - voir le § 19.3.4).

Dans les objectifs autour à 10:1 la WD peut rôder entre 4 et 10 mm dans les types normaux, beaucoup moins dans les plans. Près de M = 5:1, la WD dans les types les plus simples peut dépasser 30 mm. Aussi certains objectifs spéciaux pour épiscopie arrivent à WD = 30 mm avec des grandissements jusqu'à 20:1 et un diamètre de la lentille frontale jusqu'à 20 mm.

Pour mesurer la distance de travail d'un objectif, on le met correctement au point sur un objet plan (avec lamelle si l'objectif est prévu pour celle-ci); puis on introduit entre objectif et préparation une série de bandes de papier ou carton jusqu'à remplir l'espace disponible, qui est justement la distance de travail. On aura soin de ne pas forcer les bandes de papier pour ne pas soulever les objectifs «à pompe». Ensuite il n'est pas difficile de mesurer avec un calibre l'épaisseur du paquet des bandes. Ce n'est pas le cas d'utiliser une pige à lamelles d'acier pour le risque de rayer la lentille frontale.

La monture télescopique des objectifs, dont on a parlé dans le § 19.1, est utilisée toujours de nos jours dans les objectifs les plus forts, justement parce que leur distance de travail est plus petite et le contact avec la préparation est plus probable. Les constructeurs avisés disposent dans les mouvements de mise ou point, une fin de course, c'est-à-dire un dispositif d'arrêt (§§ 26.5.5 et 27.2.2) de telle manière que les objectifs le plus faibles et les plus courts (en général jusqu'à 10:1) ne puissent jamais toucher l'objet, et ceux-ci sont fournis donc avec une monture rigide. Pour les objectifs les plus forts on utilise par contre la monture télescopique étant donné que la WD est trop petite et le contact avec la préparation est inévitable. La position de la fin course susdite doit en effet être telle à tenir compte de l'épaisseur variable des lames porte-objets; pour pouvoir focaliser les plus minces il faut risquer le contact avec les plus grosses: la variation d'épaisseur des porte-objets peut dépasser 0,5 mm, pendant que la distance de travail, comme on a dit, peut être plus petite de 0,1 mm.

19.1.4 – Parcentralité ou parcentrage

Quand on substitue un objectif avec un autre, au moyen de coulisses, d'un revolver ou autre, l'axe optique d'un objectif ne pourra jamais coïncider parfaitement avec l'autre; en autres mots, un point qui se trouve au centre du champ avec un objectif donné, sera hors du centre avec un autre.

Pour des raisons pratiques, on devine que cette perte de centrage ne doit pas être telle à obliger à une nouvelle recherche du point intéressé de l'objet. En autres mots, après n'importe quelle substitution de l'objectif, le point central du champ visuel ne doit pas sortir du champ du nouvel objectif. Comme dans toutes les choses, il y a une "tolérance".

Le centrage réciproque des champs des différents objectifs s'appelle "**parcentralité**" ou "parcentrage". Sur cela influent plusieurs causes, toutes de type mécanique.

 Les positions d'arrêt du revolver, obtenues en général avec un ressort qui pénètre dans des fentes spéciales, devraient être congruentes et équidistantes.

 Les trous du revolver peuvent se trouver en position différente par rapport aux positions d'arrêt ou par rapport à l'axe de rotation du revolver.

 L’axe de rotation peut ne pas être bien défini à cause d’un jeu.
 Le système optique de l’objectif n’a pas la même position par rapport à la monture mécanique pour tous les objectifs.
 La fixation à vis sur la monture de l’objectif n’assure pas toujours une position répétitive en direction normale à l’axe.

De plus il faut que la position des différents objectifs soit stable dans le temps, indépendamment de la position par rapport aux autres objectifs. Ici aussi, on doit exiger que l’image observé dans l’oculaire ne se déplace pas trop pendant les normales opérations. Déplacements latéraux stables de l’image observée sont imputables naturellement à toutes les parties mécaniques qui soutiennent soit l’objet (platine, guide-objets, etc.), soit l’objectif (revolver, bras, etc.). On doit tolérer cependant des déplacements réversibles, élastiques, qui se vérifient pour une pression même légère sur l’objectif, sur le revolver, sur la platine, etc. En effet aucun matériel n’est rigide à suffisance et les raisons de poids et d’encombrement empêchent d’augmenter au-delà d’une certaine limite les dimensions des différents supports pour les raidir. Ce qu’on peut par contre exiger du constructeur sérieux c’est l’absence ou la reprise des jeux dans les guides qui soutiennent la platine, le revolver, etc., toujours pour éviter les fastidieux déplacements latéraux irréversibles de l’objet ou de l’objectif (voir le § 26.5.2).

En certains cas, par ex. dans le contraste interférentiel, il peut être nécessaire d’interposer entre objectif et revolver une pièce intermédiaire contenant certaines parties optiques. Tel raccordement peut introduire des erreurs dans la position latérale, et axiale, de l’objectif et faire perdre le parcentrage et la parfocalité.

Aussi une inclinaison erronée du revolver fait perdre le parcentrage (voir le § 27.2.3).

19.1.4.1 – Les objectifs centrables

Pour des applications spéciales ils existent des objectifs dans lesquels le groupe des lentilles ou le barillet général qui le porte sont centrables par rapport à la monture. Il est clair qu’avec ces objectifs, à part la présence de jeux, il est possible d’obtenir un parcentrage parfait ou perfectible dans n’importe quel moment.

Ces objectifs sont utilisés en radiation polarisée afin de centrer tous les objectifs par rapport au condensateur et optimiser les observations “conoscopiques”, ou bien par rapport à la platine tournante. Le centrage du groupe des lentilles par rapport à la monture de l’objectif est obtenu ou avec des vis perpendiculaires à l’axe optique (Wild, par ex.), ou avec un couple de bagues excentriques qui sont en saillie de la surface de la monture (Zeiss). Ces mouvements transversaux du groupe des lentilles peuvent coexister dans les forts objectifs avec le mouvement télescopique, vertical, des objectifs à pompe. À ce point, la structure mécanique devient très complexe.

Aussi pour les mouvements transversaux de centrage, ils peuvent se présenter les inopportuns inconvénients mécaniques habituels: jeux et instabilité, durcissement et bloc du mouvement à cause des graisses durcies ou poussière, etc.

19.1.5 – Les inscriptions (notations) sur les objectifs

La monture de l’objectif ou la “chemise” qui la recouvre (voir le § 19.1), porte en général beaucoup d’indications avec des chiffres, lettres ou symboles, gravés au pantographe ou dessiné à la peinture avec la méthode sérigraphique ou autre.

Telles indications peuvent être nombreuses, et reporter des caractéristiques importantes de l’objectif. Voilà le plus communes.

 Le nom ou le symbole graphique (logo) du constructeur.
 Le numéro de catalogue du constructeur (rarement).
 Le numéro de matricule formé par quatre, cinq ou plus chiffres décimaux.
 L’agrandissement transversal linéaire indiqué comme chiffre simple ou comme rapport d’échelle pour les objectifs à conjuguée finie (ex. 25:1), ou comme chiffre suivie par “×” pour les

objectifs à l'infini (ex. 25 ×).

 L'ouverture numérique, peut-être précédée par le symbole NA (Numerical Aperture), ou A (Apertur) ou ON (Ouverture Numérique).

 La longueur équivalente mécanique du tube (Lm) exprimée en mm, souvent 160 pour les objectifs à conjuguée finie ou ∞ pour les objectifs à conjuguée infinie.

 L'épaisseur conseillée du couvre-objet (**d**) exprimé en mm (souvent 0,17, ou 0 pour les objectifs épiscopiques). Parfois il est spécifié: d = 0,17 ou d = 0 ou semblables.

Les dernières quatre indications sont en général réunies à former un groupe compact avec un ordre constant. Ex:

40 / 0,65
160 / 0,17

lequel indique M = 40:1, NA = 0,65, Lm = 160 mm, d = 0,17 mm. Ou:

10 / 0,35
∞ / –

lequel indique: M = 10 ×, NA = 0,35, Lm = ∞; le signe – (parfois remplacé par DO ou par 0(0,17) ou 0,17(0) indique que la présence ou l'absence de la lamelle est indifférente[83].

Il est sous-entendu que les valeurs indiquées de M et NA sont nominales, au sens qu'elles peuvent être approchées, et elles sont valides de toute façon seulement avec les correctes valeurs de Lm, **d**, type d'oculaire, etc.

 "d = 0" ou "0" ou "OD" ou "NCG" indiquent des objectifs à utiliser sans lamelle[84].

 "D" indique les objectif à utiliser avec lamelle normale, d = 0,17.

 HI, Öl, Oel, Oil ou Imm indiquent les objectifs à immersion homogène. Ceux à immersion "presque homogène" sont indiqués par "Oil" ou semblables mais pas par HI.

 WI ou W ou Wasser indiquent les objectifs à immersion dans l'eau; Glyz ou Glyc pour l'immersion en glycérine. SI pour l'immersion en silicone (pour la fluorescence). VI indique objectifs à immersion indifférents au type du liquide (huile, eau, etc.; VI = Variable Immersion).

 Pol ou P ou SF (strain free) indique les objectifs prédisposés pour l'usage en radiation polarisée.

 Ph ou Phaco ou DL ou DM, etc. indiquent les objectifs à contraste de phase.

 P ou Pl ou Plan indiquent les objectifs à champ aplani (voir le § 19.2.3.2). SPL ou S ou S-Plan peuvent indiquer les objectifs "semiplan" avec courbure de champ réduite, mais pas du tout "plane".

 L ou LD ou LWD[85] indiquent les objectifs à distance de travail élevée.

 M peut indiquer les objectifs épiscopiques pour métallographie.

 NC ou NCG (no cover glass) indique les objectifs à utiliser sans lamelle (d = 0).

 HD[86] ou BD[87] indique les objectifs épiscopiques pour champ clair et champ noir.

 H[88] indique les objectifs épiscopiques seulement pour champ clair («Hellfeld») ou pour platine chauffante («Heiss» = chaud).

 Iris ou «mi» (mit iris) indique les objectif pour champ noir avec diaphragme à iris incorporé.

 Corr ou Korr ou C indiquent les objectifs avec bague de correction pour l'épaisseur de la lamelle (§ 13.2.3).

 CF indique «Color Free» = correction complète de la chromatique laterale.

 C dans les vieux objectifs Leitz indique «coated» (avec traitements antiréflechissants).

 Q peut indiquer les objectifs avec les lentilles en quartz ou silice à utiliser dans la gamme

---

[83] C'est une simplification: voir la dernière note dans le § 16.2.

[84] "OD" est l'acronyme de "Ohne Deckglas" (= sans lamelle, en allemand); "NCG" est l'acronyme de "No Cover Glass" (en anglais).

[85] LD = Long Distance; LWD = Long Working Distance, toujours en anglais.

[86] Hellfeld-Dunkelfeld = Champ clair et champ noir, en allemand.

[87] Bright and Dark field (champ clair et champ noir, en anglais).

[88] H = Hellfeld (= champ clair) ou = Heizen (= réchauffer, toujours en allemand = objectifs pour platine chauffante).

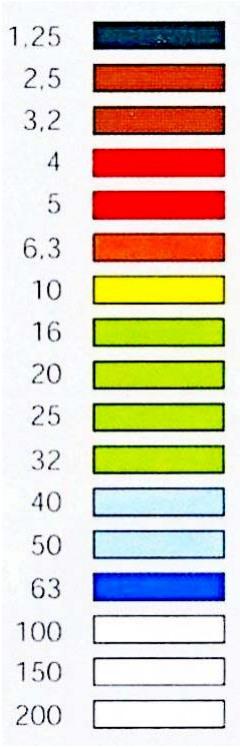
UV.

 Une L peut indiquer “usage avec Laser”, en épiscopie.

 DI ou MI ou TI indique les objectifs pour systèmes interférentiels.

 DIC (differential interference contrast) ou NIC (Nomarski Interference Contrast) indique les objectifs pour contraste interférentiel différentiel selon Nomarski.

 Il y a de plus des abréviations qui indiquent le type de correction chromatique (§ 19.3). Les achromatiques, le plus communs, ne portent pas en général aucune indication. Les semi-apochromatiques portent souvent l’indicatif Fl ou des noms commerciaux, Fluotar, Neofluar, etc. (objectifs à fluorine). Les apochromatiques sont indiqués avec Apo ou semblables. Il y a de plus des combinaisons d’abréviations dans le cas des plans: par ex. PlanApo ou PApo indique un objectif apochromatique plan.



 Les indicatifs GF ou WF ou EF[89] ou semblables indiquent les objectifs à grand champ (voir aussi le § 19.2.4).

 N indique les objectifs à champ normal.

 ICS ou UIS ou CFI (Infinity Corrected System ou Universal Infinity System ou Chrome-Free Infinity) indiquent les objectifs “à conjuguée infinie”, éventuellement du type CF.

 On remarque souvent au dessous des différentes indications une ou deux bagues colorées. Une bague noire, rarement blanche, indique souvent un objectif à immersion homogène; une bague orange indique une immersion en glycérine; une bague double peut indiquer un objectif plan; une ou deux bagues ondulées peuvent indiquer un objectif à contraste de phase. La couleur même des notations peut être indicative du type d’objectifs: par ex.:vert = contraste de phase; rouge = pour lumière polarisée. Une bague, selon la figure à côté, indique le grandissement.

Autres notations spéciales sont utilisées en cas spéciaux par différents constructeurs.

19.2 – Le SYSTÈME optique de L’OBJECTIF du MICROSCOPE

Comme on a déjà expliqué, les caractéristiques de l’image finale du microscope dépendent en bonne partie des performances de l’objectif, et on a vu à son temps comme, au moins au centre au champ (“sur l’axe”) tels objectifs soit optiquement parfait, c’est-à-dire “diffraction limited”, sauf le cas d’instruments jouet.

Des objectifs destinés à d’autres buts, seulement quelque type spécial, par ex. ceux destinés à la micro-lithographie, peuvent vanter un niveau semblable de correction.

Cette position privilégiée de l’objectif de microscope s’explique sur la base de quelques conditions favorables dont il jouit en voie presque exclusive et qui ont déjà été mentionnées dans le § 13.3:

1) L’agrandissement M, saufs des cas très particuliers, est fixe.

2) L’ouverture NA, en général, est fixe.

Ces deux conditions permettent d’optimiser le projet sur valeurs fixes de M et NA.

3) La focale et les conjuguées sont petites et donc, selon l’échelle, le cercle de confusion dû aux aberrations est petit.

4) Les petites dimensions permettent, sans augmenter trop l’encombrement des lentilles, d’atteindre les plus grandes valeurs d’ouverture, et par suite le moindre diamètre de la centrique. Aussi les non homogénéités éventuelles des verres optiques ont moins de conséquences dans des dimensions plus petites.

5) Si en général les problèmes de poids et d’encombrement, donc des dimensions des lentilles, n’existent pas, se rend possible l’usage de matériels particuliers et chers comme la fluorine qui fa-

[89] GF = grossfeld; WF = wide field; EF = extended field.

cilitent la correction de certaines aberrations (chromatiques et sphérique, surtout).

6) Le champ angulaire est petit, difficilement supérieur à 3° (demichamp).

7) Dans certains cas (oculaires compensateurs, voir le § 19.3.1, ou certaines lentilles du tube, § 3.2.3), quelques résidus d'aberrations de l'objectif peuvent être corrigées par l'oculaire.

8) Souvent il est possible d'accepter des petites valeurs de pénétration et ceci permet d'atteindre des valeurs d'ouverture très élevés.

9) Dans beaucoup de cas, on peut tolérer la courbure de champ de l'image (en photographie ça n'est pas toléré).

Qu'on pense, pour comparaison, à un objectif photographique qui doit travailler avec agrandissement et ouverture variable, grand champ angulaire, beaucoup de limites d'encombrement et de poids, l'exigence de fournir une image plane, focale élevée, etc. et on comprendra la position favorable de l'objectif pour microscope.

19.2.1 - La "luminosité" de l'objectif

Si pour luminosité on veut parler de l'éclairage E sur le plan de l'image finale du microscope, on peut exprimer E en Lux et la définir comme rapport entre le flux lumineux total qui joint sur le plan de l'image (Φ[90], exprimé en lumen) et la surface de l'image même S (exprimée en m^2). On peut montrer que:

$$E = \Phi / S = \pi \, t \, B \, NA^2 / M_M^2 \qquad (63)$$

dans laquelle **t** indique la "transparence" globale du système, liée aux pertes par absorption dans la masse des verres, par réflexion aux surfaces air-verre ou par diffusion opérée par les impuretés de différente nature; **B** exprime la brillance[91] dans le plan de l'objet, liée à la luminance $\mathbf{B_o}$ de la source et aux caractéristiques du système éclairant; NA représente l'ouverture utile de l'objectif et pour celle-ci on prend la plus petite des valeurs d'ouverture de l'objectif et du condensateur; M_M indique l'agrandissement total du microscope, qu'on peur tirer de la (34) (ou de la (33) pour l'observation visuelle) comme on a dit dans le § 12.7.

Il est évident de la (63) que, à égalité de toute autre condition, les images les plus lumineuses s'obtiennent: 1) par les objectifs avec la meilleur NA à condition que l'ouverture du condensateur ne soit pas inférieure; 2) par les objectifs les plus faibles; 3) par les oculaires les plus faibles.

On remarque que M_M est écrit au carré pour lequel, en passant d'un oculaire par ex. 10× à un 7×, la luminosité double environ: $(10/7)^2 = 2{,}02$. Cela va tenu présent quand on utilise des techniques dans lesquelles la luminosité est basse en général (fluorescence, radiation polarisée, champ noir, etc.): la tendance à augmenter l'agrandissement se paie chère, soit avec la perte de luminosité, soit avec une plus petite définition, pénétration, etc.

Pour ce qui concerne l'agrandissement de l'objectif (M_{ob}) on se rappelle que le discours vaut quand l'image d'un objet donné est gouvernée par les lois de l'optique géométrique (agrandissement, etc.). Si on observe par contre un objet très petit et lumineux (un grain fluorescent, par ex.), l'image géométrique duquel est plus petite de l'image de diffraction (§ 18.3) les dimensions de l'image sont liées seulement aux dimensions "de diffraction", c'est-à-dire à l'ouverture de l'objectif, et aux aberrations; l'agrandissement n'y entre plus.

---

[90] Φ c'est la lettre F majuscule grecque ou "fi".

[91] Aujourd'hui on dit plutôt "luminance" et cela exprime le flux émis dans l'unité d'angle solide par l'unité de surface de la source.

19.2.2 - La “netteté”

Le terme commun “netteté” correspond à l’impression subjective produite par une image optique qui montre des contours nets, des détails fins et des vifs contrastes.

Après tout ce que nous avons dit jusqu’à présent, il est clair que la netteté de l’image du microscope dépend en bonne partie de l’objectif, mais elle est liée à beaucoup de phénomènes différents, examinés à son temps. Résumons-les:

 Définition: une propriété des images optiques liée au rayon du “cercle de confusion” (§ 13.2) désigné comme somme des effets de toutes les aberrations du point, de la défocalisation éventuelle, des impuretés dans ou sur les lentilles, etc. Comme on a expliqué dans le § 13.2, la valeur du rayon du cercle de confusion influe soit sur la résolution, soit sur le micro-contraste.

On remarque que définition et résolution, par rapport au plan objet, sont indépendantes de l’agrandissement total du microscope (M_M ou V_M) à égalité de toute autre condition. En autres mots, en étant le plan de l’image finale et le plan objet conjugués entre eux, on peut imaginer que le cercle de confusion produit dans l’image finale d’un point objet soit reporté dans le plan objet, compte tenu de l’agrandissement; à ce point on construit un objet fictif qui n’est pas autre que l’image géométrique réduite du cercle de confusion comme il est présent dans l’image finale. Eh bien, il est intuitif que le rayon de cet objet fictif (le cercle de confusion dans le plan objet), ne dépend pas de l’agrandissement étant donné que pour le construire on traverse le système optique d’abord dans un sens et puis dans l’autre.

En conclusion, la résolution ou la moindre distance résolue dans le plan objet ne dépend pas de l’agrandissement de l’objectif ou de l’oculaire ou de quelque facteur de tube. Si cependant on discute en termes de résolution dans le plan de l’image finale (indiquons-la avec R_{IF}) exprimée en lignes/mm (voir le § 18.11) elle dépend de l’agrandissement total M_M comme exprimé par la (34) au § 12.7. En autres mots, si dans le plan objet j’ai la résolution de 0,5μ et M_M est égal à 200:1, dans l’image finale la résolution R_{IF} sera de 100μ, équivalent à 10 lignes/mm. En faisant les comptes avec une série d’objectifs réels, on s’aperçoit que, dans le plan de l’image finale, on dépasse difficilement la valeur de R_{IF} = 30 lignes/mm. Étant donné qu’une bonne émulsion photographique dépasse aisément les 50 l/mm, au moins en B – N, il est clair qu’il convient d’augmenter le plus possible le R_{IF} en réduisant M_M. Celle-ci est une autre raison pour laquelle les faibles oculaires, au moins en photographie, sont à préférer. Considérations analogues ont été faites quand on a parlé du grossissement utile et de son calcul (§ 18.12).

 Résolution. On a parlé plusieurs fois de la notion de résolution et on a vu que, dans un microscope de qualité même modeste, au moins au centre du champ visuel, la limite supérieure de la résolution n’est pas donnée tellement par les aberrations du point, mais plutôt par la diffraction. En autres mots, dans ces conditions, le cercle de confusion donné par les aberrations du point est plus petit que la centrique (voir le § 18.3). Le facteur déterminant de la résolution dans le plan objet est alors l’ouverture de l’objectif NA (voir la (52) ou la (54)), mais non l’agrandissement.

Nous rappelons cependant que tous les discours fait sur la résolution concernent sa valeur supérieure, sa limite maximum; la valeur réelle peut être réduite par différentes causes qu’on a déjà mentionné: contraste insuffisant dans l’objet, perte de contraste dans l’instrument (lumière diffuse par différentes causes, etc., voir le § 17); défauts et aberrations du système optique, mauvaise propreté des lentilles, défauts dans les verres optiques, régulation erronée du système éclairant (ouverture insuffisante du condensateur, fautes de centrage, etc.), fautes de mise au point, luminosité excessive ou insuffisante de l’image, vibrations qui arrivent à l’instrument de différentes sources, défauts dans le récepteur (émulsion photographique, œil, etc.).

 Contraste. Quand le contraste dans l’image finale du microscope est bas, l’appréciation des fins détails est aussi entravée; la résolution de l’instrument donc devient utilisable seulement en partie. Au point de vue de l’observation ou de la photographie, c’est-à-dire de la lecture de l’image, une perte de contraste porte ainsi une perte de résolution et chaque récepteur (rétine de l’œil, émulsion photographique, capteur de télévision, etc.) a un seuil minime de contraste au-dessous duquel le champ apparaît homogène (résolution nulle).

Ce fait ne doit jamais être oublié; dans les meilleures conditions d'ouverture, résolution, etc. une image peu contrastée peut être difficilement lisible et les détails sont perdus. On a vu dans le § 17 la notion de contraste et les facteurs qui influent sur sa valeur. Mais il ne suffit pas de se préoccuper des caractéristiques de l'instrument ou de ces manipulations qui influent sur la perte de contraste produite par l'instrument. Il faut se préoccuper aussi du contraste dans l'objet même. Sur celui-ci on peut influer en certains cas avec des techniques opportunes (colorations, etc.), mais quand ceci n'est pas possible ou ne suffit pas, on peut s'adresser aux "techniques de contraste" (voir le § 30) qui sont des dispositions instrumentales opportunes pour lesquelles le microscope peut fournir des images beaucoup plus contrastées de l'objet ou des images colorées d'un objet transparent. Nous avons déjà mentionné à quelques-unes d'elles (contraste de phase, contraste interférentiel avec toutes ses variantes, fond noir, fluorescence, radiation polarisée, etc.), mais de ça on parle plus loin (voir aussi, dans ce site, les articles n° 33 et 35).

 Pénétration. De pénétration ou profondeur de champ on a déjà parlé dans le § 14. Nous voulons ici faire seulement remarquer que tout ce qu'on a dit, référé à la définition, résolution, contraste, etc. on le référait à des objets plans sans épaisseur. Quand l'objet a une épaisseur pas nulle, chacun de ses point qui est au dehors des limites de la pénétration apparaît "défocalisé", c'est-à-dire comme un halo plus ou moins confus tout près ou superposé aux points bien focalisés.

Supposons le cas que le point défocalisé se trouve SOUS le point focalisé. Si la défocalisation est forte, l'image de ce point objet est très élargie et elle peut seulement augmenter ou diminuer la luminosité du fond image. Si la défocalisation est légère, un point objet donné parfaitement au point est superposé au halo créé par le point défocalisé et le contraste diminue, avec les conséquences que nous avons à peine discutées.

Si par contre le point défocalisé est SUR le point focalisé, il crée un masquage véritable de ce dernier. Mais difficilement le point inférieur disparaîtra du tout: dans un objectif moyen-fort comme celui de la fig. 72 (en bas), l'ouverture est toujours élevée; si sur le point focalisé (O dans la figure) se trouve un objet pas trop grand et défocalisé (O') les rayons les plus ouverts acceptés par l'objectif (esquissés dans la figure) arrivent à concourir à la formation de l'image de O étant donné qu'ils passent autour du point O' en vertu de leur forte inclinaison.

De toute façon, dans ce cas, le contraste sera encore plus empiré.

Dans la technique du champ noir les choses vont encore pire, étant donné que les points défocalisés créent un voile clair qui empêche de toute façon la formation du fond noir.

Donc, par le seul fait que la pénétration ait une valeur limitée, on a une perte de contraste toutes les fois que l'objet n'est pas infiniment mince.

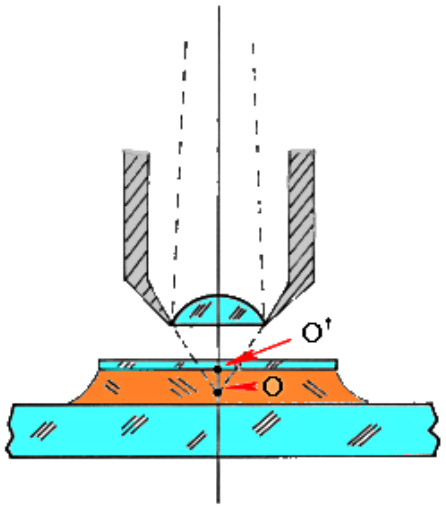


Fig. 72

19.2.3 - La structure de l'objectif

On a déjà parlé dans le § 19.1 de la structure mécanique de l'objectif de microscope; maintenant nous parlons de celle optique.

Chaque modèle d'objectif et chaque constructeur propose des solutions différentes, c'est-à-dire des "recettes" qui visent d'un côté à améliorer les performances du système, de l'autre à en réduire la complexité et par suite le coût. L'adresse du projeteur et du constructeur consiste justement à améliorer le rapport qualité/prix en faisant appel à toutes les ressources scientifiques et technologiques, instruments de calcul, verres optiques de différentes caractéristiques, techniques de travail et contrôle, etc.

Nous donnons ici seulement une description sommaire des principaux types de recettes

d'objectifs de microscope.

19.2.3.1 – Objectifs classiques, à champ non aplani

Les modèles les plus faibles, jusqu'à 6:1, peuvent être constitués par un **doublet** ou une triplette (deux ou trois lentilles simplement collées entre elles) avec une focale entre 20 et 60 mm.

La distance frontale est élevée et parfois supérieure à la longueur mécanique **Lo** des autres objectifs; pour ça les objectifs très faibles peuvent ne pas être parfocales avec les autres et ils imposent une forte augmentation de la distance objectif-objet (retouche de la mise au point).

Les modèles d'agrandissement moyen (de 10:1 à 20:1) sont formés souvent par deux doublets dont l'un compense les aberrations de l'autre (voir la fig. 73 A et B); la plus grande liberté donnée au projeteur peut lui permettre des résultats excellents. Le premier doublet se trouve à la même distance entre l'objet et le second doublet; le diaphragme est donné par le barillet du second doublet; la distance entre les deux doublets est égale à la focale du premier doublet pour lequel le plan focal supérieur se trouve sur le second doublet. La focale de ce dernier est double de celle du premier. Pour les deux doublets, les lentilles divergentes de verre flint sont tournées vers l'objet. Celle-ci est la recette des objectifs de projection "de Petzval[92]".

Dans les forts objectifs, à partir de 20:1 (fig. 73 C et D), la focale est inférieure à 10 mm, et le schéma le plus diffus est celui d'Amici[93] (1816), grand innovateur, auquel on doit la première introduction de l'immersion, comme on a déjà dit. La lentille frontale est hémisphérique, simple, de verre crown léger; ses aberrations sont corrigées par deux doublets qui se trouvent sur elle, à brève distance. Quand l'objectif est à immersion, la frontale se conduit comme un **dioptre** (surface simple de séparation entre deux milieux optiques d'index différent) en tant que sa surface extérieure est en contact avec l'huile et par suite optiquement tout arrive comme si elle n'existât pas (supposée l'immersion homogène)[94].

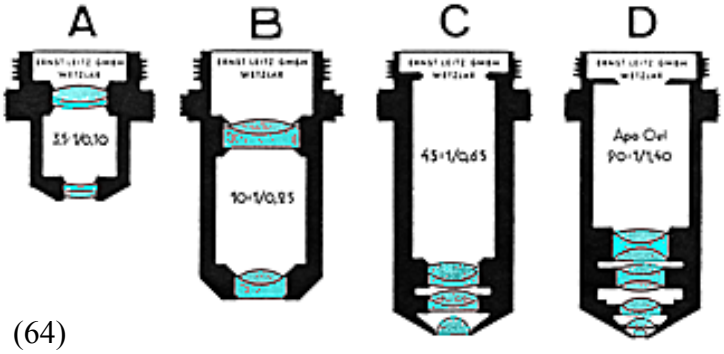


Fig. 73 - De: H. Detreman et F. Lepush, "Le microscope et son utilisation", Ed. Leitz, Wetzlar, 512-69, 1974.

Eh bien, un dioptre sphérique résulte corrigé de sphérique et coma quand on vérifie la condition suivante:

$$a = r\,(n'+n) / n \qquad (64)$$

dans laquelle **a** est la conjuguée objet du dioptre, **r** son rayon de courbure, **n** et **n'** les index côté objet et côté image. Dans les objectifs à immersion cette heureuse condition, dite "cas aplanétique", peut être satisfaite plus ou moins parfaitement aussi pour les fortes ouvertures. Et il y a un autre avantage: on peut montrer que l'ouverture du dioptre côté image (NA') est égale à celle côté objet (NA) divisé le carré de l'index côté objet (n), en supposant que l'index côté image (n') soit égal à 1, comme c'est le cas de la lentille frontale d'un objectif à immersion:

$$NA' = NA / n^2 \qquad (65)$$

Ainsi, si un objectif à immersion possède une ouverture NA = 1,35, après la lentille frontale la NA' se réduit à 0,6[95], lequel facilite la correction de toutes les aberrations achromatiques. Il y a

[92] Voir le § 13.1.1.

[93] Voir le § 16.1.

[94] Un des premiers constructeurs d'objectifs achromatiques (Selligue, Paris, 1823) et d'autres après lui, superposaient 3 - 4 doublets collés, singulièrement achromatiques. Étant donnée la difficulté de construire des doublets de forte puissance, et par suite de forte courbure et de petites dimensions, l'idée géniale de G.B. Amici fut justement celle de concentrer la puissance de l'objectif dans une petite lentille frontale simple, en laissant les corrections aux doublets suivants, plus grands.

[95] Supposé que n = 1,5, et donc $n^2 = 2,25$.

cependant un inconvénient: le cas aplanétique peut se vérifier seulement pour une longueur d'onde donnée et le problème des aberrations chromatiques reste par suite fort.

Dans les objectifs à sec avec la lentille frontale hémisphérique, la première surface, quand elle est plane, introduit une forte aberration sphérique. À propos des objectifs «plan», on verra comme le cas aplanétique soit réalisable aussi dans les objectifs à sec. De toute façon, la sphérique zonale (voir à la page 95) se réduit en diminuant la distance de travail, qu'en effet est en général petite.

Les deux doublets situés au-dessus de la frontale sont plan-convexe ou à ménisque. Dans les objectifs apochromatiques (voir plus loin) il peut y avoir des triplettes (fig. 73 D). Dans les modèles les plus raffinés, au dessus de la lentille frontale il peut y avoir un ou deux ménisques convergents minces (voir la fig. 8 dans le § 2.5) selon l'innovation des américains Tolles et Spencer, nommée "Duplexfront". Avec des opportunes astuces, "le cas aplanétique" peut se réaliser aussi pour le ménisque mince situé au-dessus de la frontale, et ceci explique l'ample diffusion de cette recette.

19.2.3.2 – Les objectifs «plan» (avec le champ image aplani)

Nous avons parlé dans le § 13.1.1 de l'aberration nommée "courbure de champ", de la manière de l'évaluer, de ses conséquences. Nous avons dit aussi que, dans l'observation visuelle, on peut compenser la courbure de champ avec un mouvement continu de la mise au point, de façon à voir au point, soit-il dans des temps successifs, chaque point du champ objet, en supposant un objet mince et plan.

Mais en photographie il est très utile de pouvoir enregistrer simultanément une image toute au point (aujourd'hui les systèmes digitaux permettent une correction en deuxième temps en superposant une série d'images à différentes plans de focalisation).

Les **objectifs "plan"** devraient être ceux dans lesquels la flèche[96] de la surface de meilleure focalisation (voir le § 13.1.1) est plus petite ou égale à la pénétration, de manière que la courbure de champ résiduelle disparaît à l'intérieur de la pénétration. Soit la surface de meilleure focalisation que la pénétration se réfèrent ici à l'espace objet et pour pénétration le terme "photographique" s'entend ici comme celui qui est exprimée par la (38) et par la (39) au § 14.

Tels objectifs parurent à l'œuvre de la maison Zeiss de Jena en 1937 sur projet de H. Boegehold, mais seulement en 1950 sont devenus disponibles des séries complètes, même apochromatiques.

Jusqu'à cette époque, les remèdes contre la courbure de champ étaient essentiellement trois, à la charge de l'oculaire:

- oculaires divergents comme les "Homal" de Zeiss, qui ont l'effet des oculaires "galiléens" des longue-vue, encore en usage dans les jumelles faibles et pour théâtre; étant donné que la courbure de champ d'une lentille divergente est de signe opposé à celle d'une lentille convergente, on peut avoir une compensation partielle de la courbure de l'objectif. Étant donné que les oculaires divergents ont la pupille basse, au-dessous de la lentille, ils ne peuvent pas être utilisés pour la vision: ils donneraient un champ angulaire très petit; ils sont utilisés seulement pour la photographie;
- oculaires convergents "photographiques" (Wild, par ex.): il s'agit d'oculaires normaux, positifs ou négatifs, dans lesquels on cherche d'obtenir une courbure de champ de signe opposé à celle de l'objectif. Étant donné que ceci est obtenu en introduisant un sensible astigmatisme, cette solution n'est pas répandue;
- oculaires forts: par leur moyen on peut projeter sur le format photographique seulement la partie centrale de l'image intermédiaire, où la courbure est plus petite (on a expliqué que celle-ci est proportionnelle au carré du champ). Cette solution est encore très diffuse, mais elle réduit la définition côté image (voir le § 19.2.2): en photographie, on a démontré, l'agrandissement total du microscope donnera des images tant plus définies qu'il est plus petit.

Aujourd'hui la courbure du champ est résolue dans l'objectif même. De cette manière, on

[96] Pour "flèche" on veut parler de la distance maximale d'une surface courbe finie du plan qui est tangent à son bord.

complique toujours la recette de l'objectif et on augmente le nombre des lentilles: voir la fig. 74 dans laquelle sont comparés deux objectifs à immersion forts; à gauche, une recette classique (deux doublets au dessus de la frontale, plus deux ménisques minces); à droite, un "plan" (15 lentilles).

Pour diminuer les coûts, beaucoup de constructeurs, même de réputation mondiale, produisent des objectifs plans avec des forts résidus d'autres aberrations, en particulier astigmatisme, et il faut les contrôler avec le star test en observant aux marges du champ.

Un bon "plan" peut avoir un nombre de lentilles plus que double du correspondant non plan, et la présence de lentilles à forte courbure (les "ménisques épais" cité plus loin) rend beaucoup plus critique le centrage des lentilles mêmes. D'ici la tendance de certains constructeurs à réduire les coûts en diminuant le nombre des lentilles, et souvent les performances.

Il y a la tendance à considérer les objectifs plan comme les meilleurs de tous les autres; à part le cas à peine cité de recettes qui obtiennent le planage du champ aux frais d'autres aberrations, à part ces cas dans lesquels le planage est suivi d'une réduction d'ouverture, il y a un inconvénient plus général: à la suite du planage, et de l'augmentation du nombre des lentilles qui en suit, chaque lentille surnuméraire présente deux surfaces air-verre, qui produisent une réflexion partielle de la radiation qui les traverse. Toute cette radiation contribue à la "lumière diffuse" issue à l'intérieur de l'instrument et provoque une perte de contraste (voir le § 17.1.2). Les objectifs plans présentent donc en général un contraste plus petit des correspondants non plan.

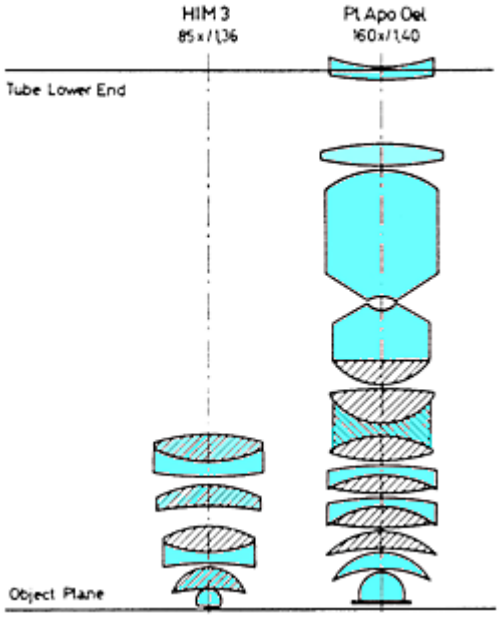


Fig. 74 - De: H. C. Claussen, "Microscope objectives with plano correction", Applied Optics, 3, pag. 993, 1964.

Il est bien vrai que, pour réduire les reflets, ils existent les "**traitements anti-réfléchissants**" (toujours dans le § 17.1.2), mais on a aussi expliqué qu'ils ne peuvent pas dérouler leur fonction pleinement, soit pour la forte courbure des lentilles, et par suite par l'angle d'incidence variable, soit parce qu'ils ne peuvent pas être utilisés sur la lentille frontale qui doit être souvent nettoyée.

Aussi pour l'usage en radiation polarisée, les objectifs plans peuvent avoir quelque inconvénient comme une mauvaise "extinction"; les causes de cet effet sont nombreuses.

Maintenant nous ajoutons quelque considération à tout ce qu'on a dit dans le § 13.1.1 sur la courbure de l'image. En exprimant telle courbure comme rayon de courbure (**r**) de la partie centrale de l'image, où on suppose qu'elle soit assimilable à une calotte sphérique, on peut écrire en première approximation:

$$r = n \cdot f \qquad (66)$$

dans laquelle **r** est le rayon de courbure de l'image, **n** l'index et **f** la focale de la lentille. On peut appliquer la (66) à une lentille simple mince. Ce type de courbure, dit "de Petzval", représente un phénomène abstrait en absence d'astigmatisme. Dans un objectif de microscope, à cause de la forte épaisseur des lentilles, qui baisse leur puissance et demande une augmentation de courbure des surfaces, **r** présente des valeurs encore plus petites, par ex.:

$$r = f \qquad (67)$$

Maintenant, comme on a expliqué, dans une lentille divergente la courbure est de signe opposé à celle d'une lentille convergente. Si on imagine un ménisque divergent (§ 2.5) et on essaie à en

augmenter l'épaisseur, on peut montrer que sa puissance diminue jusqu'à s'annuler et s'inverser. Dans un "**ménisque épais**" dans lequel l'épaisseur est proche du rayon de courbure de la surface convexe[97], la puissance peut devenir positive même en étant la surface concave plus courbée de celle convexe: ça dépend de la position de l'objet. Un tel "ménisque épais" peut devenir donc convergent, même en conservant une courbure de champ négative. Tel ménisque peut par suite compenser au moins en partie la courbure de champ des autres lentilles convergentes de l'objectif. Dans la fig. 74 (à droite) on voit deux ménisques épais avec les petites surfaces concaves l'une en face de l'autre.

Les autres moyens pour réduire la courbure sont: l'usage de verres très réfringents (Klein), la réduction de la puissance de la lentille frontale, etc. Dans les objectifs plans à sec on utilise souvent une lentille frontale à forme de ménisque de forte épaisseur, c'est-à-dire une frontale dans laquelle la surface extérieure n'est pas plane, mais concave, avec un rayon plus petit de la surface interne convexe. Même ceci est un ménisque "épais" qui aide à réduire la courbure totale de l'objectif, mais avec un avantage: la surface externe, concave, de la lentille frontale peut être concentrique à l'objet, c'est-à-dire elle peut constituer une calotte sphérique dont le centre est dans le point axial du plan objet. De cette manière, les rayons émergents de ce point traversent la surface concave de la frontale selon la normale et ne sont pas réfractés. On réalise ainsi le cas aplanétique cité plus haut, avec tous les avantages décrits. La frontale à forme de ménisque cependant tend souvent à réduire la distance de travail WD.

Actuellement se répandent les objectifs "demi-plans", souvent indiqués par l'indicatif NPl ou S ou S Plan ou SPL, qui offrent une correction partielle de la courbure à l'avantage d'un nombre réduit de lentilles et d'un coût réduit. Ils représentent un compromis entre les objectifs classiques et les plans.

Parmi les plans en sens étroit, on peut distinguer quelques groupes:

 Faibles: il y a un élément (doublet ou autre), convergent, côté image, et un élément divergent, côté objet. L'élément divergent baisse la distance de travail WD et permet de rendre ces objectifs, même si très faibles, parfocales avec les autres. Cette recette est semblable à celle des téléobjectifs photographiques, mais renversée; on peut avoir une focale beaucoup plus longue de la distance frontale.

 Moyens à sec: en général il y a un ménisque épais à la place de la frontale hémisphérique; parfois une lentille divergente mince plus en haut. La concavité de la frontale a l'inconvénient déjà cité de se remplir de liquides ou de poussière et de rendre difficile le nettoyage. L'élément divergent supérieur peut se trouver très en haut et fonctionner comme une fenêtre de fermeture supérieure de l'objectif. Ceci facilite par contre son nettoyage.

 Forts: près de la lentille émergente (qui peut être négative) se trouvent un ou deux ménisques épais avec les concavités opposées; cette combinaison peut permettre d'avoir une distance de travail élevée. Dans les types à sec il peut y avoir aussi la frontale à ménisque. On peut trouver encore un ou plus éléments divergents minces, biconcaves ou ménisques (fig. 74, à droite).

[97] En réalité l'épaisseur doit être supérieure à une certaine valeur: $d \geq n\,(r' - r'') / n - 1$ (68)
dans laquelle **r'** et **r''** sont les deux rayons de courbure de la lentille.

19.2.4 – Les objectifs à grand champ

Dans ce qui suit nous parlons de "champ" de l'objectif en tant que champ image linéaire: voir le § 7.

Dans ce paragraphe on a expliqué qu'entre le champ image **Ci** et le champ objet **Co** il y a un rapport (entre leurs diamètres) égal à l'agrandissement linéaire M (formule (13), (14) et (15) dans le § 2.6.2.2). On a aussi expliqué (§ 3.1) que l'image donnée par l'objectif est dite "**image intermédiaire**" et qu'elle doit se former (§ 4.4) dans le premier foyer de l'oculaire; à cette place (voir le § 5) il y a un diaphragme dit "**de champ visuel**" qui définit la partie de l'image intermédiaire utilisée par l'oculaire. Le diamètre de tel diaphragme (ou "**index de champ**" ou "field number", voir le § 7.1) est donc le diamètre du champ image linéaire utilisé de l'objectif ou, plus simplement "le champ" de l'objectif.

Dans le § 7.2 on a vu que, dans les **oculaires "négatifs"**, la lentille de champ opère une contraction de l'image intermédiaire et le diaphragme de champ visuel est plus petit de l'image intermédiaire qu'on aurait en absence de la lentille de champ. Mais cela ne change pas la notion de "index de champ", qui se réfère à l'image intermédiaire effectivement utilisée, en ignorant la contraction de la part de la lentille de champ.

Une fois clarifié la notion de champ image de l'objectif, il est clair aussi que le **champ objet** correspondant est donné par la valeur du champ image divisée par l'agrandissement transversal linéaire de l'objectif (M_{ob}). Parfois il est utile de connaître le champ objet de l'objectif, par ex. pour savoir si un objet donné "sera tout vu" à travers l'objectif, et les données normalement connues sont: l'agrandissement de l'objectif (M_{ob}) et l'index de champ de l'oculaire (**s'**). Le diamètre du champ objet sera alors:

$$s = s' / M_{ob} \tag{69}$$

Dans le cas d'objectifs à conjuguée infinie, tout ce qui a été dit reste valide jusqu'à présent, en tenant compte, dans le calcul de M_{ob}, de l'effet de la lentille de tube. Si de plus il y a des accessoires intermédiaires entre objectif et oculaire avec un facteur de tube ($\mathbf{f_t}$) différent de 1, il faut tenir compte de ça aussi dans le calcul de M_{ob}.

Nous parlons donc du champ image de l'objectif réellement utilisé (ou de l'objectif + lentille de tube), c'est-à-dire de l'index de champ **s'** de l'oculaire. Il résulte que c'est l'oculaire ou son diaphragme de champ visuel DV, à déterminer le champ utilisé de l'objectif, et on a aussi expliqué à son temps qu'un constructeur sérieux ne conseille jamais pour un objectif donné l'usage d'oculaires avec un index de champ **s'** supérieur au champ nominal de l'objectif. Pour "**champ nominal**" nous entendons le champ de l'objectif à l'intérieur duquel le projeteur a réalisé une correction des différentes aberrations du point et du plan qu'il a jugé suffisante. Au dehors du champ nominal, certaines aberrations peuvent empirer brusquement et il faut donc se limiter à ces oculaires dont l'index **s'** ne dépasse pas le diamètre du champ nominal.

Il est utile aussi qu'une série donnée d'objectifs destinés à un certain instrument montre une valeur constante de champ nominal, de façon à donner des performances égales avec un oculaire donné.

Eh bien, en passé, et aujourd'hui aussi pour beaucoup d'instruments économiques, le champ nominal de l'objectif ne dépasse pas 18 mm. Dans ces conditions, avec un oculaire normal 10 ×, avec index **s'** = 18 mm, le champ angulaire 2α (toujours de l'oculaire) est égal à environ 40° et cela est défini par les constructeurs comme la limite vers le "grand champ", en accord avec une convention internationale (voir le § 20.1). Un objectif avec champ inférieur, ou égal, à 18 mm peut être alors considéré "normal". Par contre, les objectifs avec champ nominal supérieur à 18 mm peuvent se définir "**à grand champ**"; tels objectifs présentent en général un champ de 24 à 32 mm.

Comment est-il possible cependant d'exploiter un si grand champ avec des oculaires normaux? Ces derniers ont un diamètre extérieur de 23,2 mm pour lequel le diamètre du diaphragme

de champ visuel ne peut pas dépasser 20 mm environ; comme nous verrons, on surpasse l'obstacle avec des oculaires de diamètre extérieur de 30 mm. Mais aussi avec ceux-ci la valeur de l'index de champ **s'** ne peut pas dépasser 26 - 28 mm. Pour exploiter un champ nominal de l'objectif jusqu'à 32 mm alors on recourt à un "système de tube" ou "**changeur d'agrandissement**" (voir les §§ 25.1 et 25.2) avec un facteur de tube de 0,8 × ou même moins, lequel permet de contracter l'image intermédiaire dans la mesure demandé. Comme on a plusieurs fois expliqué, une réduction de l'agrandissement total va toujours à l'avantage de la définition.

Il va de soi qu'un grand champ de l'objectif n'est pas exploitable pleinement s'il n'est pas plan, au sens qu'il serait peu utile d'avoir un grand champ dont seulement une partie centrale, correspondant par ex. à 30% en diamètre, soit au point; l'usage de la mise au point devrait être trop fréquent. Presque tous les objectifs modernes à grand champ sont en effet du type plan.

Les notations pour indiquer les objectifs à grand champ sont GF ("Grossfeld" en allemand) WF ou EF ("Wide field" ou "Extended Field" en anglais) ou semblables. Ceux à champ normal peuvent être indiqués par contre avec un N ("Normal") ou NPL (Normal Plan).

19.2.5 – Les objectifs (à utiliser) sans lamelle

On a déjà expliqué (§ 13.2.3) que l'objet du microscope est souvent couvert d'une lame de verre aux surfaces planes et parallèles, avec épaisseur d'habitude égal à d = 0,17 mm; telle "**lamelle**" ou **couvre-objet** sert de protection, d'imperméabilisation de la préparation et de "fenêtre optique"; en effet elle présente à l'objectif une surface raisonnablement plane, pendant que les irrégularités de l'objet sont nivelées (optiquement neutralisées) par un milieu d'inclusion ou de "**montage**" (liquide, qui éventuellement durcit avec le temps) qui remplie l'espace entre lamelle et porte-objet, pénètre l'objet et le rend optiquement équivalent à ce qui l'entoure.

Le milieu de montage imprègne l'objet, le recouvre, et la lamelle l'oblige à terminer avec une surface plane du côté de l'objectif. Si un tel milieu a un index semblable à celui du verre, comme il arrive avec le classique "baume" du Canada ou avec ses succédanés synthétiques, on peut dire qu'entre objet et lamelle le système est optiquement homogène, comme si l'objet fît partie d'un milieu transparent homogène unique, limité au dessus et au dessous par une surface plane perpendiculaire à l'axe.

On a aussi expliqué que tel système transparent entre objet et objectif fait partie du système formateur d'image du microscope et fournit une contribution importante aux aberrations de l'objectif, spécialement à la sphérique. Son épaisseur doit donc être repecté avec soin et la tolérance sur sa valeur arrive à 1 ou 2μ avec les objectifs les plus forts à sec. Sur la majorité des objectifs il y a en effet la notation "0,17" ou "d = 0,17" qui indique l'épaisseur correcte du milieu interposé justement entre objet et objectif (lamelle + couche éventuelle de "milieu de montage").

En ce qui concerne les objectifs faibles, en vertu de leur ouverture limitée, ils sont peu sensibles à l'épaisseur de la lamelle entre 0 et 1 mm, par ex. Tels objectifs sont marqués avec un trait d'union (voir le § 19.1.5). La notation "**160 /–**" indique donc: longueur mécanique du tube Lm = 160 mm / épaisseur de lamelle (**d**) indifférente.

Maintenant il faut parler d'une autre catégorie d'objectifs, projetée exprès pour travailler sans lamelle. Ils viennent marqués avec la notation **d = 0** ou simplement **0** (ex. ∞ / 0 indique Lm = ∞; d = 0). Tels objectifs sont visés à des objets spéciaux: ••• objets opaques (alliages métalliques, roches, charbons, matériels céramiques, semi-conducteurs, etc.) dont on observe une surface polie; ••• frottis minces de cellules, sang, sédiments urinaires, excréta, etc. qui, pour le nombre élevé d'examens exigés par la routine médicale, demandent une observation rapide sans lamelle.

Dans le premier cas, l'éclairage du haut ("éclairage vertical" ou "incident" ou "réfléchie" ou "**épiscopique**") (§ 30.1) exige de l'objectif une réduction des reflets sur les lentilles pour limiter les pertes de contraste. En effet, le faisceau éclairant (épiscopie en "champ clair") arrive d'habitude à l'objet opaque à travers les lentilles mêmes de l'objectif qui sert de condensateur; chaque réflexion sur les lentilles crée un voile de lumière diffuse qui se superpose à l'image de

l'objet en baissant son contraste; si l'objet est peu réfléchissant (charbons, alliages foncées, etc.) la lumière diffuse peut être plus intense que l'image utile. Alors il faut éviter au moins le reflet sur la lamelle; l'objet est observé directement, soit-il après une lévigation ou autres types de préparation. L'objectif doit donc être projeté pour opérer sans lamelle.

Dans le second cas (observation de frottis minces), l'éclairage est normal, pour "lumière transmise" ou "**diascopie**", mais l'absence de lamelle exige encore un projet qui en tienne compte. Il y a seulement un problème, normalement ignoré par les apprentis; les éléments déposés sur le porte-objet (cellules, bactéries, etc.), après le séchage sortent de la surface du porte-objet et leurs marges constituent une petite marche. Le long de la marche on a des phénomènes de réfraction et réflexion totale qui présentent la marche même dans l'image comme un bord noir qui cache les détails. Pour éviter ce phénomène, comme on a expliqué, il faut créer une couverture mince de la préparation avec un matériel transparent (mince, pour ne pas créer un résidu de sphérique comme il ferait une lamelle non prévue par le calcul de l'objectif).

En pratique, il suffit de peindre ou vaporiser au "spray" sur la lame un voile de peinture transparente quelconque. Ils existent des produits spéciaux, mais la subtilité de la couche n'exige pas un respect précis des valeurs d'index, dispersion, etc. Ce **laquage** des préparations n'est pas dépourvu d'inconvénient, mais normalement il est bien préférable à l'observation des frottis simplement desséchés.

Les objectifs sans lamelle (d = 0), pour cette application, en diascopie, peuvent être tout à fait semblables structuralement à ceux épiscopiques sur cité, mais pour eux on peut avoir un plus petit soin dans l'élimination des reflets. En effet, les faisceaux réfléchis par les surfaces des lentilles en épiscopie joignent à l'oculaire directement, pendant qu'en diascopie ils viennent dirigés en bas et seulement avec une seconde réflexion vers le haut peuvent déranger l'image utile. La seconde réflexion atténue évidemment beaucoup le reflet.

Pour ce qu'on a expliqué dans le § 13.2.3, il devrait réussir clair que, avec des ouvertures supérieures à environ 0,4, on ne peut pas ignorer la contribution portée par la lamelle à la sphérique global du système formateur d'image. Spécialement au-dessus de NA = 0,6 il n'est pas possible d'utiliser un objectif normal (d = 0,17) avec une préparation sans lamelle[98], ni un objectif "sans lamelle" (d = 0) avec des préparations couvertes par une lamelle: l'image serait atteinte d'un résidu intolérable d'aberration sphérique, en montrant un bas contraste et perte de résolution.

En parlant de l'immersion homogène (§ 16.5) on a aussi expliqué que l'objectif à immersion est relativement insensible à la présence ou absence de la lamelle, et cela soit en diascopie qu'en épiscopie. En diascopie, cela signifie que toutes les préparations pourraient être confectionnées sans lamelle; il suffit de disposer d'objectifs à immersion pour les différents agrandissements désirés, et de ceci on a déjà parlé dans le § 16.3. Dans le cas de l'immersion "presque homogène" (§ 16.1), l'objectif à immersion n'est pas du tout indifférent à l'absence de lamelle justement pour la non identité d'index entre huile et lamelle.

Pour le cas de l'épiscopie, l'objectif à immersion n'offre pas seulement l'avantage de l'insensibilité à l'épaisseur de la lamelle; en effet, l'homogénéité d'index entre objet, huile et objectif élimine ou réduit beaucoup le reflet à la surface de l'objet (surtout quand l'objet est poli) et à la surface extérieure de la lentille frontale.

On a expliqué dans le § 16.2 qu'ils existent des objectifs épiscopiques à immersion calculée pour fonctionner avec des liquides à index élevé; on peut avoir ainsi une meilleure correspondance entre l'index de l'huile et l'index de l'objet et une meilleure réduction des reflets.

[98] En pratique, on peut utiliser un objectif normal (d = 0,17) aussi avec des objets non couverts par une lamelle avec une simple astuce: ou on appuie la lamelle simplement sur l'objet, peut-être en interposant un voile d'huile d'immersion si l'objet est plat, ou on recoupe une disquette d'une lamelle (contrôler auparavant l'épaisseur avec un "Palmer") et on la colle par ses bords sur la monture de la lentille frontale de l'objectif. Cette méthode est valide en diascopie, mais en épiscopie la lamelle produit un reflet nuisible.

19.2.6 – Le diaphragme à iris incorporé

Pour des raisons que nous examinerons plus loin (§ 30.2), un objectif (diascopique) destiné à la technique du fond noir ne peut jamais avoir une NA supérieure environ à 1,1.

Par suite, quand on doit utiliser pour le champ noir un objectif à immersion normale, avec ouverture d'habitude excédante 1,2, il faut en limiter l'ouverture avec un diaphragme interne spécial qui peut être fixe ("cylindres limiteurs", enfilés par le haut dans l'objectif) ou à iris, réglable avec une bague extérieure spéciale. La régulation de tel diaphragme porte à une réduction de NA et par suite de résolution et luminosité de l'objectif, mais elle doit procéder tant que le fond de l'image apparaît bien sombre (en supposant tout le système bien centré).

Certains constructeurs fournissent "de série" tous les objectifs à immersion avec diaphragme à iris, c'est-à-dire tous prédisposés pour le champ noir, mais ceci **est dangereux étant donné que il arrive souvent de fermer le diaphragme par mégarde, même sans champ noir, et ceci emmène l'opérateur distrait à travailler même pour long temps avec résolution et luminosité réduite sans s'en rendre compte; et celles-ci sont toujours des performances insuffisantes dans un objectif fort.**

19.3 – Les CLASSES de CORRECTION de l'OBJECTIF du MICROSCOPE

Nous parlons ici de la correction des aberrations, de leur réduction le plus possible poussée, d'une manière compatible avec les difficultés techniques et économiques.

En ce qui concerne la courbure de champ, on en a déjà discuté dans le § 19.2.3.2, et on a vu qu'il s'agit d'un problème techniquement résolu, soit-il avec augmentation des coûts.

La distorsion en général n'est pas si forte à déranger, et elle est réduite souvent par les mêmes astuces qu'on utilise pour réduire la courbure de champ.

Il nous reste à discuter des aberrations du point. En ce qui concerne les achromatiques (la sphérique, la coma et l'astigmatisme) on peut dire que chaque type d'objectif tâche de les minimiser, d'une manière compatible avec la complexité de structure permise par les coûts de production. Dans les recettes classiques des "apochromatiques" d'Abbe, ces trois aberrations étaient réduites à des limites négligeables; aujourd'hui on tend à une plus grande indulgence, surtout pour l'astigmatisme.

Pour les aberrations chromatiques, le discours est différent. Nous commençons avec l'aberration chromatique axiale (§ 13.2.1).

En laissant de côté les instruments jouet, tous les objectifs, même de modeste qualité, montrent au moins une correction "achromatique" dont le principe a déjà été décrit. Dans la fig. 40 (§ 13.2.1, pag. 93) sont montrées les courbes qui expriment la valeur de la conjuguée image **a'** (c'est-à-dire la position du point de meilleur focalisation) en fonction de la longueur d'onde λ. Dans l'objectif achromatique (fig. 40 B) on a vus comme la courbe soit repliée de manière que, à l'intérieur de certaines valeurs extrêmes, il est possible de trouver des infinis couples de valeurs de λ pour lesquels la conjuguée **a'** est la même. En pratique, l'œil juge comme position de meilleur foyer celle qui montre les moindres bordures colorées, et ceci arrive quand les images des couleurs les plus vives ("bleu" et "rouge") coïncident. En déplaçant la mise au point dans un sens, on pourra mettre au point sur l'image de couleur "vert"[99], c'est-à-dire dans le point correspondant à la moindre conjuguée, et on verra avec la plus grande défocalisation l'image construite par les longueurs d'onde aux extrêmes du spectre optique, où leur conjuguée est maximal; telle image correspondra aux régions spectrales du "violet" et du "rouge" et elle apparaîtra couleur cramoisie ou

[99] Les guillemets pour indiquer que les couleurs représentent des sensations subjectives et non pas des réalités objectives définissables avec des termes non équivoques. Ont été omises pour brièveté les indications des valeurs correspondantes de λ, qui seraient au contraire objectives.

pourpre. L'objet apparaîtra plus ou moins net mais entouré par un halo pourpre. En déplaçant la focalisation du côté opposé, on peut mettre au point sur l'image formée par les couleurs "violet" et "rouge extrême", et nous aurons la défocalisation de l'image formé par les radiations dans la région "du vert." L'image de l'objet sera entourée ainsi d'un halo vert. Halos analogues de couleur analogue apparaissent dans l'éclairage oblique unilatéral (§ 18.9), mais ils sont asymétriques: pour un objet au centre du champ, on verra des couleurs différentes de ses deux côtés, pendant que les halos formés par un éclairage normal, centré, sont symétriques. L'intensité, la largeur et la distance axiale (la distance entre les deux positions de focalisation à peine décrites), des halos colorés sont très différentes d'un objectif à l'autre; on doit au moins exiger d'un objectif achromatique qu'il existe une position de focalisation dans laquelle les halos colorés soient imperceptibles et l'image apparie neutre, c'est-à-dire sans couleurs, au moins au centre du champ. Si de plus l'image reste sans halos colorés appréciables même au dehors de la meilleure focalisation, il s'agira d'une solution surfine. Aujourd'hui, l'usage de verres ou matériels spéciaux et de méthodes de calcul automatique permettent aux objectif, même de prix moyen, d'atteindre ce raffinement, et l'image apparaît toujours neutre aussi avec une focalisation imparfaite. De l'autre côté on trouve des objectifs achromatiques, même de producteurs prestigieux, qui montrent d'une façon voyante des halos colorés au moindre signe de défocalisation.

Un contrôle de cette situation peut être exécuté en utilisant un oculaire moyen-fort, du type prévu par le constructeur et un objet aux bords nets et fort contraste comme un micromètre objet (§ 12.1) ou une suspension de limage métallique ou, encore mieux, un réseau métallisé à lignes claires et sombres alternées (§ 19.5.4). L'observation des halos soit exécutée au centre du champ.

La présence des halos colorés avec les achromatiques peut être en bonne partie atténuée avec l'usage, dans le système éclairant, d'un filtre vert, qui réduit l'intensité aux deux extrêmes du spectre optique. Le filtre vert a quelque inconvénient naturellement, surtout dans la photographie à couleurs; avec les objectifs bien corrigés il peut être du tout inutile.

Dans le § 13.2.3 (pag. 95) on a mentionné le "**sphérochromatisme**", c'est-à-dire le fait que l'aberration sphérique est liée à la longueur d'onde λ de la radiation qui traverse un système optique. La correction de la sphérique peut être bonne à une certaine λ, mais empirer pour les autres régions spectrales. Eh bien, même en supposant d'avoir corrigée complètement la chromatique axiale, la sphérique résultera corrigée seulement pour certaines régions du spectre.

Dans les objectifs **achromatiques** classiques, la sphérique vient corrigée pour la région centrale du spectre ("vert") pour le fait qu'en elle l'œil humain présente la plus grande sensibilité. Pour les autres régions du spectre, la sphérique résultera moins corrigée, en relation à l'habilité du projeteur et aux moyens permis par le constructeur (nombre de lentilles, usage de matériels spéciaux, tolérances de fabrication, etc.). La sphérique sera surcorrigée en général pour le "bleu" et souscorrigée pour le "rouge."

Dans le § 13.2.1 on a vu que le spectre secondaire résiduel de la correction achromatique peut être très atténué avec une augmentation de la complexité du système et avec un grand usage de verres spéciaux ou de matériels chers comme la fluorine, une fois d'origine naturelle, aujourd'hui souvent obtenue synthétiquement. La **fluorine** ou spath fluore (fluorure de calcium) est un minéral monométrique, et par suite monoréfringent; elle est utile dans la correction soit de la sphérique, soit de la chromatique à cause de son bas index ($n_D = 1{,}4339$) et de sa basse dispersion ($\nu = 97$) (voir le § 13.2.1). Malheureusement elle est très tendre et, spécialement quand elle constitue la lentille émergente de l'objectif, elle rend les opérations de nettoyage très critiques.

Dans les objectifs "**semi-apochromatiques**", avec les moyens décrits (§ 13.2.1, pag. 93), on obtient une réduction du spectre secondaire et par suite un aplanissement de la courbe de la fig. 40 B. Le type de correction est celui des objectifs achromatiques, mais la correction est meilleure. Le plus grand contrôle de la sphérique consent en outre la réalisation de plus grandes ouvertures, à égalité d'autres conditions. Comme on a déjà dit dans le § 13.2.1, les objectifs semi-apochromatiques représentent une gloire italienne; la maison Koristka en effet, ne voulant pas accepter tous les inconvénients des apochromatiques (voir plus loin), ni les limitations des achromatiques, imagina un type de correction au compromis, avec considérable simplification constructive et réduction du coût. Les semi-apochromatiques, dits aussi "**à fluorine**" ou dénommé avec des

noms spéciaux, représentent un compromis très avantageux; les corrections sont excellentes, l'ouverture de peu inférieure à celle des apochromats correspondants, la résistance aux agents mécaniques ou chimiques est excellente, le coût raisonnable. Cette solution est encore adoptée par beaucoup de constructeurs.

Dans les objectifs "**apochromatiques**" on réalise par contre la correction apochromatique (§ 13.2.1) de l'aberration chromatique longitudinale. En 1886 le Prof. E. Abbe, en ayant aux épaules une longue expérience en fait d'optique du microscope, voulut se libérer des compromis liés à la correction achromatique et obtenir des connaissances scientifiques et technologiques de cette époque les meilleurs résultats possibles. Près des usines Zeiss de Jena et avec la collaboration des verreries d'Otto Schott[100], furent réalisés des nouveaux verres ed des nouvelles "recettes" optiques. Les meilleurs objectifs possibles à ce temps naquirent ainsi. Le repli de la courbe qui exprime la conjugué image **a'** en fonction de λ, (voir la fig. 40 C) porta au résultat qu'il était possible d'avoir une image de meilleur focalisation avec la contribution de trois régions du spectre. Dans les régions intermédiaires, la variation résiduel de la conjuguée ("**spectre tertiaire**") était si réduite à pouvoir considérer la chromatique axiale comme du tout insignifiante. Le plus grand nombre de lentilles et l'ample usage de fluorine et verres spéciaux permirent en outre de corriger la sphérique pour deux régions spectrales, et réduire à niveaux imperceptibles la sphérique zonale, la coma et l'astigmatisme. Il s'agissait d'objectifs "diffraction limited" sur tout le champ. Aussi l'ouverture pouvait atteindre les meilleures valeurs possibles, (0,95 pour objectifs à sec et 1,4 pour ceux à immersion - voir le § 16) et le même on peut dire de la résolution. Aujourd'hui il est encore difficile de dépasser les apochromatiques d'Abbe en fait de chromatique axiale et d'autres aberrations du point. Les meilleurs résultats qu'on obtient aujourd'hui concernent la planéité du champ (§ 19.2.3.2), l'ampleur du champ (§ 19.2.4) et la chromatique latérale (§ 19.3.1)[101].

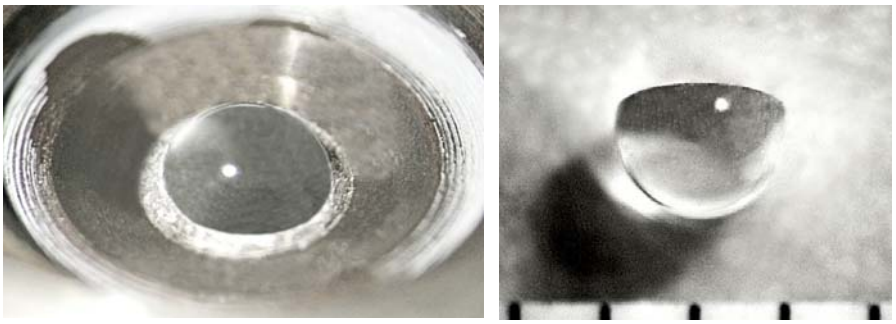
À côté de ces avantages, les apochromats classiques, aujourd'hui encore construits selon le schéma d'Abbe, présentent différents désavantages. Voilà les principaux.

 Le nombre des lentilles est beaucoup plus grand de celui d'un équivalent achromatique; au-delà du coût, ceci augmente le nombre des surfaces air-verre, donc la quantité de radiation réfléchie et diffuse; le contraste pour objets étendus empire.

 Certains verres optiques, surtout dans les vieux modèles, sont chimiquement instables et s'opacifient avec le temps; en cas extrêmes, les lentilles constituées par ces verres étaient collées au milieu d'autres deux lentilles de verre stable, en constituant une triplette.

 La courbure de champ, dans les types classiques, est plus grande que dans les équivalents achromatiques.

 La lentille frontale peut être plus qu'hémisphérique pour lequel elle ne peut pas être serrée dans la monture, mais seulement appuyée par les bords et collée; elle se détache ainsi aisément.



(Lentille frontale plus qu'hémisphérique, dans sa monture et détachée.)

 À part le plus petit contraste, déjà cité, il sera plus difficile de pouvoir utiliser les objectifs apochromatiques en radiation polarisée, à cause de la fluorine, pas toujours du tout isotrope.

Dans l'ensemble, la plus grande ouverture et la plus grande définition des apochromats les recommandent pour l'observation des structures fines et la reconnaissance de leur couleur; la plus grande ouverture et la plus grande luminosité de l'image les fait par suite préférer pour les techniques "peu lumineuses" comme la fluorescence (voir la (63) dans le § 19.2.1); la plus grande résolution permet l'utilisation d'oculaires plus forts.

---

[100] Friedrich Otto SCHOTT, chimiste et industriel du verre, allemand (1851-1935).

[101] Aujourd'hui quelques constructeurs offrent des objectifs apochromatiques corrigés de la chromatique axiale **et** de la sphérique pour quatre différentes longueurs d'onde.

À ce point il faut remarquer que les trois classes décrites d'objectifs (achro -, semiapo - et apo-chromatiques) représentent aujourd'hui des résidus de valeur historique, au sens que les progrès technologiques permettent maintenant de réaliser des série d'objectifs qui rentrent difficilement dans ces trois classes. Sauf les séries les plus économiques, qui peuvent rentrer souvent parmi les achromatiques classiques, aujourd'hui on produit des objectifs avec des performances améliorées (semiplans, achromatiques améliorés avec usage limité de fluorine, etc.) qu'il n'est pas facile à classifier. Si de plus on considère les objectifs plans (§ 19.2.3.2) et ceux à grand champ (§ 19.2.4) on a toutes les combinaisons Plan-achromatiques, Plan-semiapochromatiques, Plan-apochromatiques ou autant de versions à grand champ (GF) qui sont aussi souvent plan; mais il peut arriver de trouver des Plan-apochromats avec des forts résidus d'aberrations extra-axiales, pires que dans un achromatique classique, ou bien des achromatiques si bien faits à être classables comme semi-apochromatiques. Souvent, la distinction entre achromatiques et apochromatiques repose sur la valeur de l'ouverture des premier, essentiellement plus petite.

La contribution de l'oculaire à la chromatique axiale est en général modeste, mais pas négligeable et il est conseillé d'utiliser avec chaque objectif l'oculaire indiqué par le constructeur, ou exécuter des contrôles attentifs (avec un opportun réseau ou un objet aux forts contrastes) sur les halos visibles au centre du champ.

19.3.1 – La "compensation"

L'heure est venue de parler de l'aberration chromatique latérale (§ 13.2.2), dite aussi "**différence chromatique d'agrandissement**" par les auteurs allemands: **CVD** = Chromatische Vergrösserungsdifferenz.

Cette aberration, comme la chromatique axiale, dépend de la **dispersion de l'index**, c'est-à-dire de la variation de l'index de réfraction (**n**) des moyens transparent en fonction de la longueur d'onde λ. Elle cependant n'entraîne pas la variation de la conjuguée qui dérive de la variation d'index et de focale, comme dans le cas de la chromatique axiale, mais la variation de l'agrandissement: Deux manifestations de la même cause. L'image d'un objet est formée donc en réalité par autant d'images de différente couleur et de différentes dimensions que sont les longueurs d'onde présentes dans la radiation incidente. Le point axial de toutes ces images peut être unique, si la chromatique axiale est corrigée, mais, en augmentant le champ, c'est-à-dire la distance de l'axe, augmente la différence de position entre les images de couleur différente correspondantes à un point objet donné. Un objet hors de l'axe apparaît donc suivi par un halo coloré allongé (avec les couleurs de l'iris en lumière blanche) dirigé en étoile. La résolution et la reconnaissance de la couleur de petits objets hors du centre résulte difficile. C'est une des aberrations les plus fastidieuses.

Maintenant nous rappelons tout ce qu'on a dit dans le § 19.2.3.1; les systèmes classiques à petit agrandissement (jusqu'à 16:1 environ) peuvent être constitués par un ou deux doublets ou triplettes, singulièrement corrigés; l'objectif dans son complexe peut être bien corrigé de chromatique latérale et axiale. Avec ces objectifs il convient d'utiliser des **oculaires achromatiques** (§ 20.4.4) c'est-à-dire corrigés eux aussi au mieux par rapport aux aberrations chromatiques.

Si nous considérons par contre les objectifs achromatiques moyen-forts, à partir de 20:1, ils se basent en général sur la recette d'Amici, à son temps décrite: il y a une lentille frontale simple de forte courbure, même hémisphérique, et au moins une paire de doublets suivants. Étant donné que la frontale est simple, elle sera nécessairement souscorrigée, au moins par rapport à la chromatique; telle aberration pourra été compensée par une surcorrection des éléments optiques suivants. Le résultat final peut être bon, comme on a expliqué en parlant des objectifs achromatiques, mais seulement pour la chromatique axiale. En effet, la frontale est plus ou moins éloignée des éléments suivants et sur ceux-ci le point d'incidence d'un rayon oblique diffère en fonction de λ; par suite, change aussi l'ouverture côté image α' et, en appliquant la "condition des sinus" d'Abbe:

$$\frac{y'}{y} = \frac{n \operatorname{sen} \alpha}{n' \operatorname{sen} \alpha'} \qquad (70)$$

s'explique comme varie même l'hauteur de l'image **y'**, c'est-à-dire l'agrandissement. Avec les recettes classiques, ce résidu de chromatique latérale (CVD) des forts achromatiques est inévitable et on le retrouve aussi dans les apochromatiques et semi-apochromatiques forts; il correspond à une souscorrection. Pour obvier à cet inconvénient, E. Abbe projeta des oculaires spéciaux dits "**compensateurs**" dans lesquels était créée exprès un résidu de chromatique latérale de la même entité et de signe opposé par rapport à celui de l'objectif. L'image finale peut être ainsi complètement corrigée.

Ce système de **compensation** dans l'oculaire résout assez bien un des défauts des objectifs classiques forts de bon niveau (la courbure de champ et la chromatique latérale), mais il n'est pas dépourvu d'inconvénients: •• le nombre des lentilles et le coût peuvent être supérieurs à ceux d'un oculaire achromatique correspondant; •• l'image intermédiaire, qui se forme devant l'oculaire, est encore atteinte par la chromatique latérale CVD et elle ne peut pas être utilisée directement, comme on fait en général avec les systèmes macrographiques ou de télévision qui ne prévoient aucune compensation; •• la chromatique latérale surcorrigée de l'oculaire compensateur montre avec des halos colorés les objets qui se trouvent dans le premier foyer de l'oculaire (diaphragme de champ visuel, réseaux de tout genre, pointeurs, etc.); •• les oculaires compensateurs ne peuvent pas être utilisés avec des objectifs achromatiques faibles, parce qu'on trouverait dans l'image finale la surcorrection de la CVD; il faut ainsi posséder une double série d'oculaires: achromatiques pour les objectifs achromatiques faibles, compensateurs pour les forts objectifs de chaque type et les faibles apochromatiques (pas toujours, voir plus loin); •• la CVD, exprimée comme longueur du spectre (largeur des halos, c'est-à-dire différence de position d'un point image dans le "rouge" et dans le "bleu") est proportionnelle à peu près au champ (distance de l'axe) dans les objectifs, pendant qu'elle grandit avec une loi pas linéaire dans les oculaires compensateurs; ceci signifie qui la compensation peut être parfaite aux bords du champ ou dans quelque zone intermédiaire, mais elle restera incomplète dans les autres zones; •• le résidu de CVD n'est pas le même dans tous les objectifs forts et la compensation ne peut pas être parfaite dans tous les cas.

Tous ces défauts sont éliminés dans les modernes systèmes "CF", sous décrits.

Il va de soi que, dans le cas des objectifs avec conjuguée infinie, tous les discours sur la correction de la CVD doivent être appliqués au système 'objectif total + lentille de tube', étant donné qu'il est seulement après cette dernière que se forme l'image intermédiaire[102].

Pour reconnaître en pratique un oculaire compensateur d'un achromatique on peut observer l'indicatif gravé par le constructeur: C ou K ou "Compens" ou autre. Mais dans certains cas on peut commettre une faute d'interprétation. Si l'oculaire compensateur est positif (§ 7.2) en le mettant à l'œil et en le dirigeant vers une fenêtre, on verra le bord du diaphragme de champ visuel avec un halo rouge-orange (signe de surcorrection de la CVD); si l'oculaire compensateur est négatif, tel halo peut être moins distinct. Dans un oculaire achromatique positif le bord du diaphragme de champ apparaîtra en général sans couleurs pendant que, s'il est négatif, il apparaîtra bordé de bleu, étant donné que la correction de la CVD est opérée en partie par la lentille de champ, en partie par la lentille oculaire, et le diaphragme de champ est vu dans l'oculaire négatif seulement à travers la lentille oculaire. Cette règle empirique résout en général n'importe quel doute, mais il est bien toujours d'opérer un contrôle global du système objectif-oculaire: on met sous l'objectif une préparation avec des détails bien contrastés aux bords nets (suspension de limage, micromètre objet, réseaux spéciaux) et on l'observe attentivement aux bords du champ visuel: si l'épaisseur de la lamelle est correct, le système éclairant centré, l'ouverture du condensateur de peu inférieure à celle de l'objectif, la focalisation optimisée aux bords du champ, etc. on observera sur les marges des détails sombres de l'objet qui sont lointains de l'axe tous les résidus de CVD. Si la ligne de contact entre une zone claire et une sombre de l'image (partie sombre à

[102] Certains constructeurs (Zeiss par ex.) utilisent une lentille de tube simple spécialement corrigée pour compenser un résidu de CVD des objectifs; il est évident que tel résidu doit être le même pour tous les objectifs, vu que la lentille de tube est unique. Avec ces instruments, on peut utiliser seulement les objectifs du même constructeur.

l'extérieur) apparaît colorée en bleu, cela signifie que la compensation de la CVD est insuffisante, si elle est colorée en orange elle est excessive. Et on rappelle que tous les systèmes interposés entre objectif et oculaire, lentilles de tube, prismes, variateurs d'agrandissement, etc., peuvent donner une contribution à la CVD et le contrôle de cette aberration va fait par suite sur le système optique complet. Un couple objectif-oculaire qui résulte bien corrigé avec un tube monoculaire, par ex., peut montrer un résidu de CVD avec un tube bioculaire, à cause de la plus grande épaisseur en verre des prismes, ou vice versa.

On rappelle aussi que les oculaires compensateurs ne sont pas tous égaux: le résidu maximum de CVD et la loi de variation de la même CVD le long du champ peuvent différer d'un constructeur à l'autre et d'un oculaire à l'autre. La correction de la CVD, comme on a à peine expliqué, est un fait global et le résultat final dépend de tout ce qui se trouve entre l'objet et l'œil (ou l'émulsion photographique): le choix de l'oculaire est donc très critique et remplacer un oculaire compensateur avec un autre est toujours risqué. Il devrait résulter évident qu'**un objectif (achromatique ou non) fort avec un oculaire achromatique montrera un résidu de CVD souscorrigée, pendant qu'un objectif achromatique faible ou un système CF (voir dessous) avec un compensateur donnera une CVD surcorrigée**.

Jusqu'à présent, à l'égard de la CVD, nous avons établi une distinction entre objectifs achromatiques faibles (un ou plus doublets) et forts (formule d'Amici, avec lentille frontale simple), et on a vu que cette situation impose l'usage de deux équipements d'oculaires: achromatiques et compensateurs. Mais qu'est-ce qu'il arrive dans les apochromatiques et semi-apochromatiques ? À partir de plus d'un siècle, les constructeurs ont tâché de simplifier les choses. Les séries économiques d'objectifs achromatiques sont construites encore avec le critère dont on a parlé et se divisent en deux groupes: faibles, totalement achromatiques, et forts, avec un résidu de CVD, résidu pas constant pour tous les objectifs forts. Toujours pour économie, sont fournis avec ces objectifs seulement des oculaires d'un type: ou achromatiques, qui ne sont pas convenables aux forts objectifs, ou compensateurs, inconvenables pour les objectifs faibles, ou "semi-compensateurs" comme solution de compromis. Il s'agit donc d'un pis-aller.

Par contre, pour les objectifs de grande valeur (apo- ou semi-apochromatiques) l'usage s'est établi d'imposer aussi aux faibles objectifs, qui pourraient être corrigés complètement de CVD, le même résidu de CVD qui est inévitable dans les forts. Ainsi, avec une série unique d'oculaires, évidemment compensateurs, on devrait avoir toujours une correction totale de la CVD. Les réserves faites plus haut restent valides: il est toujours bien de contrôler une par une toutes les combinaisons "objectif-oculaire-systèmes intermédiaires" dont on dispose. La composition de ces combinaisons est toujours une affaire critique.

19.3.2 – L'achromatisme total et les systèmes CF

Les inconvénients du système de la compensation sont à peine été décrits, en particulier la variation pas linéaire de la chromatique latérale CVD dans les oculaires compensateurs.

L'idéal serait d'éliminer de tous les objectifs la CVD de manière que, avec des oculaires achromatiques, il n'y ait pas des halos colorés appréciables sur tout le champ, même avec des objets très contrastés. Si même la coma, la sphérique et l'astigmatisme fussent pas bien corrigés, on pourrait disposer de séries complètes d'objectifs qui résulteraient "diffraction limited" (voir le § 18.3) sur tout le champ. Cette dernière condition, on a dit, est bien réalisée dans tous les objectifs de microscope, mais seulement "sur l'axe" (au centre du champ).

Naturellement, un système optique "diffraction limited" n'est pas EXEMPTE d'aberrations; simplement, le cercle de confusion globale de ses aberrations "du point" n'est pas plus grand de la "centrique". De ceci on a déjà parlé, mais maintenant nous savons comment le dernier obstacle à surmonter pour avoir la condition "diffraction limited" sur tout le champ soit justement la CVD, et comment le système de compensation réussit à éliminer la CVD sur certaines zones mais pas sur toutes.

Voilà ainsi que les constructeurs[103], dans les dernières années, ont cherché et obtenu l'élimination de cet obstacle, la CVD. Élimination dans les limites de la centrique, évidemment. Pour ce but il a été nécessaire de corriger de CVD la frontale des objectifs forts, en remplaçant la lentille simple de la formule d'Amici avec un doublet ou avec d'autres systèmes. Dans son ensemble, la recette de l'objectif se complique et ce type de correction est réservé aux systèmes de grand coût. Mais le résultat peut être excellent. Au-delà du coût, les objectifs totalement corrigés par CVD (nommés "**systèmes CF**" ou "color free" ou "chrome free") peuvent avoir seulement un défaut: le plus grand nombre de lentilles, et par suite de surfaces air-verre, et donc de lumière réfléchie et diffuse, qui peut baisser le contraste. Mais en théorie ils peuvent être optiquement parfaits sur tout le champ en ayant presque éliminé le dernier obstacle sur lequel s'étaient ensablés les apochromatiques classiques.

Un avantage du système CF reste en ce que la correction de la CVD dans l'objectif rend inutile la surcorrection dans l'oculaire compensateur; donc la non linéarité de la CVD dans l'oculaire reste presque sans effet. Autres avantages sont: •• tous les objectifs de n'importe quel série peuvent être totalement achromatiques et donc interchangeables (au moins au point de vue de la CVD; voir sur ce problème le § 19.4.2). Naturellement, aussi les oculaires devront être tous achromatiques, et dans la même mesure. •• Les oculaires, ne devant plus être surcorrigés, peuvent avoir une structure plus simple des compensateurs équivalents. •• L'image intermédiaire est déjà corrigée de CVD et elle peut être utilisée directement pour la photographie, la reprise de télévision, etc. •• Le bord du diaphragme de champ visuel, le micromètre-oculaire et semblables sont vus à travers un oculaire achromatique et donc sans halos colorés. •• La correction de la CVD permet d'atteindre des valeurs de champ, jusqu'à 32 mm (Jena), qui ne seraient pas possibles avec des systèmes à compensation à cause de la non linéarité de la CVD. •• Les variantes structurales des objectifs CF aident aussi dans la correction de la courbure de champ.

La correction de la CVD n'interfère naturellement pas avec les autres caractéristiques des objectifs; donc, les objectifs à système CF peuvent présenter une correction, de la chromatique longitudinale, de type achromatique ou apochromatique, ils peuvent être à champ aplani ou pas, à champ grand ou normal, corrigés pour l'usage de lamelle ou pas, à sec ou à immersion, à seconde conjuguée finie ou infinie, etc. En réalité, étant donné l'engagement technologique demandé par ces solutions, il est fréquent que les nouveaux objectifs CF soient en même temps plans, à grand champ, à seconde conjuguée infinie.

19.3.3 – Les objectifs monochromatiques et polychromatiques

Il s'agit d'objectifs spéciaux, visés seulement sur des applications spéciales.

Il y a des cas dans lesquels il est utile d'éclairer l'objet du microscope avec des radiations pas optiques: ils existent des instruments basés sur les rayons X ou les électrons ou ultrasons, mais il s'agit de cas qui s'éloignent beaucoup de la microscopie optique, soit au point de vue technique que d'application (voir, dans ce site, l'art. n° 42, en italien).

Plus semblables au microscope optique classique sont les microscopes qui utilisent de la radiation ultraviolette (UV) ou infrarouge (IR) (voir le § 1.1). Ces radiations sont utilisées pour observer des objets qui seraient trop transparents ou trop opaques dans le spectre optique "visible". Par ex. l'exosquelette des insectes, opaque en conditions normales, transparent en IR; certaines structures du noyau cellulaire, bien contrastées en UV, etc. Parfois l'UV est utilisé pour des mesures quantitatives d'absorption et par suite pour une évaluation volumétrique du DNA et d'autres substances opaques à l'UV.

Dans ces cas se présentent deux problèmes principaux:

 Les verres optiques normaux sont peu transparents soit à l'UV, soit à l'IR, autant plus que la longueur d'onde s'éloigne des limites optiques (environ 0,4 - 0,8μ = 400 - 800 nm).

[103] Horst Riesenberg chez Zeiss et Zenji Wahimoto chez Nikon.

 Tout le système optique doit être plus ou moins corrigé des aberrations pour ces radiations spéciales.

Si de plus on pense que l'œil humain est insensible soit à l'UV qu'a l'IR, se présentent deux solutions possibles pour consentir à l'observateur de préparer le travail (encadrer, focaliser, etc.) avec une image visible, avant de la photographie:

 "on convertit" l'image dans l'UV ou l'IR en image optique avec des opportuns dispositifs électroniques "**convertisseurs d'image**"; ces dispositifs possèdent une surface sensible d'entrée sur laquelle on projette l'image UV ou IR et un écran luminescent en sortie dans lequel l'image réapparaît en radiation optique; on observe ainsi dans le visible et on éclaire l'objet dans l'UV ou dans l'IR;

 on illumine l'objet avec une radiation mixte UV + visible, ou IR + visible, de manière que l'UV ou l'IR permettent le travail spécifique et le "visible" permet l'observation visuelle.

Il y a encore les observations de la fluorescence présentée par certains objets éclairés en UV, mais il s'agit ici d'une technique qui rentre dans la microscopie spéciale, traitée dans le § 30.6.

Maintenant relégués au passé sont les objectifs "**monochromatiques**"[104], constitués seulement par des lentilles en silice; étant donné que dans ce cas on exploite seulement la réfraction, ils peuvent rentrer dans la catégorie générale des systèmes "**dioptriques**." Nous verrons au chapitre suivant qu'ils existent aussi des systèmes "**catoptriques**" qui exploitent la seule réflexion et "**catadioptriques**", contenants soit miroirs (moyens réfléchissants) que lentilles (moyens réfringents).

Aussi pour la "**silice (fondue**", obtenue par fusion du quartz**)** il faut une mise au point: il s'agit d'un matériel vitreux obtenu par le refroidissement d'une pâte contenant du sable quartzeux chauffé jusqu'au point de fusion. Le quartz au contraire est un minéral naturel à l'état cristallin, pendant que la silice est un matériel artificiel à l'état vitreux. Aussi les ampoules électriques "au quartz-iode" n'ont pas un bulbe constitué de quartz mais de silice. Les deux matériels sont de toute façon chimiquement identiques: il s'agit de bioxyde de silicium (SiO_2), au moins en grande partie. Eh bien, la silice est assez transparente à l'UV et elle a été par suite utilisée pour les objectifs dioptriques "**monochromatiques**" destinés à l'UV. Ces systèmes, n'étant pas achromatisés, doivent être utilisés en radiation monochromatique, à l'intérieur de bandes déterminées de l'UV.

Plus pratiques sont les objectifs dioptriques "**polychromatiques**" dans lesquels on porte à coïncider l'image pour une valeur de longueur d'onde dans l'UV et une ou deux valeurs dans le spectre optique. Cadrage et mise au point peuvent donc être effectués visuellement. Pour ces derniers objectifs on utilise même de la fluorine. Il y a aussi des types à immersion, mais comme liquide on utilise la glycérine à cause de sa transparence en UV.

Exemple typique de la catégorie des objectifs dioptriques polychromatiques sont les "Ultrafluar", réalisé par C. Zeiss en 1959, destinés à la microspectrophotométrie et à la recherche sur les tumeurs.

19.3.4 - Objectifs catoptriques et "long distance"

Comme on sait, les lois de la réflexion sont indépendantes de la longueur d'onde λ: le parcours d'un rayon réfléchi ne dépend pas de λ, contrairement à tout ce qu'arrive dans la réfraction, (phénomène de la dispersion, voir le § 2.3.1). S'il est ainsi, un système optique formé par des miroirs, de n'importe quelle forme, est toujours parfaitement achromatique. Celle-ci est une des raisons pour lesquelles on construit avec des miroirs, paraboloïdal ou semblables, les objectifs de la majorité des télescopes.

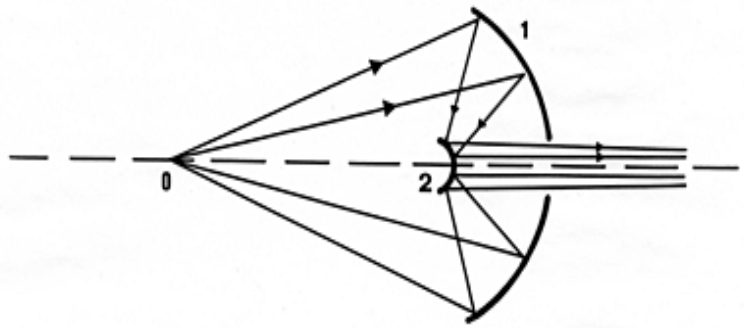
En parlant d'UV et IR, et de l'opportunité d'avoir des objectifs pour microscope corrigés sur des amples bandes du spectre, il semblerait qu'un objectif formé par des miroirs dût être capable de donner une image corrigée de chromatique pour n'importe quelle région spectrale. Cela est vrai, mais il y a des autres limitations comme celle du pouvoir réfléchissant des miroirs qui n'est

[104] Il s'agit d'un projet initial d'A. Köhler et M. von Rohr du 1904, usines Zeiss de Jena.

pas indépendant de λ.

Le schéma de base des objectifs pour microscope formé seulement par des miroirs (**catoptriques**) est le classique à deux miroirs sphériques; le premier miroir à recevoir le faisceau provenant de l'objet (fig. 75) est le concave, plus loin de l'objet même; il transforme le faisceau divergent provenant de l'objet en un faisceau convergent, qui grave sur le second miroir, plus petit, convexe. Le faisceau vient rendu plus ou moins parallèle (ça dépend de la seconde conjuguée de l'objectif qui peut être finie comme d'habitude {160 mm ou semblables} ou infinie) par le second miroir, qui est convexe, contrairement au premier. Le second miroir crée une zone d'ombre centrée, c'est-à-dire il oblitère la zone centrale du faisceau incident sur l'objectif et, en correspondance de cette ombre, le premier miroir porte un trou qui sert au passage du faisceau qui concourt vers l'image intermédiaire. La pupille d'objectif n'est donc pas toute libre comme dans un objectif dioptrique normal, mais elle porte une obturation centrale: en regardant du côté de l'oculaire on voit une image rapetissée du premier miroir, créée par le second miroir, et au centre d'elle une tache sombre qui est l'image, rapetissée elle aussi, du trou au centre du même miroir.

Fig. 75



Telle obturation porte à une altération de la forme de la centrique, c'est-à-dire à une réduction d'intensité (jusqu'à 20% dans les cas pratiques) du disque d'Airy (voir le § 18.3) et à une augmentation d'intensité des anneaux, jusqu'au qua-druple, le tout en relation au rapport entre ouverture maximum et mini-mum de la pupille annulaire créé par l'obturation.

En pratique, l'obturation n'occupe pas plus du 20% de la surface de la pupille. Tout ceci correspond au fonctionnement d'un objectif dioptrique atteint d'aberration sphérique.

Pour réduire cet effet néfaste de l'obturation centrale, il y n'a pas que réduire l'obturation même, lequel réussit mieux avec les objectifs **cata-dioptriques** qui, au-delà des deux miroirs, contiennent aussi des lentilles. Il y a différentes solutions pratiques pour les objectifs cata-dioptriques, mais la disponibilité de marché est réduite à peu de constructeurs.

Les objectifs catoptriques et cata-dioptriques ont en général une distance de travail (voir le § 19.1.3) très élevée, en vertu de la structure schématisée dans la fig. 75. Donc beaucoup de constructeurs choisissent cette structure quand ils entendent offrir des objectifs avec une distance de travail (WD) particulièrement élevée. Sont communs les objectifs catoptriques avec M = 40:1 et WD = 10 - 15 mm; on rappelle cependant que, si un normal objectif dioptrique avec M = 40 a une WD inférieure a 1 mm, en revanche il a une NA d'au moins 0,65; le catoptrique correspondant a une NA difficilement plus grande de 0,5. L'augmentation de WD permise par l'objectif catoptrique se paie donc en termes de:

1) réduite NA;

2) altération de la centrique et par suite une légère perte de définition;

3) augmentation de l'encombrement de l'objectif, pour le grand diamètre du premier miroir. Sur un revolver normal, aux deux côtés d'un objectif catoptrique, il faut souvent laisser deux trous vides.

Pour obtenir une partielle augmentation de la distance de travail WD, beaucoup de constructeurs restent donc fidèles aux recettes dioptriques classiques, à seuls lentilles. Ils existent en commerce des objectifs forts, aussi à immersion, pour applications spéciales, avec une distance de travail de l'ordre de 2 mm. Ces objectifs dioptriques forts avec élevé WD, à égalité d'agrandissement et par suite de focale, doivent avoir au moins la lentille frontale plus grande de l'habituel pour conserver une ouverture analogue à celle des types normaux. Les raisons de ceci sont intuitives et ce fait permet de les reconnaître à première vue.

Tous ces objectifs avec distance de travail sensiblement supérieure à celle d'un objectif diop-

trique classique, sont commercialisés avec le nom de "**long distance**" (LD) ou "**long working distance**" (LWD). Leur longueur mécanique **Lo** est quelque fois supérieure au normal, au moins dans les types dioptriques. Sons fréquentes les solutions dédiées à l'observation des circuits intégrés avec WD jusqu'à 30 mm, grandissement jusqu'à 50:1, **Lo** jusqu'à 85 mm.

Pour finir, on a déjà expliqué que la réflexion est achromatique et donc un objectif catoptrique pur (seuls miroirs) peut être absolument achromatique, c'est-à-dire dépourvu d'aberrations chromatiques, et peut fonctionner soit en UV que dans le "visible" (c'est-à-dire dans le spectre optique) et dans l'IR. Mais on a déjà mentionné l'existence de difficultés (pouvoir réfléchissant variable des miroirs, aberration sphérique, etc.), et pour ça seulement dans certains cas les objectifs catoptriques viennent destinés aux bandes UV ou IR; on recourt plus souvent aux formules mixtes (cata-dioptriques) avec des lentilles en silice, fluorine ou autres matériels transparent à l'UV ou à l'IR. D'ailleurs, si un objectif catoptrique est utilisé avec des préparations couvertes par une lamelle, il devient "*ipso facto*" un cata-dioptrique étant donné que la lamelle fait partie du système formateur d'image et fournit une contribution aux aberrations du système, surtout sphérique et chromatique, à cause de la réfraction à sa surface supérieure. Il faut, comme d'habitude, se conformer aux indications du constructeur.

Pour être exhaustif, nous voulons citer ici les objectifs "pour segments" destinés aux observations en radiation polarisée avec la "platine universelle" sur des préparations renfermées entre deux "segments" ou demi-sphères de verre (voir les §§ 27.7.4 et 30.7): il s'agit d'objectifs dioptriques à grande distance de travail, à bas agrandissement, opportunément calculé en vue de la présence des demi-sphères.

Ont été produits aussi des objectifs "Zooms" (à focale variable), de bas agrandissement; il s'agit en général de systèmes économiques, aux corrections limitées, en usage sur les instruments pour amateurs.

19.4 – Le CHOIX et l'ÉQUIVALENCE des OBJECTIFS

De tout ce qu'on a dit, il résulte évident que les caractéristiques que présente un objectif de microscope sont nombreuses, et tels caractéristiques définissent les propriétés structurales et fonctionnelles du système en permettant apparemment l'existence de beaucoup de versions semblables.

19.4.1 – Caractéristiques mécaniques

- Type de fixation, pas du filet, etc.
- Longueur mécanique **Lo**
- Distance de travail WD
- Dimensions extérieures

Quand deux ou plus objectifs doivent être montés sur le même statif ou revolver, ils doivent être interchangeables, c'est-à-dire **équivalents** au point de vue mécanique; ceci arrive quand ils ont le même type de fixation, la même longueur mécanique **Lo** et un diamètre extérieur pas supérieur à la distance entre les trous du revolver.

Indépendamment de l'interchangeabilité, il faut vérifier aussi la **compatibilité** mécanique entre objectif et statif, qui peut être empêchée par un différent type de fixation, par les dimensions (on a spécifié que certains objectifs catoptriques ou épiscopiques pour fond noir ont un diamètre extérieur de plusieurs centimètres) et aussi par la longueur mécanique **Lo**. En effet, si elle est trop petite, il peut arriver que l'objectif ne réussisse pas à se rapprocher assez de l'objet, c'est-à-dire la course de la mise au point soit insuffisante et on ne réussisse pas à mettre au point. Par contre, si elle est excessive, elle peut non seulement ne pas consentir la mise au point, mais elle peut provoquer le contact entre objectif et préparation quand on tourne le revolver en passant d'un objectif à basse **Lo** avec un objectif à **Lo** supérieure.

On a déjà expliqué que, d'un instrument de qualité, on doit exiger la parfocalité (§ 19.1.2) et aucun autre objectif ne doit toucher la préparation quand on met au point avec un premier objectif et puis on tourne le revolver.

19.4.2 - Caractéristiques optiques

Au point de vue de l'équivalence ou interchangeabilité optique, il faut considérer:

 Le champ image "nominal" de l'objectif (§ 19.2.4), celui dans lequel le constructeur croit de fournir une correction suffisante des aberrations.

Étant donné un certain oculaire avec un index de champ **s'** (voir le § 7.1), si on utilise des objectifs doués d'un champ avec le même diamètre, tout va bien; si le champ de l'objectif est plus grand de **s'**, il va partiellement perdu; s'il est plus petit que **s'**, alors l'oculaire accueille une zone marginale du champ de l'objectif dans laquelle le constructeur ne garantit pas les corrections, et la définition sera mauvaise.

 La correction de la courbure de champ

Si on utilise un système photo-micrographique sur un champ image moyen-grand avec un objectif plan, et après on change avec un objectif non pas plan, il peut arriver de trouver l'image défocalisée aux marges de la photo.

 Correction de la chromatique latérale CVD (§ 19.3.1)

On a déjà expliqué que les objectifs achromatiques faibles et les systèmes CF (§ 19.3.2) exigent un oculaire achromatique, pendant que les objectifs forts achromatiques, les apochromatiques et les semi-apochromatiques exigent un oculaire compensateur et pas toujours avec le même degré de compensation. Une erreur d'accouplement objectif-oculaire peut endommager beaucoup la définition, au moins aux marges du champ visuel.

 Correction de l'astigmatisme, qui peut être en partie compensé par un oculaire de type spécial (§ 20.4.3)

 Parfocalité

On a déjà vu dans le § 19.1.2 quelles sont les causes de perte de parfocalité; le plus importants: longueur mécanique du tube (Lm) incorrecte; présence de "tubes intermédiaires" ou porte-oculaires non corrects; régulation erronée des embouts porte-oculaires ou, dans certains cas, de la distance inter-pupillaire; oculaires avec diaphragme de champ visuel en position erronée; oculaire réglable ne pas disposé sur la position 0.

Dans le système objectif-oculaire entrent donc comme cause d'erreur aussi le tube, les systèmes intermédiaires, les tubes porte-oculaires, les embouts porte-oculaires. Mais de toute façon les objectifs, pour être interchangeables, doivent posséder la même longueur **Lo**, comme on a cité.

 Correction pour usage avec ou sans lamelle

Deux objectifs d'ouverture supérieure à 0,4 sont interchangeable seulement si les deux sont calculés pour l'usage avec ou sans lamelle, à moins de changer la préparation quand on change l'objectif.

En concluant, différents objectifs d'égal ou différent agrandissement sont interchangeables, et peuvent être correctement utilisés sur le même statif et avec les mêmes oculaires, seulement si sont satisfaites les conditions sur recensées.

19.4.3 - Le choix

Nous considérons le cas dans lequel on dispose ou on doit choisir entre deux ou plus instruments ou au moins entre deux ou plus séries d'objectifs de type différent.

Il y a des séries dédiées aux applications spéciales. Voyons les plus communes, sans entrer dans les détails:

 Objectifs à contraste de phase; avec les opportuns diaphragmes, ils sont dédiés à l'observation d'objets transparents non colorés (§ 30.4).

 Objectifs pour radiation polarisée; avec les filtres opportuns, ils servent à l'observation et à certaines mesures sur des objets anisotropes, optiquement biréfringents: matériels cristallins, parois cellulaires végétales, amidon, tissu corné, osseux ou musculaire, composants nucléaires, fibres de type différent, etc. (§ 30.7).

 Objectifs épiscopiques, pour l'observation des corps opaques ou de toute façon d'objets non couverts par une lamelle (§ 30.1).

 Objectifs pour l'UV et l'IR (voir le § 19.3.3).

Il y a encore les séries pour utilisation générale, déjà recensées, douées de corrections spéciales:

- achromatiques, apochromatiques, semi-apochromatiques et CF (§ 19.3);
- plan et non plan (§ 19.2.3.2);
- à grand champ ou à champ normal (§ 19.2.4);
- "long distance" pour les platines spéciales, les «chambres» fermées et chauffantes/refroidissantes, etc. (§ 19.3.4).

Entre les catégories précédentes il y a d'habitude un ample choix, au moins au moment de l'achat. **Voilà quelque critère de choix.**

-- Si on cherche le meilleur contraste, un achromatique classique peut donner les meilleurs résultats, au moins pour les objets étendus, en vertu du plus petit nombre de lentilles (voir le § 17.1.2). Il peut fonctionner aussi assez bien en radiation polarisée.

-- Si on cherche la meilleure résolution (la plus grande valeur théorique) on choisira les types avec la plus grande ouverture (§ 18.6) et par suite les apochromatiques, peut-être à immersion. Ceci vaut aussi pour la fluorescence (§ 30.6), étant donnée la basse luminosité des images.[105]

-- Pour la meilleure définition, ils seraient encore à préférer les apochromatiques ou les systèmes CF, mais avec quelque réserve sur les aberrations extra-axiales (qui peuvent être négligées dans certain modèles) et sur le contraste, et sans référence à l'ouverture qui sera en général plus grande.

-- La résolution photographique, celle qui s'exprime en lignes/mm dans l'image finale, est meilleure dans les systèmes avec le minimum d'agrandissement, soit d'objectif que d'oculaire, et ceci est facilité, à égalité de format photographique, par les systèmes à grand champ. Dans la photographie d'objets minces sont à préférer les plans.

-- À première vue, un objectif plan à grand champ et CF devrait être toujours le meilleur,[106] mais il contient un plus grand nombre de lentilles et son contraste peut être plus petit que dans les types les plus simples. En général, il ne sera en outre pas convenable à la radiation polarisée et au DIC (contraste interférentiel différentiel d'après Nomarski) et il peut avoir un rendement photométrique plus petit des types normaux correspondants, toujours pour le plus grand nombre de surfaces air-verre. Un rendement plus petit est importun dans les observations en fluorescence pour laquelle il est préférable de recourir aux systèmes les plus simples, peut-être à immersion, et si possible apochromatiques non plans (pour la plus grande ouverture et par suite luminosité). Toujours pour augmenter le rendement photométrique, il est bien de réduire l'agrandissement total,

---

[105] Attention: en fluorescence on préfère d'une façon générale les objectifs apochromatiques pour leur plus grande ouverture, mais le plus grand nombre de lentilles et l'usage de verres spéciaux en réduisent la transparence, spécialement en UV (limite importante en épiscopie).

[106] L'aplanissement du champ est indépendant de la correction des autres aberrations.

sans réduire l'ouverture de l'objectif.

D'ailleurs, le planage de l'image provoque souvent une aggravation de l'astigmatisme.

-- Si on cherche la plus grande profondeur de foyer ou pénétration (§ 14) on tâchera d'utiliser un objectif à petite ouverture; étant donné que cela donnera en général un petit agrandissement, on pourra l'accoupler à un oculaire fort en ignorant les limites du grossissement utile (§ 18.12). Si par contre on désire exécuter une "**section optique**" (c'est-à-dire mettre au point une couche la plus mince possible dans un objet) on cherchera la moindre pénétration, donc la plus grande ouverture (le plus fort agrandissement vaut seulement dans l'observation visuelle, voir la (41) dans le § 14.1).

-- Pour avoir la plus grande distance de travail WD, à part les types spéciaux sur cité, on fera recours aux types les plus faibles, mais on ne peut pas donner des règles précises; les objectifs plans ont en général une réduite WD; tout dépend de la structure optique ou "recette" de l'objectif.

On rappelle aussi que les apo- et semiapo-chromatiques pas plan peuvent avoir une courbure de champ plus forte des correspondants achromatiques.

Dans l'ensemble, en accouplant un objectif faible avec un fort oculaire augmente la pénétration, la distance de travail et le champ objet; diminue l'ouverture, la résolution et la luminosité. Un objectif fort + faible oculaire donnera par contre la plus grande NA, résolution et luminosité, mais aussi une pénétration et une distance de travail plus petites. D'un faible oculaire il y a aussi à s'attendre un champ angulaire plus petit.

Beaucoup de choses dépendent de l'objet: un objet aux contrastes forts sur zones étendues, surtout où les couleurs n'ont pas d'importance, se lit mieux avec un simple achromatique; les objets fins qui se reconnaissent en base à la couleur (comme les granulations des leucocytes), se lisent au mieux avec un bon apochromat ou un CF. Quand il est possible, utiliser toujours des systèmes à immersion, les avantages desquels ont été énumérés dans le § 16.2.

Finalement il est sous-entendu que les performances de l'objectif peuvent déchoir brusquement pour différentes causes, toutes citées à son temps: longueur erronée Lm du tube (§ 13.2.3) ou épaisseur erronée de la lamelle (encore § 13.2.3), dispositifs intermédiaires erronés (§ 25), type d'oculaire ne pas indiqué, éclairage ne pas centré, diaphragme d'ouverture trop fermé (§ 18.9) ou trop ouvert (§ 18.10), diaphragme de champ trop ouvert (§ 17.1.1), défauts de propreté ou de fabrication, huile d'immersion sur les objectifs à sec, huile d'immersion avec des caractéristiques pas indiquées (§ 16.1), etc.

Au point de vue mécanique, les objectifs «à pompe» (§ 19.1) sont évidemment les plus protégés des fautes de mise au point; et ils sont très conseillés quand ils sont forts (basse WD).

19.5 - Le CONTRÔLE de l'OBJECTIF

(voir, dans ce même site, l'article n° 18 : «Comme contrôler … » (en français))

Les discours qui suivent se réfèrent à l'objectif qui est l'organe le plus déterminant pour les propriétés de l'image finale du microscope mais, au moins sous certains aspects, s'appliquent aussi à l'oculaire et aux systèmes intermédiaires de tout le système formateur d'image.

Les contrôles sur un système optique peuvent concerner trois aspects distincts.

19.5.1 – Défauts contingents, liés à des conditions temporaires

 Propreté défectueuse.

Il s'agit d'examiner, peut-être avec une lentille d'agrandissement ou un microscope stéréoscopique, la lentille frontale et la lentille émergente de l'objectif. Au-delà de la poussière, empreintes digitales etc., il est facile de trouver sur le frontale quelques résidu d'huile d'immersion ou du liquide de montage (suspension aqueuse de cellules, baume du Canada, etc.). Pour l'huile et le baume on conseil en général un vieux tissu de coton bien lavé, humidifié avec du xylol ou autres sol-

vants des résines. Certaines huiles sont solubles en alcool ou solvants pas usuels. En certains objectifs, spécialement apo- ou semiapo-chromatiques, la lentille émergente peut être constituée par de la fluorine ou autres matériels tendres; il faut donc procéder avec beaucoup de soin à la propreté, par le moyen de papier doux (par ex. papier "optique") ou de vieux mouchoirs de coton bien propres et essuyés loin de la poussière[107]. Dans le cas de la lentille émergente, rarement servira un solvant, sauf le cas d'empreintes digitales; mieux essayer avec le xylol, en cas de faillite avec de l'alcool, toujours en minime quantité: si le liquide coule à l'intérieur du système ou entre lentille et métal il peut endommager les ciments des lentilles. Parfois il peut suffire de respirer sur la lentille avec la certitude qu'il s'agit d'eau distillée. Nous avons dit "respirer", c'est-à-dire à bouche ouverte, et ne pas "souffler" aux lèvres étroites pour ne pas projeter sur les lentilles quelque goutte de salive que plus tard il serait difficile d'enlever.

La lentille émergente peut posséder un "**traitement**" antireflet, qui est plus délicat que la surface de la lentille et il se raie aisément. La présence d'un traitement se révèle bien étant donné que les reflets à la surface de la lentille apparaissent colorés, d'habitude en bleu-violet.[108]

Pendant le nettoyage, il est inutile de s'acharner sur un particulier pépin de **poussière**, et cela pour deux bons motifs. En premier lieu, le grain occupera toujours une fraction dérisoire de la surface de la lentille et la radiation absorbée ou diffuse par lui sera toujours négligeable. En second lieu, les lentilles peuvent être rayées par ce pépin pendant le frottement lié au nettoyage: les grains de nature minérale sont souvent plus durs du verre. D'ailleurs, les lentilles de l'objectif avec la poussière qui s'y est déposée se trouvent très lointaines de l'image intermédiaire et elles ne viennent pas vues au point avec l'objet.

La poussière vice versa est nuisible, en quelques cas spéciaux, spécialement si elle se dépose sur les surfaces de la préparation ou des lentilles frontales du condensateur et de l'objectif: en champ noir, à cause de la lumière diffuse et de la perte de contraste (§ 18.10); en fluorescence, en tant que beaucoup de fibres textiles sont fluorescentes; en radiation polarisée, en tant que la poussière minérale, végétale, ou aussi d'origine synthétique, est en général biréfringente; en contraste de phase en tant qu'elle peut apparaître très contrastée même si hors foyer.

Parfois s'embuent les lentilles internes de l'objectif, ou pour sublimation et condensation de substances contenues dans les peintures ou dans les ciments, ou pour pénétration des liquides, spécialement de l'huile dans les types à immersion. Dans la pratique, l'huile n'est pas enlevée de l'objectif après l'usage; ceci porte à une altération de ses caractéristiques physiques et par suite de la bonté de l'image; de plus, l'huile pénètre, tôt ou tard, à l'intérieur de l'objectif. Il peut être question d'une ou plusieurs années, mais il est inévitable. Le résultat est désastreux et pour enlever l'huile il faut démonter complètement l'objectif et puis le recentrer. Il n'est pas possible dans ce siège illustrer les procédures relatives (voir, dans ce site, plusieurs «Schede tecniche» sur ce sujet (en italien)).

Les **ternissures** et condensations, en contraste avec la poussière, occupent plus ou moins toute la surface de la lentille et elles peuvent être nuisibles, surtout en termes de lumière diffuse et perte de contraste, même si elles sont peu visibles; en effet elles peuvent être parfaitement homogènes et ne pas se révéler à l'œil sans un intense éclairage rasant. Et on ne croie pas que les ternissures se forment seulement sur les surfaces internes pour les causes à peine citées. L'air, spécialement dans les centres urbains et le long des grandes rues, ne porte pas en suspension seulement des grains solides (poussière), mais aussi des gouttes de liquides, souvent très visqueuses. L'air atmosphérique n'est pas en effet un gaz mais un **aérosol**. Il s'agit d'hydrocarbures peu volatils qui condensent des gaz d'échappement des véhicules, installations de chauffage, installations industrielles, centrales thermiques, etc. Ces matériels peuvent se résumer sous le terme de **goudron** et ils forment sur les lentilles une couche diffusante très difficile à enlever sans solvants spéciaux (il peut suffire le xilol). Les gouttes d'hydrocarbures sont très petites, même moins de 1μ, et elles pénètrent partout, aussi à l'intérieur des emballages de bois ou carton. Ici aussi c'est seulement une question de

[107] Dans beaucoup de cas est utile un bout de polystyrène répandu du type "à haute densité" (le plus consistant) à peine cassé, si possible pointu avec une lame de barbe; il est nécessaire d'opérer à sec.

[108] D'ailleurs la lentille frontale est toujours construite avec des verres chimiquement stables (par ex., résistants aux solutions 0,1 molaires d'acide nitrique, à l'eau, etc.), et mécaniquement durs.

temps. La vitesse de déposition dépend de toute façon du type de verre, de traitements éventuels, etc. et elle est différente d'un verre à l'autre (voir aussi le § 27.6).

 Ciments altérés.

Beaucoup de lentilles sont composées de deux ou trois éléments collés avec les matériels les plus différents. On peut vérifier des altérations des ciments qui cristallisent et deviennent opaques ou décolletés. Les décolletages se remplissent d'air et provoquent des reflets irréguliers, parfois colorés, du type des "anneaux de Newton", quand se forme une couche d'air mince qui produit des phénomènes interférentiels (voir le § 17.1.2 et la figure à côté) aisément visibles en observant l'objectif du côté de la lentille émergente.

Seulement en certains cas, et avec des astuces spéciales, il est possible de remédier à ces défauts (voir l'article n° 40, en italien).

 Chocs mécaniques

Au-delà des ruptures, plus faciles à se révéler, les chocs mécaniques peuvent provoquer des déformations des barillets et déplacements des lentilles qui simulent des fautes d'assemblage (voir la figure à côté). On en parlera plus loin. Les déformations provoquent en plus des tensions internes dans les lentilles, nuisibles en radiation polarisée, étant donné qu'elles rendent biréfringent le verre.

Il est bien de contrôler aussi le mouvement des objectifs à correction (§ 13.2.3.2) et des objectifs "à pompe" (§ 19.1), qui peuvent résulter bloqués par une déformation due à un choc, par la poussière ou, plus souvent, par le durcissement des graisses. On peut dire la même chose des mécanismes de centrage présents dans certains objectifs pour radiation polarisée (§§ 19.1.4.1 et 30.7), et du diaphragme à iris présent dans certains objectifs à immersion pour champ noir (§§ 19.2.6 et 30.2).

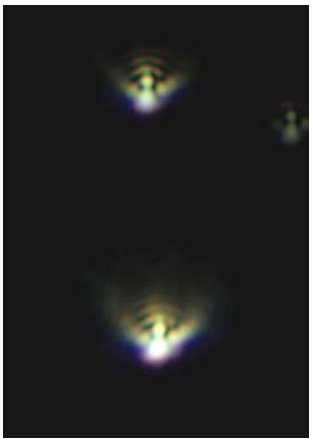
19.5.2 - Défauts d'assemblage

Il s'agit de défauts liés aux fautes dans la réalisation physique de l'objectif.

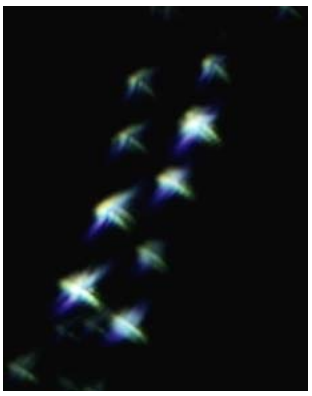
 Défauts strictement **mécaniques**. Il peut s'agir de mauvais glissement des parties mobiles à peine citées (bagues de correction, mouvements à pompe, diaphragmes). Il peut s'agir de dimensions inexactes du filet de la vis de fixation (difficulté d'assemblage), de position erronée de la battée (§ 19.1.2) avec perte de parfocalité, de fautes de centrage du filet par rapport à l'axe optique, avec perte de parcentralité (§ 19.1.4), de parties mal visées, comme la "chemise" (§ 19.1) qui se dévise au premier effort pour démonter l'objectif, etc.

 Défauts de **centrage**. Un système optique est centré quand les centres optiques de tous les éléments qui le composent se trouvent sur la même droite. Étant donné qu'on a déjà parlé dans le § 13.2.4 de la coma et de comme elle se révèle, nous rappelons ici seulement que la présence de "coma sur l'axe", au centre du champ, est le signe d'un mauvais centrage d'un ou plus élément. Ce défaut, dans certaines limites, peut être corrigé aisément (si l'objectif a été prédisposé à cette fin), mais on demande l'usage du star test (§ 18.4) et de quelque outil pour accéder à la lentille

flottante (voir les §§ 13.2.4 et 13.5, pag. 99). Pour révéler le défaut, ou au moins sa manifestation, c'est-à-dire la coma sur l'axe, on dispose le microscope comme pour l'observation usuelle, en mettant le star test à la place de la préparation. Il est bien d'utiliser un oculaire fort, au moins 15×, et une source la plus intense possible; soigner que le condensateur soit correctement au point (contrôler sans star test, vu que celui-ci est presque tout opaque) et le diaphragme d'ouverture soit tout ouvert. Choisir un condensateur avec la meilleure ouverture possible et monter sa lentille frontale dans le cas qu'elle soit escamotable. On déplace le test jusqu'à porter au centre du champ, une après l'autre, différentes figures de diffraction ou centriques (voir toujours le § 18.4) et on observera leur forme prédominante, surtout les plus petites.



Si la forme prédominante n'est pas circulaire, ou au moins elle ne montre pas une symétrie de rotation autour du disque d'Airy, on observera les anneaux de diffraction; si ils sont irréguliers et ils forment d'un côté du disque même un halo à forme de comète, c'est-à-dire la classique "queue" de la coma, et si tous les centriques ont la queue du même côté, il s'agit de coma sur l'axe et l'objectif doit être centré. Comme déplacer le lentille flottante pour faire disparaître la queue de la coma dépend de la structure mécanique de l'objectif et on ne donne pas des règles générales. On peut dire de toute façon que la lentille flottante est accessible en général à travers trois ou quatre petits trous présents sur la monture de l'objectif et cachés par la "chemise".



 Défauts d'**alignement**. Un système optique est aligné quand il est centré (tous les centres sur la même droite) et les axes optiques de tous les éléments sont parallèles entre eux. Il peut arriver par suite que dans un objectif parfaitement centré un élément soit incliné. Ceci provoque l'apparition d'astigmatisme sur l'axe, décelable en observant le star test avec les mêmes précautions sur citées (voir aussi le § 13.2.5). Une centrique au centre du champ apparaîtra allongée, mais en réglant légèrement la vis micrométrique sur et sous le meilleur foyer on verra la direction d'allongement de la centrique qui assume deux positions différentes, à 90° l'une par rapport à l'autre. Ce défaut n'a pas pratiquement de remède.

 Défauts d'**espacement** des lentilles. Dans le § 13.2.3.2 on a mentionné ce fait qui provoque l'apparition d'aberration sphérique avec perte de définition et microcontraste. À la fin du § 18.4 on a expliqué comme le star test révèle la sphérique et permette d'en évaluer quantité et signe. Une faute de ce type se corrige en changeant la distance entre les lentilles, mais cette opération est très délicate. Plus facile est compenser le résidu de sphérique dans l'objectif en utilisant des lamelles d'épaisseur différente de la valeur nominal ou en changeant la longueur du tube (voir la fin du § 13.2.3).

19.5.3 - Défauts de projet

À ce moment là on ne peut pas parler de vrais défauts, mais plutôt des limites dans les performances de l'objectif imposées par les choix que le projeteur accomplit dans son travail.

Les choix s'imposent entre amélioration des performances du système, avec augmentation de complexité, de contrôles qualitatifs et de coûts de production, et réduction de coûts, avec choix de matériels plus économiques, de tolérances de travail plus larges, de recettes plus simples. L'économie de projet peut être accompagnée par des contrôles de qualité "coulants", la quelle chose peut porter à ne pas relever les défauts d'assemblage sur décrit. Mais essentiellement on aura des limitations de performances optiques:

•• limitations du champ utilisable

•• limitations de l'ouverture et par suite de la résolution
•• résidus d'aberrations et perte de définition.

Contre ces limites il est difficile de mettre remède. En ce qui concerne la sphérique, on a à peine expliqué comme on peut intervenir en changeant l'épaisseur de la lamelle ou la longueur du tube. Contre les aberrations chromatiques on peut utiliser en général un filtre vert, à bande pas trop étroite, c'est-à-dire de verre coloré, et on rappelle qu'aussi d'autres aberrations comme la sphérique sont mieux corrigées au centre du spectre optique. Mais un fond vert de l'image est désagréable à l'œil et inacceptable dans la photographie aux couleurs. Contre la chromatique latérale on peut essayer de changer l'oculaire ou le tube intermédiaire: on rappelle que les oculaires, achromatiques ou compensateurs, ne sont pas tous égaux; il y a des gradations infinies dans l'achromatisme et dans la compensation. Chaque élément interposé entre objectif et oculaire peut en outre donner une contribution aux aberrations totales, surtout à la chromatique latérale.

Les limites fonctionnelles de l'objectif n'admettent donc pas en général beaucoup de remèdes. En base aux caractéristiques de l'objet, aux résultats qu'on s'attend et aux considérations économiques, il s'agira plutôt d'effectuer un choix avisé au moment de l'acquisition, selon les critères illustrés dans le paragraphe 19.4.3. L'idéal serait de posséder plus d'une série d'objectifs, pour pouvoir effectuer un choix au moment de l'usage: achromatiques en vue du meilleur contraste, apochromatiques pour la meilleure résolution et luminosité, etc.

19.5.4 - Les réseaux

Maintenant nous reprenons la notion de "**réseau**", défini dans les §§ 17.2 et 18.5 comme un objet sans épaisseur (ou avec épaisseur inférieure à la pénétration des plus forts objectifs) constitué par des lignes alternées et parallèles, transparentes et opaques, aux bords nets.

Tel objet doit être plan. En pratique, il s'agit de couches métalliques (chrome, etc.) déposé à la surface d'un porte-objet normal par évaporation sous vide.

Pour les faibles objectifs, il serait utile un réseau avec un pas d'environ 100μ; pour les forts il faudrait un pas de 8-10μ. Un pas intermédiaire est suffisant en général, par ex. 40 μ. Si le réseau doit être utilisé avec des objectifs normaux, calculés pour l'usage d'une lamelle (d = 0,17 mm) il sera couvert avec une lamelle d'épaisseur 0,17 ± 0,01 mm (contrôler avec une jauge centésimale). La lamelle doit être collée avec du baume du Canada, en y superposant un petit poids pour quelque semaine, de manière que la couche de résine soit le plus possible mince.

Eh bien, on a déjà mentionné dans le § 19.3 l'utilité d'un réseau pour le contrôle des aberrations chromatiques. Cherchons d'élargir cette notion. À la fin de ce texte, sont indiquées quelques adresses près desquels on peut trouver des accessoires pour microscopie; mais il est possible de produire soi même quelque réseau en étalant sur un porte-objet une couche uniforme d'encre de Chine. Après dessiccation, on grave la couche avec l'arête d'une lame de barbe ou un bistouri bien tranchant, de façon à créer des sillons minces et parallèles. Si les bords des sillons apparaissent dentelés, il n'a pas d'importance. Ça suffit que le passage des zones opaques aux zones transparentes soit net. Si les parties sombres ne résultaient pas du tout opaques, le procès doit être répété avec une couche d'encre plus épaisse.

En observant un réseau semblable, on peut révéler beaucoup de défauts de l'objectif et du microscope, et il est bien d'entrer dans les détails. Les caractéristiques géométriques et optiques du réseau le rendent idéal pour plusieurs tests, qui sont beaucoup moins significatifs s'ils sont exécutés avec une normale préparation biologique, habitude trop diffuse. Le réseau, pour le fait d'être plan et mince, révèle très bien la courbure de champ. Pour cet examen, il est bien d'utiliser un oculaire avec le plus grand index de champ permis par l'objectif. Pour le fait de présenter des lignes droites, le réseau révèle bien aussi la distorsion: il suffit d'observer si les lignes sont courbes aux bords du champ. Pour le fait de présenter des passages nets entre zones claires et sombres, il permet de révéler, même si moins efficacement que le star test, la structure du cercle de confusion (voir le § 13.2), le microcontraste (§ 17.2) et la définition (encore § 13.2). En effet, le cours photométrique du passage 'zone clair-zone sombre' est dans l'objet représentable par une courbe à

échelon (voir la courbe 1 dans la fig. 51 - § 18.1, pag. 128): la transparence de l'objet passe d'une valeur très élevée à une presque nulle dans un espace qu'on peut considérer nul en tant qu'il est normalement plus petit du pouvoir résolutif de l'objectif. Si ce "échelon" dans l'image n'est pas autant net que dans l'objet, cela signifie que le "cercle de confusion" (§§ 13.2 et 18.3) n'a pas un diamètre nul. Nous savons déjà que dans tel "cercle" il y a une inéluctable composante due à la diffraction, et liée essentiellement à l'ouverture, et une due aux aberrations du point.

Si l'objectif est "optiquement parfait" (§ 18.3), un peu d'expérience permettra de le reconnaître non seulement avec le star test, comme on a vu, mais aussi en observant les bords des lignes du réseau: il n'y aura pas aucun bord coloré, on verra une ou deux franges de diffraction bien nettes (mieux visibles en fermant le diaphragme d'ouverture) et *les effets de la défocalisation seront symétriques des deux côtés de la ligne du réseau, dans les deux directions de défocalisation et sur tout le champ*. Toujours en observant les marges des lignes du réseau, on révèle la coma quand des deux côtés de la ligne on voit des halos (non colorés en absence de chromatique), plus larges d'un côté, mais toujours du même côté pendant qu'on bouge la vis micrométrique des deux côtés du meilleur foyer. Il sera bien exécuter cette vérification avec différentes orientations du réseau pour éviter que la queue de la coma résulte parallèle aux lignes et vienne cachée.

Pour l'astigmatisme, en supposant de ne pas pouvoir ou vouloir utiliser le star test, il convient observer la dentelure qui si trouve toujours aux marges des lignes; focalisant, en présence d'astigmatisme, on verra les dents qui s'allongent en deux différentes directions, orthogonales entre elles. Aussi ici, les halos doivent être achromatiques s'il s'agit de seul astigmatisme.

Si on voit par contre des halos colorés, on doit distinguer. Pour la chromatique longitudinale, on doit observer le centre du champ: si on ne trouve pas aucune position de foyer dans laquelle les lignes du réseau apparient neutres, achromatiques, cela veut dire qu'il y a un résidu excessif de cette aberration. S'il y a par contre au moins une position de foyer dans laquelle les lignes, sur l'axe, apparaissent sans couleurs, la chromatique longitudinale est corrigé de façon acceptable. Dans ce dernier cas, en focalisant, aux bords des lignes les halos colorés réapparaîtront. Si ceux-ci sont imperceptibles, il s'agira d'un apo - ou semiapo-chromatique; si ils sont visibles, il s'agira d'un achromatique classique. Si les halos sont verts d'un coté et violet de l'autre côté du meilleur foyer, la correction est encore bonne; si ils sont bleu et rouge, la correction est mauvaise.

Pour la chromatique latérale (CVD), il faut observer aux marges du champ, dans les positions ou les lignes du réseau sont tangentes à la circonférence du champ (à droite et à gauche dans la fig. 76, voir dessous). La CVD provoque, seulement aux marges du champ, nous répétons, l'apparition d'halos colorés, de couleur complémentaire sur les deux côtés de la ligne du réseau, en général bleu et rouge. En altérant la mise au point, les couleurs ne doivent pas s'inverser, sauf en présence de forts résidus de chromatique longitudinale. Du cours des couleurs, on peut tirer le signe des résidus de CVD: Dans la fig. 76 on voit une surcorrection.

Tous les problèmes de correction de la CVD, d'accouplement objectif-oculaire et de compensation (§ 19.3.1) s'éclairent avec l'observation d'un bon réseau: une image comme celle de la fig. 76 dans laquelle fût absent tout halo coloré dans tout le champ visuel (aplani ou pas) au moins dans une position de la mise au point, ce serait une image totalement achromatique. Ceci est assuré actuellement seulement par les meilleurs objectifs de la série CF (§ 19.3.2) avec des oculaires achromatiques. Parmi les objectifs classiques, on peut penser aussi à l'accouplement de bons apochromatiques avec des oculaires compensateurs du même constructeur ou d'objectifs faibles achromatiques avec des oculaires achromatiques.

Un réseau offre ainsi les meilleures conditions pour la reconnaissance visuelle des aberrations chromatiques. Pour les autres aberrations du point, on a expliqué, le star test est plus sensible. Au moyen du réseau on peut révéler aussi la sphérique, mais seulement si elle est d'entité considérable: en focalisant sur et sous le meilleur foyer, au centre du champ, on observera des halos sur les marges des lignes; si les halos apparaissent sensiblement différents sur et sous le foyer optimal, mais symétriques aux deux côtés de la ligne, il y a un fort résidu de sphérique. En repensant à tout ce qu'on a expliqué à la fin du § 18.4, il est possible de prévoir quel aspect auront les halos et quel est le signe du résidu de la sphérique: l'image "aux anneaux" produira des bords nets, mais avec des franges parallèles; l'image "nuancée" produira des forts halos nuancés.

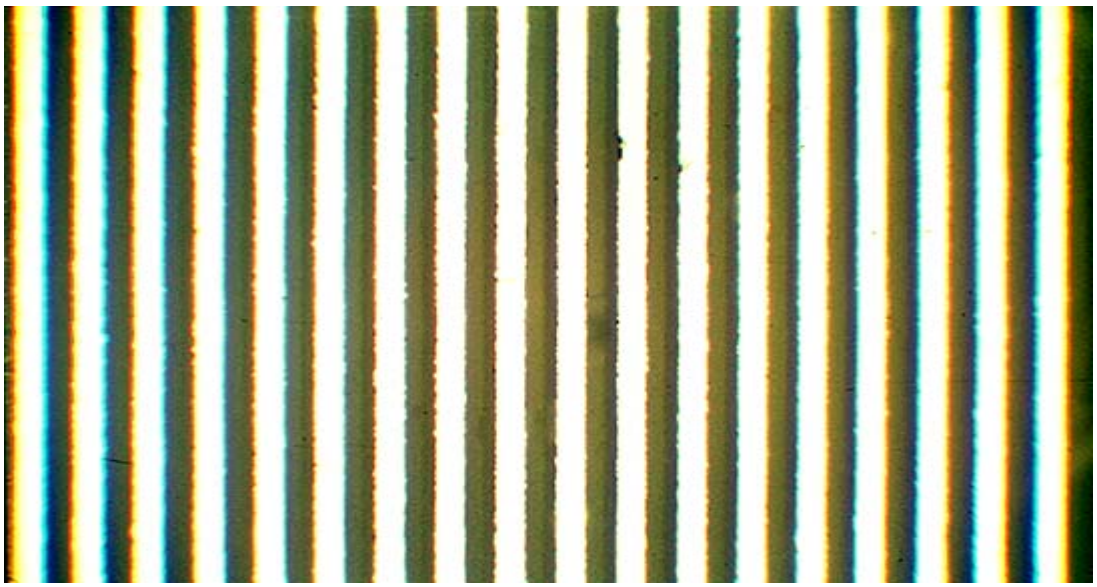


Fig. 76 – Un réseau à pas 20 + 20 μ, observé avec un objectif achromatique faible et un oculaire compensateur.

19.5.5 - L'observation de la pupille et le microscope auxiliaire

Nous entendons ici pour "pupille" la pupille de sortie de l'objectif (voir le § 6); on peut l'observer à l'œil nu, à travers le tube, simplement en enlevant l'oculaire. Ses dimensions seront autant plus grandes qu'est grande l'ouverture de l'objectif et sa focale (et tant plus petit l'agrandissement). Son diamètre, comme on devine de simples considérations trigonométriques, est: $\mathbf{d = 2\ NA \cdot f}$ dans laquelle **f** est la focale.

Étant données ses petites dimensions, cependant, on conseille l'usage d'un n'importe quel milieu d'agrandissement dont ils existent quatre types fondamentaux que nous examinons séparément, et qu'il est bien connaître, étant donné que chacun présente des avantages et des désavantages et peut être préférable en relation au but qu'on se propose.

•• **Lentille de grossissement** faible, environ 2 ×, à appuyer simplement sur le bord supérieur du tube, simplement après avoir enlevé l'oculaire. Elle n'a pas toujours la puissance nécessaire.

•• **Lentille d'Amici** ou de Bertrand[109]. Il s'agit d'une lentille convergente de moyenne puissance qui s'interpose entre oculaire et objectif, même sans ouvrir le tube, c'est-à-dire avec une commande extérieure. Sa puissance et sa position sont telles à produire une image réelle et renversée de la pupille d'objectif, avec agrandissement environ unitaire, dans la position de l'image intermédiaire. Telle image de la pupille se voit donc au point dans l'oculaire, sans déplacer ce dernier. Étant donné que la position de la pupille en général n'est pas la même dans différents objectifs, pour voir toujours au point son image dans l'oculaire il est nécessaire d'habitude focaliser la lentille d'Amici, ou en modifiant axialement sa position ou en changeant sa puissance par ex. en changeant la distance entre les éléments qui la composent. Il y aura à l'extérieur une commande spéciale, qu'en général sert aussi à insérer ou extraire la lentille. Seulement certains modèles économiques de microscopes polarisateurs, en supposant que l'observation conoscopique soit exécutée seulement avec l'objectif le plus fort, ont une lentille d'Amici à positon fixe (§ 30.7).

•• **Microscope auxiliaire**. Ceci est un véritable "microscope composé" avec objectif et oculaire. Étant données ses modestes fonctions, l'objectif et l'oculaire de cet accessoire sont très simples, un doublet ou même une lentille simple, avec champ et ouverture modeste. Aussi son agrandissement est modeste, près de 10 ×. Ce dispositif est un accessoire, au sens qu'il est extérieur au microscope et on l'insère au besoin à la place de l'oculaire, au bout supérieur du tube. Il a le même diamètre et une longueur de peu supérieure à celle d'un oculaire normal avec lequel il est

[109] Emile BERTRAND, ingénieur français (1844–1909).

facile de le confondre (la lentille inférieure de l'oculaire est cependant toujours très grande, pendant que celle du microscope auxiliaire est en général très petite). Tout est préparé pour que ce système composé, au lieu de l'oculaire qui présente à l'œil une image virtuelle agrandie de l'image intermédiaire, présente une image de peu agrandie de la pupille. Il y a ici aussi le problème de focaliser, en général résolu en changeant la longueur du microscope auxiliaire, qui a en effet une structure télescopique.

•• **Lentille de Klein**. Pour observer la pupille, on peut se servir aussi du disque de Ramsden, qui est une image rapetissée de la pupille d'objectif: pour mieux l'observer (il est très petit) on peut utiliser un oculaire fort renversé ou une lentille convergente forte (lentille de Klein[110]) déposée sur l'oculaire. À ce but on peut utiliser un objectif 10:1 ou 20:1.

Eh bien, l'observation de la pupille d'objectif est essentielle en cas spéciaux, que nous mentionnons rapidement:

 En contraste de phase, pour le centrage des diaphragmes annulaires qu'on met sous le condensateur et l'image desquels se forme justement dans la pupille (§ 30.4).

 En radiation polarisée, pour l'observation des "figures spéciales d'interférence" qui se forment, toujours dans la pupille, quand on observe une lame biréfringente opportune avec le condensateur à pleine ouverture (§ 30.7)[111].

Dans les microscopes polarisateurs est présente en général une lentille d'Amici; dans les microscopes à contraste de phase, spécialement si économiques, le microscope auxiliaire est plus fréquent. La lentille de Klein évite la substitution de l'oculaire.

En général, l'observation de la pupille de l'objectif est une source de renseignements utiles, et nous en énumérons quelqu'un, sans oublier (voir le § 8.8 et la fig. 32, pag. 65) que dans cette pupille on trouve une première image réelle du diaphragme d'ouverture et une seconde image réelle de la source Q.

•• Quand on observe l'image du diaphragme d'ouverture, on peut vérifier si son diamètre est correct, et en outre en contrôler le centrage par rapport à la pupille, et éventuellement le modifier dans le cas qu'il existe quelque dispositif *ad hoc*.

•• Quand on observe l'image de la source, par ex. le filament d'une ampoule à incandescence, on peut en contrôler encore et en modifier le centrage et la focalisation. En particulier, quand la source est externe au microscope (même une fenêtre) et sur le pied il y a un miroir orientable, l'observation de la pupille peut aider pour orienter le miroir même: il faut que la pupille soit éclairée uniformément.

•• On peut identifier des taches sombres dues à des corps étrangers, saleté, décolletages des lentilles collées, ébrèchements, etc. Pour comprendre si telles défauts sont situés à l'intérieur de l'objectif ou de parties voisines (lentilles de tube, condensateur, etc.) on desserre telles parties et on les tourne une à la fois. Pour ces observations il est souvent utile de fermer complètement le diaphragme d'ouverture ou celui de champ, éventuellement en réalisant l'éclairage oblique (§ 18.9 et fig. 66; voir aussi, dans ce site, les articles n° 18 (en français, pag. 36 et suivantes) et n° 41).

•• Au-delà de la pupille, il est possible de mettre au point dans un certain trait les surfaces internes de l'objectif et du tube et vérifier l'existence de surfaces polies qui réfléchissent les rayons obliques. On a expliqué à son temps comme ces reflets nuisent au contraste (§ 17.1.1).

•• Disposant un filtre polarisateur (voir le § 23.1) devant l'objectif et un autre après, et en "les croisant" (en tournant l'un ou l'autre jusqu'à avoir la moindre luminosité) se révèlent sous forme de zones irrégulières claires ou colorées les tensions internes dans les verres des lentilles, les défauts d'homogénéité des lentilles en fluorine, etc. (voir le § 19.5.1, fin du paragraphe, et l'article n° 18 (pag. 36 et suivantes)).

•• Dans l'usage d'objectifs à immersion, l'observation de la pupille révèle au coup d'œil la présence de bulles d'air ou corps étrangers dans l'huile.

---

[110] Karl KLEIN, minéralogiste allemand (1842–1907).

[111] Le fait de devoir travailler à pleine ouverture, c'est-à-dire de traverser l'objet avec un faisceau conique très ouvert, justifie le terme "conoscopie" ou "lumière convergente" donné à ces observations.

•• Si le condensateur est affecté de forte aberration sphérique (§ 21.7 et fig. 89), la pupille ne sera pas éclairée uniformément (fermer le diaphragme de champ).

•• Dans la pupille d'objectif on observe les "maxima de diffraction", comme décrit dans les §§ 18.7 et 18.8, et on peut tirer des renseignements sur les structures de l'objet (illustrations 62 et 64, § 18.8).

•• Quand on utilise le microscope auxiliaire ou la lentille d'Amici et leur course de focalisation est suffisante, il est possible de mettre au point aussi l'objet, naturellement après avoir enlevé l'objectif. On peut observer ainsi l'objet avec un bas agrandissement, inférieur à celui réalisable avec les objectifs les plus faibles.

19.6 – L'ENTRETIEN de l'OBJECTIF

Nous parlons ici des opérations à la portée d'un praticien attentif et rodé, en excluant tout ce que demande un équipement ou une formation particulière.

L'opération la plus importante pour l'entretien d'un objectif, et en général d'un instrument optique, c'est le nettoyage. En différentes occasions on a parlé des effets nuisibles de la poussière et des ternissures et dans le § 19.5.1 on a décrit les opérations fondamentales du nettoyage.

Il déborderait des buts de ce manuel entrer dans les détails des opérations pour le démontage et la réparation de l'objectif[112]. Malheureusement, la figure du technicien compétent, capable d'exécuter ces opérations, est largement absente dans les laboratoires publics et privés où sont en usage des microscopes de tout genre. Et la tendance des responsables est celle de faire intervenir le service technique du réseau de vente qui a fourni l'instrument. Celui-ci, à son tour, dans les cas délicats comme la réparation d'un objectif, a la tendance à renvoyer la pièce au constructeur qui est souvent à l'étranger. Ensuite ce dernier tend à remplacer la pièce contestée avec une nouvelle, étant donné que la réparation demande trop de temps et elle n'est pas rentable. Le résultat final est que le temps et les frais pour résoudre le problème sont infiniment supérieurs à l'étroit nécessaire, en moyenne une ou deux heures de travail, en mains expertes.

Pour réduire les dégâts pour l'objectif et la nécessité d'une intervention, il est bien donc prévoir avec quelques astuces une **conservation** opportune:

 Éviter les sollicitations mécaniques, chocs et vibrations, qui peuvent provoquer le détachement de la lentille frontale, le décolletage des éléments composés, la déformation du barillet et le déplacement des lentilles.

 Éviter les sauts de température. Le passage d'une pièce froide à une pièce chaude peut provoquer la condensation de vapeur d'eau sur toutes les surfaces, en particulier sur celles exposées. Les objectifs sont fournis en général dans une boîte spéciale avec bouchon à vis: on tienne l'objectif dans sa boîte pour une paire d'heures après le changement de pièce à fin que sa température se stabilise. Si on déplace l'instrument entier, il faut le tenir encore pour une paire d'heures dans la nouvelle pièce, bien couvert d'un sac en nylon.

 Si un objectif doit être appuyé sur la table momentanément, cherchez une surface propre et appuie-le avec la frontale en haut.

 Si l'objectif reste fixé normalement au statif, on prenne soin que l'intérieur de celui-ci ou du "tube" soit bien fermé; les oculaires doivent rester en position de travail, de manière que le bout supérieur du tube soit fermé. Avec les couvercles spéciaux ou au moins avec un bout de scotch seront fermées toutes les autres ouvertures, comme les petites fenêtres dans lesquelles on insère les coulisses porte-filtres ou porte-diaphragmes ou porte-prismes. Les trous du revolver éventuellement vides soient fermés par des bouchons.

 Quand la technique utilisée demande un rayonnement fort de l'objet (micro-projection) photo-micrographie), peut-être dans la bande UV (fluorescence), les verres ou les ciments des lentilles peuvent avec le temps s'opacifier. Délimiter donc tels rayonnements au moins possible. Aussi une microlampe normale, si elle est oubliée allumée jusqu'au jour après, peut provoquer des sé-

[112] Voir dans ce même site l'article n° 18 (en français) et plusieurs «Schede tecniche» (en italien).

rieux dégâts. L'usage d'un ou deux filtres calorifuges devant le condensateur est toujours utile.

 Si dans les environs du microscope on exécute des opérations avec des agressifs chimiques, spécialement acides, cela peut corroder les surfaces mécaniques et optiques. Pourvoir à une ventilation de la pièce, peut-être sous un manteau, ou à l'éloignement du microscope.

Avec des astuces semblables, un objectif de microscope, au moins à sec, peut conserver ses performances pour un temps illimité. Cependant il y a des cas, déjà mentionné de plusieurs reprises, dans lesquels les habilités sur exposées n'empêchent pas la détérioration spontanée, et par suite difficilement prévenible. Résumons-les.

•• Certains verres optiques sont chimiquement instables et s'opacifient avec le temps, surtout à leur surface (certains apochromatiques).

•• Les cimentes qui unissent les éléments composés peuvent s'opacifier ou se retirer en provoquant le décolletage.

•• L'huile d'immersion, tôt ou tard, pénètre dans l'objectif. L'unique remède est de nettoyer bien l'objectif, avec le solvant prévu par le constructeur, tout de suite après l'usage (§ 19.5.1).

•• L'aérosol qui constitue l'air atmosphérique dépose sur toutes les surfaces une couche de goudron. Celle-ci et autres causes internes provoquent la ternissure des lentilles (encore § 19.5.1). S'il s'agit de surfaces internes, il s'impose le démontage et le recentrage de l'objectif.

•• Certaines surfaces métalliques s'altèrent avec le temps; cependant, rarement cela grave sur les performances optiques, à moins qui s'agisse de surfaces internes qui produisent des détritus ou poussière, comme certains peintures qui s'émiettent en séchant.

•• Quand le traitement extérieur de l'objectif ou certaines notations sont exécutées avec de la peinture, revenez au cas précédent.

Beaucoup plus délicats sont les objectif à contraste de phase, qui contiennent un filtre spécial annulaire. Tel filtre est constitué par des couches minces déposées avec la méthode de l'évaporation sous vide sur la surface d'une lentille ou d'une lame; ces couches peuvent s'altérer avec le temps et ne pas dérouler leur fonction correctement. Aussi les sauts de température, l'humidité et les chocs sont ici à éviter.

La même recommandation vaut pour les objectifs pour radiation polarisée: un choc ou autre agent mécanique peut introduire des tensions internes dans les verres qui deviennent faiblement biréfringents et gênent la formation de l'image. En particulier est dérangée l'"extinction", c'est-à-dire la formation du fond noir quand les polarisateurs sont "croisés" (§ 30.7). Pour ce motif, dans un microscope polarisateur il est bien tourner le revolver en saisissant ses bords, sans toucher les objectifs. En peu plus haut on a vu comme on révèle ces défauts (observation de la pupille d'objectif entre deux filtres polarisateurs croisés); un contrôle dans ce sens irait répété de temps en temps, étant donné qu'une tension interne dans le verre des lentilles peut se vérifier même sans causes apparentes et graduellement dans le temps.

20 – L'OCULAIRE du MICROSCOPE

Quand on a traité les principes de l'optique et le schéma général du microscope on a parlé plusieurs fois d'oculaires et de leurs performances. Maintenant, en voulant épuiser le sujet, et voulant éviter des répétitions, nous reprendrons les différents aspects en rappelant chaque fois ce qu'on a déjà dit.

Pour oculaire on veut parler d'un système optique (§ 4.1), d'habitude convergent, qui fonctionne avec le principe de la loupe de grossissement (fig. 14 ou 15 dans les §§ 2.6.2 et 2.7 et fig. 19 dans le § 4.1) et donc il peut fournir une image virtuelle droite et agrandie d'un objet mis dans ou près de son foyer antérieur.

On a aussi expliqué que cet objet, dans le cas de l'oculaire du microscope, est constitué par l'image intermédiaire fournie par l'objectif. Mais l'image intermédiaire n'irradie pas dans un angle solide très ouvert comme ferait un corps normal, lumineux ou éclairé, diffusant. Le faisceau que l'image intermédiaire envoie vers l'oculaire est confiné à l'intérieur de précis limites, c'est-à-dire dans le prolongement d'un faisceau à tronc de cône qui a pour base plus petite la pupille de sortie de l'objectif (PU, voir la fig. 32 dans le § 8.8) et pour base plus grande le diaphragme de champ visuel DV de l'oculaire (en supposant pour simplicité que l'oculaire soit positif, c'est-à-dire sans une lentille de champ qui s'interpose entre objectif et image intermédiaire).

De tout ce qu'on a dit dans les chapitres cités, il résulte aussi que l'oculaire a des caractéristiques pour certain aspects opposées à celles de l'objectif: ce dernier a en effet une ouverture élevée, champ angulaire petit et pupilles internes ou très proches des lentilles; l'oculaire a par contre:

•• petite ouverture; on a vu dans le § 9 que la pupille de sortie de l'oculaire (d) dépasse rarement les deux mm, pendant que la focale (f) varie de 70 à 10 mm; l'ouverture côté objet ne dépasse pas donc (voir la (22) dans le § 5.2.4 pour l'ouverture relative) la valeur de:

$$f\# = f / d \geq 10/2 = 5$$

et, pour l'ouverture numérique (toujours côté objet) (voir la (24)):

$$NA = 1/(2\ f\#) \leq 1/10 = 0{,}1$$

mais la valeur est normalement beaucoup plus petite;

•• champ angulaire fort: comme on a expliqué dans le § 7.1, un oculaire peut dépasser la valeur de 50° (2α), pendant qu'un objectif ne dépasse pas 7°;

•• position de la pupille: comme on a expliqué dans les §§ 4.4 (fig. 21) et 9, à chaque point de l'objet correspond un point de l'image intermédiaire et un faisceau qui converge devant l'image intermédiaire et diverge après, en direction de la lentille oculaire. Cette lentille rend parallèle tel faisceau élémentaire et tous les faisceaux correspondants à tous les points de l'image intermédiaire émergente de l'oculaire en formant globalement un faisceau conique au sommet duquel se trouve le "disque de Ramsden" (§ 4.4) ou "pupille de sortie" (P dans les figures 20, 21 et 32). On a aussi expliqué que telle pupille P est celle de sortie soit de l'oculaire soit du microscope, et par elle passe toute la radiation émergente du microscope. Eh bien, la pupille P se trouve un peu au-delà du second foyer de l'oculaire[113], et sa distance de la lentille supérieure, la soi-disant "**hauteur de la pupille**" (Ap) ou «extraction», varie de 5 à 20 mm environ. Donc P, qui est en réalité le diaphragme d'ouverture virtuel de l'oculaire en étant l'organe qui limite le diamètre du faisceau émergent, se trouve au dehors du système, et donc on parle de "**pupille extraite**"; il en résulte qui le faisceau élémentaire correspondant à chaque point de l'image intermédiaire traverse la P qui est centrée, mais il traverse les lentilles de l'oculaire en position excentrique, et cela s'oppose à la

[113] Dans les oculaires négatifs, un peu au dessous.

correction de certaines aberrations, surtout astigmatisme.

Dans le § 9 on a expliqué comme on calcule ou on mesure le diamètre Øp du disque de Ramsden (voir la formule (28)) et quelle est son importance et sa valeur optimale.

Mais c'est important aussi l'hauteur de la pupille qui dépend de la structure de l'oculaire. On ne peut pas donner des règles générales; on peut dire seulement que les oculaires négatifs (voir le § 7.2) ont en général une pupille plus basse, à cause de l'effet convergent de la lentille de champ. La pupille est plus basse aussi dans les oculaires les plus forts, à égalité de toute autre condition, à cause de la plus petite focale.

On peut dire aussi que la pupille doit être la plus haute possible; en effet entre l'œil et l'oculaire peuvent s'interposer deux choses: **les lunettes**, pour celui qui en a besoin, qui ne doivent pas heurter contre la lentille émergente de l'oculaire ("lentille oculaire") pour ne pas la rayer (voir le § 20.10); **les cils**, qui y laissent des empreintes nuisibles. Par contre, une pupille haute, à égalité de champ angulaire, demande évidemment des lentilles plus grandes et celui-ci n'est pas seulement un problème de coûts, mais d'aberrations.

Une hauteur de pupille de 10 mm peut être satisfaisante, en absence de lunettes, et elle est commune dans les oculaires faibles, même négatifs. Pour les porteurs de lunettes il faut au moins 15 mm, en étant 12 mm la distance nominale entre la lentille de la lunette et la cornée. Rarement le constructeur déclare la hauteur de pupille (Ap) de ses oculaires[114], mais on la mesure aisément en identifiant la position de la pupille même avec un verre dépoli ou un bout de papier calque: avec le microscope allumé et correctement réglé, on déplace l'écran dépoli en haut ou en bas sur l'oculaire jusqu'à avoir le moindre diamètre de la tache éclairée. À ce moment on mesure la distance entre l'écran et le point plus élevé de l'oculaire, en tenant compte que la monture dépasse en général la lentille oculaire.

Un cas spécial est donné par les systèmes photographiques ou de télévision dans lesquels l'appareil photo ou la caméra de télévision sont munies d'objectif. Les objectifs de reprise, surtout si du type "zoom" ("pancratiques") peuvent avoir une pupille d'entrée très profonde, et la pupille de l'oculaire doit être autant élevée. À ce but ont été construits des oculaires spéciaux avec hauteur de pupille jusqu'à 250 mm. Si les deux pupilles, de l'oculaire et de l'objectif de la caméra de télévision, ne coïncident pas il est facile d'avoir un vignetage (voir le § 6.1 et l'article n° 13 dans ce même site).

Du grossissement de l'oculaire on a parlé au § 4.3 (formules (20) et (21)) et on a vu comme on le mesure dans les §§ 12.5 et 12.6 (formules (31) et (32)). On a aussi parlé du "**grandissement utile**", soit de l'objectif que de l'oculaire (§ 18.12).

On peut ajouter que seulement dans des cas spéciaux il convient sortir des limites du grandissement utile: vers le haut, jusqu'à $V_{ok} = 30 \times$, pour faciliter le travail des personnes avec un visus réduit ou pour délimiter une zone limitée de l'objet (les oculaires les plus forts ont un index de champ plus petit)[115]; vers le bas, jusqu'à 2 ×, pour la photographie sur petit format, la projection, etc. Pour la reprise de télévision avec les modernes capteurs, qui sont très petits, il peut se rendre nécessaire tout à fait réduire l'image intermédiaire avec des oculaires ou systèmes intermédiaires très spéciaux (voir le § 30.8).

20.1 – Le CHAMP de l'OCULAIRE

En ce qui concerne les images de l'objet, l'oculaire a comme propre objet l'image intermédiaire et comme diaphragme de champ (son côté objet) le **diaphragme de champ visuel** (DV dans la fig. 32; voir aussi le § 5.1). Dans l'observation visuelle, l'image finale produite par l'oculaire est virtuelle, et donc on ne peut pas parler de champ image linéaire.

Le diamètre de DV, c'est-à-dire du champ objet de l'oculaire, c'est le soi-disant "index de

[114] Le symbole ∽ est utilisè pour indiquer: «pour porteurs de lunettes» - Ap ≥ 15 mm.

[115] Un oculaire très fort peut être precieux pour l'examen avec le star test au centre du champ.

champ" **s'** (voir les §§ 7.1 et 19.2.4)[116]. Tel **index de champ** ("field number") dépend de la construction mécanique et optique de l'oculaire et la limite supérieure est liée au diamètre extérieur de l'oculaire même. Pour les oculaires classiques, selon le standard de la Royal Microscopical Society de Londres, le diamètre extérieur est 23,2 mm et le diaphragme de champ visuel DV ne dépasse pas en général 20 mm. Pour beaucoup de constructeurs modernes, il est devenu normal un diamètre extérieur supérieur, souvent de 30 mm, et ainsi dans beaucoup de microscopes stéréoscopiques. Dans ces conditions, le diamètre de DV peut arriver à environ 26 mm.

Toujours dans le § 7.1 (formule (26)) on a considéré le champ angulaire **2α'** de l'oculaire et on a vu comme on le calcule. Le champ angulaire est simplement l'ouverture du cône formée par les rayons principaux qui viennent du centre de la pupille de sortie de l'objectif (PU dans la fig. 32), rasent les bords du diaphragme DV et émergent de l'oculaire en passant par le centre de la pupille de ce dernier (P). De la même façon, on a vu que le champ angulaire **2α'** dépend de l'index de champ **s'** (diamètre de DV) pour lequel les oculaires de diamètre extérieur 30 mm peuvent avoir un champ angulaire **2α'** plus grand.

Eh bien, il est usuel de considérer "normal" un champ **2α'** jusqu'à 39 - 40°; il sera "**grandangulaire**" au-delà de cette limite (voir aussi les §§ 7.1 et 19.2.4). Avec un diamètre extérieur "classique" de 23.2 mm et un index de champ **s'** = 18 mm, on peut avoir un champ grandangulaire seulement avec un grossissement de l'oculaire d'au moins 10 ×; avec des oculaires de diamètre 30 mm on peut avoir déjà un "grand" champ avec $V_{ok} = 6{,}4 \times$ (**s'** = 28 mm).

En principe, il est bien que le champ angulaire **2α'** sois le plus grand possible. Mais il y a différentes contre-indications. Pour commencer, à un grand champ correspond, à égalité de toute autre condition, le plus grand diamètre des lentilles et le plus grand coût. En second lieu, l'œil ne réussit pas à enlacer dans un seul coup un champ supérieur à environ 40° pour lequel, au-delà de cette limite, il est contraint à se remuer en continuation pour explorer tout le champ. Mais, pendant les mouvements de l'œil, on déplace aussi sa pupille, qui ne coïncide plus avec le disque de Ramsden; donc la tête de l'observateur doit se le déplacer aussi, en direction opposée à l'œil, pour rétablir cette coïncidence.

Finalement, le plus grand champ angulaire complique la correction de toutes les aberrations.

De l'accord qui doit exister entre l'index de champ de l'oculaire et le champ image de l'objectif on a déjà parlé dans le § 19.2.4.

20.2 – La PARFOCALITÉ des OCULAIRES

On a vu à son temps que dans le projet de l'objectif, soit pour une meilleure correction des aberrations, soit pour des raisons d'interchangeabilité, etc. on définit rigidement la position de l'image intermédiaire. Si telle position est la même pour tous les objectifs d'une série, ils seront équivalents, au moins sous cet aspect.

Avec le même critère on peut parler de parfocalité des oculaires quand ils présentent la même position du foyer antérieur par rapport à la battée, c'est-à-dire la même position idéale de l'image intermédiaire. Ceci sera une autre contribution à l'équivalence des objectifs. Comme pour les objectifs, il n'y a pas d'uniformité entre les différents constructeurs. En mesurant la position du premier foyer par rapport au bord supérieur du tube porte-oculaires, c'est-à-dire par rapport à la référence mécanique qui détermine la position de l'oculaire quand on l'enfile dans le tube, on peut relever entre les différents constructeurs une position qui varie au moins de 8 à 25 mm par-dessous le bord du tube (Ai = hauteur de l'image intermédiaire). Les règles DIN indiquent une valeur de 10 mm; les règles TGL, 13 mm.

Pour évaluer l'importance de cette variation, on remarque qu'un déplacement axial de seuls 2 mm de l'oculaire porte à une perte appréciable de parfocalité entre les objectifs, spécialement entre le plus forts et le plus faibles. Étant donné qu'il arrive souvent de remplacer l'oculaire avec un autre, il faut s'assurer de leur parfocalité en contrôlant simplement que la mise au point ne vienne

[116] Pour ce qui concerne les oculaires négatifs, voir la fin du § 7.2.

pas altérée après la substitution. Pour rendre ce contrôle plus sensible, on utilise ces astuces: objet bien contrasté ou coloré et surtout très mince (frottis de sang, micromètre objet, réseau); objectif faible, à grande ouverture et par suite à grande pupille; œil ne pas accommodé, c'est-à-dire image finale à l'infini[117].

Aussi entre les oculaires du même constructeur, de séries différentes ou aussi de la même série, surtout si de vieille construction, il peut y avoir un manque de parfocalité. Naturellement, étant donnés deux ou plus oculaires parfocales, et positifs, aussi le diaphragme de champ visuel DV doit être dans la même position. Dans le cas d'oculaires négatifs (§ 7.2), il peut y avoir des différences à raison de la différente recette de l'oculaire.

Utiliser pour un objectif donné un oculaire prévu pour une position de l'image intermédiaire différente de celle de l'objectif même, il exige une retouche de la mise au point, et cela équivaut à une altération de la longueur du tube, c'est-à-dire des conjuguées de l'objectif. On sait déjà que cela comporte: perte de parfocalité des objectifs (§ 19.1.2), apparition d'aberration sphérique (§ 13.2.3.1) et d'autres aberrations, altération de l'agrandissement (§ 2.6.2.2). Ceci est un autre motif pour mettre beaucoup d'attention dans l'association objectif-oculaire, aussi du même constructeur. Pour savoir si un certain oculaire peut être utilisé avec une série d'objectifs donnée, à part les problèmes de chromatique transversale, etc., c'est-à-dire seulement au point de vue de la parfocalité, on mette au point un objet mince avec l'oculaire et avec un des objectifs de la série; en changeant objectif, il faut retrouver toujours le foyer, au moins approché, sans toucher les boutons relatifs. Le contrôle réussit plus sensible en passant de l'objectif le plus fort au plus faible de la série. Nous avons à peine dit "foyer approché": est-il possible de quantifier? Malheureusement, on ne peut jamais exiger un foyer parfait quand on change d'objectif: trop sont les causes d'erreur. Évaluer jusqu'à quand la perte de focalisation est acceptable, devient donc subjectif. On doit exiger au moins que, à l'échange de l'objectif, la structure de l'objet reste reconnaissable et on puisse comprendre tout de suite de quelle côté se trouve le foyer optimal.

20.3 – La STRUCTURE MÉCANIQUE

Extérieurement, un oculaire normal de microscope a une partie inférieure cylindrique, lisse, en général chromée, qui se glisse dans le tube porte-oculaires (voir le § 24).

Sa longueur peut être très variée: de 20 à 60 ou plus mm. Le tube porte-oculaires a un diamètre interne constant, égal à celui de l'oculaire, mais tôt ou tard il se rétrécit ou il est obturé mécaniquement par la présence de prismes ou lentilles ou des leurs montures ou de quelque diaphragme ("light baffle"). La profondeur de la partie supérieure du tube (embout) est envisagée évidemment par le constructeur de façon à pouvoir accueillir les oculaires prévus. Mais quand on veut utiliser des oculaires spéciaux ou d'autres constructeurs, il peut arriver que l'oculaire ne pénètre pas complètement dans le tube à cause de sa longueur excessive.

Le diamètre intérieur du tube, et l'extérieur de la partie inférieure de l'oculaire, est naturellement et largement normalisé sur deux valeurs: le classique (RMS) égal à 23,2 mm et celui "grand-angulaire" moderne, égal souvent à 30 mm, mais il y a beaucoup d'exceptions, surtout parmi les microscopes stéréoscopiques, opératoires, etc.

Au dessus de la partie inférieure de l'oculaire il y a une partie de plus grand diamètre, de forme différente, même si en général cylindrique, d'hauteur très variée, d'une paire de mm à plusieurs cm (voir les figg. 77, 78 et 79), vernie de couleur noire, grise ou autres, ou brunie.

Entre la partie inférieure et celle supérieure (à plus grand diamètre) de l'oculaire il y a une saillie, un bord proéminent, qu'on peut donc appeler **battée** à ressemblance de celle qui existe pour l'objectif (voir les §§ 10 et 19.1.2 et la fig. 71). La battée, quand on glisse l'oculaire dans le tube relatif, s'appuie sur le bord supérieur du tube. En conséquence, la battée représente la référence pour la position axiale de l'oculaire, comme il arrive pour l'objectif.

---

[117] Pour s'assurer de ça, il est bien de superposer à l'oculaire un petit télescope ou longue-vue, avec grossissement 3 - 5 ×, mis au point pour l'infini, ou utiliser un oculaire micrometrique mis bien au point sur le réseau.

La face supérieure de l'oculaire porte la "**lentille oculaire**" ou émergente, le diamètre de laquelle peut aller de 5 mm (oculaires négatifs forts à basse pupille) à 25 mm (oculaires positifs faibles, à haute pupille). Il est évident que, à égalité de champ angulaire **α** ou 2**α** (voir le § 7.1), la lentille oculaire sera autant plus grande que plus haute est la pupille: telle lentille en effet est la base d'un cône, l'hauteur duquel est égal à l'hauteur de la pupille et l'ouverture duquel (voir le § 5.2.3 et la fig. 23) est le demi-champ angulaire **α** de l'oculaire.

La surface supérieure (externe) de la lentille oculaire ne reçoit pas d'habitude de traitement anti-réfléchissant étant donné qu'elle se salit aisément (poussière, contact avec les doigts et les cils, etc.) et doit être nettoyée avec fréquence: le traitement est plus délicat du verre et il se raie immédiatement.

D'habitude, la monture mécanique dépasse vers le haut la surface extérieure de la lentille oculaire, et le nettoyage se rend plus difficile.

Fig. 77 – Oculaire positif. Le diaphragme de champ visuel se trove sous le sistème des lentilles, dans le tube qu'on voit à gauche.

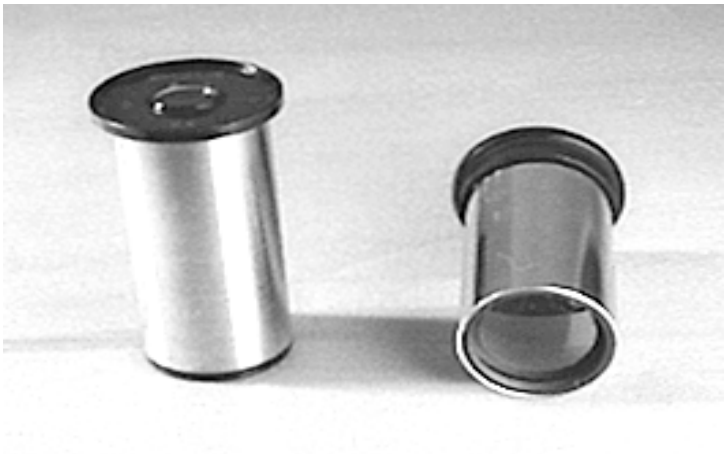


Fig. 78 - Oculaire négatif. Le diaphragme de champ visuel ne se voit pas de l'extérieur car il se trove au milieu des deux lentilles.

La formule de cet oculaire est celle d'Huygens.

Le bord supérieur de l'oculaire peut servir d'appui ou pour l'insertion de types différents d'accessoires:

□ filtres "d'arrêt" pour fluorescence; □ filtres polarisants; □ prismes pour le dessin ("chambre claire" d'Abbe ou semblables, voir le § 27.7.1, fig. 110); □ prismes ou miroirs pour la microprojection[118]; □ œillères, etc.

Les **œillères** sont un organe constitué par métal, plastique ou gomme, qui entoure le bord supérieur de l'oculaire; il a la forme de coupe et sert à réduire l'entrée de lumière latérale dans l'œil de l'observateur. Dans certains cas il n'est pas simplement circulaire, mais il a une aile latérale qui sert à remplir l'angle extérieur de l'œil. L'œillère se coince ou se vise au bout supérieur de l'oculaire, et dans ce cas on la démonte facilement; parfois elle est moue, en gomme, et on peut la replier à l'arrière; d'autres fois elle est rigide mais coulissante à télescope sur la partie supérieure de l'oculaire de façon à pouvoir disparaître, et dans ce cas elle n'est pas extractible.

Pour tous ces accessoires, il serait bien que le diamètre de l'extrémité supérieure soit le même

[118] Souvent les prismes, plus qu'à l'oculaire, sont fixés au tube porte-oculaires (voir le § 27.7.1).

pour tous les oculaires; en effet il y a une mesure très diffuse, de 28 mm, correspondante aux règles DIN 58 881, mais il y a beaucoup d'exceptions.

Nous avons décrit dans le § 12.1 les **oculaires micrométriques** ou **réglables**, leur structure, leur usage. Au-delà du "micromètre-oculaire", tels oculaires peuvent contenir des fils croisé à 90° (pour l'observation en polarisation), des dessins à rectangle (pour l'encadrement d'une photographie), petits cercles (pour focaliser ou pour délimiter la zone sensible d'un éventuel posemètre "spot"), etc. Eh bien, souvent ces figures doivent être orientées de manière précise et jamais tournées. Étant donné que le réseau, le micromètre, ou de toute façon la figure, en général déposée sur un disque de verre, est fixé rigidement à l'intérieur de l'oculaire, il ne reste qu'imposer une position fixe à ce dernier, soit-il en permettant un démontage facile. La solution normale est celle de créer, tout de suite au dessous de la battée, une clé, c'est-à-dire une saillie qui se coince dans une entaille spéciale du bord supérieur du tube et empêche de tourner l'oculaire, mais pas de le défiler. La clé peut être constituée par la tête d'une petite vis, par une saillie de la battée ou par une bague spéciale avec une dent ou une épine. La clé empêche d'utiliser l'oculaire qui en est doué sur un tube dépourvu de l'entaille à peine cité, étant donné que cette clé le tient soulevé.

20.4 – La STRUCTURE OPTIQUE

Étant donnée l'ouverture plus petite et l'agrandissement toujours modeste, l'oculaire n'a pas les exigences et l'importance de l'objectif; par contre, il doit fournir un grand champ angulaire (§ 20.1) et travailler avec la pupille extraite ou externe au système (§ 20).

En outre, il peut aisément introduire des aberrations qui empirent la qualité de l'image fournie par l'objectif, pendant qu'en d'autres cas il peut compenser certains résidus d'aberrations de l'objectif: nous l'avons vu pour la chromatique latérale (§ 19.3.1), et nous le verrons pour l'astigmatisme.

20.4.1 – Oculaires positifs et négatifs

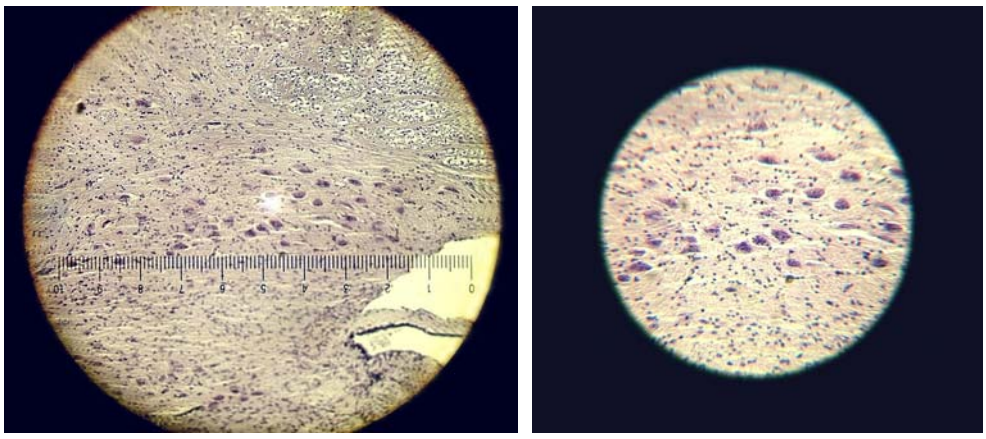
On a fait allusion plusieurs fois à ce sujet et nous pouvons par suite le résumer (voir le § 7.2).

Un oculaire est "**positif**" quand son système de lentilles reste complètement AU DESSUS du diaphragme de champ visuel (DV dans la fig. 32, dans le § 8.8). On parle de "**oculaires à diaphragme externe**": voir la fig. 77 dans laquelle le tube qui porte le diaphragme de champ visuel (à gauche) ne contient pas de lentilles; le groupe des lentilles est tout renfermé dans la partie qui se vise sur le tube cité, comme il apparaît au centre de l'illustration; à droite, on voit le même oculaire complet. Essentiellement, un oculaire positif peut être reconduit à une lentille simple unique dans l'approximation de Gauss (§ 2.5.1), même si la correction des aberrations demande un système plus complexe.

L'oculaire "**négatif**" contient par contre deux systèmes indépendants, pas reconductibles à un seul: une **lentille oculaire** au dessus du diaphragme DV, qui déroule la fonction d'oculaire positif et se trouve du côté de l'œil (d'où son nom)(Lo dans la fig. 32), et une **lentille de champ**, sous le DV, qui a la fonction illustrée dans le § 7.2 (LC dans la fig. 32). Le diaphragme DV se trouve donc au milieu des deux lentilles (oculaires "**à diaphragme interne**")(voir la fig. 78), et on trouve là aussi le premier foyer (côté objet) de l'oculaire. Le second foyer se trouve par contre au dessus de la lentille oculaire, tout près, mais pas coïncident, avec le disque de Ramsden. Voilà parce que un oculaire négatif peut être utilisé comme loupe de grossissement seulement en le renversant: l'objet doit rester très près d'un des foyers, et seulement le second est accessible. Ceci est un critère pour distinguer les oculaires négatifs, mais souvent, même dans les oculaires positifs, le premier foyer n'est pas accessible car il se trove à l'interieur de la partie inférieure du système.

Des performances de l'oculaire négatif on a déjà parlé dans le § 7.2 et on a vu que la lentille

de champ a comme première fonction d'augmenter le champ angulaire 2**α** de l'oculaire et diminuer le grossissement (V)(voir la figure ici dessous). Cependant elle a aussi un grand avantage: avec des valeurs opportunes de la puissance, de l'index, de la dispersion, de la forme et de la position des lentilles, un oculaire constitué par deux lentilles simples, une oculaire et une de champ, peut être achromatique, c'est-à-dire corrigé de chromatique latérale et assez bien de chromatique longitudinale.



Encéphale de chat. Coloration hématoxyline/eosine.
Obj. 20:1. Oculaire négatif 6×, à gauche avec la lentille de champ; à droite sans cette lentille: l'agrandissement est plus grand, mais le champ est réduit.

Cela explique le succès, surtout en passé, d'une recette si économique. Aujourd'hui on cherche des systèmes plus complexes pour une meilleure correction, le plus grand champ angulaire et une pupille plus élevée.

20.4.2 – Les formules classiques

 Oculaire d'**Huygens** ou de **Campani**[119]

Il est formé par deux lentilles plan-convexes avec la convexité vers l'objectif, produites avec le même verre ("**crown**", qui est un silicate léger de potassium, calcium, etc.). La distance entre les lentilles est égale environ à la demi-somme de leurs focales; la focale de la lentille de champ est environ le double de celle de l'autre lentille. La lentille inférieure, dans les recettes modernes, peut être un ménisque convergent. Le plan focal objet, et par suite le diaphragme DV, est au milieu des deux lentilles.

Il s'agit d'un oculaire négatif dans sa forme la plus simple. La pupille de sortie est basse; l'hauteur de la pupille, dans les formules classiques, est égale à un troisième de la focale de l'oculaire, (**f_{oc}**). Le champ angulaire est modeste (même moins de 30°); sont fortes la courbure de champ, la distorsion, la sphérique. La chromatique latérale (CVD) peut être par contre nulle, comme déjà dit. L'oculaire peut être donc du type achromatique (voir les §§ 19.3.1 et 20.4.4 et la fig. 79 à droite). Si on veut en tirer une correction de la CVD de type **compensateur**, la lentille oculaire sera en général un doublet et la lentille de champ peut être de verre **flint**, qui est un silicate lourd de potassium et plomb à haute dispersion et index élevé. On peut atteindre ainsi un fort grossissement (fig. 79 à gauche).

Dans les types **micrométriques** le réseau, avec le DV, est renfermé au milieu des deux lentilles et donc il reste propre pour des temps très longs. Dans les oculaires positifs le réseau se trouve par contre dans la partie inférieure de l'oculaire, découvert vers le bas et reçoit aisément de la poussière. Telle poussière est vue au point dans le même plan de l'image de l'objet, étant donné qu'elle se trouve dans le premier foyer de l'oculaire.

En réalité, les bons constructeurs ont le soin de déposer le réseau sur la face supérieure, interne, du réseau, de manière que la poussière sur la face inférieure résulte peu focalisée.

Un autre perfectionnement consiste à couvrir la graduation du micromètre avec un second disque de verre d'épaisseur pas négligeable (structure "à sandwich"). De cette manière, les deux sur-

[119] Giuseppe CAMPANI, opticien et astronome de Spolète (17ème siècle).

faces extérieures du micromètre sont toutes les deux lointaines de la graduation.

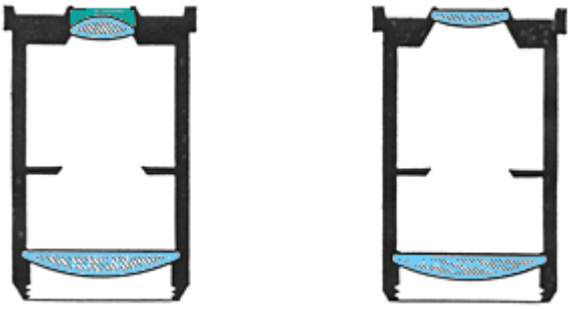


Fig. 79 - Un oculaire compensateur négatif, à gauche, et un achromatique, d'après Huygens, à droite.
De: H. Determann et F. Lepusch, "Le microscope et son utilisation", Ed. Leitz, Wetzlar, 512 - 69a, 1974.

 Oculaire de **Ramsden**

Dans la formule classique, il s'agit de deux simples lentilles plan-convexes avec les convexités qui s'opposent et très voisines. Pour cette dernière raison, les deux foyers sont externes au système et l'oculaire est positif. Les lentilles sont encore de verre crown. La pupille est basse, le champ est modeste, la courbure de champ est sensible. La chromatique latérale (CVD) ne peut pas être corrigée, à moins de mettre la lentille inférieure dans le premier foyer de la supérieure, c'est-à-dire dans la position de l'image intermédiaire, et cela montre au point chaque pépin de poussière qui s'y dépose. Coma et sphérique peuvent être petites. Si une ou les deux lentilles sont constituées par des doublets, les corrections peuvent améliorer et on peut avoir un oculaire achromatique ou compensateur: "de Plössl" ou «symétrique» (deux doublets), ou "de Kellner" (un doublet oculaire plus une lentille simple plan-convexe); on a ainsi des champs angulaires même au-delà de 40°.

 Oculaire **orthoscopique**

C'est une variante de celui de Ramsden, au sens que la lentille inférieure est remplacé par un triplet symétrique avec deux biconvexes égales collées sur une biconcave. La distance entre les lentilles est moindre. Le système est positif, il peut avoir la pupille assez haute et un champ jusqu'à 50°, en rentrant ainsi dans la catégorie des "grand-angulaires" (voir le § 20.1); courbure et distorsion sont réduites (de cela vient le nom qui signifie en grec "qui voit droit").

Cette recette, appelée aussi "**périscopique**" ou "**aplanétique**" est très utilisée aussi dans les télescopes; en microscopie, on la consacre en général à une correction compensatrice.

 Oculaires **"grand-angulaires**": sous ce nom vont beaucoup de recettes, avec un champ angulaire supérieur à 40°, en général positives, avec correction achromatique ou compensatrice, et souvent avec pupille haute. Ces caractéristiques, c'est-à-dire grand champ et pupille haute, se répandent dans beaucoup d'instruments modernes, mais il faut être prudents parce que, afin d'obtenir ces performances, on néglige souvent certaines corrections. Nous citons le schéma de Plössl[120] (deux doublets égaux biconvexes, déjà décrit), d'Erfle (deux doublets différents avec une lentille simple interposée), etc.

Actuellement, avec la disponibilité de verres optiques spéciaux, on a des bonnes performances même de recettes relativement simples et la variété de telles recettes ne peut pas être décrite ici.

Comme on a expliqué dans le § 20.1, un oculaire peut être "grand-angulaire" avec un diamètre extérieur de 23,2 mm seulement avec un grossissement V plus grand de 10 ×; si le diamètre extérieur est 30 mm, on peut avoir le grand champ à partir d'une valeur de V égal à environ 6,4 ×.

[120] Simon PLÖSSL, opticien viennois (1794 – 1868).

20.4.3 - Les aberrations des oculaires

 Sphérique et **coma**. Elles sont modestes en général, et en certains cas le constructeur cherche une compensation entre les résidus d'aberrations de l'objectif et de l'oculaire.

Nous savons déjà quels sont les facteurs qui influent sur la sphérique dans l'image au microscope: résidu dans l'objectif, épaisseur **d** de la lamelle, longueur du tube **Lm**. Maintenant nous devons ajouter le résidu de l'oculaire.

Dans les systèmes modernes CF (§ 19.3.2) on cherche cependant une correction totale, soit dans l'objectif, soit dans l'oculaire pour lequel vient délaissée l'idée de compensation.

 La **courbure de champ** d'un oculaire est plus petite en général de celle d'un objectif non plan, étant donnée la plus grande focale, mais elle est du même sens et les deux courbures s'ajoutent. La plus grande contribution à la courbure est donnée par la lentille de champ des oculaires négatifs.

 La **distorsion** en général est modeste et crée une difficulté seulement quand on exécute des mesures de longueurs ou de surfaces sur des grandes parties de l'image.

 Pour l'**astigmatisme** il faut rappeler tout ce qu'on a exposé sur les "nappes" (voir le § 13.2.5) et sur la surface de Petzval (§ 13.1.1); la correction de la courbure et de l'astigmatisme doivent procéder avec le même pas au sens qu'au moins une des nappes devrait coïncider avec la surface de Petzval et les deux nappes devraient coïncider avec le plan souhaité de l'image. Si donc un objectif est corrigé au sens que seulement une des nappes est aplanie, l'autre sera recourbée. On peut alors penser à une compensation de l'astigmatisme aussi entre objectif et oculaire: l'oculaire peut avoir un résidu, c'est-à-dire une courbure des nappes, tel à compenser celui de l'objectif. C'est la méthode utilisée par certaines maisons pour les propres objectifs plan ("Pl", "NPl" ou semblables), qui possèdent un résidu d'astigmatisme compensé par les oculaires de la même maison.

20.4.4 – L'aberration chromatique

Pour la chromatique longitudinale, seulement dans certains cas on a autrefois cherché la "compensation" entre objectif et oculaire. Surtout dans les systèmes CF modernes (§19.3.2) on cherche la correction totale soit dans l'objectif soit dans l'oculaire.

Pour la chromatique latérale ou CVD, on rappelle ce qu'on a dit dans le § 19.3.1: on appelle **achromatiques** les oculaires qui sont corrigés de la CVD (et, si possible, de la chromatique longitudinale), et doivent être jumelés avec des objectifs également corrigés de CVD (faibles achromatiques, systèmes CF); sont **compensateurs** les oculaires surcorrigés pour la CVD qui s'accouplent avec les objectifs souscorrigés de CVD: forts achromatiques, tous les semi-apochromatiques et apochromatiques. Cette distinction est utile pour les recettes classiques, pendant que pour les systèmes CF on utilise seulement des oculaires achromatiques, étant donné que les objectifs (+ l'éventuelle lentille de tube) sont totalement corrigés.

Nous répétons aussi que la compensation a des infinies nuances, au sens qu'elle est non seulement différente d'un constructeur à l'autre, mais aussi d'un objectif à l'autre du même instrument. Ainsi, dans les systèmes classiques, un équipement complet d'objectifs peut demander deux ou trois types différents d'oculaires, même si, pour économie, le fournisseur offre en général un seul oculaire ou une série d'oculaires de différent grossissement, mais avec la même correction.

En pratique, les oculaires achromatiques ou compensateurs se reconnaissent selon la règle décrite dans le § 19.3.1.

20.5 – L'ÉQUIVALENCE des OCULAIRES

En différentes occasions on a parlé d'oculaires et donc nous pouvons même ici résumer.

Pour remplacer sans dégât un oculaire avec un autre il faut vérifier quelques caractéristiques mécaniques et optiques.

 Diamètre de la partie inférieure, celle qui se glisse dans le tube porte-oculaires. Seulement dans certains cas, on peut introduire un oculaire de diamètre inférieur dans un tube de diamètre supérieur. Ils existent dans le commerce, ou sont aisément réalisables, des raccords spéciaux. Ils doivent cependant tenir compte aussi de la position axiale de l'oculaire, c'est-à-dire ils doivent le tenir à l'hauteur correcte.

 Longueur de la partie inférieure: on a déjà expliqué que le tube porte-oculaires a une longueur limitée, différente d'un tube à l'autre; si l'oculaire est trop long, il ne pénètre pas complètement, et on perd la parfocalité des objectifs (voir plus loin).

 Parfocalité. Comme on a expliqué dans le § 20.2, la parfocalité des oculaires est un facteur important, qui doit être contrôlé avant d'acheter un oculaire ou aussi un instrument complet; et on a expliqué et répété quelles conséquences donne un oculaire qui n'a pas le premier foyer à l'hauteur correcte: sera altérée la position de l'image intermédiaire, donc les conjuguées de l'objectif, donc la parfocalité des objectifs (§ 19.1.2), l'agrandissement **Mob** et la correction, surtout de la sphérique (§ 13.2.3.1). Pour être interchangeables, tous les oculaires d'un équipement doivent au moins avoir le premier foyer à la même distance de la battée, sauf le cas des oculaires négatifs dans lesquels il faut tenir compte de l'abaissement de l'image intermédiaire opérée par la lentille de champ.

 Champ: dans les §§ 19.2.4 et 19.4.2 on a discuté du problème du champ (objet) linéaire de l'oculaire qui ne doit pas dépasser le champ (image) nominal de l'objectif: on ne peut pas remplacer un oculaire avec un autre d'index de champ plus grand si tel grand champ dépasse le champ nominal de l'objectif.

 Corrections: l'interchangeabilité des oculaires suppose qu'ils aient les mêmes corrections, surtout pour la chromatique latérale, astigmatisme, etc. De ceci on a déjà parlé amplement.

En conclusion, l'accouplement entre objectif et oculaire est toujours critique et la substitution d'un objectif ou d'un oculaire avec un autre peut fonctionner seulement si sont satisfaites toutes les conditions citées plus haut et celles énumérées dans le § 19.4.

20.6 – Les OCULAIRES DIVERGENTS

Nous avons fait allusion dans le § 2.5, fig. 9, au pouvoir divergent d'une lentille aux surfaces sphériques qui soit plus mince au centre qu'aux bords.

Nous ne voulons pas traiter *in extenso* la formation des images réelles à travers une lentille divergente, mais il peut suffire une compréhension intuitive au moyen de la fig. 80:

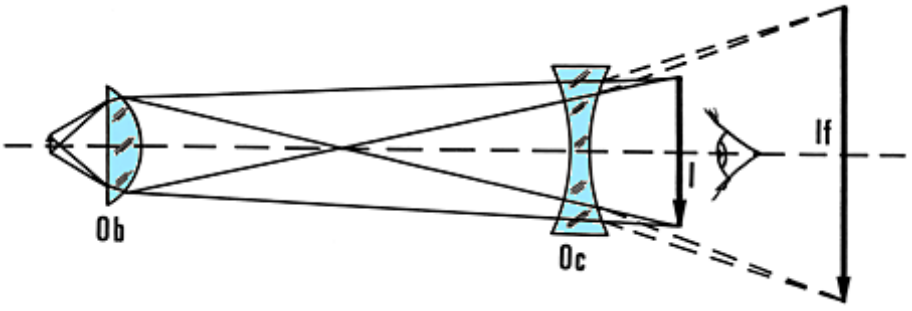


Fig. 80

l'objectif Ob, du type à "conjuguée finie", est mis au point correctement et il fournit de l'objet une

image intermédiaire, réelle, renversée, agrandie, en **I**. Maintenant on met DEVANT l'image intermédiaire une lentille divergente **Oc**; la puissance et la position de la lentille soient telles que les faisceaux qui se dirigent en chaque point de **I** (en sont dessinés seulement deux, pour les points extrêmes de I) deviennent moins convergents, sans arriver à diverger. Au lieu de **I** se forme ainsi une image **If**, toujours réelle, agrandie par rapport à **I** et déplacée en direction opposée à **Ob**. Le fonctionnement de cet oculaire divergent est différent de celui de l'oculaire de Galilée, qui est divergent lui aussi, mais il produit une image finale virtuelle, s'il est correctement au point.

L'oculaire de la fig. 80 a une pupille de sortie située entre objectif et oculaire, en vertu de sa puissance négative; l'œil de l'observateur éventuel, cependant, doit rester sur l'oculaire , comme schématisé dans la fig. 80, et donc bien au-delà de la pupille: quelque chose de semblable arrive à tout ce qu'a été schématisé dans la fig. 33 (voir le § 8.8): la pupille de l'œil, en étant lointaine de la pupille de l'oculaire, se conduit comme un diaphragme de champ et limite le champ angulaire. De ça en découle que l'oculaire divergent peut être utilisé seulement où est nécessaire une image réelle: en photographie ou en projection.

Ses avantages sont: sa courbure de champ est opposée à celle de l'objectif, et il peut la compenser en partie; son astigmatisme peut réduire aussi celui de l'objectif.

Avec l'avenue des objectifs plan, les oculaires divergents ont perdu beaucoup de leur intérêt et leurs défauts, comme la forte distorsion, en ont décrété la presque disparition du marché.

20.7 – Les OCULAIRES PROJECTIFS

Le terme "projectif" indique un oculaire capable génériquement de fournir une image réelle, convenable à la photographie et à la projection.

L'oculaire divergent à peine décrit est un premier exemple de projectif.

Dans le § 12.5 on a vu comme il est possible d'obtenir une image réelle d'un oculaire convergent: il est suffisant que l'image intermédiaire se forme devant le premier foyer de l'oculaire en retombant dans le cas de la fig. 13 (§ 2.6.2.4). Eh bien, ce résultat peut être obtenu de trois manières différentes:

- augmenter la distance objectif-objet, et par suite diminuer la distance objectif-image intermédiaire, par rapport à la position de mise au point idéale dans laquelle l'image intermédiaire se forme dans le foyer de l'oculaire et l'image finale est à l'infini. En pratique, il s'agit d'une retouche de la mise au point; si l'image finale réelle doit se former à une distance de l'oculaire[121] d'au moins 20 cm, le procédé est correct et **n'importe quel oculaire est convenable**;
- laisser la mise au point en conditions idéales et soulever l'oculaire. Cette méthode est peu pratique, mais elle est également correcte pour des tirages supérieurs à 20 cm et on la réalise avec des oculaires normaux;
- utiliser un oculaire réglable (voir le § 12.1): la mise au point de l'objectif peut être correcte, l'image intermédiaire et le diaphragme de champ visuel se trouvent dans la position idéale: en soulevant la seule lentille oculaire, c'est-à-dire en dévissant sa monture, on obtient le but de mettre l'image intermédiaire devant le foyer de la lentille oculaire, foyer qui s'est soulevé avec la lentille même; aussi cette méthode est peu pratique, mais assez correcte.

Quand par contre la distance oculaire-image finale (ou tirage) est inférieure à 20 cm, il vaut mieux utiliser des oculaires spéciaux, en général convergents, dits "**projectifs**" qui sont optimisés pour donner une image réelle avec la seconde conjuguée finie.

Certains constructeurs utilisent en réalité un autre système, qui permet d'utiliser des oculaires normaux avec n'importe quelle valeur du tirage: le microscope est mis à point correctement et l'image finale est à l'infini. Sur l'oculaire (en correspondance du disque de Ramsden) on pose une lentille convergente dite "**lentille de chambre**" la focale de laquelle est égale à la distance qu'on

[121] On peut appeler "**tirage**" la distance oculaire-image finale, et cela correspond à la longueur d'une éventuelle chambre obscure sur le fond de laquelle se trouve l'émulsion photografique.

veut avoir entre le disque de Ramsden et l'émulsion ("**tirage**"). De cette manière l'image finale à l'infini est reportée dans le second foyer de la lentille de chambre.

Quand on désire par contre créer une image finale réelle à grande distance pour la projection sur écran ou sur mur, on peut difficilement utiliser des oculaires normaux étant donné que leur agrandissement linéaire est excessif (voir aussi le § 27.7.1): un normal oculaire 10× (18) crée déjà une image sur l'écran d'environ 1 m de diamètre à la distance de 1,4 m[122]. On utilise alors des projectifs spéciaux avec une focale jusqu'à 200 mm; pour comparaison, on pense que l'oculaire typique cité (10× (18)) a une focale de 25 mm.

Quoi que se sois, l'agrandissement linéaire de l'oculaire qui produit une image réelle est déductible de la (61), comme on a dit dans le § 18.12, ou bien il est donné par la (14) dans le § 2.6.2.2:

$$M = x' / f \qquad (14)$$

Dans ce cas, **x'** est le "tirage" deja cité et **f** est la focale de l'oculaire, qu'on peut tirer de la (60) (dans le § 18.12):

$$f_{ok} = 250 / V_{ok} \qquad (60)$$

dans laquelle $\mathbf{V_{ok}}$ est le grossissement visuel de l'oculaire.

Les projectifs peuvent être positifs, négatifs, achromatiques, compensateurs, etc. et mécaniquement ils peuvent aussi différer beaucoup d'un constructeur à l'autre.

Pour la reprise de la télévision au microscope (§ 30.9) il peut y avoir des exigences différentes: les modernes détecteurs de la télévision, que ce soient du type thermoïonique (tube au vide) ou à état solide (CCD et semblables), ont une surface sensible petite, parfois plus petite de 1 cm, et doivent être disposés, pour des raisons d'utilité pratique, très voisins de l'oculaire. À ce point il est nécessaire un système optique intermédiaire, du type de la lentille de chambre sur citée, qui peut être constitué par le même objectif de la caméra de télévision, ou par un projectif spécial. Le problème principal est d'adapter les dimensions de l'image finale à celles du détecteur: beaucoup de "raccordements TV", même de constructeurs en renom, ont le défaut d'utiliser seulement la partie centrale de l'image, comme on la voit dans les oculaires. C'est comme dire que dans le "canal TV" on a un agrandissement beaucoup plus grand que dans les oculaires.

Du problème de la reprise de télévision ou photographique au microscope on traitera dans les §§ 30.8 et 30.9; il s'agit d'un cas spécial, qui rentre dans la "microscopie spéciale".

20.8 – Les OCULAIRES de MESURE

Dans le § 12.1 on a décrit les **oculaires micrométriques** ou **oculaires réglables** et leur structure.

Dans le § 12.2 on a décrit leur usage pour la mesure de l'agrandissement de l'objectif (M_{ob} ou M); dans le § 12.3 on a expliqué comme l'oculaire micrométrique puisse fournir des mesures de longueur, de surface, d'angles, et donc comme il devient un **oculaire de mesure**.[123]

À ce point il ne nous reste pas que décrire des autres cas spéciaux, en remarquant qu'aussi l'oculaire de mesure peut être achromatique ou compensateur et se plier aux mêmes limitations d'usage décrites dans le § 19.3.1. Il peut être aussi positif ou négatif, mais dans ce dernier cas, comme on a expliqué, il ne peut pas servir à mesurer directement l'agrandissement de l'objectif.

En somme, l'oculaire de mesure n'est qu'un oculaire, si possible à lentille oculaire réglable, qui contient un "**réseau**", c'est-à-dire un dessin spécial sur un support en verre, placé dans le plan du premier foyer, c'est-à-dire de l'image intermédiaire (voir le § 12.1). On a déjà expliqué que le réseau peut avoir n'importe quel aspect: s'il est constitué par une graduation linéaire, il peut servir

[122] Parfois les oculaires destinés à la projection ont la lentille oculaire réglable pour optimiser la mise au point quand on change la distance de l'écran.

[123] Voir, dans ce site, l'article n° 24: "La microscopia ottica dall'osservazione alla misura" (en italien).

aux mesures de longueur; si la graduation est circulaire aux mesures d'angles. Un réseau quadrillé peut servir (comme on a dit dans le § 12.3) aux mesures de surface, mais aussi aux comptages de particules; en effet, si on pourvoit à un calibrage (voir le § 12.3) on connaît la surface réelle (dans le plan de l'objet) correspondante au quadrillage entier. Telle surface cependant est subdivisée en nombreux carreaux, d'habitude 10 × 10 = 100 ou 20 × 20 = 400. Si dans la préparation il y a des particules, des points, des globules ou autres à compter, au sens de mesurer combien d'eux il y en a pour une surface donnée, le comptage sera facilité étant donné qu'on compte les points carreau par carreau, file après file, en évitant de compter deux fois le même point.

Mais il y a beaucoup d'autres réseaux, convenables à différents buts. Parfois on demande une mesure du pourcentage de la surface d'un composant donnée dans une préparation composée. Par ex., supposons qu'on ait une section taillée dans un échantillon d'une roche, d'un alliage métallique, de quelque tissu animal ou végétal. Dans un tel échantillon on ait différents composants en grains ou en particules, et les composants soient reconnaissables visuellement, peut-être à la coloration, à la valeur du contraste, etc. Supposons qu'on veuille savoir quel pourcentage de la surface de la section est occupé par chaque composant particulier. On procède avec la méthode statistique. On utilise un réseau qui contient, dans le plan de l'image intermédiaire, un certain nombre de points uniformément distribués. On compte combien de points tombent sur les grains du composant A, combien de points tombent sur les grains du composant B, et ainsi de suite. On répète le comptage sur un certain nombre de "champs", c'est-à-dire de domaines de l'objet, et on ajoute tous les points tombés en A, en B, etc. Avec des simples calculs on déduit le pourcentage pour la surface des différents composants. Si se vérifient certaines suppositions sur l'homogénéité de l'échantillon, etc. on peut tirer de l'analyse d'une surface aussi la distribution des différents composants dans l'échantillon, c'est-à-dire leurs pourcentages en volume. Justement la possibilité de mesurer les volumes relatifs dans un agrégat composé a donné à ces analyses le nom de "**stéréologiques**".[124]

Il est évident que, derrière ce simple principe, il y a tout un développement mathématique qui permet de calculer quel nombre de mesures il faut effectuer pour obtenir une précision demandée dans les résultats (calcul des erreurs, sur base statistique) et ceci en relation au rapport volumétrique des différents composants, etc.

Les réseaux pour les analyse stéréologiques se ressemblent tous; ils contiennent 10 - 20 points ou petites croix uniformément distribués dans un champ carré; ils sont cités sous le nom de leur auteur (Weibel, Merz, etc.).

Aujourd'hui, les méthodes stéréologiques laissent la place aux techniques d'analyse automatique de l'image qui se basent sur la technique da la télévision et sur le calcul électronique. À la même manière sont abandonnés les **oculaires intégrateurs** qui permettent de mesurer les rapports entre les surfaces des différents composants d'une section, en évaluant l'espace parcourue sur ces composants par un point qui traverse l'image sur la commande de différents tambours gradués. Chaque tambour additionne, c'est-à-dire intègre, les segments parcourus par le point mobile sur chaque composant.

En d'autres cas, on doit mesurer la dimension moyenne des grains d'un agrégat à un ou plus composants (roche, alliage métallique, etc.). La méthode la plus rapide est de comparer l'image de l'objet avec une série de réseaux qui représentent une structure analogue en forme schématique, avec des valeurs opportunément échelonnés des dimensions des grains. Les réseaux de telles séries doivent être explorables rapidement: l'un après l'autre on observe les réseaux en les comparants avec l'objet et on choisit celui qui ressemble au plus grand degré. Chaque réseau correspond à une dimension moyenne des grains. Il faudra naturellement un calibrage en relation à l'agrandissement de l'objectif ou des systèmes ou tubes intermédiaires. Pour une substitution facile des réseaux, ont été construits des oculaires contenants un disque tournant, ("revolver") qui porte pas mal de réseaux différents. L'axe de rotation du disque est parallèle à l'axe de l'oculaire mais excentrique; en tournant le disque, les réseaux vont en position de travail un à la fois.

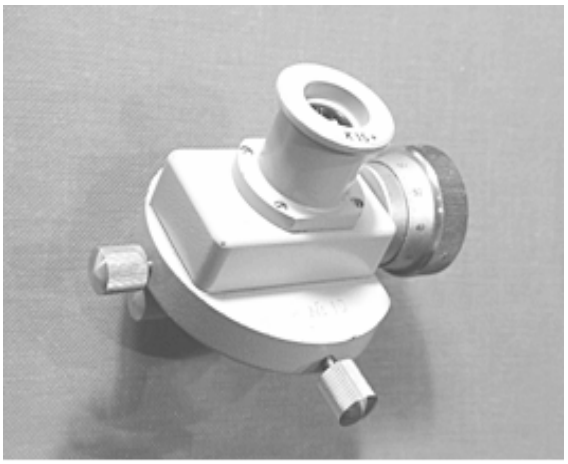
Ces enquêtes sur les dimensions des grains vont sous le nom de **mesures granulométriques**.

---

[124] Du grec "stereon" = solide, c'est-à-dire à trois dimensions. C'est la même étymologie de "stéréo-scopique", "stéréo-phonique", etc.

En d'autres cas, au-delà des modèles granulométriques, ces **oculaires à revolver** portent des réseaux avec des dessins d'autre type, par ex. profils de filets de vis; avec ces réseaux, on compare la silhouette d'un objet avec un profil-étalon.

Quand il faut délimiter une surface spéciale dans le plan image, on utilise des oculaires contenants un diaphragme, en général carré, de côté réglable. La régulation se fait avec une bague extérieure; avec calibrage opportun, au moyen d'un micromètre objet, on peut savoir à quoi correspond dans le plan objet le côté du carré, pour chaque position de la bague. Il est ainsi possible aussi d'exécuter des mesures de dimensions de l'objet. Celui-ci est l'**oculaire d'Ehrlich**.[125]



Pour des mesures linéaires de grande précision on utilise l'**oculaire à tambour** qui contient une graduation fixe normale; sur laquelle on voit superposée une ligne qui est mobile au moyen d'un bouton latéral.

Concentrique au bouton il y a un tambour gradué, d'où le nom, qui permet de lire avec précision la position de la ligne mobile; en portant la ligne à toucher les deux côtés d'un objet observés dans l'oculaire, on peut mesurer la largeur de l'objet. L'oculaire à tambour doit être bloqué sur le tube porte-oculaires, avec une vis latérale ou autre, étant donné que le jeu entre oculaire et tube introduirait une erreur.

Semblable à celui-ci est l'**oculaire à spirale** dans lequel la ligne mobile est commandée par une bague concentrique à l'oculaire; cette bague porte un disque en verre avec une spirale gravée; on lit la spirale directement en regardant dans l'oculaire et elle donne la position de la ligne.

L'**oculaire indicateur** n'est pas un vrai oculaire de mesure: il contient simplement une pointe mobile dans le plan de l'image intermédiaire: on peut déplacer la pointe pour indiquer un point quelconque de l'image. L'utilité de ce mécanisme consiste à permettre d'indiquer avec certitude à un autre observateur un point spécial de l'objet. L'emploi est donc didactique.

Par contre, un vrai oculaire de mesure est l'**oculaire spectroscopique** (**spectroscope pupillaire**) qui fournit le spectre de la radiation qui compose l'image finale. Il permet une analyse spectrale (grossière, à vrai dire) mais il ne produit pas d'image de l'objet. En conséquence, ce n'est pas un vrai oculaire.

À la même manière on peut exécuter une mesure de luminance de l'objet, sur tout le champ visuel ou sur une petite partie du même, au moyen d'un **oculaire photométrique**. Pour avoir une bonne sensibilité ou résolution, tel oculaire devient cependant complexe et volumineux, et on parle de "**microphotomètre**".

Pour le dessin de l'image microscopique, différents types de mécanismes existent, traités dans les §§ 27.7.1 et 27.7.2 et dans la fig. 110. Le plus simple peut s'appeler "**oculaire à dessin**" en tant qu'il ressemble beaucoup à un oculaire et il se base sur le principe de la "chambre claire" d'Abbe.

Nous nous arrêtons ici étant donné que dans la longue histoire de la microscopie infinis sont les problèmes spéciaux qui se sont présentés aux micrographes et autant infinies sont les différentes solutions proposées par les constructeurs.

20.9 – La NOTATION des OCULAIRES

Près des constructeurs avant de 1950 il était assez commun de marquer les oculaires avec des chiffres ou indicatifs arbitraires desquels on pouvait tirer les performances de chaque oculaire au moyen d'un tableau spécial.

---

[125] Paul EHRLICH (1854 – 1915), pathologiste et histologiste allemand, qui introduisit l'usage des colorants d'aniline, Nobel pour la médicine, Académique des Lincei, élève de R. Koch.

Actuellement, ils existent soit des indications qui sont différents d'un constructeur à l'autre, soit des indications d'usage universel.

Les indications non standard concernent la catégorie des oculaires. Un H ou aucun indicatif peut indiquer un oculaire Huygens (§ 20.4.2). De nos jours, les indications H ou HE (high eye-point) indiquent par contre les oculaires à haute pupille (voir dessous). Un compensateur sera marqué d'un C ou un K ou de "Compens" ou d'aucun indicatif. Un W ou GC ou GW ou WF ou GF ou UW peuvent indiquer un grand-angulaire (§ 20.1). Les "**oculaires photographiques**" ("Phot") ou "**complanétiques**" (§ 19.2.3.2) sont des oculaire avec un résidu d'astigmatisme qui servent à aplanir l'image ou au moins une des "nappes" (§§ 13.2.5 et 20.4.3) d'un objectif non plan; évidemment, ils ne doivent pas être utilisés avec les objectifs plan, et donc il faut faire bien attention à leur notation, pas toujours claire.

L'indication P peut indiquer un oculaire particulièrement corrigé de la courbure de champ ou à utiliser en radiation polarisée. "A" peut indiquer un oculaire achromatique. "Br"[126] ou le symbole d'une lunette (👓) indiquent un oculaire à haute pupille, convenable aux porteurs de lunettes. "O" est souvent utilisé pour les oculaires orthoscopiques (§ 20.4.2), plus ou moins grand-angulaires.

Par contre, sont très standardisées les indications de grossissement visuel V (voir la (21) dans le § 4.3) et d'index de champ **s'** (voir les §§ 7.1 et 7.2). Le grossissement V est indiqué par un numéro, souvent suivi par un signe ×. Ensuite, il peut y avoir l'indication de **s',** exprimée en mm, séparé par une barre ou renfermé entre parenthèse ou dans un petit cercle: ex. 10/20 ou 6× / 18 ou 16× (12,5).

Il est standard aussi l'indicatif "Pol" qui indique un oculaire prévu pour l'usage en radiation polarisée. Tels oculaires sont essentiellement caractérisés par la présence d'un réseau contenant deux fils croisés à 90°; le réseau impose évidemment que la lentille oculaire soit réglable (pour compenser éventuelles fautes du pouvoir convergent de l'œil). À la fin du § 20.3 on a vu qu'une figure en croix demande une orientation obligée de l'oculaire autour de l'axe optique et on obtient ça avec une **clé** proéminente qui empêche l'usage de ces oculaires sur un tube normal.

20.10 - OCULAIRES et LUNETTES

On a plusieurs fois expliqué que le microscope est projeté de façon que l'image finale, celle fournie par l'oculaire pour l'observation directe, soit virtuelle et à l'infini. Soit-il en rappelant que la notion d'infini en optique se limite à «beaucoup plus grand que la focale», le fait reste qu'un microscope correctement mis au point devrait être utilisé avec l'œil focalisé à l'infini, c'est-à-dire non accommodé.

Tout ceci dans le cas d'un œil normal ou **emmétrope**.

Mais maintenant nous considérons le cas d'un observateur atteint d'**amétropie** sphérique, c'est-à-dire d'un défaut des milieux réfringents de l'œil consistant dans un excès (**myopie**) ou un défaut (**hypermétropie**) de la puissance sphérique. Ces défauts de l'œil se corrigent normalement avec des lunettes ayant une puissance sphérique qui compense le défaut de l'œil. Mais, au microscope, la lunette doit être gardée ?

Si l'amétropie ne dépasse pas ± 3D environ[127], il est possible de la corriger simplement en déplaçant l'image finale, c'est-à-dire en retouchant la mise au point.

Nous savons que, de cette manière, on altère les conjuguées de l'objectif, avec les conséquences connues sur la parfocalité, etc., mais celle-ci peuvent être normalement tolérées. Si l'amétropie est plus forte que ± 3 D, alors il est conseillable de porter les lunettes "pour loin", c'est-à-dire celles qui donnent la meilleure vision pour des objets à quelque mètres de distance.

Tous savent que les âgés deviennent en majorité **presbytes**, c'est-à-dire qu'ils perdent le pou-

---

[126] de l'allemand: "Brillen" = lunettes.

[127] On rappelle que la puissance P d'une lentille, exprimée en dioptrìes (D), est donnée par l'inverse de sa focale exprimée en mètres (vois la note dans le § 2.6.1) : $P = 1/f$ (71)

voir d'accommodation pour lequel, en passant la vision «de loin» à «tout près», ils doivent enfourcher des lunettes ou les remplacer. Le presbyte "pur", sans autres défauts de l'œil, voit bien «de loin» sans lunettes et ainsi il n'a pas besoin de lunettes s'il observe à travers un microscope correctement focalisé. Si le presbyte a des autres défauts dioptriques, il devra utiliser au microscope les lunettes "pour loin", au moins si on dépasse le seuil des trois dioptries sphériques.

Différent est le cas pour les amétropies "cylindriques": dans ce cas le défaut de convergence de l'œil ne peut pas se reconduire à une puissance, c'est-à-dire à une lentille, sphérique, mais à une lentille cylindrique. On parle dans ces cas d'"**astigmatisme**", pas au sens de l'aberration décrite dans le § 13.2.5, qui est symétrique par rapport à l'axe, mais au sens qu'un objet ponctuel apparaît à l'œil allongé en segment, même au centre du champ visuel. Jusqu'à une dioptrie, l'astigmatisme peut être ignoré, mais autrement sont nécessaires les lunettes avec puissance cylindrique, toujours du type "pour loin." Dans le microscope ils n'existent pas des moyens pour compenser ce défaut.

Dans le § 20 on a déjà vu que l'usage des lunettes suppose que la pupille de sortie de l'oculaire soit haute au moins 15 mm pour donner place à la lentille de la lunette; c'est une caractéristique à bien considérer au moment de l'achat. Les meilleurs constructeurs offrent des oculaire soit normaux, soit à haute pupille, opportunément marqués (§ 20.9), mais de toute façon les deuxièmes sont reconnaissables pour avoir une très grande lentille émergente. On rappelle aussi que les lunettes altèrent la position de la pupille (de l'oculaire), en fonction de leur puissance sphérique: la pupille se baisse avec des lunettes convergentes et vice versa.

Dans le cas de l'observation avec les deux yeux, c'est-à-dire avec un **tube bioculaire,** valent les mêmes recommandations: en synthèse, porter les lunettes "pour loin" pour amétropies sphériques supérieures à ± 3 D et en cas d'astigmatisme supérieur à ± 1D. Il y a de plus une complication; les deux yeux peuvent présenter un pouvoir dioptrique différent ("**anisometropie**"); les lunettes tiennent compte aussi de ça mais, pour celui qui ne désire pas porter ou tolérer les lunettes, il peut compenser les anisometropies sphériques de quelque dioptrie au moyen de la régulation d'un ou des deux tubes porte-oculaires (voir le § 24.1.1)[128]. Pour l'astigmatisme, comme on a expliqué, il y n'a pas de remède, sauf l'usage des lunettes spéciales, "pour loin".

Un autre problème est lié à l'usage des **tubes monoculaires** avec un seul oculaire. L'œil qui ne regarde pas dans l'oculaire, comme doit-il se conduire ? L'idéal serait de le tenir fermé, mais après quelque minute la fatigue peut devenir intolérable. Si on le tient ouvert, on a le recouvrement de l'image microscopique avec la table de travail. Le remède pour sortir du dilemme est simple: prendre un bout de carton noir, du type pour album de photographies, environ 10×15 cm; on pratique un trou en position excentrique (si on pratique deux coupes en croix d'environ 30 mm et on lève les quatre bords, le carton restera forcé spontanément sur le tube), et on enfile le carton sur le tube porte-oculaires, après avoir momentanément enlevé l'oculaire. Le champ visuel de l'œil qui ne regarde pas dans le microscope voit un fond noir. Quand on change d'œil, et ceci doit arriver en moyenne chaque cinq minutes pour ne pas fatiguer un seul œil, il faudra tourner le carton. Au-delà du carton auto-construit, ont été produites des œillères spéciales qui déroulent une fonction analogue, mais les distributeurs normaux ne donnent pas grand pois à ces accessoires de petit prix.

20.11 – La PROPRETÉ de l'OCULAIRE

On peut reprendre ici beaucoup de tout ce qu'on a expliqué dans le § 19.5.1 à propos de la propreté de l'objectif. On doit ajouter cependant que la grande (relativement) focale des lentilles de l'oculaire rend moins critique leur centrage et en permet le démontage et le remontage sans

---

[128] La puissance sphérique de compensation D, exprimée en dioptries, correspondante au déplacement axial **s** (en mm) de l'oculaire, se déduit en base à la focale $\mathbf{f_{oc}}$ (en mm) de l'oculaire même: $D = 1.000\ \mathbf{s} / f_{oc}^2$.
Par ex., un oculaire 10× (f_{oc} = 25 mm) corrige une anisométropie de 1 D pour un déplacement axial de 0,625 mm.

trop de précautions. On fasse seulement attention, avant le démontage, à bien noter la disposition des lentilles pour ne pas courir le risque de les remonter renversées ou en ordre erroné.

Une autre différence par rapport à l'objectif est que la lentille de champ, dans les oculaires négatifs, et les réseaux éventuels se trouvent dans ou près du plan focale de l'oculaire. Il en dérive qu'ils apparaissent pratiquement au point, avec la poussière qui s'y trouve, superposés à l'image microscopique.

Quand on observe, superposée à l'objet, une tache ou un filament sombre qu'on suppose ne soient pas présents dans la préparation, il faut établir avant tout où se trouve le corps étranger qui les provoque. Qu'on se rappelle de tout ce qu'on dit à propos du système éclairant: on tienne présents tous les plans conjugués avec l'objet et les parties voisines à tels plans: la préparation, le collecteur, la lentille de champ de l'oculaire, le réseau éventuel présent dans l'oculaire. Plus nuancé apparaît un corps étranger sur la lentille oculaire[129].

Eh bien, si le corps étranger disparaît en bougeant transversalement la préparation, il est signe qu'il se trouve dans ou sur la préparation. S'il disparaît en mettant un verre dépoli (ou un bout de papier-calque) sous le condensateur, il se trouve sur le collecteur ou sur quelque lentille ou fenêtre ou miroir du système éclairant; s'il tourne quand en dévisse un peu l'objectif, il se trouve sur l'objectif même; s'il tourne quand on tourne l'oculaire, il se trouve sur l'oculaire; si la tache reste encore fixe, tourner le tube porte-oculaires autour de la queue d'aronde: dans ce cas, si la tache reste fixe pendant que l'image de l'objet tourne, le corps se trouve sur un des prismes ou des fenêtres du tube.

Pour bien nettoyer un **réseau** de la poussière, après les opérations normales (papier optique ou toile de coton humidifié d'alcool ou xylol), il faut l'observer avec un microscope à bas grossissement, si possible stéréoscopique, en l'éclairant avec une lumière rasante. Chaque grain de poussière doit être enlevé un par un avec une aiguille ou une pointe propre en plastique, dans une pièce fermée et dépourvue de courants d'air.

Il est aussi évident que la **lentille oculaire** se salit aisément parce qu'elle est exposée à la poussière et les cils des paupières y frottent aisément (et l'enduisent). Elle va nettoyée souvent et donc elle est dépourvue en général de **traitement anti-réfléchissant**, qui se raye aisément. Sur le nettoyage, on a déjà consacrées des indications: papier doux ou une vieille toile de coton bien lavée; humidifier avec du xylol, puis repasser avec la toile sèche après avoir embouée la surface avec l'haleine; enlever les poils résidus en soufflant avec un poire en gomme.

L'oculaire en outre, ne doit jamais être enlevé de son tube, étant donné que le tube ouvert se remplirait de poussière.

En nettoyant un oculaire du type "Pol" (voir les §§ 20.9 et 30.7) on fasse beaucoup d'attention: le réseau à forme de croix n'est pas toujours déposé sur un support de verre, mais il peut être constitué par deux fils minces et délicats. Pour remplacer tels fils en cas de rupture, on peut s'adresser aux fibres textiles synthétiques opportunément choisies ou aux fils d'araignée, qui doivent être bien sélectionnés parce qu'ils se recouvrent aisément de poussière. On trouve difficilement en commerce des fils métalliques assez minces. Le travail de fixation des fils doit être exécuté sous un microscope stéréoscopique.

Dans les oculaires réglables ou "à tambour" ou bien où il y a des parties mécaniques en mouvement, il y aura encore les problèmes habituels de propreté, graissage, substitution des graisses durcies, oxydation, etc.

---

[129] Toujours pour réduire les surfaces conjuguées avec l'objet et avec l'image finale, il est bien que le diaphragme de champ soit plutôt loin du collecteur ou d'autres surfaces en verre, justement parce que les éventuels corps étrangers sur ces surfaces ne résultent pas au point avec l'objet, Même les filtres, présents dans le système éclairant, devraient être disposés le plus loin possible du diaphragme de champ: la meilleure position pour les filtres est sous le condensateur.

21 – Le CONDENSATEUR

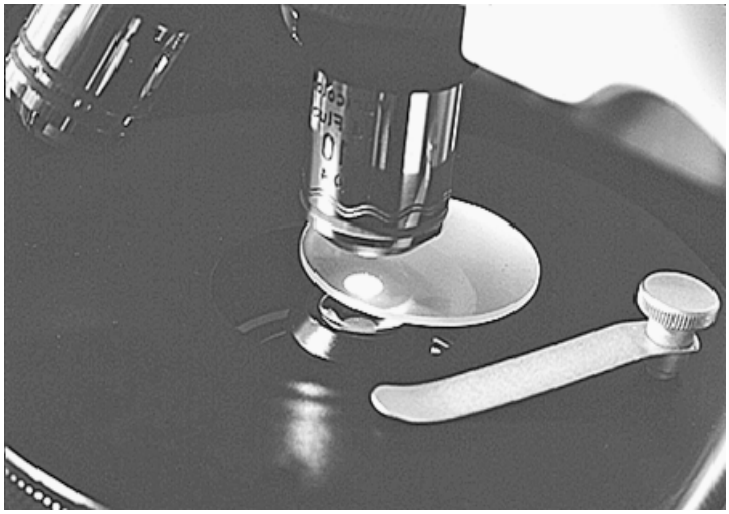
Dans le système éclairant du microscope le condensateur est un système optique qui se trouve dans les environs immédiats de l'objet et qui sert à créer dans le plan de l'objet même un champ éclairé avec une ouverture semblable à celle de l'objectif.

Dans le cas de l'observation de surfaces d'objets opaques (métallographie, pétrographie, industrie du charbon ou des matériels céramiques, etc.), il est clair que l'éclairage, et par suite le condensateur, doit se trouver du même côté de l'objectif par rapport à la surface de l'objet. C'est celui-ci l'"**éclairage épiscopique**" ou "**incident**" ou "**vertical**" ou "**lumière réfléchie**" ou, simplement, "**épiscopie**" dont nous parlerons dans le § 30.1.

Pour le moment, nous considérons le cas d'objets minces et transparents pour lesquels le faisceau éclairant et le condenseur se trouvent, par rapport à l'objet, du côté opposée de l'objectif ("**éclairage diascopique**" ou "**par transparence**" ou "**à lumière transmise**" ou, brièvement, "**diascopie**"). Nous rétrécissons encore le champ: dans le § 18.10 on a parlé du "champ obscur", une technique qui éclaire l'objet avec des faisceaux obliques et le fait apparaître clair sur fond noir. Cela rentre dans le groupe des "**techniques de contraste**", et il est aussi traité dans le § 30.2. Limitons nous ainsi au cas de la diascopie en "champ clair", qui éclaire l'objet avec un faisceau qui, après avoir traversé l'objet même, entre au moins partiellement dans l'objectif et donne toujours au fond de l'image une luminosité élevée.

D'ailleurs, les principes généraux de l'éclairage que nous avons déjà discuté dans le § 8.8 sont les mêmes, en diascopie comme en épiscopie, en champ clair comme en champ noir: le condensateur sert à former, dans le plan de l'objet du microscope, une image d'une source de radiation optique. Cette image se forme dans le plan-image du condensateur; dans son plan objet il y a la source citée. Dans le schéma d'éclairage d'après Köhler (voir le § 8.8 et la fig. 32), telle source est constituée par le "diaphragme de champ éclairé" (Dc); tel diaphragme et le plan objet en O sont conjugués entre eux à l'œuvre du condensateur Ko; l'image de Dc, qui se forme en O doit coïncider avec le champ objet de l'objectif. Donc en O coexistent l'image de Dc donnée par le condensateur et l'objet de l'objectif; on considère la fig. 81 dans laquelle la préparation a été remplacée par un verre dépoli sur lequel est visible un petit disque vivement éclairé qui est l'image de Dc créée par le condensateur.

Fig. 81



Le faisceau qui forme l'image de la source (Dc dans ce cas) est convergent et il devrait avoir une ouverture maximale semblable à celle de l'objectif en usage. La dimension de l'image de la source, c'est-à-dire de la partie éclairée de l'objet du microscope, c'est-à-dire du "**champ objet éclairé**" (on parle ici de l'objet de l'objectif du microscope), doit être au moins égale au champ objet maximum de l'objectif (voir le § 19.2.4 et la formule (69)).

Nous verrons, en parlant de l'ouverture et du champ du condensateur, que ces valeurs peuvent varier dans des amples limites; en général on peut dire cependant que **le condensateur est un système convergent à courte focale**[130] (mais toujours plus grande de celle de l'objectif de même ou-

[130] La focale des condensateurs les plus communs, comme celui d'Abbe, varient entre 9 et 13 mm.

verture) et **avec un champ angulaire semblable à celui des objectifs** (en général plus petit de 10°). Sa fonction a été décrite dans le § 8.3. Dans les §§ de 8.4 à 8.8 on a vu que la source qui représente l'objet du condensateur peut être constituée par un diffuseur (voir le § 23.2), par un corps lumineux (flamme, filament incandescent, etc.), ou par le plan d'un diaphragme (le diaphragme de champ éclairé, **Dc** dans le schéma de Köhler), opportunément éclairé par une lentille (collecteur).

21.1 – Le CHAMP du CONDENSATEUR

Le champ objet du condensateur est donc constitué par la source (diffuseur, lentille, diaphragme, corps lumineux, etc.), pendant que le champ image est occupé par l'image de la source.

Celle-ci se forme selon le schéma de la fig. 11 (§ 2.6.2.2), et elle est donc réelle, renversée et rapetissée. Telle image (le "**champ éclairé**") doit se trouver dans le plan de l'objet et elle doit être égale ou un peu plus grande du champ objet de l'objectif. Dans le § 8 C on a vu que celle-ci est une des conditions pour un bon système éclairant de microscope.

Pour simplicité, nous prenons en examen le système éclairant conçu par Köhler et illustré dans le § 8.8. La source, l'objet du condensateur, est constituée par le plan d'un diaphragme dit "**de champ éclairé**" qui n'est pas évidemment lumineux pour soi-même, mais il transmet la radiation provenant d'un corps lumineux (filament incandescent, etc.), et réfractée par la lentille collectrice. Donc le diamètre du champ objet du condensateur est égal au diamètre du diaphragme de champ (Dc dans la fig. 32). Le diamètre du champ image du condensateur, c'est-à-dire du champ éclairé C_i, alors sera:

$$C_i = C_o \cdot M_k \tag{72}$$

dans laquelle C_o est le diamètre de Dc et M_k est l'agrandissement linéaire transversal du condensateur. On peut calculer M_k avec la (13), la (14) ou la (15), mais ceci n'est pas facile étant donné que normalement on ne connaît pas la focale du condensateur, ni les deux "tirages" **x** et **x'** (voir le § 2.6.1) qui dépendent de la position des foyers. En pratique, cependant, il est simple de mesurer le diamètre du champ éclairé, au moins en voie approché (voir la fig. 81): on appuie sur la platine, à la place de la préparation, un filtre dépoli ou un bout de papier millimétré; avec quelque manœuvre opportune (en particulier, en focalisant le condenseur) il est facile d'avoir sur le filtre dépoli un disque éclairé avec les bords nets; c'est le champ éclairé dont on peut mesurer le diamètre.

Tel diamètre est important étant donné que, nous avons dit, il devrait être toujours à peine supérieur au diamètre du champ objet de l'objectif (**s** dans la (69), dans le § 19.2.4). En pratique, en regardant dans l'oculaire avec les combinaisons d'objectifs et d'oculaires capables de donner la valeur maximum et minimum d'agrandissement visuel V_M (voir la (33) dans le § 12.7), nous aurons respectivement la moindre et la plus grande valeur du champ objet **s**: en chaque cas <u>on doit voir le champ visuel homogènement éclairé dans toute son étendue ou peu plus</u>.

Dans le cas concret, en supposant un faible oculaire avec index de champ **s'** = 20 mm et un faible objectif (M = 2,5:1), on a une valeur de champ objet égale à 20/2,5 = 8 mm; à l'extrême contraire, avec un fort oculaire avec **s'** = 8 mm et un fort objectif avec M = 100:1, on a un champ objet de 8/100 = 0,08 mm. Le rapport entre le maximum et le minimum diamètre du champ éclairé, et par suite du diaphragme de champ Dc, devrait être au moins 8/0,08 = 100:1.

Voilà alors le grand problème de tous les dispositifs éclairants pour microscope: produire un champ éclairée variable de moins de 0,1 mm à au moins 8 mm de diamètre. Nous voyons les solutions les plus utilisées.

21.1.1 – Les solutions de pis-aller

Il est possible de mettre une limite à la valeur supérieure demandé du champ éclairé en évitant les objectifs les plus faibles; un objectif 10:1 peut avoir un champ **s** de moins de 1,5 mm avec un

oculaire moyen d'index s' = 15 mm.

Il est aussi possible de mettre un filtre diffusant au dessous du condensateur: l'image de la source (C_i) sera élargie à l'œuvre de la diffusion; naturellement, s'efface toute image définie du diaphragme de champ Dc (voir la condition C au § 8). En pratique, le système peut donner des bons résultats; le rendement photométrique sera insuffisant, mais aux bas agrandissements tout est plus facile, et il est dans ces conditions que se présente le problème du champ éclairé insuffisant. Avec les agrandissements forts, on peut toujours enlever le filtre dépoli.

On peut même enlever tout à fait le condensateur et le remplacer avec un diffuseur; pour ouvertures d'objectif pas supérieures à 0,4, le système peut fonctionner, même si le rendement photométrique est toujours insuffisant. Bien de modèles économiques choisissent cette solution (fig. 28, § 8.4).

En ce qui concerne le problème opposé, c'est-à-dire d'un champ éclairé trop grand, il se présente rarement avec les condensateurs usuels en absence de diffuseurs.

21.1.2 – Le diaphragme de champ à iris

Dans la grande majorité des instruments, le diaphragme de champ éclairé (Dc dans la fig. 32) est "**à iris**", c'est-à-dire à diamètre variable, comme il arrive dans les objectifs photographiques, où est visible de l'extérieur le jeu des lamelles arquées qui se croisent en mesure variable.

Un diaphragme à iris peut avoir un diamètre maximum, dans les microscopes, de 40 - 50 mm et un minimum de 1 - 2 mm. Le rapport maximum/minimum ne dépasse pas donc 30:1, et on a vu qu'il faut par contre un rapport de 100:1 au moins. Il faut s'adresser AUSSI aux autres moyens, au sens que d'habitude le diaphragme de champ à iris, tout seul, ne suffit pas à couvrir la variation demandé du champ éclairé.

21.1.3 – La lentille frontale escamotable

Le système optique du condensateur est formé souvent par un membre inférieur, simple ou composé de grandes dimensions (20 - 35 mm) et d'un membre supérieures plus petit ou **lentille frontale**, en général simple et hémisphérique. La plus grande puissance du condensateur, comme dans l'objectif, est due à la frontale (voir la fig. 82 – 1, plus loin).

Dans les différentes parties de la fig 82 est indiqué avec une flèche à deux pointes le diamètre du champ éclairé, c'est-à-dire de l'image du diaphragme de champ qui est hors figure. Les lignes continues représentent les limites du faisceau qui, du centre de ce diaphragme, se dirigent dans le centre du champ éclairé; avec hachure large est indiqué le faisceau qui, d'un point marginal du diaphragme, se dirige dans un point marginal du champ éclairé. Sous la lentille inférieure, la plus grande, du condensateur est indiqué schématiquement le diaphragme d'ouverture tout ouvert.

Eh bien, dans beaucoup de condensateurs il est possible d'éloigner ou renverser ou déplacer latéralement ("escamoter") la lentille frontale. Dans ces cas, elle est souvent enchâssé ou bloquée dans une bague à vis, qu'on dévisse du bout supérieur du condensateur (fig. 83), ou bien cette bague peut être encastrée plus rapidement, sans vis, avec des pointes souples spéciales (Wild); autres fois la lentille frontale est montée sur un bras latéral tournant; la rotation du bras arrive au moyen d'un bouton latéral et elle porte la lentille dans ou au dehors la position de travail (fig. 84). Ce type de condensateur "**à lentille frontale escamotable**" ou extractible est très confortable et diffus, même si optiquement mauvais (nous verrons pourquoi).

Tous ces mécanismes pour extraire la lentille frontale ont un avantage commun: la puissance du condensateur se baisse, donc sa focale augmente et la réduction, le rapetissement, de l'image de la source est plus petit; enfin, le champ éclairé est plus grand. Mais il y a aussi quelque inconvénient dans tous les modèles:

 les aberrations dont nous parlerons plus loin (§ 21.7), peuvent être minimisées avec le condensateur complet ou bien privé de la frontale, mais pas dans les deux conditions. Le résultat, de ce point de vue, est toujours mauvais;

 le diaphragme d'ouverture Da, (voir les §§ 8.3 et 8.8 et la fig. 32) doit se trouver, pour ce qu'on a dit dans ces paragraphes, très près du premier plan focal du condensateur. Ceci arrive quand le condensateur est complet, mais pas après l'extraction de la frontale. Pour ceci, l'image du diaphragme **Da** ne se forme plus dans le plan focal supérieur de l'objectif (PU) et le diaphragme même n'explique plus la fonction de limiter l'ouverture du condensateur, mais plutôt il se rapproche à un diaphragme de champ très défocalisé;

 comme on voit dans la fig. 82-2, après l'extraction de la frontale, l'image de la source ou du diaphragme de champ Dc se forme plus en haut; pour la reporter à coïncider avec le plan objet on doit baisser le condensateur; ceci n'est pas toujours permis par la structure mécanique de l'instrument.

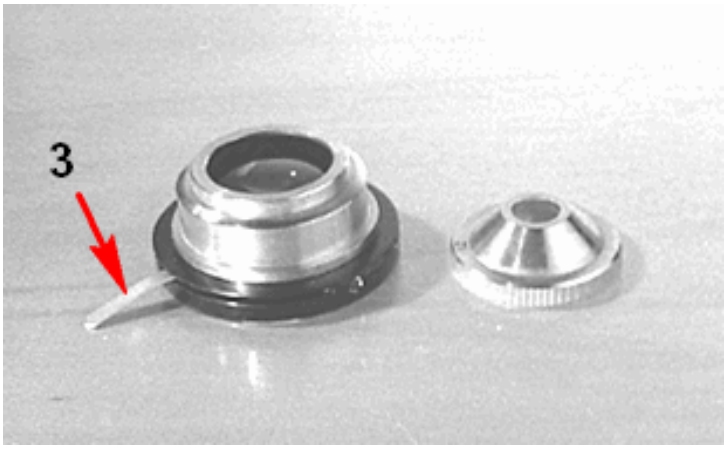


Fig. 83 – (à droite) Exemple de lentille frontale qu'on peut deviser.
Produit PZO.

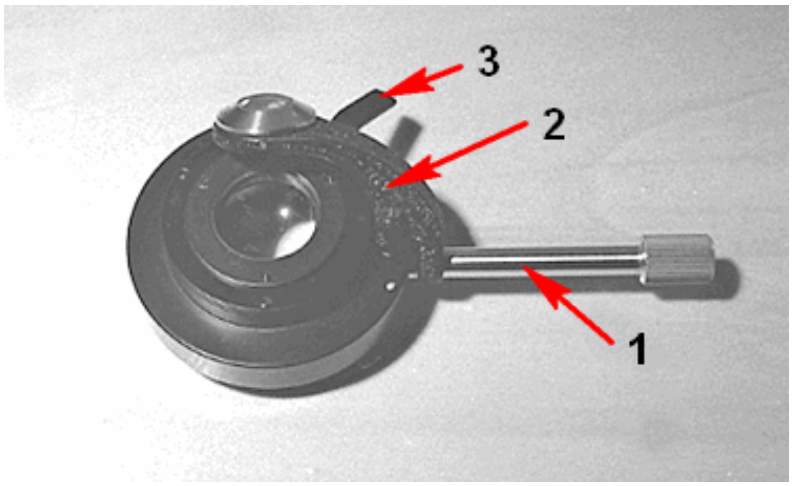


Fig. 84 – (à gauche) Example de lentille frontale escamotable. Le long bouton à droite (1) est la commande du bras mobile (2) avec sa lentille frontale.
Produit Zeiss W.

Dans le deux cas, on voit le petit lévier latéral (3) pour le réglage du diaphragme d'ouverture.

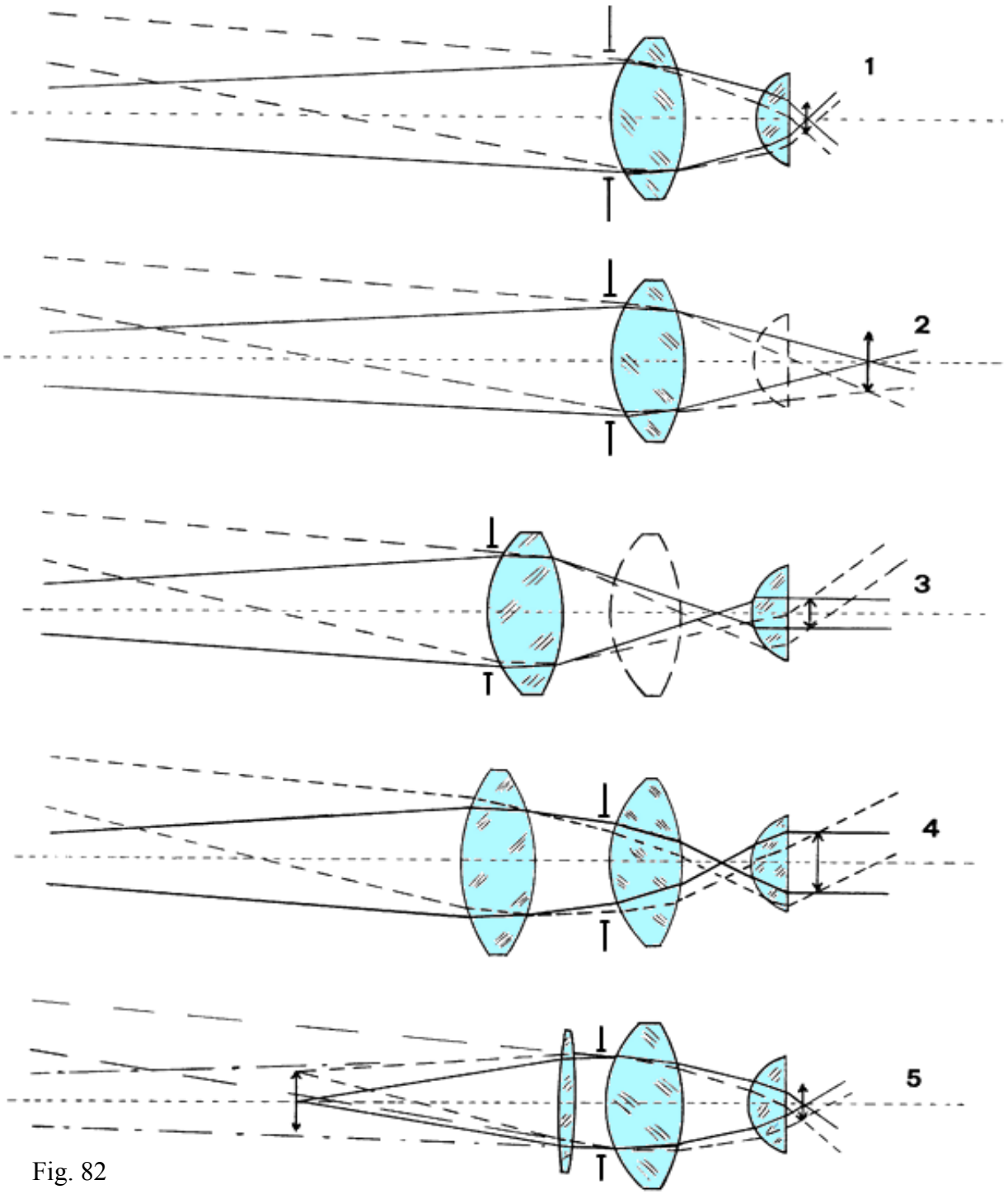


Fig. 82

21.1.4 – L'abaissement du foyer image

Une autre solution consiste à baisser la lentille inférieure du condensateur en manière que son foyer (et dans ses alentours l'image de Dc) se forme SOUS la frontale (figures 82.3 et 82.4).

Dans le schéma normal (fig. 82-1), le foyer et l'image de Dc se forment au-delà de la frontale; si telle image se forme en avant, dans les alentours du premier foyer de la frontale, comme on voit dans la fig. 82-3 et 82-4, de la frontale émerge un faisceau ample et à forte ouverture; dans le plan objet de l'objectif peut se former plus ou moins au point une image du diaphragme du condensateur **Da**, qui assume les fonctions de diaphragme de champ. Il n'est pas possible avec ce schéma régler correctement l'ouverture du condensateur; seulement en partie on peut le faire en certains cas en manœuvrant Dc.

En pratique, ce principe est appliqué de deux manières différentes:

•• en baissant la lentille inférieure du condensateur (fig. 82-3);

•• en insérant au dessous d'elle une deuxième lentille de forte puissance (fig. 82-4).

Dans les deux cas, les conditions de travail du condensateur viennent altérées; il s'agit encore de pis-aller.

Une autre possibilité consiste à mettre, sous le condensateur, une faible lentille convergente; dite "**lentille à grand champ**" (champ éclairé) (voir la fig. 82-5). Intuitivement, telle lentille agit comme une lentille d'agrandissement du point de vue du condensateur et lui montre une image virtuelle agrandie du diaphragme de champ. La position de l'image finale de Dc se baisse un peu. Cette solution est utilisée surtout quand le diaphragme Dc se trouve loin du condensateur et son image résulterait trop petite, mais l'augmentation du champ éclairé est modeste. La lentille à grand champ peut être escamotable étant donné que, avec les forts objectifs, on n'a pas intérêt à agrandir le champ éclairé, mais plutôt à le réduire. Introduire ou extraire tel lentille oblige à focaliser à nouveau le condensateur.

À l'extrême contraire, une lentille à grand champ de moyenne puissance permet de tenir le diaphragme Dc très près du condensateur en évitant que son image s'élève trop (Zeiss W.). En certains cas, il est possible de choisir entre deux ou trois différentes lentilles à grand champ (Wild).

21.1.5 – Condensateurs interchangeables

Toutes les solutions proposées jusqu'à présent pour obtenir d'un condensateur un champ éclairé grand et variable entre amples limites sont donc atteintes par différents inconvénient. Elles sont employées largement seulement pour des raisons d'utilité pratique et d'économie.

Pour couvrir toutes les valeurs de champ éclairé, qui changent comme on a vu dans le rapport d'au moins 100:1 dans les équipements optiques normaux, la solution idéale est de changer condensateur. En général, avec deux condensateurs de différente focale et avec la manœuvre du diaphragme de champ à iris on répond à chaque exigence. Quelques constructeurs offrent donc un condensateur "normal" avec ouverture maximum 1,25 au moins, convenable aux objectifs de 100:1 jusqu'à 10:1 ou même moins, à côté d'un **condensateur "à grand champ"** convenable pour tous les faibles objectifs prévus sur ce particulier instrument.

En autres cas, le porte-condensateur prévoit un "**changeur de condensateurs**" sous la forme de bras pivotant (Zeiss Jena, série 250 CF) ou de revolver. Un revolver à trois condensateurs peut porter un condensateur normal, un à grand champ et un pour champ noir (Zeiss Jena, série Amplival). Il sera évidemment souhaitable que les deux ou trois condensateurs montés sur le changeur soient parfocales, au sens que, en passant de l'un à l'autre, il ne soit pas nécessaire de répéter leur focalisation.

En certains cas de microscopes projecteurs, où le rendement photométrique est important, on peut trouver un revolver dessous la platine avec un différent condensateur pour chaque objectif, par ex. 4. De cette manière on peut avoir la meilleure adaptation entre condensateur et objectif en ce qui concerne la focale, l'ouverture, etc.

Un bon condensateur à grand champ doit posséder un diaphragme d'ouverture et il doit permettre de mettre au point l'image du diaphragme de champ avec une préparation d'épaisseur normale. Évidemment, son ouverture et le champ éclairé qu'il produit doivent être convenables aux objectifs les plus faibles qui sont prévus par le constructeur.

21.1.6 – Types spéciaux

À la place du changeur de condensateurs, certains constructeurs ont réalisé des condensateurs "**pancratiques**" ou "**zoom**", c'est-à-dire à focale variable.

Avec ceux-là il est souvent possible de changer de manière suffisante, avec un seul condensateur, sa focale, donc son agrandissement, donc les dimensions du champ éclairé. En beaucoup de

cas, la variation de focale permet de changer dans amples limites aussi les dimensions de l'image du diaphragme d'ouverture, image qui se retrouve dans la pupille de sortie de l'objectif (PU, voir le § 8.8). De telle manière, si dans le plan focal inférieur du condensateur il y a un diaphragme annulaire, il est possible de changer avec continuité l'ouverture du faisceau creux conique produit par lui et ainsi passer avec continuité du champ clair au contraste de phase (avec les objectifs spéciaux) et au fond noir à sec. Celui-ci est le "condensateur de Heine" (Leitz).

Il a aussi été étudié un condensateur avec focale tellement courte à admettre une position trés rapprochée de la source, c'est-à-dire du diaphragme de champ. De cette manière ce diaphragme peut se trouver inséré dans la partie inférieure du condensateur, un peu au dessous du diaphragme d'ouverture. Celui-ci est le "**condensateur à deux diaphragmes**" ou "**de Berek**[131] (Leitz)." En enlevant sa lentille frontale, son champ éclairé s'élargit, le diaphragme d'ouverture va tenu ouvert et celui de champ prend la fonction de diaphragme d'ouverture.

21.1.7 - La distance de la source

Dans beaucoup d'instruments, le système éclairant est incorporé dans le pied du statif et pour cette raison la géométrie du système est rigide et la distance entre source (diaphragme de champ dans le cas des illuminateurs d'après Köhler) et condensateur est fixe.

Quand par contre la source (ou la microlampe, voir le § 22) est externe et sa distance du condensateur est variable, il faut penser aux conséquences de cette variation. Augmenter la distance entre le diaphragme de champ Dc et le condensateur porte à une augmentation de la conjuguée objet du condensateur, donc à une réduction de son agrandissement (voir la (13) dans le § 2.6.2); en fin, le champ éclairé diminue. En outre, diminue la conjuguée image du condensateur, c'est-à-dire l'image de Dc se baisse et il peut réussir impossible de la focaliser. On a aussi une petite augmentation d'ouverture du condensateur (côté image).

La manœuvre inverse, d'approche du diaphragme Dc, porte aux résultats opposés, et par suite elle est utile pour élargir le champ éclairé, mais on trouve rapidement une limite dans l'encombrement des différentes parties mécaniques.

Nous verrons ci-après (aux §§ 22 et 27.2.1), les détails sur les microlampes incorporées ou indépendantes du statif. Nous faisons remarquer cependant que, du point de vue du champ éclairé, ce qui est important c'est la dimension de la source et l'agrandissement du condensateur (ce dernier subordonné à sa focale et à la distance de la source). En supposant fixe, comme il est en général, la position de la source, et supposant de disposer d'un seul condensateur, avec une focale définie, le champ éclairé peut changer seulement en actionnant le diaphragme de champ à iris. Étant donné que le diamètre de tel diaphragme en général change dans un rapport pas supérieur à 30:1 (§ 21.1.2), et il faut par contre un champ variable dans un rapport d'au moins 100:1 (§ 21.1), il ne reste pas que changer la focale du condensateur avec un des milieux décrits, ou changer le condensateur lui-même.

Mais tout ceci suppose que la source soit constituée par une surface uniformément éclairée. Dans le cas qu'il se traite d'un diffuseur (voir les §§ 8.4 et 8.5), ceci est aisément réalisable, et on aura en général des grands champs éclairés, avec les deux inconvénients que, souvent, on ne peut pas les limiter et le rendement photométrique est bas.

Dans le cas de l'**éclairage d'après Köhler** (§ 8.8), la surface éclairée est celle du diaphragme de champ Dc. À l'éclairer pourvoit un corps lumineux Q et une lentille collectrice Cl (voir la fig. 32 dans le § 8.8 et le § 22). À la limiter pourvoit la manœuvre du diaphragme Dc.

Dans le cas de l'**éclairage critique,** par contre (voir les §§ 8.6 et 8.7), la source est donnée directement par le corps lumineux (flamme, filament incandescent, arc électrique, etc.), sur les dimensions duquel on ne peut pas intervenir en général et dans le plan duquel on ne peut pas mettre un diaphragme de champ. Les dimensions du champ éclairé peuvent grandir seulement et de façon

[131] Max BEREK, minéralogiste allemand, collaborateur des usines Leitz (1886 – 1949); son condensateur fut introduit par la maison Leitz en 1913.

limitée en approchant la source. Justement les petites dimensions du champ éclairé et l'impuissance de les changer ont limité les applications de l'éclairage critique, malgré son rendement photométrique élevé. L'avantage des autres méthodes d'éclairage (avec diffuseur ou d'après Köhler) est vraiment celui-ci: on peut avoir une grande "source" (et par suite un champ éclairé grand), même si le corps lumineux est très petit et pas uniforme (filaments électriques, par exemple).

21.2 - Le RENDEMENT PHOTOMÉTRIQUE du CONDENSATEUR

Dans le cas de l'éclairage critique, le champ éclairé n'est pas autre que l'image du corps lumineux; si on néglige les pertes par réflexion ou par absorption dans les lentilles du condensateur ou sur les éventuels miroirs interposés, le flux provenant directement du corps lumineux et recueilli par le condensateur est le même qui traverse le plan de l'objet.

Quand il y a un diffuseur, le faisceau diffus est toujours plus ample du nécessaire et bonne partie de la radiation va perdue; aussi l'absorption peut être sensible.

Maintenant nous voyons le rendement du système de Köhler dans les deux cas extrêmes.

 Petit agrandissement, grand champ objet de l'objectif

En supposant de disposer d'un condensateur de focale convenable, capable de donner un champ éclairé suffisant, l'ouverture de l'objectif sera toujours modeste et en général il faudra limiter l'ouverture du condensateur avec la manœuvre du diaphragme d'ouverture (voir le § 8.8 au point 8). Donc on utilisera seulement la partie centrale de l'image du corps lumineux Q que le collecteur projette sur le diaphragme d'ouverture **Da** (voir la fig. 32). La radiation correspondante à la zone périphérique de l'image de Q ou elle est absorbée par les lamelles du diaphragme **Da** ou bien (si celui-là est ouvert) elle émerge du condensateur avec une ouverture excessive et elle n'entre pas dans l'objectif. Elle va perdue. Le rendement photométrique est bas mais, étant bas le grossissement total du microscope, l'image finale sera en général suffisamment lumineuse.

 Les choses vont moins bien quand l'agrandissement de l'objectif est fort: le champ objet est petit, donc il faut fermer le diaphragme de champ **Dc** (si on le tient ouvert, la zone périphérique du champ éclairé n'est pas accueillie par l'objectif). Donc, bonne partie de la radiation qui éclaire **Dc** va perdue. Afin de pouvoir ouvrir davantage le diaphragme de champ, on peut éloigner l'éventuelle lentille à grand champ ou utiliser un condensateur à focale plus petite; de cette manière cependant augmente l'ouverture du condensateur qui pourrait aller partiellement perdue et on retomberait dans le cas précédent. Déjà au niveau du plan objet on a donc une forte perte.

Malgré ses avantages, le schéma de Köhler n'est donc pas le meilleur du point de vue photométrique.

Si de plus on rappelle la (63) dans le § 19.2.1, on peut voir que la luminosité E dans l'image finale est inversement proportionnelle au carré du grossissement total du microscope. Ça suffit un peu d'expérience pour s'apercevoir que, aux forts agrandissements, il est facile d'avoir une image trop peu brillante.

21.3 – La DISTANCE FRONTALE du CONDENSATEUR

Sous certains aspects, un condensateur normal (diascopique) a une structure semblable à celle d'un fort objectif: même du schéma d'un condensateur simple comme celui de la fig. 85 on voit la présence d'une lentille frontale hémisphérique, suivie par un ou plus éléments de plus grand diamètre et de plus petite puissance.

Tel système optique du condensateur se trouve, par rapport à l'objet, comme image spéculaire symétrique à l'égard de l'objectif: les lentilles frontales des deux systèmes se trouvent l'une en face de l'autre, et entre elles il y a la "préparation" (**Og**, fig. 85).

Étant donné que le porte-objet est plus épais que le couvre-objet, la distance frontale, et par suite la focale et les dimensions du condensateur, sont supérieures à celles de l'objectif.

Plus en détail, comme pour l'objectif (voir le § 19.1.3), on peut définir une "**distance frontale**" et une "**distance** (libre) **de travail**" même pour le condensateur. À la place de la lamelle (couvre-objet) on considère le porte-objet et la distance de travail (flèche rouge dans la fig. 85) est la distance existante entre la surface supérieure de la lentille frontale, ou de sa monture mécanique, et la surface inférieure du porte-objet, supposé que le condensateur soit au point et la microlampe soit à la distance nominale.

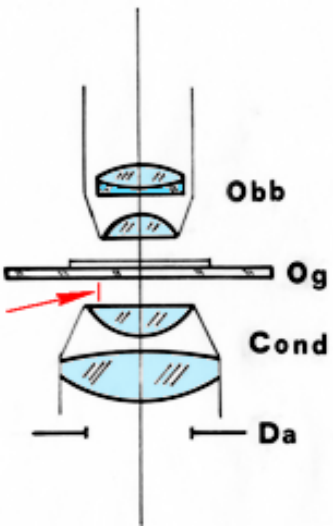


Fig. 85

Si l'objet est monté collé à un normal porte-objet (épaisseur normalisée: 0,9-1,1 mm), le constructeur prépare les choses de manière que, quand le condensateur est au point, c'est-à-dire l'image de la source se forme dans le plan de l'objet, la distance de travail du condensateur ne descende jamais à zéro. En effet si, pour focaliser le condensateur, il va toucher le porte-objet par-dessous, il le soulève et il fait perdre la mise au point, ou il l'écrase directement contre l'objectif. En autres mots, dans la conjuguée image du condensateur il doit toujours y avoir la place pour une préparation d'épaisseur normale, et en plus un petit espace vide. Quand de plus on veut prévoir l'usage de porte-objets spéciaux de grande épaisseur, comme les différents types de "**chambres de comptage**" pour échantillons de sang ou suspensions de particules, il faudra disposer d'une distance de travail plus grande, et beaucoup des condensateurs usuels permettent de travailler avec des porte-objets jusqu'à 2-3 mm d'épaisseur, ou bien sont disponibles des lentilles frontales interchangeables avec une distance de travail augmentée (Leitz, etc.).

Dans d'autres cas, la distance de travail du condensateur doit être très supérieure: quand on observe des cultures ou suspensions de cellules ou micro-organismes ou particules contenu dans des bacs, micro-aquariums, boîtes de Petri[132], etc., on peut devoir observer un objet qui est soulevé de 10 - 20 mm sur le fond du récipient. Ils existent à ce but des "**condensateurs à longue focale**" ou, ce que plus intéresse, à longue distance de travail, même plus de 30 mm. Comme on a dit à propos des objectifs "**long distance**" (§ 19.3.4), à la plus grande distance de travail correspond, à égalité de focale et d'ouverture, le plus grand diamètre des lentilles, surtout de la frontale, laquelle chose rend ces condensateurs bien reconnaissables. Étant donné cependant que le diamètre des lentilles trouve rapidement une limite dans la structure mécanique de l'instrument, les condensateurs "long distance" ou LD ont souvent une ouverture réduite et il n'est pas convenable de les utiliser avec des objectifs très forts.

Dans le § 3.2 on a cité le phénomène de l' "**avancement**" subit par une image quand le faisceau qui converge en elle traverse une lame transparente aux faces planes et parallèles, et on a vu de la (17) que tel déplacement d'image, pour les verres optiques plus communs (n_D = 1,5 environ) correspond à 1/3 environ de l'épaisseur **d** de la lame. Eh bien, en pensant au faisceau qui se dirige dans l'image de la source donnée par le condensateur, le porte-objet est justement une lame qui s'y interpose et qui fait avancer l'image même: en enlevant les porte-objets, l'image se baisse, jusqu'à n'être pas plus focalisable. De ça on tien compte dans le projet du condensateur et cela explique parce que, en focalisant le condensateur ou réglant le diaphragme de champ, il est normalement nécessaire la présence d'un porte-objet sous l'objectif, au moins pour les forts agrandissements: sans porte-objet, certaines distances sont altérées.

---

[132] Julius Richard PETRI, bactériologiste allemand (1852 – 1921). Les "boîtes de Petri" sont des boîtes plates et rondes en verre, avec couvercle, avec diamètre de plusieurs centimètres et hautes environ 1 cm; elles sont très utilisées pour les cultures bactériennes sur gelatine.

21.4 – La FOCALISATION du CONDENSATEUR

Dans les systèmes éclairants dans lesquels la source est un diffuseur (voir le § 8.5) il est bien que l'image de celui-ci créé par le condensateur, ne se trouve pas dans le plan de l'objet.

En effet le diffuseur le plus souvent utilisé et le plus pratique c'est le verre dépoli et celui-ci n'est pas homogène; sa surface (d'habitude, une des deux) présente un aspect "grainé", c'est-à-dire des menues irrégularités, et ce sont justement celles qui produisent la diffusion. Mais telles irrégularités créent aussi des petites différences de luminance qui donnent au filtre un aspect granuleux. Si l'image du filtre tombait au point sur l'objet, en observant dans l'oculaire on verrait l'objet superposé à cette granulation, naturellement agrandie. Pour ce motif, un constructeur sérieux fait de manière que le diffuseur ne résulte jamais au point dans le plan objet ou dans ses plans conjugués.

Quand on utilise par contre le système éclairant de Köhler (voir le § 8.8), le plan du diaphragme de champ Dc peut (dans des circonstances déterminées) être éclairé uniformément; alors il convient que l'image de Dc se trouve au point avec l'objet, de manière que le champ éclairé résulte bien délimité par les bords de Dc. Pour obtenir cette mise au point de Dc, doivent être appropriées certaines conditions qui influent sur la position de l'image de ce diaphragme:

- longueur focale du condensateur; à ceci doit pourvoir le constructeur ou le choix de la part du praticien;
- distance entre Dc et condensateur (conjugué objet du condensateur); à ceci peut pourvoir le praticien seulement dans le cas peu fréquent que l'illuminateur avec Dc sois externe à l'instrument;
- présence ou absence d'opportunes lentilles à grand champ ou de lentilles frontales escamotables, qui doivent être prudemment utilisées;
- épaisseur opportune du porte-objet, c'est-à-dire valeur pas nulle de la "distance libre de travail" du condensateur.

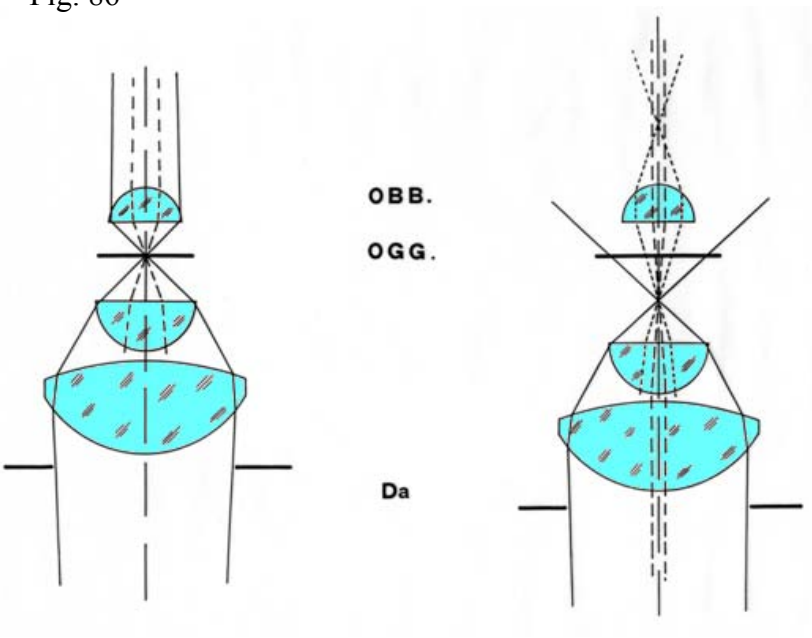
Toutefois, même si tous ces facteurs ont la valeur correcte, il reste au moins le fait que l'épaisseur des porte-objets, même des types normaux, est affecté d'une tolérance de quelque dixième de mm. Donc, pour que l'image du diaphragme Dc coïncide toujours avec le plan de l'objet (qu'on suppose collé à la surface supérieure du porte-objets), il faut que le condensateur puisse monter ou descendre de quelque dixième de mm. En autres mots, quand on remplace la préparation, il est facile de devoir retoucher la "focalisation" du condensateur, même sans modifications d'autre type. Si de plus on veut tenir compte des variations de focale conséquentes par ex. à l'extraction de la lentille frontale ou d'une lentille à grand champ, il faut que la course du condensateur soit de 2 - 3 cm au moins. Voilà que le condensateur doit être muni d'un dispositif de **focalisation**, qui doit pouvoir le déplacer axialement avec une course longitudinale parallèle à l'axe optique.

Les moyens techniques pour obtenir ce déplacement sont différents: le plus diffus est donné par un guide "à queue d'aronde" (à section transversale de forme trapézoïdale) entraînée par une **crémaillère**, d'habitude fixée à la partie coulissante du guide. La crémaillère coulissante est poussée par un "**pignon**" ou roue dentelée, qui est fixée à la partie immobile du statif, et est actionnée par un ou deux boutons. En général, les dents de la crémaillère et du pignon sont inclinés, et le même on relève dans les mouvements de "mise au point micrométrique" de l'objectif ou de translation de la platine (§§ 26.2, 26.4 et 27.2.2). La raison de cette inclinaison repose dans l'amélioration de l'uniformité des mouvements: si les dents du pignon étaient parallèles à son axe, elles "entreraient en prise", c'est-à-dire elles toucheraient les dents de la crémaillère, une à la fois; dans l'intervalle d'une dent à l'autre il pourrait y être un petit saut dans le mouvement. Les dents inclinées entrent par contre en prise deux à la fois et quand une dent laisse la prise, la suivante est déjà engrenée.

La course du condensateur doit posséder des "**fins de course**", c'est-à-dire des arrêts positifs

qui en limitent l'amplitude soit vers le bas, pour ne pas heurter aux organes sous-jacents ou au pied du statif, soit vers le haut, pour ne pas s'heurter à la préparation et puis l'écraser contre l'objectif. Dans les condensateurs forts, la distance de travail se réduit souvent à quelques dixièmes de mm, donc la fin de course supérieure doit être très précise, et les meilleurs instruments possèdent une régulation fine (une vis, une petite came) pour telle fin-course. La fin-course supérieure pourra s'allonger quand l'épaisseur du porte-objet est grande, mais toujours en évitant que le condensateur se heurte à ce dernier. La saillie la plus élevée du condensateur ne doit jamais dépasser le plan de la platine sur lequel s'appuie la préparation.

Fig. 86



D'autres détails sur les mécanismes de fin de course se trouvent dans le § 26.5.5.

Le mouvement de focalisation du condensateur doit de plus posséder un certain degré de frottement ou de "**friction**" pour éviter que le poids puisse traîner lui seul le condensateur vers le bas; d'autre part, la friction ne doit pas être excessive pour ne pas demander un effort inutile. La friction en général est réglable: par ex. en tournant en sens inverse les deux boutons pour la commande de la crémaillère. Autres détails sur les frictions dans le § 26.5.4.

L'importance de la focalisation du condensateur est toujours sous-estimée: sans trop de mots, on peut clarifier le problème en regardant la fig. 86: le condensateur se trouve à l'hauteur correcte à gauche de la figure; soit les rayons marginaux, d'ouverture maximale (lignes entières), soit les rayons paraxiales (à hachure large) sont utilisés par l'objectif. Si le condensateur est baissé (à droite) on voit que les rayons marginaux ne sont pas accueillis par l'objectif; les rayons d'ouverture intermédiaire, à hachure plus fine, pénètrent dans l'objectif, mais avec inclinaison insuffisante et, après avoir traversé l'objectif, ils vont se disperser sur les parois internes du tube. Seulement les rayons paraxiales contribuent à former l'image. Tout se déroule comme si le diaphragme d'ouverture (Da) eût été fermé, en tant que le faisceau utilisé par l'objectif a une ouverture minimale. Pour se convaincre de ceci il est suffisant d'enlever l'oculaire et observer la pupille d'objectif, peut-être avec une faible lentille d'agrandissement ou une lentille d'Amici (voir le § 19.5.5): si le condensateur est focalisé correctement (fig. 86 à gauche), la pupille de l'objectif apparaîtra entièrement illuminée; si on baisse le condensateur, seulement les rayons paraxiales sont utilisés et la partie éclairée de la pupille se rétrécit jusqu'à se réduire à une petite tache centrée. Ce test réussit mieux avec un objectif moyen-fort, par ex. un 40:1 et un bon condensateur d'ouverture numérique non inférieure à 0,7.

Un condensateur baissé porte donc à une perte de son ouverture utile et ceci, comme on a déjà expliqué (voir le § 18.9) produit une perte de résolution et de luminosité. Est fréquente la mauvaise habitude d'augmenter le contraste ou réduire la luminosité de l'image en baissant le condensateur ou en fermant son diaphragme: avec cette opération on obtient toujours une perte d'ouverture et par suite de résolution. La manœuvre de la focalisation ou du diaphragme du condensateur peut déterminer toute seule la possibilité qu'une certaine structure de l'objet soit résolue ou non (voir la figure suivante).

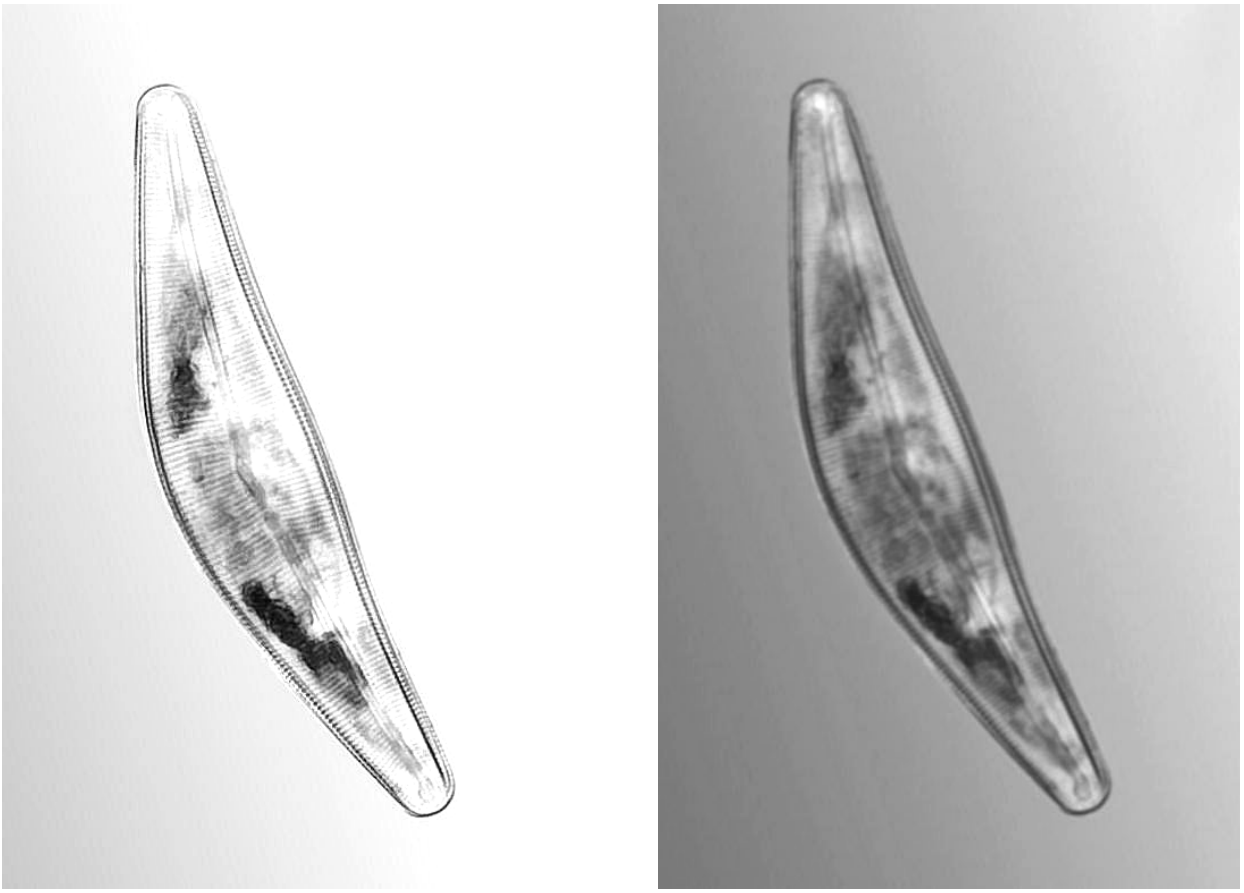


Fig. 86b – Un frustule di diatomée observé avec un objectif 40/0,75 et avec un condensateur à pleine ouverture (à gauche) ou avec le diaphragme fermé à NA = 0,35 (à droite).

21.5 – L'OUVERTURE du CONDENSATEUR

On a déjà fait remarquer (fig. 85) comme le condensateur, par rapport au plan de l'objet, ressemble à l'image spéculaire de l'objectif, et beaucoup de ce qu'on a dit à l'égard de l'ouverture de l'objectif peut être répété pour le condensateur.

On a vu aussi lesquels sont les effets sur l'image finale d'une variation de l'ouverture du condensateur. Dans la (55)(§ 18.10) on a vu comme dans beaucoup de calculs approchés, par ex. de résolution, on peut introduire comme valeur d'ouverture non celle de l'objectif mais la moyenne arithmétique entre l'ouverture de l'objectif et celle du condensateur.

Il reste toujours valide tout ce qu'on a dit dans le § 5.2.5: si entre condensateur et porte-objet il y a de l'air, (nous aurons ainsi les "**condensateurs à sec**"), l'ouverture numérique NA = n sen α (voir la (23)) ne peut pas dépasser la valeur théorique de 1 et celle pratique de 0,95; si entre la lentille frontale du condensateur et le porte-objet on pose une goutte d'huile d'immersion (n = 1,515), la NA peut atteindre la valeur de 1,51 en théorie et 1,45 en pratique. On a ainsi un **condensateur à immersion**. L'immersion du condensateur avec un objectif à sec a peu de sens (comme on a démontré dans le § 8.9, point 8, l'ouverture du condensateur doit être réglée en beaucoup de cas sur les 2/3 de celle de l'objectif), mais elle permet de "remplir" complètement l'ouverture d'un objectif à immersion. Dans ce cas on doit mettre l'huile des deux côtés du porte-objet, vers l'objectif et vers le condensateur, et on parle de "**double immersion**". De tout ce qu'on a dit en son temps, il résulte que la présence d'huile ou d'air entre objectif et objet influe sur les performances et par suite sur le projet de l'objectif, et donc on ne peut pas utiliser un objectif à sec avec huile ou un objectif à immersion sans huile. Pour un condensateur, les choses ne sont pas si draconiennes; les corrections sont meilleures certainement en utilisant l'huile avec les condensateurs à immersion et seulement avec ceux-là, mais la majorité des condensateurs du commerce qui n'exige pas

l'optimum des corrections, peut être utilisée à sec avec une NA pas supérieure à 0,95, pendant qu'avec l'huile elle montre une NA de 1,25 ou 1,30. Tels condensateurs en effet portent en général l'inscription "1,25" ou "1,30" ou semblables, et sous-entendent que cette valeur d'ouverture peut être atteinte seulement avec l'immersion, mais le condensateur va aussi bien à sec (avec NA ≤ 0,95).

En pratique, le maximum d'ouverture d'un condensateur peut être 1,4 pour ceux à immersion bien corrigés; 1,20 pour le plus simples; 0,95 pour ceux à sec bien corrigés; 0,80 pour ceux à sec à deux lentilles simples; 0,6 pour ceux à une lentille; 0,50 ou moins pour ceux à grande distance de travail (LD); 0,20 ou même moins pour ceux à grand champ. Tel maximum d'ouverture doit être semblable à celui du plus fort objectif qu'on entend utiliser. Il serait sot tenter d'utiliser un objectif à immersion avec un condensateur par ex. du type LD avec du NA = 0,5 ou vice versa utiliser un faible objectif, avec NA < 0,25, avec un condensateur fort.

De toute façon, tous les condensateurs sont dotés d'un "**diaphragme d'ouverture**", à iris, qui a été discuté à plusieurs reprises, et permet en chaque cas une forte réduction de l'NA du condensateur, avec tous les avantages et les désavantages que nous savons.

Qu'on ne croie pas en outre que, en disposant d'une ouverture du condensateur très supérieure à celle de l'objectif, on puisse augmenter à volonté la résolution de l'objectif (voir la (55), § 18.10): comme déjà dit, dans ce cas augmente la lumière diffuse, s'empire le contraste et le dégât est plus fort que l'avantage.

Avec les objectifs les plus corrigés et un objet bien contrasté, il convient tenir l'ouverture du condensateur (NA_k) très voisine à celle de l'objectif (NA_o); avec un objectif de corrections modestes, surtout si avec beaucoup de lentilles (plan, par ex.), il peut convenir de réduire NA_k à la moitié de NA_o. Seulement la situation concrète indiquera le meilleur compromis entre forte NA_k (meilleure résolution) et basse NA_k (meilleur contraste)[133].

Le diaphragme d'ouverture **Da** devrait se trouver, comme on a expliqué, dans le premier foyer du condensateur, mais beaucoup de constructeurs ne respectent pas cette règle. D'habitude on le trouve, physiquement, tout de suite sous le paquet des lentilles, rarement au milieu des lentilles.

Près du diaphragme **Da** il y a parfois une graduation qui indique, en mm, ou en valeurs de NA, ou en unités arbitraires, le diamètre même du **Da** pour chaque position du levier de commande.

Pour finir, nous rappelons que la double immersion comporte la présence d'huile SOUS le porte-objets: telle huile tendra à couler sur le condensateur (qui a toujours une forme pointue à cause des plus petites dimensions de la lentille frontale) et l'espace entre porte-objet et condensateur restera vide; à ce point, personne ne résistera à la tentation d'ajouter de l'autre huile et le procès avancera. Nouvelle vidange, nouvelle addition d'huile, etc. Il est facile d'imaginer l'état de coulée qui se réalise après quelques heures de travail de cette "réaction en chaîne" hydraulique. Il est pour ça que beaucoup de constructeurs ont le bon sens de conseiller un condensateur à sec aussi pour les objectifs à immersion. Tant pire pour la résolution. Un compromis peut être constitué par l'usage de glycérine à la place de l'huile pour l'immersion du condensateur. Il ne se traitera pas d'immersion homogène (n = 1,456), mais au moins on peut laver la glycérine avec de l'eau.

21.6 – La STRUCTURE du CONDENSATEUR

La forme extérieure du condensateur est à peu près celle d'un cylindre, avec un diamètre d'environ 4 cm et une hauteur de 1-2 jusqu'à 5 ou plus cm.

Le cylindre termine supérieurement avec un tronc de cône ou avec un cylindre plus petit étant donné qu'il y a souvent une lentille supérieure (la **frontale**, du côté de l'objet), de diamètre plus petit. Le cylindre termine inférieurement, d'habitude, avec un diaphragme à iris, contrôlable avec

[133] Dans certains microscopes dédiés au travail de routine, spécialement en champ médical, il y a quelque dispositif qui règle automatiquement le diaphragme d'ouverture, et parfois aussi le diaphragme de champ, quand on change l'objectif. Les automatismes rendent, évidemment, plus rapide le travail, mais ils rendent impossible toute adaptation aux exigences de préparations particulierès.

un petit levier radial ou une bague godronnée[134], et avec un porte-filtres. Les porte-filtres consistent en général dans une bague, en métal ou en plastique, avec un logement interne pour les filtres, de diamètre compris souvent entre 30 et 33 mm, et un trou excentrique qui leur permet de pivoter autour du bord inférieur du condensateur. Les porte-filtres sont donc extractibles. Parfois ils sont coupés, de façon à être élastiques, et serrer légèrement le filtre. Autres fois, comme dans la fig. 87, les bagues porte-filtres (6) ne sont pas fixées au condensateur mais au porte-condensateur.

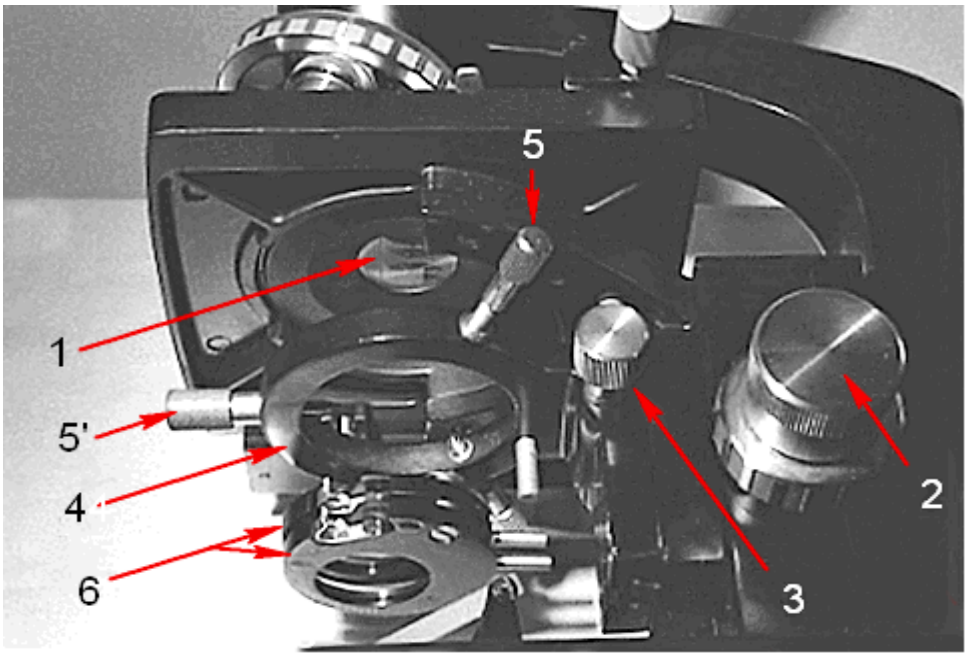


Fig. 87 – Statif mod. BC II de Galileo (Florence).

La fixation mécanique du condensateur au statif arrive d'habitude à travers un porte-condensateur avec la forme la plus variée. Il s'agit souvent d'un support en équerre: la partie horizontale de l'équerre, à forme de bague (4, dans la fig. 87), soutient le condensateur; la partie verticale porte la crémaillère et le guide à queue d'aronde, qui en permet les déplacements verticaux (voir le § 21.4 et le point 9 dans la fig. 102, § 26).

La fixation du condensateur à la partie horizontale de l'équerre arrive essentiellement de trois manières:

 glissière à queue d'aronde linéaire horizontale (Leitz, Reichert, etc.); le condensateur porte inférieurement une "queue d'aronde" linéaire (guide à section trapézoïdale) et on l'introduit sur le porte-condensateur qui a la forme d'un U disposée horizontalement;

 queue d'aronde circulaire (Zeiss, Galileo, etc.): le guide est encore à section trapézoïdale, mais en annau, et il entoure la base du condensateur (voir la fig. 84 dans le § 21.1.3); le condensateur s'insère du haut dans le porte-condensateur; la queue d'aronde est fixée par trois vis radiales, qui en permettent aussi le centrage. Dans la fig. 87 on voit un statif classique, dans la partie qui reste dessous la platine, vue par-dessous. Du haut en bas se distinguent: la grande platine carrée, avec le trou centrale (1) dans lequel se porte le condensateur quand il est déplacé vers le haut; à l'extrême droite les grands boutons pour focaliser l'objet (2) et, tout de suite à gauche de ceux-ci, le petit bouton pour focaliser le condensateur (3); à gauche de ce dernier est bien visible la bague horizontale porte-condensateur (4); le condensateur s'insère du haut dans cette bague et on voit deux des trois vis de centrage (5 et 5')(celle de gauche - 5' - est doué d'un ressort, voir le § 21.9). Encore plus en bas, il y a deux bagues porte-filtres identiques (6, une d'elles porte une lentille à grand champ), les deux sont orientées au dehors du chemin optique;

 emboîture cylindrique: la surface extérieure du condensateur est cylindrique, souvent avec diamètre de 39,5 mm, qui se coince du bas dans la bague porte-condensateur. Une vis horizontale ou quelque chose de semblable permet de bloquer le condensateur après qu'il est entré dans son logement (voir 9 dans la fig. 102, § 26). Un condensateur de ce type, très commun, est celui de la

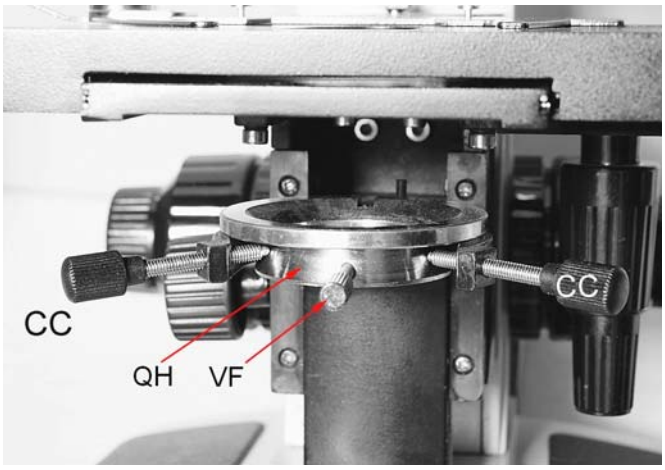
[134] On appelle "godronnage" le traitement d'une surface à fins sillons parallèles; le traitement avec des pointes fines ou saillies, c'est-à-dire à sillons croisés, s'appelle par contre "chagrinage" (à ressemblance du "chagrin" des requins).

fig. 83 dans le § 21.1.3.

Le diamètre extérieur très répandu de 39,5 mm pourrait faire penser à une **inter-changeabilité** des condensateurs de différents constructeurs; mais il faut vérifier aussi la parfocalité des condensateurs: devrait être égale (et ne l'est pas en général) l'**hauteur** du condensateur, c'est-à-dire la distance entre sa battée inférieure et sa surface supérieure. Aussi la forme de la partie supérieure, qui doit loger dans le trou de la platine, peut empêcher l'interchangeabilité.

Le condenseur de ce statif est cylindrique, mais il loge dans une bague avec une queue d'haronde (QH) à laquelle il est fixé par la vis VF.

La bague est centrable au moyen des deux vis CC.



Nous avons déjà parlé dans le § 21.1.3 (fig. 83) de ces condensateurs qui peuvent se démembrer, au moins au sens qu'il est prévu le démontage de la lentille frontale afin d'obtenir un champ éclairé plus grand. Du point de vue optique, il y a beaucoup de solutions différentes pour la structure du condensateur.

Historiquement, les premiers condensateurs étaient très complexes, et bien corrigés: c'étaient les "concentrateurs" contenants deux ou plus doublets (Dujardin[135], 1838). Ensuite, E. Abbe (1872) étudia un condensateur à deux lentilles simples (voir la fig. 82-1 dans le § 21.1.3), après lui justement appelé "**condensateur d'Abbe**". La lentille frontale est presque hémisphérique; l'inférieure est biconvexe, souvent asymétrique; pour réduire l'aberration sphérique, certains types modernes ont au moins une surface de la lentille inférieure de forme pas sphérique et la surface supérieure de la frontale peut être concave. En démontant le frontale, on a un assez grand champ.

Cette recette est simple et économique, mais atteinte d'aberration chromatique (et sphérique forte, dans les types à lentilles seulement sphériques). Pour une meilleure correction, l'élément inférieur peut être constitué par plus d'un ou deux doublets ou d'un doublet plus un ménisque. Aussi la frontale peut être double. On arrive ainsi aux **condensateurs achromatiques** ou à ceux **achromatique-aplanétiques**, en général d'hauteur plus grande du condensateur d'Abbe simple.

Les types spéciaux déjà cités (LD, à grand champ, pancratiques, etc.) peuvent être très différents des schémas indiqués et contenir aussi des miroirs ou seuls miroirs quand ils sont destinés au champ noir. Les condensateurs pour contraste de phase contiennent en général un système optique semblable à celui normal, au-delà de la présence d'un ou plus diaphragmes annulaires; ainsi ceux pour radiation polarisée, à part certain détails constructifs; ceux pour fluorescence en diascopie ne doivent pas contenir des verres lourds, opaques à l'UV, et si jamais ils devraient contenir seulement de la silice (dite communément "quartz"), pour sa transparence en UV.

21.7 – Les ABERRATIONS du CONDENSATEUR

Nous ne parlons pas ici des aberrations «du plan» (courbure du champ et distorsion) qui n'ont pas d'effet, en étant l'objet du condensateur une circonférence (le bord du diaphragme de champ Dc.

Peu d'embarras donnent aussi certaines aberrations «du point» extra-axiales (coma et astigma-

[135] Félix DUJARDIN (1801 – 1860), zoologiste français, spécialiste en Protozoaires.

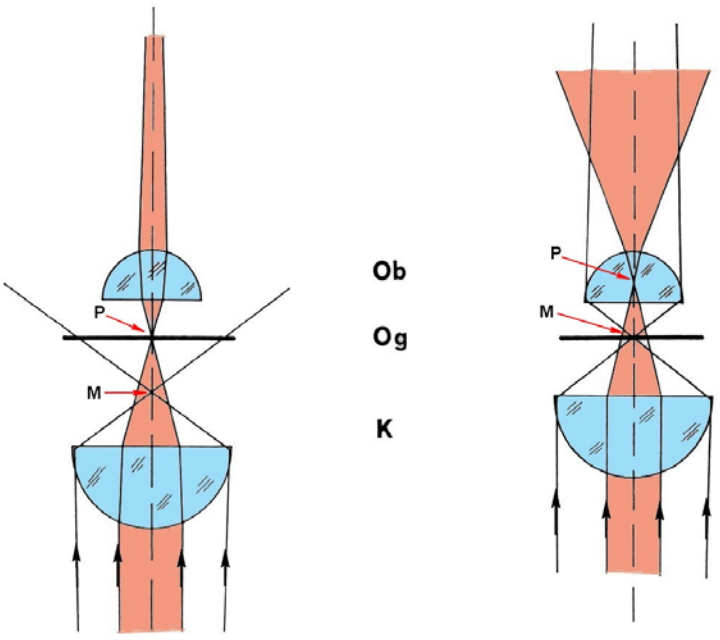
tisme) en étant le champ angulaire du condensateur assez petit. Le chromatique longitudinal vice versa est nuisible en tant que, du diaphragme Dc, on a (en lumière blanche) infinies images à différente hauteur et de différente couleur. Si on focalise le condensateur sur l'image "bleu-violet", on aura un halo rouge; si on focalise "sur le rouge", on aura un halo bleu; si on focalise "dans le vert", le halo est pourpre, ou cramoisis, un mélange de violet et rouge.

Aux petits agrandissements, les halos ne sont pas désagréables et d'ailleurs, en pouvant fermer beaucoup le diaphragme d'ouverture, l'aberration se réduit; mais aux forts agrandissements (et à forte ouverture) les halos apparaissent très larges, comparables au diamètre du champ éclairé. En apparence, les halos restent au dehors du champ éclairé, mais en réalité ils se poussent aussi à l'intérieur de l'image de Dc, si jamais ils sont masqués par elle. Il en résulte qu'elle n'est pas blanche: si elle est entourée, par ex., d'un halo rouge, elle sera atteinte d'une couleur "**dominante**" bleu; si le halo est pourpre, elle aura une dominante verte, etc., toujours de la couleur complémentaire du halo. Ceci est nuisible dans la photographie aux couleurs et il n'y a pas aucun filtre de compensation qui tienne, étant donné que la dominante diffère rapidement au changer de l'hauteur du condensateur. Pour cette raison ont été construits les condensateurs "**achromatiques**", qui minimisent l'aberration chromatique. Ne disposant pas d'eux, l'unique remède est de régler l'hauteur du condensateur selon le meilleur compromis (halo pourpre) et ouvrir beaucoup le diaphragme Dc: ceci augmente la lumière diffuse (voir le § 17.1.1), mais il élargit aussi le diamètre des halos qui sortent du champ visuel, en leur empêchant de conférer à ce champ une couleur dominante.

L'aberration sphérique pour soi rend peu nets les bords du champ éclairé, et ceci serait encore rien; le pire est que l'ouverture utile de l'objectif ne vient pas toute "remplie" par le faisceau conique produit par le condensateur. On se réfère à la fig. 88.

Dans les deux sections de la figure il est schématisé avec une seule lentille hémisphérique (K) un condensateur atteint de forte sphérique souscorrigée: les rayons marginaux se rencontrent dans un foyer (M) plus rapproché par respect au foyer paraxial (P). À gauche, le foyer paraxial se trove dans le plan objet et les rayons correspondants sont accueillis par l'objectif Ob; les rayons marginaux sont perdus; seulement la zone centrale de l'objectif est éclairée et l'effet est le même qu'on aurait en fermant le diaphragme d'ouverture. À droite, sont focalisés (et utilisés par l'objectif) les rayons marginaux (M) tandis que sont perdus les rayons paraxiales (P); tout se passe comme si on avait dans le condensateur un diaphragme annulaire. En effets, il n'existe pas dans ces conditions une focalisation correcte du condensateur.

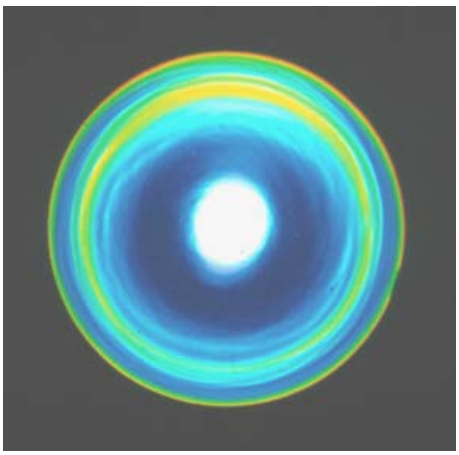
Fig. 88



En pratique, on révèle ces effets en fermant le diaphragme de champ, en ouvrant complètement celui d'oùverture, et en observant la pupille d'un fort objectif après avoir enlevé l'oculaire; on pourrait voir une image comme celle de la fig. 89 dans laquelle n'apparait pas éclairé la zone intermédiaire de l'objectif; la présence de zones colorées dénonce l'effet d'une NON correction de l'aberration chromatique.

Pour mieux se rendre compte de tout ce qu'il arrive, il conviendra focaliser vers le haut et le bas le condensateur. Il est bien aussi tenir un porte-objet sous l'objectif pour sa contribution à la sphérique.

Fig. 89



Cette présence de forte aberration sphérique dans les condensateurs simples rend un peu ambigüe l'indication de leur ouverture maximum: un condensateur d'Abbe vendu comme doué de NA = 1,25 (très répandu), en réalité peut fournir une zone marginale avec NA = 1,25 (en immersion), utile par ex. pour le fond noir, mais le restant de la pupille de l'objectif ne sera plus complètement éclairé; la plus grande pupille qu'on peut remplir UNIFORMÉMENT avec un tel condensateur peut avoir une NA de 0,6 ou 0,7 seulement (voir la figure 89 à coté).

Contre cet inconvénient, sensible pour les forts objectifs, on construit les condensateurs "**aplanétiques**", qui sont souvent aussi achromatiques (condensateurs achromatique-aplanatiques), déjà cités. Un condensateur d'Abbe ne peut pas être ni achromatique ni aplanétique: il faut des recettes plus complexes. On peut obtenir un avantage partiel, comme déjà mentionné, avec l'usage de lentilles asphériques; les surfaces asphériques sont techniquement plus difficiles à réaliser, mais elles permettent une certaine correction de la sphérique sans ajouter des autres lentilles au système. Dans le § 21.6 on a mentionné la structure de ces condensateurs corrigés.

Finalement on a expliqué dans le § 21.1.3 qu'un condensateur à frontale escamotable peut être bien corrigé quand il est complet, mais difficilement il le sera quand il est privé de la lentille frontale.

Donc les meilleurs condensateurs sont fournis avec différents frontales interchangeables toutes corrigées, à choisir en base à l'ouverture ou à la distance de travail qu'on souhaite.

21.8 – Les DIAPHRAGMES ANNULAIRES

Nous supposons de mettre dans le porte-filtres du condensateur, près du diaphragme d'ouverture Da, un diaphragme annulaire (fig. 90), c'est-à-dire un diaphragme qui présente une zone transparente au milieu de deux zones opaques, comme mentionné dans le § 18.10.

Pour **zone** nous entendons une région circulaire centrée d'un élément optique, correspondante à des valeurs définies d'ouverture.

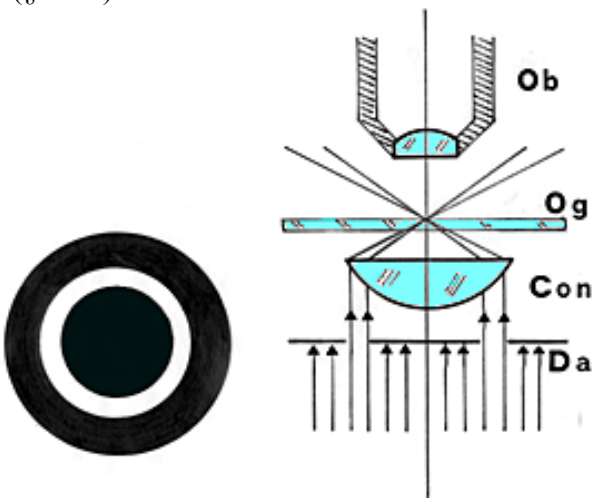
Un diaphragme annulaire au dessous du condensateur permet l'entrée d'un faisceau cylindrique creux qui est rendu conique par le condensateur et se dirige, si tout est disposé correctement, dans le point axial du plan objet (Og dans la fig. 90). À ce point, il a peu d'importance si le condensateur est affecté de sphérique et le foyer paraxial est ailleurs. Il a de l'importance seulement qu'un certain faisceau conique se dirige dans l'objet et après il diverge. Un faisceau creux conique comme schématisé dans la fig. 90 résulte avoir une ouverture maximum et une minimum; si la minimum est supérieure à celle de l'objectif, comme dans la figure, le faisceau ne pénétrera pas dans l'objectif même, et le fond de l'image apparaîtra sombre. Si dans le sommet du cône se trouve un objet quelconque, il répand la radiation qui le frappe dans toutes les directions, comprise l'ouverture utile de l'objectif, et l'image de l'objet apparaîtra claire sur fond noir. Celle-ci est la méthode la plus simple pour obtenir le **fond noir**, une technique de contraste dont on parlera dans le § 30.2; telle méthode peut fonctionner bien aux petits agrandissements et avec des objectifs à sec.

Si au contraire l'ouverture de l'objectif est supérieure à celle minimum du faisceau éclairant conique, le fond de l'image apparaîtra clair, vu qu'une partie de ce faisceau pénètre dans l'objectif. Il ne s'agit pas cependant d'un "fond clair" simple, étant donné que l'altération de la structure du faisceau éclairant modifie le cours des phénomènes de diffraction, la structure de la centrique et la valeur de la résolution (avec une légère amélioration). Ces diaphragmes annulaires, avec une ouverture plus petite de celle de l'objectif en usage, servent pour la technique du

contraste de phase, autre technique “de contraste” (§ 30.4).

Fig. 90

Pour obtenir le “champ noir unilatéral”, c’est-à-dire l’éclairage oblique de l’objet d’un seul côté, on utilise la même méthode décrite dans le § 18.9 pour l’éclairage oblique, soit un diaphragme étroit (quelque mm de diamètre) en position excentrique dans la pupille d’entrée du condensateur.



Mais sa forme n’a pas beaucoup d’importance: ce qui a de l’importance est que son ouverture[136] soit plus grande que celle de l’objectif (§ 30.2).

Dans des cas très particuliers, dans certains interféromètres (Interphako, Jena), on utilise des diaphragmes à réseau, constitués par des lignes transparentes et opaques alternées.

21.9 – Le CENTRAGE du CONDENSATEUR

Certains constructeurs fournissent des instruments dans lesquels le condensateur est précentré à l’usine. Tel centrage fixe ne peut pas être parfait pour tous les objectifs, à cause des petites différences énumérées dans le § 19.1.4, mais il est suffisant pour le champ clair, la fluorescence, etc.

Pour le contraste de phase, il y a des exigences beaucoup plus poussées, mais on se limite à centrer les diaphragmes particuliers. Pour le champ noir, on produit en général des condensateurs centrables spéciaux dans lesquels le mécanisme de centrage est interne à la mécanique du condensateur (§ 30.2). Pour les microscopes polarisateurs, on préfère centrer les objectifs individuels (§§ 19.1.4.1 et 30.7).

En beaucoup d’autres cas, le condensateur est par contre un système rigide, mais la bague dans laquelle il est fixé (la partie horizontale du porte-condensateur, voir 4 dans la fig. 87 dans le § 21.6) est douée d’un mécanisme de centrage. Il s’agit de trois vis, en général à 120° l’une de l’autre, dont une est rendu rétractable, et les autres deux poussent sur le condensateur en refoulant la résistance de la pointe à ressort.

L’idéal serait que le condensateur soit centré chaque fois par rapport à l’objectif inséré, mais une référence directe entre les deux axes optiques n’est pas facile[137]. Alors on utilise des critères indirects par ex. l’observation du diaphragme d’ouverture Da ou du diaphragme de champ Dc, comme décrit ici dessous.

On sait, du § 8.8 et de la fig. 32, que dans la pupille de sortie de l’objectif (PU) s’observe une image réelle du diaphragme Da. Eh bien, qu’on observe la PU, avec la lentille d’Amici, avec un microscope auxiliaire (voir le § 19.5.5) ou à l’œil nu (après avoir enlevé l’oculaire) et, en manœuvrant le Da, on verra son image en PU qui change de diamètre. Maintenant, qu’on l’élargit, jusqu’à quand les bords de son image effleurent les bords de la pupille PU. Si le centrage entre les

---

[136] Ici, comme ouverture on entend l’inclinaison moyenne du faisceau qui traverse le diaphragme et ensuite le condensateur.

[137] À cette fin on utilise la méthode des "**catadioptriques**" c'est-à-dire des images d’une source quelconque créées par les reflets sur les surfaces des lentilles; telles images doivent résulter alignées en deux directions à peu près perpendiculaires entre elles. Comme source peut être utile le diaphragme de champ, très fermé; mais la source doit être décentrée pour que ses images résultent distribuées selon un diamètre de PU; s’il n’y a pas un miroir orientable, on peut utiliser une petite ampoule du type de celles pour pile de poche.

deux parties n'est pas bon, on retouchera le centrage du condensateur. En focalisant le condensateur on trouvera une position dans laquelle le bord de Da apparaît coloré en bleu et le centrage peut devenir très précis. Cependant, cette technique suppose que Da soit centré parfaitement par rapport au condensateur, la quelle chose n'est pas toujours assurée.

Une autre méthode de centrage du condensateur suppose que la "source" (en général le diaphragme de champ) soit fixée rigidement en position correcte à l'intérieur de l'instrument. Ceci arrive dans tant de bons statifs "à éclairage incorporé". Au-delà du diaphragme de champ, on suppose que sois aligné aussi le miroir éventuel mis dans le pied du statif, dessous le condensateur. Tel miroir en effet présente au condensateur une image virtuelle de la source. Si telles éléments sont centrés et alignés, c'est-à-dire situés sur l'axe optique commun objectif-oculaire, alors il ne reste pas que centrer le condensateur sur le même axe: CECI SE FAIT EN OBSERVANT DANS L'OCULAIRE, MÊME EN ABSENCE D'OBJET, L'IMAGE DU DIAPHRAGME DE CHAMP Dc fournie par le condensateur; il faudra fermer opportunément Dc et focaliser le condensateur, mais ce n'est pas une manœuvre compliquée. Tel centrage doit être retouché chaque fois qu'on change l'objectif.

Même cette technique, en général conseillée par les constructeurs, part de la supposition que le constructeur ait parfaitement centré les autres parties du système, mais il vaut mieux ne pas parier: il arrive souvent, en observant à fort agrandissement l'image du diaphragme de champ, de voir des halos colorés pas symétriques (figure à côté): c'est la preuve que quelque chose est hors centre.

Il y a en plus des cas (voir les §§ 22.8 et 22.9) dans lesquels la source est externe au microscope et un miroir mobile au dessous du condensateur en renvoie la radiation vers le condensateur même: tel miroir doit être actionné par le praticien et par suite on ne peut pas partir de la supposition que la source (ou son image donnée par le miroir) soit centrée. Nous avons vu comme on opère dans ce cas (§ 8.9).

21.10 – NETTOYAGE et DÉMONTAGE du CONDENSATEUR

Par rapport à un objectif, un condensateur montre des exigences beaucoup plus petites: les corrections des aberrations sont moins importantes; les focales et les diamètres des lentilles sont supérieurs et les centrages et les distances entre les lentilles sont par suite moins critiques; le système est plus simple.

Il en résulte que démonter et remonter un condensateur ne présente pas beaucoup de problèmes. Les lentilles sont fixées en général par une bague à vis (voir l'article n° 51), sauf la frontale, qui est souvent enchâssée dans la monture métallique par l'intermédiaire d'une rivure (voir le § 19.1).

Un condenseur d'Abbe démonté. La lentille frontale est serrée dans le barillet supérieur (H) par la bague à vis 94.

La lentille inférieure (93) est serrée par une autre bague (92) dans la monture principale G.

88 est un anneau espaceur.

Produit Meopta.

Au-delà de la poussière, la lentille frontale peut être souillée par des détritus ou par des liquides tombés de la préparation, spécialement par l'huile pour l'immersion. Sur le nettoyage de l'huile d'immersion, voir le § 16.4.

Aussi le diaphragme à iris peut se salir à cause de l'huile; ça suffit une moindre trace d'huile ou de graisse sur les minces lamelles de l'iris pour qu'il se crée une forte adhérence et dans ces conditions, quand on tâche de fermer le diaphragme, les lamelles se courbent et se déforment. Démonter et nettoyer (avec de l'alcool ou quelque solvant) un diaphragme à iris n'est pas difficile. La difficulté est dans le remontage, étant donné que chaque lamelle porte deux pivots et tous les pivots doivent simultanément s'insérer dans les trous relatifs. Il faut une certaine expérience et une dose massive de patience pour éviter une crise de nerfs (voir dans ce site, la «Scheda tecnica» n° 23 (en italien).

Quelque pépin de poussière sur les lentilles du condensateur ne crée pas de problèmes en général étant donné que ces surfaces ne sont jamais conjuguées avec l'objet: la poussière est amplement hors foyer. Il y a cependant des cas spéciaux, déjà mentionné dans le § 19.5.1:

 La fluorescence. Beaucoup de fibres végétales et textiles sont fluorescentes et leur présence sur les lentilles du condensateur crée un voile de luminosité de fond qui baisse le contraste. Dans la fluorescence en épiscopie les choses ne changent pas étant donné que le faisceau d'excitation qui éclaire l'objet entre aussi dans le condensateur diascopique (qui est au dehors du chemin utile), à moins qu'on le démonte. Dans ce sens est nuisible de la même manière la poussière sur la préparation et sur l'objectif, surtout en épiscopie, où l'objectif déroule aussi la fonction de condensateur. Le problème est plus grave quand la lentille frontale de l'objectif ou du condensateur sont concaves étant donné que telles cavités agissent comme réceptacle de poussière.

 La radiation polarisée. La poussière, qu'elle soit de nature minérale, végétale ou animale, est en général biréfringente. Entre "Nicol croisés", c'est-à-dire en conditions d'"extinction" (fond noir), chaque pépin de poussière biréfringente crée un halo qui baisse le contraste. Ici valent les mêmes considérations vues sur la propreté de la préparation et des frontales concaves.

 Le fond noir. Encore une fois, la poussière hors foyer, même si monoréfringente, crée des halos clairs qui baissent le contraste.

 Le contraste de phase. Ici aussi, la poussière hors foyer est très désagréable étant donné qu'elle apparaît avec un fort contraste sous forme de halos de différent diamètre.

En tous ces cas donc la propreté du condensateur, de la préparation et de l'objectif est très importante.

22 – La MICRO - LAMPE

Dans les §§ 8.2 et 8.3 et au début du § 21 on a vu comme le champ éclairé dans le plan objet du microscope, celui qui rend visible l'objet, soit donné par l'image d'une "source".

Dans le § 8.2 on a vu que parfois la "source" est d'origine naturelle: le ciel, si possible nuageux, un mur éclairé par le soleil, jamais le soleil direct à cause du champ angulaire insuffisant du faisceau, de l'instabilité de sa position, etc. Mais on utilise d'habitude des sources artificielles au moins pour des raisons de stabilité, de maniabilité, de disponibilité.

En désuétude depuis longtemps sont les sources à flamme (à pétrole, etc.); on peut dire que la presque totalité des sources modernes est alimentée électriquement.

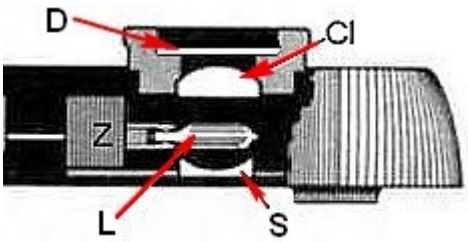
Nous verrons dans le § 22.6 la structure du corps lumineux. Maintenant nous examinons la structure du système optique-mécanique qui entoure le corps lumineux et qui représente la vraie "source", c'est-à-dire l'objet du condensateur. Tel système peut être défini "lampe" ou "microlampe".

Dans l'**éclairage diffus simple** (§ 8.4, fig. 28), la microlampe est réduite à sa plus simple expression, étant constituée par un diffuseur, éventuellement par un miroir qui renvoie vers lui un faisceau, et d'une ampoule électrique, même du type "étendu pas homogène" (voir le § 8.2), c'est-à-dire avec un filament allongé, alimenté directement par la tension du réseau électrique (125 - 220 V AC, ou semblables). On parle de "lampes à tension de réseau". Ce schéma implique rarement un diaphragme.

Dans l'**éclairage diffus avec condensateur** (§ 8.5, fig. 29) il y a en plus un condensateur, peut-être avec diaphragme d'ouverture, mais la microlampe est constituée essentiellement encore

par une lampe électrique ou ampoule à incandescence, éventuellement avec un miroir sphérique dessous, pour récupérer une partie du faisceau (voir S dans la fig. 29, § 8.5), et le diffuseur.

S'il y a une lentille collectrice, comme on a dit dans le § 8.5 (Cl dans la figure à côté), on peut avoir un "microlampe " de bon rendement, et il peut y avoir aussi un diaphragme de champ. Du collecteur on parlera plus loin.



Dans l'**éclairage critique** (voir le § 8.6 et la fig. 30), la microlampe est constituée par un corps lumineux et par son logement, mais ce schéma est très peu utilisé. Un peu plus utilisé est le schéma avec collecteur (§ 8.7 et fig. 31), et il y a ici encore une lentille convergente, mais sans diffuseur ni diaphragme de champ.

Par contre très diffus est le **schéma de Köhler** (voir le § 8.8 et la fig. 32).

Comme on a expliqué, entre microlampe et condensateur il peut y avoir un ou plus miroirs qui replient le chemin optique et réduisent l'encombrement du système. Mais il s'agit toujours de miroirs plans qui ne modifient pas le schéma de base. Le fonctionnement de ce système a déjà été illustré dans le § 8.8. Ici pour micro-lampe on veut parler du complexe: ampoule électrique - collecteur - éventuel verre dépoli avant ou après le collecteur - diaphragme de champ – porte-filtres éventuels - enceinte avec des accessoires pour la dissipation de la chaleur et la fixation - miroir éventuel - accessoires éventuels pour la focalisation et/ou le centrage de l'ampoule, du collecteur, du diaphragme ou du miroir.

Sur l'aspect extérieur et la structure mécanique d'une "microlampe de Köhler" nous ne pouvons pas nous attarder étant donné que chaque instrument offre une différente solution. Il nous suffit de bien comprendre le principe de fonctionnement, comme il résulte de la fig. 32.

En examinant les différentes parties de la moitié inférieure de la fig. 32 on peut commencer par le miroir ou les miroirs, ne pas représentés dans cette illustration, disposés d'habitude entre

condensateur et collecteur.

22.1 – Le MIROIR

Comme on a expliqué, spécialement quand la microlampe est logée dans le pied de l'instrument ou fixée extérieurement au pied même, on utilise un ou plus miroirs plans qui replient opportunément le chemin optique et le rendent compatible avec les encombrements du système. En certains cas, la distance entre microlampe et condensateur devient tellement grande qu'elle demande une «lentille à grand champ» ou d'autres systèmes intermédiaires de lentilles.

Les miroirs présentent au condensateur une image virtuelle de la source, et leur inclinaison détermine la position de telle image. Si les miroirs sont mal alignés, l'image de la source et du diaphragme de champ Dc apparaîtra déplacée (si le condensateur est fixe), ou bien elle demandera un décentrage du condensateur pour ramener au centre l'image de Dc. Les problèmes de centrage dans un instrument optique sont toujours délicats, surtout si on ne dispose pas d'outils spéciaux, et il est toujours dangereux de se fier aveuglément des centrages opérés par le constructeur.

La tolérance sur la planéité de la surface du miroir est en général assez large à ne pas créer de problèmes.

La couche réfléchissante à la surface du miroir peut être de nature différente.

22.1.1 - Argenture

Étant donné que l'argent s'altère rapidement et noircit au contact avec l'air, en réagissant avec l'hydrogène sulfuré (présent en traces dans l'atmosphère) pour former le sulfure d'argent, il doit être protégé avec des peintures spéciales.

L'argenture est donc déposée sur la face postérieure du miroir qui se composera d'une lame de verre aux surfaces planes et parallèles, toutes les deux polies. L'argent est déposé sur le verre par immersion dans une solution de sel d'argent de laquelle le métal se sépare par une réaction chimique.

Ce type de miroir a un réflectivité élevé, grâce à l'argent, et on peut le nettoyer sans danger étant donné que la surface exposée est la surface libre du verre, mais il a un défaut: le faisceau incident (symbolisé dans la fig. 91 par le rayon I) crée un premier faible reflet (R1) à la surface exposée du verre, puis un fort reflet (R2) sur la surface postérieure argentée (Ag), puis un troisième faible reflet (R3) à la suite d'une double réflexion sur les deux surfaces de la lame, puis autres réflexions plus faibles par rebonds suivants à l'intérieur de la lame. En pratique, des deux côtés de l'image principale de la source, donnée par le faisceau R2, on verra au moins deux halos, dus aux reflets R1 et R3 et éventuellement aux suivants.

Ces "miroirs postérieurs" sont donc peu utilisés, au moins quand ils sont placés à l'intérieur de l'instrument, où il y a une protection de la poussière. Ils sont remplacés souvent par les miroirs de surface sous décrits ou par des prismes à réflexion totale (voir le § 11 et la fig. 34 A): ces derniers peuvent être argentés sur la face hypoténuse sans produire des reflets multiples.

L'argenture d'un prisme ne serait pas nécessaire étant donné que la réflexion "interne" est vraiment "totale" (voir le § 2.3.2), mais elle est usuellement utilisée pour protéger la surface réfléchissante de la poussière ou des traces de doigt. Sur la couche d'argent, il y a toujours une couche de peinture protectrice.

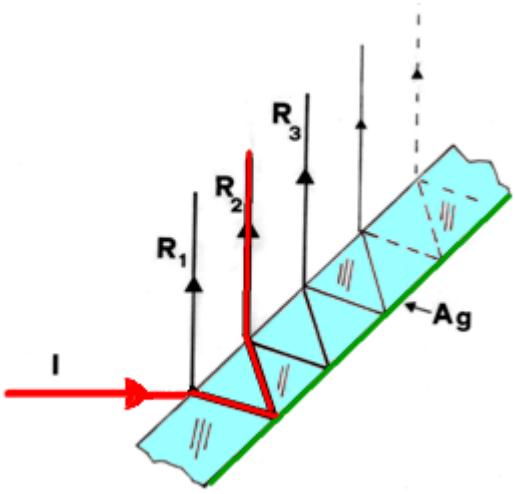


Fig. 91

22.1.2 - Aluminage

L'aluminium est relativement stable au contact avec l'air et donc il peut être utilisé pour revêtir la surface antérieure du miroir qui devient la surface réfléchissante. On parle de "**miroirs de surface**".

L'aluminium ne vient pas déposé comme résultat d'une réaction chimique, mais par évaporation du métal chauffé électriquement dans une cloche sous vide. Le support peut être de nature différente, mais en général il s'agit de verre. L'aluminium a une réflectivité même inférieure à 90 %, plus petite de celle de l'argent[138], mais la réflexion de surface évite l'inconvénient des réflexions multiples. Étant donné que le faisceau réfléchi ne traverse pas la lame de verre, le miroir de surface a un rendement supérieur dans la bande UV, et par suite en fluorescence. Le désavantage est la facilité avec laquelle l'aluminium se raye à la moindre tentative de le nettoyer: pour réduire cet inconvénient, la couche réfléchissante est protégée par une couche de monoxyde ou bioxyde de silicium ou autre matériel; on parle de "quartzage" du miroir, même si le quartz est bioxyde de silicium naturel à l'état cristallin, pendant que le quartzage est déposé par évaporation, à l'état amorphe. Malgré le quartzage, les miroirs de surface restent très délicats et ils sont d'habitude placés dans les parties fermées de l'instrument, où est plus petite l'entrée de poussière. Pour les nettoyer, il faut utiliser un matériel doux, exempte de poussière, si possible humidifié avec de l'alcool ou une solution détergente, et puis il faut les rincer avec de l'eau distillée (ou bien y respirer dessus). L'emploi d'alcool ou autres solvants organiques se rend nécessaire en présence de traces de doigt.

22.1.3 – Les miroirs interférentiels

Dans le § 17.1.2 on a parlé des "**traitements anti-réfléchissants**", c'est-à-dire de ces systèmes de couches transparentes minces déposés à la surface des éléments en verre qui, en provoquant des reflets multiples (voir la figure 91) et en exploitant l'interférence entre les mêmes, peuvent réduire radicalement l'énergie réfléchie à la surface du verre.

On peut compliquer ce principe des couches interférentielles minces en réalisant des couches multiples superposées et/ou en ajoutant des couches minces semi-réfléchissantes. En exploitant ainsi le schéma de l'interféromètre de Fabry et Perot[139] (1901), on peut obtenir une diversité pratiquement infinie de courbes spectrales de réflexion et de transmission (d'autres détails dans le § 23.1). On peut réaliser ainsi des filtres interférentiels et des **miroirs interférentiels**, qui ont une fonction différente, mais ne diffèrent pas dans le schéma de principe. Ces systèmes absorbent peu et ils distribuent l'énergie incidente dans une fraction réfléchie et une transmise; en autres mots, ce qui n'est pas réfléchi est transmis et vice versa: les deux fonctions sont déroulées en même temps.

Quand on utilise un système interférentiel comme miroir dans un système éclairant, on se propose d'avoir la plus grande réflectivité possible dans le spectre optique et la plus petite dans l'ultraviolet et dans l'infrarouge, à fin de protéger la préparation de la décoloration et du réchauffement. De cette manière se réalisent les "**miroirs froids**" qui agissent dans le spectre optique comme un miroir normal, mais ils laissent passer bonne partie de l'UV et de l'IR. Ensuite telle radiation transmise va tomber sur les parois du boîtier où elle n'apporte pas de dégât.

Évidemment, un miroir froid n'est pas convenable à la fluorescence en UV, mais il est recommandé dans l'observation d'objets vivants et très délicats. Il supporte mal le nettoyage, en étant structuré comme un miroir de surface. Étant donné qu'il transmet l'UV et l'IR, il transmet

---

[138] La réflectivité **r** peut être évaluée comme: $r = 100 - [(3{,}7\ \boldsymbol{\rho}^{0,5}) / \boldsymbol{\lambda}^{0,5}]$ dans laquelle $\boldsymbol{\rho}$ est la résistivité du métal, exprimée en micro-ohm pour mètre et $\boldsymbol{\lambda}$ (longueur d'onde) est exprimée en micron. La formule est approchée.

[139] Charles FABRY (1867-1945) et Alfred PEROT (1863-1925), physiciens français.

quelque chose aussi aux extrêmes du spectre optique ("violet" et "rouge"), et donc, observé par transparence, il apparaît de couleur pourpre. Par réflexion, il apparaît neutre étant donné que le spectre optique est réfléchi presque intégralement. Le miroir froid est plus cher que les autres types, naturellement.

En fonctionnant avec le principe interférentiel, le miroir froid a une bande de réflexion qui dépend de l'angle d'incidence (voir le § 23.1): un miroir donné donc répond aux caractéristiques nominales seulement en rapport à l'incidence prévue, que dans le cas le plus normal est de 45° (réflexion à 90°).

22.1.4 – Le miroir concave

Dans les instruments qui prévoient une source externe il est encore en usage un miroir à double face placé sur la base de l'instrument: plan d'un côté et concave de l'autre.

Le diamètre est souvent autour de 50 mm; la monture permet de l'orienter dans toutes les directions étant donné que le miroir tourne sur un axe horizontal autour des extrêmes d'une fourche semi-circulaire, et la fourche tourne autour d'un axe orthogonal au premier, par un pivot fixé à la base de l'instrument (**articulation "à cardan"**).

Il s'agit toujours d'un miroir postérieur étant donné qu'il est monté à l'extérieur de l'instrument et il est exposé à la poussière.

On utilise la face plane comme d'habitude. La face concave peut être utile avec des objectifs faibles quand manque le condensateur (instruments économiques) ou, parfois, quand le champ éclairé donné par le condensateur est insuffisant. Le miroir concave en effet réfléchit un faisceau incident plus ou moins parallèle, comme il arrive de la source, et il le rend convergent avec une ouverture jusqu'à 0,3. L'avantage du miroir concave est justement celui d'assurer des grands champs sans condensateur. Le désavantage est celui de ne pas permettre l'usage d'objectifs moyen-forts. En outre, en travaillant obliquement, il donne de la source une image atteinte de fortes aberrations. En présence de condensateur, le miroir concave doit être toujours remplacé avec celui plan.

Quoi que se soit, le miroir doit être mobile quand la source est externe au microscope afin de réfléchir dans la direction correcte un faisceau qui peut venir d'une direction quelconque. Si la source est fixe dans le statif, le miroir ou les miroirs sont en général fixes, et on a vu que leur alignement est très critique.

Comme règle pratique pour orienter un miroir mobile, on revoie à ce qu'on a dit dans le § 8.9, point 4. Si on travaille avec des sources naturelles comme le ciel, peut-être à travers une fenêtre, il convient observer la pupille de sortie de l'objectif: on tâche d'obtenir le meilleur "remplissage" de telle pupille et surtout le centrage du faisceau éclairant. Ceci aidera aussi à choisir entre miroir plan ou concave.

22.2 – Le COLLECTEUR

Le "condensateur de lampe" ou "condensateur de champ" ou "lentille de champ" est nommé de manières différentes, surtout par les auteurs étrangers, mais le terme "**collecteur**" est le moins équivoque.

Il s'agit d'un système convergent simple ou composé, à forte puissance, forte ouverture, fort diamètre, champ angulaire modeste, corrections modestes. Sa proximité au corps lumineux l'expose à un fort chauffage et donc on ne peut pas y introduire des lentilles collées; si possibles, utiliser des lentilles en silice fondue. Sa fonction est celle de créer une image réelle agrandie d'un corps lumineux (voir plus loin); telle image doit "remplir" la pupille d'entrée du condensateur, c'est-à-dire l'ouverture maximum du diaphragme d'ouverture. Mais de ceci on a déjà parlé en dif-

férentes occasions.

Maintenant nous entrons dans quelque détail.

Le schéma de fonctionnement du collecteur est celui de la fig. 13 (§ 2.6.2.4); son agrandissement (Mc) détermine les dimensions de l'image du corps lumineux; étant donné que telles dimensions doivent correspondre à celles du diaphragme d'ouverture (tout ouvert), nous voyons lesquels sont les facteurs qui les déterminent. En modifiant la (12) qui dit: M = y'/y, nous appelons **Mc** l'agrandissement transversal linéaire du collecteur, **Q** le diamètre **y** de l'objet, c'est-à-dire du corps lumineux (filament de l'ampoule ou semblables), et **Q'** le diamètre **y'** de son image, comme elle se projette sur le diaphragme d'ouverture (voir la fig. 32). À son tour Mc, sur la base de la (14) qui dit: M = x' / f, résulte lié à la focale $\mathbf{f_c}$ du collecteur et à la distance **x'** entre image (Q') et second foyer du collecteur Cl. En combinant la (12) avec la (14) on obtient:

$$Q' = Mc \cdot Q = (x' \cdot Q)/ \mathbf{f_c} \qquad (73)$$

Donc, étant plus ou moins fixe le diamètre maximum du diaphragme d'ouverture (25-30 mm en général), les facteurs sur lesquels on peut jouer sont:

 x', c'est-à-dire la distance collecteur - condensateur (second foyer du collecteur - premier foyer du condensateur); si la microlampe est incorporée dans l'instrument, cette distance est fixe; ce sera le projeteur à l'établir sur la base des autres facteurs. Si la lampe est externe, cette distance peut être changée, mais les encombrements du système ne donnent pas beaucoup de liberté;

 Q, c'est-à-dire le diamètre du corps lumineux (filament incandescent, arc électrique, etc.). Cela doit être été choisi prudemment par le projeteur; le praticien ne devra pas remplacer une "ampoule" électrique avec une autre sans un examen attentif. En pratique, surtout avec des instruments pas récents, il est normale de rester sans les ampoules de rechange et la substitution avec un type "équivalent" demande une comparaison sur quelques caractéristiques fondamentales, comme on dira dans le § 22.6.4;

 $\mathbf{f_c}$, c'est-à-dire la focale du collecteur. Même celle-ci doit être déterminée par le projeteur, compte tenu de tous les autres facteurs.

Étant donné que le diaphragme d'ouverture est circulaire, l'image du corps lumineux devra être le plus possible arrondi; en pratique, c'est déjà beaucoup quand elle est carrée, et de ceci on va reparler. Mais ce qui est plus grave c'est qu'en beaucoup d'instruments, même de qualité excellente, l'image projeté sur le diaphragme d'ouverture est trop petite. Cela équivaut à réduire l'ouverture utile du condensateur au sens que les zones les plus marginales de la pupille de ce dernier ne viennent pas éclairées et nous savons lesquels sont les conséquences à la charge de la résolution, de la profondeur de champ, etc. En outre, un diamètre insuffisant de l'image du filament (Q') comporte que les diaphragmes annulaires à fort diamètre utilisés en champ noir et contraste de phase à fort agrandissement résultent mal éclairés.

22.2.1 - La focale du collecteur

On a à peine expliqué que la focale $\mathbf{f_c}$ influe sur les dimensions de l'image Q' du corps lumineux Q. Mais, à égalité d'ouverture du système, la focale $\mathbf{f_c}$ influe aussi évidemment sur les dimensions des lentilles.

Maintenant, étant établi le diamètre du champ éclairé (qui doit être égal au diamètre **s** du champ objet de l'objectif) et étant établi l'agrandissement du condensateur, un des facteurs qui limitent la valeur maximum du champ éclairé est justement le diamètre des lentilles du collecteur (qu'on voit à ce propos les §§ 21.1 et 21.1.7). Le diamètre des lentilles (le diamètre maximum du diaphragme de champ ne peut pas être plus grand: évidemment, il serait inutile) c'est donc une autre propriété dont le projeteur doit s'occuper, avec la focale $\mathbf{f_c}$.

En plus nous rappelons qu'entre collecteur et condensateur il peut y avoir quelque lentille, par ex. une lentille à grand champ, et ceci influe soit sur les dimensions de l'image du filament, soit

sur les dimensions du champ éclairé. La focale $\mathbf{f_c}$ du collecteur influe en outre aussi sur sa "**distance frontale**", distance entre la première surface des lentilles (côté filament) et filament ou corps lumineux en général, supposé focalisé. Maintenant, dans toutes les lampes électriques, le corps lumineux (filament, arc, etc.) est entouré d'une ampoule de verre, de silice, etc. et la distance entre corps lumineux et paroi de l'ampoule est fixe. Eh bien, telle distance ne peut pas dépasser la distance frontale du collecteur, peine l'impuissance de focaliser le corps lumineux. Certaines ampoules à incandescence ont un filament excentrique dans le bulbe, justement pour rendre moins grave ce problème, mais en chaque cas, aussi du ce point de vue, la substitution d'une ampoule avec une de type différent peut être impossible.

22.2.2 - L'ouverture du collecteur

Comme on a expliqué dans le § 5.2.4 (voir la (22)), l'ouverture dépend du rapport entre la focale d'une lentille et son diamètre utile. Et on a déjà vu lesquels sont les rapports entre l'agrandissement du collecteur, sa focale, le diamètre de ses lentilles, etc. Par suite, aussi l'ouverture du collecteur ($\mathbf{NA_c}$), côté filament, est liée à beaucoup de facteurs.

Naturellement, plus grande est $\mathbf{NA_c}$, plus lumineuse sera l'image du filament, proportionnellement au carré de $\mathbf{NA_c}$. On peut se servir de la relation (dans un système idéal):

$$Q \cdot \mathbf{NA_c} = s \cdot \mathbf{NA_k} \tag{74}$$

qui met en rapport le diamètre Q du corps lumineux, l'ouverture du collecteur ($\mathbf{NA_c}$) et du condensateur ($\mathbf{NA_k}$) avec le diamètre du champ éclairé (**s**). Par ex., une fois choisi l'objectif, sont déterminées les valeurs de **s** (champ objet, que nous supposons coïncider avec le champ éclairé) et de $\mathbf{NA_k}$ (de peu inférieure à l'ouverture de l'objectif). Il résulte alors déterminé le produit $Q \cdot \mathbf{NA_c}$; en étant Q lié à la structure du corps lumineux, sera déterminée $\mathbf{NA_c}$. Si $\mathbf{NA_c}$ est excessive, il sera excessif aussi le diamètre des lentilles du collecteur (qu'on suppose égal au diamètre du diaphragme de champ) et le diamètre du champ éclairé: on a une perte de radiation. Si $\mathbf{NA_c}$ est insuffisante, il arrive le contraire: l'image **Q'** est moins lumineuse et le champ éclairé peut résulter insuffisant (plus petit diamètre du collecteur).

Et encore: dans la (63) (voir le § 19.2.1) on a vu que l'éclairage dans l'image (E) dépend de différents facteurs: nous pouvons l'appliquer au collecteur et écrire:

$$E = (\boldsymbol{\pi} \cdot t \cdot B \cdot \mathbf{NA_c^2}) / \mathbf{M_c^2} \tag{75}$$

dans laquelle **t** est la transparence du système (pertes par absorption, réflexions sur les lentilles, etc.), B est la luminance du corps lumineux (nous verrons de quoi elle dépend) et M_C est l'agrandissement du collecteur. Aussi du point de vue photométrique on voit qu'ils existent des liens entre les différentes propriétés du système. Par ex., on pourrait penser d'augmenter l'éclairage (E) dans le plan du diaphragme d'ouverture en diminuant l'agrandissement du collecteur (M_C), c'est-à-dire en augmentant sa focale; mais cela porterait à réduire la zone éclairée dans le diaphragme d'ouverture (Q') et par suite l'ouverture utile du condensateur.

Ça dépend du projeteur de trouver le meilleur compromis entre les différentes propriétés et optimiser le système; à l'utilisateur reste à accomplir très peu de choix, à part l'alignement du système comme il est décrit dans le § 8.9:

•• choisir le type de condensateur ou sa configuration (voir les §§ 21.1.3, 21.1.4 et 21.1.5);

•• changer la distance de la source, quand cela est possible (voir les §§ 21.1.7 et 22.2);

•• choisir le collecteur ou les lentilles intermédiaires, dans les rares cas dans lesquels ceci est possible;

•• utiliser le type prévu pour l'"ampoule".

22.2.3 – Les aberrations du collecteur

Sont très peu celles qui ont un quelque intérêt pratique.

 La chromatique: cette aberration agit de façon que l'image du filament qui se forme dans le plan du diaphragme d'ouverture (Q' dans la fig. 32) soit entourée par des halos colorés; l'éclairage dans ce plan n'est donc pas homogène, même pas comme couleur. En pratique, cet effet peut produire seulement quelques imperceptible dommage à la résolution avec les objectifs les plus forts ou quelque légère "dominante" de couleur.

 La sphérique: on a ici un effet considérable: les différentes zones du collecteur produisent des faisceaux, de différente ouverture naturellement, qui ne se rencontrent pas dans le même plan. En regardant du point de vue du condensateur, le collecteur paraît de luminosité pas uniforme (on voie à ce propos la fig. 92, dans laquelle un mauvais collecteur a été photographié justement en mettant l'objectif photographique à la place du condensateur): les faisceaux (les zones) qui convergent dans un point devant ou derrière le plan du diaphragme d'ouverture ne participent pas, ou seulement en partie, à la formation du faisceau éclairant; il en résulte qu'aussi le plan objet, dans lequel se forme une image plus ou moins au point du collecteur, n'est pas éclairé uniformément. Un tel effet se révèle plus aisément aux bas agrandissements et avec le diaphragme d'ouverture très fermé: de cette manière, les faisceaux, les zones, avec inclinaison erronée sont coupés par le diaphragme même, justement parce qu'ils se rencontrent sur un plan différent et la fermeture du diaphragme leur empêche de continuer; ils sont utilisés seulement les faisceaux qui se dirigent exactement dans le plan du diaphragme.

Fig. 92 – Le diaphragme de champ n'est pas éclairé uniformement et on voit une trace de la structure du filament (dont les spires sont dirigées verticalement).

Pour corriger la sphérique du collecteur sont utilisés les mêmes moyens utilisés dans les condensateurs: systèmes complexes à plusieurs lentilles ou surfaces asphériques, avec exclusion des lentilles collés à cause du chauffage (voir le § 21.7).

22.2.4 - Les surfaces dépolies

Dans le § 12.4 on a vu que, à cause de l'agrandissement longitudinal, l'image du filament produite par le collecteur est très étendu en direction longitudinale.

De cette manière, elle peut se trouver, plus ou moins défocalisée, aussi sur le plan objet duquel elle rend l'éclairage peu homogène. Pour obvier à cet inconvénient, très fréquent, beaucoup de constructeurs disposent près du collecteur une surface dépolie pour détruire ou brouiller l'image du filament. La lumière diffuse par cette surface ira en partie perdue en tombant au dehors du diaphragme d'ouverture mais, si la surface est placée entre filament et collecteur, l'ample ouverture du faisceau diffus vient en bonne partie récupérée par le collecteur même, qui possède justement une forte ouverture. La perte photométrique est donc réduite.

Parfois la surface dépolie est sur une des lentilles, et elle est par suite fixe; c'est mieux si elle est sur une surface interne, parce qu'elle se salit moins facilement.

Il y a parfois une lame dépolie entre collecteur et ampoule; si elle est escamotable, c'est la meilleure solution: aux forts agrandissements il vaut mieux l'enlever.

Si le verre dépoli est entre collecteur et condensateur, la perte photométrique est forte à cause de la petite ouverture du faisceau utile dans cette région, et en outre tel verre devra se trouver loin du diaphragme de champ à fin que son "grain" ne tombe pas au point sur le plan objet. Cette astuce est souvent oubliée par les constructeurs (et par les praticiens).

22.3 – Le DIAPHRAGME de CHAMP ÉCLAIRÉ

L'image de ce diaphragme, dit simplement "**diaphragme de champ**", se forme dans le plan de l'objet, de la préparation, à l'œuvre d'un condensateur bien focalisé. Tel diaphragme délimite donc la partie éclairée de l'objet, c'est-à-dire le "champ éclairé". De ceci on a parlé plusieurs fois (voir les discours sur le champ du condensateur dans le § 22.1, sur le diamètre du diaphragme de champ dans le § 22.1.2, etc.). Nous rappelons seulement quelques points.

Le diaphragme de champ (Dc dans la fig. 32) est un diaphragme à iris, avec un diamètre maximum pas supérieur au diamètre utile des lentilles du collecteur (rarement plus de 40 mm), et un diamètre minimum d'environ deux millimètres, pas moins pour des raisons mécaniques. Parfois tel diaphragme est centrable par rapport au collecteur, mais son centrage n'est pas critique et sa position est normalement fixe. Quelque constructeur utilise le centrage de Dc au lieu de celui du condensateur pour centrer le champ éclairé, et c'est une solution plus correcte des autres parce qu'elle ne risque pas de décentrer le condensateur pour compenser une erreur dans le centrage d'autres éléments, comme l'éventuel miroir.

La distance entre diaphragme de champ et collecteur est très lié à la structure mécanique du système; il est bien qu'elle soit plutôt grande, au moins deux centimètres, étant donné que de cette manière les pépins de poussière ou autres irrégularités présentes sur les lentilles du collecteur ne sont pas focalisées sur le plan objet: sur ce dernier doit être au point seulement le bord du diaphragme de champ. En autres mots, le diaphragme de champ est conjugué avec l'objet, avec l'image intermédiaire et avec la rétine de l'œil; donc, chaque imperfection présente sur un de ces plans est vue comme un corps étranger superposé à l'image utile. C'est donc toujours utile éloigner de ces plans chaque surface optique, comme justement le collecteur. On voit aussi assez distinctement, malheureusement, les imperfections présentes sur les surfaces voisines, qui en général ne peuvent pas être éloignées, comme la surface supérieure de la lentille frontale du condensateur, la lentille de champ de l'oculaire, etc.

22.4 – Le MIROIR SPHÉRIQUE POSTÉRIEUR

Il faut penser à un projecteur de diapositives et à son système éclairant.

On trouve un principe de fonctionnement semblable au schéma de Köhler (voir le § 8.8). En effet il y a une ampoule électrique, un "condensateur" formé en général par deux lentilles et l'objectif de projection. Ce "condensateur" projette une image du filament dans la pupille de cet objectif, pas sur l'objet (c'est-à-dire sur la diapositive); le plan de l'objet n'est pas éclairé par l'image du filament, mais par une lentille. Eh bien, on peut comparer le "condensateur" du projecteur au collecteur d'une microlampe, et l'objectif du projecteur au condenseur du microscope; on réalise dans le projecteur le principe fondamental de Köhler, c'est-à-dire de ne pas éclairer l'objet avec une image du corps lumineux, mais avec le faisceau qui traverse une lentille.

A part ces parallélismes, nous voulons faire remarquer que, derrière l'ampoule du projecteur, du côté opposé par rapport au "condensateur", il y a un miroir sphérique concave, centré sur l'axe optique commun du système. Le filament de l'ampoule se trouve près du centre de courbure du miroir; dans ces conditions, on peut démontrer que le miroir forme une image réelle renversée du

filament, avec un rapport d'agrandissement de 1:1, dans les alentours du filament même. Avec des dispositifs mécaniques spéciaux, on peut décentraliser légèrement le filament de manière que son image ne tombe pas sur lui même, mais près de lui. Si filament et image coïncidaient, la radiation qui concourt dans l'image serait absorbée par le filament qui peut-être surchaufferait, et elle irait perdue; si l'image se forme contigüe au filament (et on y réussit avec les vis de centrage de l'ampoule), on a un corps lumineux (filament + image réelle) de dimensions doubles; le flux d'énergie double aussi étant donné que l'image, à part les pertes du miroir, a la même luminance du filament. On suppose naturellement que l'ouverture du miroir soit la même de celle du "condensateur".

Le miroir sphérique en outre ne permet pas seulement d'augmenter le rendement photométrique du projecteur: si le filament est allongé, le complexe du filament + image du même (supposés abordés les côtés longs des deux) peut apparaître carré et remplir mieux la pupille de l'objectif, qui est circulaire.

Semblablement, beaucoup de microlampes disposent d'un miroir concave concentrique au filament qui sert à doubler, ou presque, le flux utilisé par le collecteur et à fournir une image environ carrée d'un filament allongé. Parfois, ce miroir est fixe, centré par le constructeur; parfois il est muni de vis de centrage qui permettent de centrer l'image du filament après avoir centré ce dernier, de manière que le collecteur fournisse une image des deux à l'intérieur du diaphragme d'ouverture.

Parfois, le miroir sphérique est du type "froid", c'est à dire il est constitué par un système de couches minces qui, pour des phénomènes interférentiels (voir le § 22.1.3), réfléchissent en majorité le spectre optique et transmettent, au dehors du système, l'infrarouge, de façon à réduire le chauffage de l'objet du microscope.

22.5 – Le PORTE FILTRES

La place la plus convenable pour ranger la majorité des filtres (colorés, calorifuges, d'excitation de la fluorescence, etc.) est tout de suite sous le condensateur du microscope étant donné que tel plan est toujours conjugué très loin du plan objet et la poussière ou les corps étrangers présents sur le filtre résultent trop défocalisés pour apporter quelque trouble.

Mais les condensateurs normaux contiennent à la limite un seul porte-filtres, et ceci ne suffit pas en beaucoup de cas. Autres logements pour les filtres peuvent venir prédisposés dans autres endroits, et souvent dans les alentours de la microlampe. Pour les raisons habituelles, de ne pas mettre au point la poussière, il est bien que ces positions soient le plus éloignées possible du diaphragme de champ; en outre, tels logements (et les filtres relatifs) devront être assez grands de façon à ne pas vigneter le faisceau éclairant.

Les logements pour filtres peuvent être escamotables singulièrement, de manière qu'on puisse insérer deux ou plus filtres simultanément. En autres cas, il y a des disque-revolvers avec quatre-six logements; mais ils ont le défaut qu'on peut insérer un seul filtre à la fois. Les logements mêmes doivent posséder un système de bloc qui empêche au filtre de sortir du logement et se casser, mais en même temps permet une substitution facile.

Quand la microlampe est externe au statif, elle est munie en général aussi d'un porte-filtres multiple; si elle est interne, le logement pour les filtres peut se trouver dans les points les plus imprévus du statif.

22.6 – Le CORPS LUMINEUX

Toujours avec référence à la fig. 32, la vraie source de radiation de la microlampe, et par suite du microscope, c'est un corps lumineux (Q dans la fig. 32).

Les différents systèmes éclairants décrits à son temps (voir les §§ de 8.4 à 8.8) utilisent différemment le flux produit par ce corps. Étant donné qu'il est le plus diffus et le plus complet, nous nous baserons toujours sur le schéma de Köhler et nous savons que l'essence de ce schéma consiste à projeter l'image du corps lumineux non pas sur le plan-objet, mais sur le condensateur. Le système de Köhler naquit vraiment quand les vieilles lampes à flamme ou à arc, à structure homogène, convenables à l'éclairage critique, furent supplantées par les lampes à incandescence, avec filament à forme d'hélice et par suite à luminosité pas homogène. A. Köhler se proposa justement d'obtenir un éclairage homogène de l'objet avec un corps lumineux irrégulier.

Le corps lumineux est un objet qui émet une radiation dans le champ optique (λ comprise entre 400 et 800 nm) et, exceptionnellement (technique de la fluorescence), dans la bande UV (200-400 nm), ou (microscopes en infrarouge) dans la bande IR (800-10.000 nm).

Le **spectre d'émission** d'un corps lumineux peut être "**continu**" si la bande de longueurs d'onde émise est ininterrompue, "**à bandes**" s'il s'agit d'une ou plus bandes relativement larges, continues à leur intérieur, mais séparées par des bandes de non émission, et "**à raies**" si l'émission est concentrée en bandes étroites, de peu de **nm** de largeur, séparées par des régions d'émission négligeable. Sauf celles à vapeurs de mercure, les sources utilisées en microscopie sont presque toujours à spectre continu.

Se méfier des LED, qui émettent un spectre à bandes, jamais continu, même si l'œil donne l'impression du blanc: en photographie, ils donnent souvent une «dominante» désagréable.

Dans la photographie aux couleurs il intéresse d'un spectre continu de n'importe quelle source le rapport de l'énergie contenue dans les deux bandes extrêmes ("bleu" et "rouge"); tel rapport est lié à la température du corps lumineux et s'exprime justement au moyen d'une valeur de température dite "**température de couleur**" ou TC. La TC attribué à une source est la température du "**corps noir**" ou radiateur intégral[140] qui émet l'énergie avec une distribution spectrale comparable à celle de la source en examen. La TC s'exprime en degrés absolus ou Kelvin[141] (°K) égales aux degrés centigrades ou Celsius[142] (°C) + la température du zéro absolu[143] (- 273 °C, à ajouter sans soin au signe).

Une TC plus basse indique une prédominance du rouge. En augmentant la température absolue d'un corps à partir de la température ambiante, sa TC augmente, c'est-à-dire le maximum de la radiation qu'il émet se déplace, de l'infrarouge au rouge, orange, jaune, ... , bleu, mais au-delà d'une certaine limite, la source se détruit. La TC d'un filament de tungstène peut être plus haute que la température effective, jusqu'à 150°C en plus.

Une différence de TC supérieure à 100 °K entre radiation de la source et sensibilité d'une émulsion photographique aux couleurs porte à une couleur dominante dans la photo développée.

La TC du ciel change de 5.000 à 8.000 °K (ça dépend de l'heure, de la saison, etc.) et elle est égale à 5.500 °K avec le ciel partiellement nuageux.

En majorité, les sources utilisées sur le microscope sont artificielles: 1) à solide incandescent (filament de tungstène ou semblables); 2) à arc (plasma et électrode embrasé); 3) à semiconducteur (LED), toutes à alimentation électrique; 3) à flamme, c'est-à-dire à combustion.

---

[140] Le "corps noir" est un radiateur qui transforme intégralement en radiation électromagnétique toute l'énergie qu'il possède et il absorbe toute la radiation qu'il reçoit; un métal incandescent se rapproche beaucoup de ce comportement.

[141] Lord William Thomson KELVIN (1824-1907), physicien anglais.

[142] Anders CELSIUS (1701-1744), astronome suédois.

[143] C'est la température à laquelle un corps ne possède plus d'énergie thermique dans le sens qu'il ne peut pas être refroidi ultérieurement.

22.6.1 – Sources à incandescence

Le corps lumineux est un filament ou un ruban de **tungstène** (ou wolfram), qui est un métal à haut point de fusion (3410°C), renfermé dans une ampoule de verre ou silice, vide ou remplie de gaz inerte, peut-être à pression modérée pour limiter l'oxydation et l'évaporation du métal.

L'incandescence du filament est produite par la chaleur engendrée par un courant électrique d'alimentation. En changeant la tension d'alimentation V, change la température et la TC du filament, sa luminance et sa durée de vie. Une augmentation de V de 25% double ou triple la luminance et réduit la vie à 6% de la valeur initiale. La vie se réduit de moitié pour une augmentation de V de 5% environ. La fig. 93 expose les variations en pour cent, en ordonnée, du flux total (**f**) en lumen, du rendement (**r**) en lumen/watt, de la puissance (**p**) en watt, du courant (**c**) en ampère, de résistance électrique (**o**, en ohm), toujours au changer du pourcentage de V (abscisse). La luminance du filament change avec la huitième ou la dixième puissance de la température, la quelle varie au changer de V selon la:

$$V' / V'' = (T' / T'')^{2,7} \qquad (76)$$

dans laquelle T' et T'' sont les températures aux tensions V' et V''.

L'avantage des sources à incandescence repose justement dans la possibilité de changer luminance et flux en changeant V. Pour changer V on n'utilise pas une résistance en série qui dissiperait trop de puissance, mais un transformateur variable ("Variac"), ou à prises multiples, ou un circuit à semi-conducteur (SC, triac ou similaires). Quand on allume une lampe au tungstène, il est bien partir d'une basse tension et l'augmenter graduellement pour augmenter la vie du filament: à froid, en effet, le filament a une résistance plus petite et il supporte un pic de courant à l'allumage.

Le spectre du tungstène incandescent est continu, mais avec une TC relativement basse; il doit être compensé avec des filtres spéciaux "**de compensation**" (§ 23.2) pour la reconnaissance diagnostique des couleurs (méthode de coloration des bactéries d'après Gram, par ex.) ou dans la photographie à couleurs avec des pellicules "daylight".

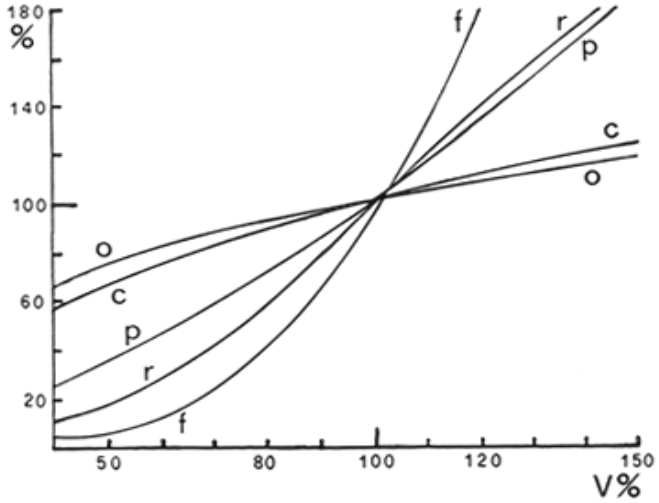


Fig. 93
De: R. Kingslake, "Applied Optics and Optical Engineering", Academic Press, N.Y. 1965.

On a l'émission maximum du tungstène entre 1μ (à 2.500°K) et 0,8μ (à 3.400°K effectifs). Au dessous de 2.000°K, un filament au tungstène n'émet pas dans le spectre optique; les lampes de microscope ont une TC nominale qui oscille entre 2.500 et 3.400°K. À une température supérieure, le tungstène accélère la sublimation (voir la note 145 dans le § 22.6.1.3) et après il commence à fondre.

La tension d'alimentation de ces lampes oscille entre 4 et 220 V (continue ou alternée); la puissance entre 5 et 150 W, le flux entre 5 et 2.500 lumens, la luminance entre 1.000 et 2.000 stilb. La vie nominale va de 50 à 2.000 heures.

En courant alterné, le flux et la TC d'un filament suivent les variations de la puissance dissipée, avec fréquence double des variations de tension[144] et avec un certain retard à cause de

[144] On a le maximum de puissance soit avec avec la demi-onde positive qu'avec celle négative.

l'inertie thermique. La variation du flux, dite "**ondulation**" ou "**flicker**" s'exprime comme:

$$O\ \% = (Jmax - Jmin)/(Jmax + Jmin) \times 100 \qquad (77)$$

dans laquelle **Jmax** et **Jmin** indiquent le flux maximal et minimal.

Pour les ampoules communes, O varie de 5 à 50 %, et elle est plus petite quand le filament est plus gros et compact (plus grande inertie thermique).

On doit remarquer aussi la tolérance dans la position du filament par rapport au culot, qui peut arriver à ± 3 mm. L'image du filament donnée par un collecteur avec un agrandissement de 10:1, par ex., aura dans ce cas une tolérance de position transversale de ± 30 mm et elle peut par suite sortir du tout du périmètre du diaphragme d'ouverture; ceci explique la nécessité d'un mécanisme de centrage du corps lumineux ou de "précentrage" des ampoules (voir les §§ 22.7 et 22.8).

22.6.1.1 - Sources à incandescence à tension de réseau

Telles ampoules se branchent au réseau électrique sans transformateur ou autres organes intermédiaires; le filament cependant doit posséder une résistance élevée et doit par suite être très mince, long et étendu, souvent replié à zigzag ou à C. En conséquence ce n'est pas pratique l'usage d'un collecteur qui ne pourrait pas fournir dans le diaphragme d'ouverture une tache de lumière concentrée.

En général ces lampes "à branchement direct" ont une puissance pas supérieure à 25 W à cause de la production de chaleur et on les utilise avec un verre dépoli ou avec une ampoule opale pour réaliser l'éclairage critique avec diffuseur. Le rendement photométrique est insuffisant, justement pour la présence d'un diffuseur et le manque d'un collecteur.

22.6.1.2 - Sources à filament concentré

Il s'agit de filaments courts et gros, enroulés en hélices compactes de peu de spires. L'homogénéité atteinte est suffisante pour un illuminateur d'après Köhler, pendant que pour l'éclairage critique il faut un diffuseur.

L'hélice du filament tourne vers le collecteur une surface rectangulaire ou carrée, mieux si carrée pour remplir de la meilleure manière la pupille du condensateur. Parfois la position à l'intérieur de l'ampoule est excentrique pour permettre une plus petite focale du collecteur. La résistance électrique est petite, justement parce que le filament est court, et la tension d'exercice change de 4 à 24 V ("**basse tension**"). Ceci demande un transformateur ou autre organe capable de baisser la tension du réseau.

En revanche, les petites dimensions du filament (souvent autour de 2 × 3 mm) permettent l'usage d'un collecteur à courte focale et ouverture élevée, avec un rendement élevé. Pour ce motif, une ampoule à filament concentré, par ex. 6 V - 15 W, avec collecteur, peut donner une image finale (à égalité d'autres conditions) avec un éclairage plus grand d'une ampoule à tension de réseau de 50 W avec diffuseur.

Les types plus utilisés ont une TC de 2.600 à 3.200 °K, luminance de 1.000 à 2.000 stilb.

La présence d'un transformateur permet de changer avec des simples moyens la tension d'alimentation et par suite la luminance du filament; on rappelle cependant que, en baissant la tension d'alimentation V , se baisse aussi la TC, la quelle chose nuira à la reconnaissance des couleurs de l'objet et à la photographie aux couleurs.

22.6.1.3 - Sources "à quartz - iode" ou "à halogènes"

Dans les sources examinées jusqu'à présent, la haute température du filament provoque la sublimation[145] du métal qui noircit le bulbe et graduellement amincie le filament jusqu'à sa rupture.

[145] Pour "sublimation" on entend le passage direct d'un corps de l'état solide à l'état gazeux (vapeur) sans traverser une phase liquide.

On évite ce phénomène nuisible en introduisant dans l'ampoule un halogène, en général iode, qui se combine avec les vapeurs de tungstène à température relativement basse; ensuite le composé se décompose au contact avec le filament (s'il est incandescent) en déposant à nouveau sur lui le métal. La combinaison iode-tungstène arrive cependant seulement à 250 °C environ et celle-ci doit être la température de l'ampoule qui donc sera petite et fabriquée avec silice pour résister à telles températures. L'absence de noircissement de l'ampoule permet un rendement constant pour toute la vie de l'ampoule. La récupération des vapeurs de tungstène permet, à égalité de vie, une TC et un rendement plus élevé par rapport aux types classiques; en général les ampoules à iode sont alimentées pour un TC de 3.200 – 3.400 °K avec une vie d'environ 50-200 heures. Le type le plus utilisé (12 V - 100 W) a un flux de 2.700 lumens, un rendement de 29 lumen/watt, dimensions du filament: 2 × 4 mm.

Par rapport aux types conventionnels à filament concentré, les ampoules "à halogènes" ou "à **halogénures**"[146] (pas toujours elles contiennent de l'iode), ont une vie plus brève mais TC et luminance plus grande. Elles sont convenables à toutes les techniques, peut-être exclue la fluorescence en UV. Elles sont donc en train de supplanter les autres ampoules à incandescence.

Nous ne nous attardons pas ici sur les sources à **LED** car il s'agit d'une technologie en évolution continue. D'ailleurs les LED ne sont pas souvent aptes à la microscopie pour différents motifs: • les dimensions du corps lumineux, même si doué d'une enveloppe bombée avec la fonction de lentille convergente, sont en générale trop petites; • la structure n'est souvent pas homogène en tant qu'elle est formée par 2 - 4 corps lumineux petits et rapprochés; • la TC n'est pas en général connue et le spectre d'émission de toute façon n'est pas continu, mais à bandes; • la TC change de manière imprévisible en fonction de la tension d'alimentation et de l'age du LED;• la luminance ne change pas de manière linéaire avec la tension et souvent elle n'est pas réglable à volonté.

Les LED sont fixés sur une base opaque et le miroir postérieur de beaucoup de microlampades en générale devient inutile.

22.6.2 - Sources à arc

La source de chaleur est un arc électrique qui s'établit entre deux électrodes rapprochés en atmosphère gazeuse. L'arc est soutenu par un courant à forte intensité et basse tension.

Le corps radiant est donné par le bout d'un ou des deux électrodes, chauffés au rouge par l'arc, et/ou par le plasma créé entre eux. La forte dissipation de chaleur oblige à tenir éloigné le collecteur qui aura donc une ouverture réduite. Malgré cela, celles-ci sont les sources les plus intenses, précieuses pour la micro-projection, l'ultra-microscopie et la fluorescence en UV.

N'existant pas le danger de fusion du filament, la température effective et la TC peuvent dépasser 10.000 °K. Les arcs ont souvent une résistance électrique négative[147] pour laquelle il faut une impédance en série ("**ballast**"), limitatrice de courant: sans cette dernière, à une diminution de la tension appliquée suivrait une augmentation du courant et une fluctuation normale de l'alimentation tôt ou tard provoquerait une espèce de court circuit.

Souvent l'allumage demande en plus, ou un contact momentané entre les électrodes ou une impulsion de tension très forte et brève.

L'émission en UV est forte, la quelle chose est dangereuse pour les yeux et demande des précautions opportunes.

 Arcs à basse intensité. Les électrodes de charbon ou métal sont en air libre; on demande un courant rectifié ou continu. Le corps radiant est donné par le bout incandescent de l'électrode po-

[146] Halogénure est un composé d'un halogène (comme le iode) avec un métal, par ex. le iodure de tungstène. Les halogènes sont quatre métalloïdes: iode, brome, chlore et fluor.

[147] Et donc ils n'obéissent pas à la loi d'Ohm.

sitif, dont le point de sublimation met une limite à la TC. Les électrodes de charbon de cornue permettent une TC de 3.600 – 3.800 °K, avec une émission entre 0,3 et 4,2 μ; la courbe d'émission est très semblable à celle du corps noir (le maximum à 1μ, avec un pic étroit à 390 nm).

L'arc à charbon comme celui "à flamme", celui "à haute intensité", etc. sont presque inutilisés actuellement en microscopie.

 Arcs concentrés. Ils sont des arcs courts entre électrodes métalliques comme l'arc "au **zirconium**"; un des électrodes est creux et plein d'oxyde de zirconium, qui est la vraie source. On utilise parfois un type de 40 W, 3 A et 50 V avec résistance "ballast"; diamètre de la source peu plus qu'un mm. La TC est élevé, 3.200 °K, le spectre d'émission est assez continu (dans la région optique) et la tension d'alimentation peut être changée dans amples limites, pourvu qu'elle soit continue.

 Arcs compacts au plasma ("brûleurs"). Il s'agit d'arcs concentrés qui créent un plasma qui est la vraie source. Ils sont renfermés dans une enveloppe de silice avec atmosphère gazeuse dans laquelle la température peut monter à des centaines de degrés et la pression à dizaines d'atmosphères. Il existe donc le danger d'explosions violentes[148]; il reste en plus le danger de la forte émission UV. Les arcs au plasma sont plus pratiques et plus intenses que les arcs au charbon, qu'ils ont supplanté depuis longtemps aussi dans d'autres applications (projecteurs cinématographiques). La distance entre les électrodes va de 0,2 à 10 mm; la résistance électrique est encore négative pour laquelle on demande l'impédance en série. L'impulsion initiale d'allumage est encore nécessaire; il est souvent opportun de pouvoir changer légèrement le courant (pas la tension) d'alimentation pour tenir compte des différences individuelles entre une lampe et l'autre; alimentateur et lampe sont donc complexes et chers. Il y a des arcs compacts pour courant alterné avec des électrodes égaux; les autres, pour courant continu ou redressée, seraient à préférer parce qu'ils sont plus stables et ils ont une vie plus longue; dans ces derniers l'anode est plus volumineux parce que il se réchauffe davantage. L'arc est plus vif près de la cathode.

Les arcs alimentés en courant alterné ou redressée ont une forte ondulation (voir le § 22.6.1) à cause de leur inertie thermique insuffisante. La tolérance sur le courant d'alimentation est de l'ordre de ± 10 % pour lequel il n'est pas possible de changer la luminance ou le flux en changeant les caractéristiques de l'alimentateur. C'est ça un désavantage par rapport aux ampoules au tungstène; et il y a en outre le danger d'explosions, le rayonnement élevé en UV, la complexité de l'alimentateur, etc. Les arcs les plus courts, à égalité de puissance, ont une grande luminance mais un flux total plus petit.

La mort de ce type d'arcs dérive de la sublimation des électrodes qui noircissent l'ampoule (diminution de luminance, augmentation de la température de l'ampoule à cause de la plus forte absorption, danger augmenté d'explosions), ou d'une difficulté à l'amorçage ou d'une instabilité excessive de l'arc.

Les types les plus utilisés sont deux:

•• Arcs compacts en **xénon**. Quand l'ampoule est remplie du gaz "noble" xénon, l'arc est stable, il a une très longue vie (1.000 – 2.000 heures), et il émet un spectre continu avec une TC prochaine à celle du ciel (5.500 – 6.000 °K), comme on voit dans la fig. 94. Il est donc convenable pour TOUTES les techniques, à commencer par la photographie aux couleurs avec des pellicules "pour lumière du jour" sans besoin de filtres de compensation. À cause de la forte dissipation de chaleur, la microlampe doit être externe au statif et le collecteur doit être construit en silice, très résistante aux bonds de température, qui est aussi transparente à l'UV. Pas de lentilles collées. Derrière l'ampoule on pose souvent le miroir sphérique (§ 22.4) pour la récupération du flux émis en direction opposée au collecteur.

Un arc très utilisé est l'OSRAM XBO 162, de 160 W, 20 V, 3.200 lumens, 9.000 stilb, pour

[148] Les arcs en vapeurs de mercure réduisent beaucoup la pression interne quand ils sont éteints, et donc ils sont moins dangereux; ceux en xénon sont en pression aussi quand ils sont éteints et donc ils peuvent exploser dans n'importe quel moment, s'ils sont heurtés.

courant alternée ou continue. Longueur de l'arc: 2 - 3 mm.

•• Arcs compacts en **vapeurs de mercure** à haute pression. Ce sont les sources les plus fortes et les plus riches d'UV utilisées en microscopie. Le bulbe contient une petite quantité de mercure liquide que l'arc fait évaporer en créant une pression de quelque dizaine d'atmosphères. La luminance est quelques fois supérieure à celle des arcs en xénon, surtout dans les arcs petits. Le spectre émis est à raies (les principales à longueur d'onde de 366, 406, 435 et 546 nm) sans compter les autres raies en UV.

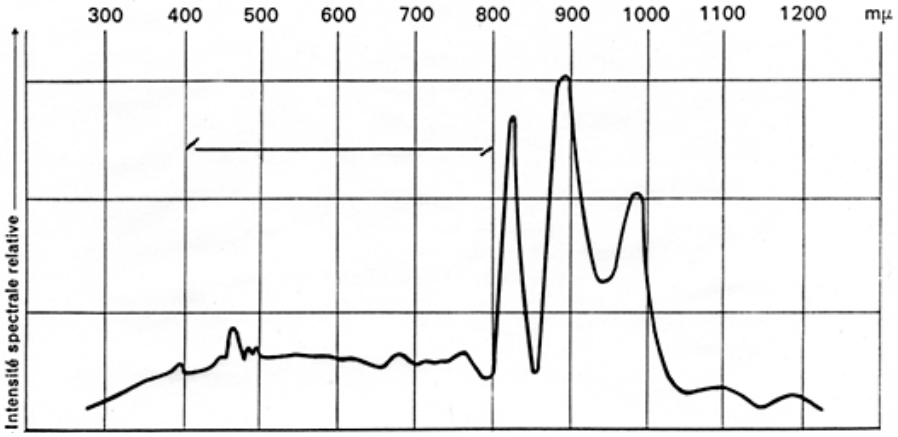


Fig. 94 - La double flèche horizontale indique le spectre optique. Arc en xénon.

De: Wild Herbrugg, Catalogue M1 – 302, 1963.

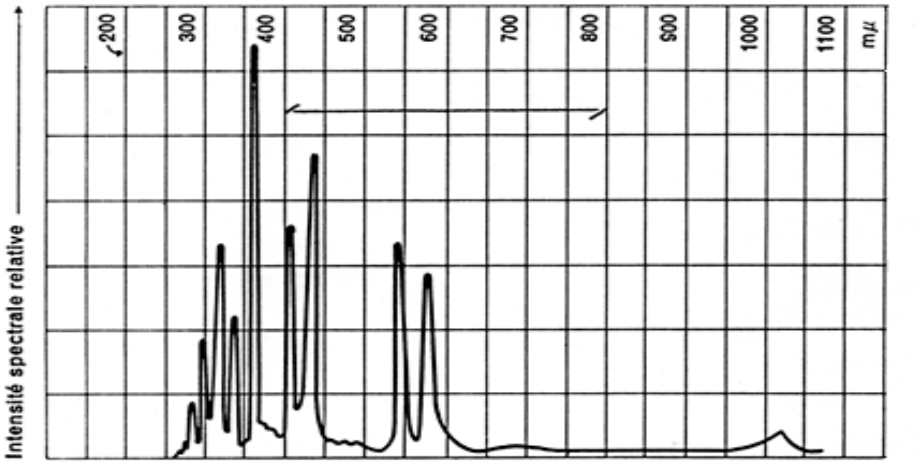


Fig. 95 - Arc en vapeurs de mercure.

De: Wild Herbrugg, Catalogue M1-302, 1963.

Le spectre à raies empêche une définition de la TC qui oscille de toute façon entre 7.000 et 10.000 °K. Cette structure à raies du spectre ne se prête pas à la photographie (surtout aux couleurs) et elle est désagréable même pour l'observation (reconnaissance difficile des couleurs) mais, avec des filtres opportuns à bande étroite, elle permet l'isolement de radiations presque monochromatiques. Voir la fig. 95. Ces "raies" de plus grande émission des lampes à mercure sont amplement utilisées dans la technique de la fluorescence pour l'"excitation" de l'objet, et celui-ci est un vaste champ pour une leur spécifique application.

La vie de ces "brûleurs" est modeste, 100 - 300 heures; l'allumage demande toujours une impulsion à haute tension et la résistance négative impose l'usage du "ballast"; après l'allumage, il faut laisser passer quelque minute avant de l'éteindre et ainsi après la coupure. Allumages fréquents raccourcissent la vie de la lampe.

Sont très utilisées les ampoules OSRAM HBO 75 W et HBO 200 W avec un arc de 2-3 mm, une luminance respectivement de 6.000 et 30.000 stilb, un flux de 2.500 et 9.500 lumens. La maison NIKON utilise un brûleur de 100 W, avec arc très petit (quelque dixième de millimètre). Très diffus est aussi un arc de 50 W.

Les lampes à mercure sont réservées à la micro-projection et aux recherches en UV (fluorescence, etc.).

À froid, les lampes aux vapeurs de mercure ont une petite pression interne à cause de la condensation des vapeurs; elles sont donc moins dangereuses que celles à Xénon, qui restent en pression même à froid.

22.6.3 - Sources à flamme

Nous mentionnons ici quelques sources dans lesquelles le corps lumineux est constitué par la flamme qui se détache d'un solide combustible ou, le plus souvent, d'un liquide ou d'un gaz.

Nous faisons allusion aux "lampes **à pétrole**" ou "**à acétylène**" ou "**à gaz**". Parfois, la flamme du gaz est peu lumineuse en soi même, mais elle rend incandescent un corps solide, par ex. une toile contenant de l'oxyde de thorium (99 %) et de cérium (1 %): celle-ci est la "lampe" ou "brûleur **Auer**[149]" ou "manchon Auer".

La luminance des lampes à pétrole et à gaz n'est pas élevée, pendant qu'elle est très grande dans les lampes Auer. Sans entrer dans les détails constructifs, il faut dire que telles lampes, même si moins confortables que celles à alimentation électrique, trouvent emploi "sur le champ" ou en localités où manque l'énergie électrique. Leur luminance est souvent suffisamment homogène sur bonne partie de leur surface, et cela suffit à permettre un schéma d'éclairage critique sans diffuseur et aussi sans collecteur (voir les §§ 8.6 et 8.7). En autres mots, étant donné un microscope avec un condensateur normal et un miroir orientable, une lampe à flamme peut donner des résultats satisfaisants même du point de vue photométrique, sans besoin de microlampe. Même la constance dans le temps de ces lampes est suffisante, au moins pour l'observation visuelle.

22.6.4 – Les caractéristiques du corps lumineux

De la composition spectrale et de la **température de couleur** (TC) on a déjà discuté dans le § 22.6.

Nous rappelons seulement qu'en certains cas (colorations sélectives avec valeur diagnostique, couleurs d'interférence en radiation polarisée, photographie aux couleurs, etc.) a beaucoup d'importance l'appréciation de la couleur dans l'image de l'objet et par suite la TC de la source; la présence d'une "dominante" de couleur dans une image peut donner des fausses interprétations. Même l'aberration chromatique du condensateur (voir le § 21.7) peut donner une **dominante**, qui varie en focalisant le condensateur même. Pour évaluer objectivement la situation ils existent des instruments spéciaux ("**colorimètres**").

Dans les sources à incandescence, comme on a expliqué, la TC est plutôt basse: même si on les alimente à tension nominale, elle oscille entre 2.600°K et 3.400°K; pour l'observation visuelle il est opportun d'insérer dans ou près de la microlampe un "**filtre diurne**", c'est-à-dire un filtre de compensation qui transmet en grande mesure les longueurs d'onde plus petites et apparaît par suite bleuâtre; naturellement, il élève la TC (dans les filtres diurnes les plus communs, d'environ 1.000 °K).

Pour la photographie aux couleurs, il faut être plus précis et utiliser des filtres de compensation capables d'élever la TC en mesure plus grande et bien définie, en supposant que la lampe soit alimentée à la tension nominal et compte tenu de la TC pour laquelle la pellicule est projetée. Ils existent dans ce sens des pellicules pour "**lumière diurne**" ou "**lumière du jour**" ou "**daylight**" (TC = 5.000 ou 6.000 °K), des pellicules pour "**lumière artificielle**" de type A (TC = 3.400 °K) et type B (TC = 3.200 °K). Il est évident que, pour une pellicule "daylight", la TC de la source à incandescence doit être élevée pas mal et on devra utiliser un filtre de compensation[150] plus sombre, par ex. le Kodak **Wratten** 80 A ou 80 B.

Les lampes à arc en xénon sont convenables pour la vision et la photographie avec des pellicules "diurnes" parce que leur TC correspond à celle de la "lumière moyenne diurne". Celles-au mercure, par contre, pour leur spectre à raies, ne sont pas convenables soit pour la vision que pour la photographie, et il n'y a pas de filtre de compensation suffisant, étant donné qu'un tel filtre a

[149] Karl AUER, baron de Welsbach (1858-1929), chimiste autrichien.

[150] Sur les filtres de compensation, voir le § 23.2.

toujours une courbe de transmission continue, sans marches, qui ne peut pas tenir compte des "raies".

Dans la pratique, les sources à incandescence sont souvent "sous-alimentées", c'est-à-dire alimentées à tension inférieure à celle nominale, soit pour réduire la "luminosité" de l'image, soit pour allonger leur vie (voir le § 22.6.1). Ceci cependant porte à une réduction de la TC, de manière difficilement évaluable, et pour ça la photo doit être prise seulement avec la lampe à tension nominale.

La **luminance**. Nous avons vu dans le § 22.2.2 (formule (75)) qu'un des facteurs qui déterminent l'éclairage E dans l'image du microscope c'est la luminance B du corps lumineux de la microlampe.

Pour luminance ou brillance B s'entend le flux émis par une source pour chaque cm^2 de sa surface et pour chaque stéradian (unité de mesure de l'angle solide: une sphère entière correspond à 4π stéradians). L'unité de mesure de la luminance est le stilb (sb) égal à un flux d'un lumen pour cm^2 et pour stéradian[151].

La luminance de la source doit être choisie sur la base du travail à exécuter, de la sensibilité de l'émulsion photographique, etc. Les valeurs les plus élevées sont demandés, en ordre croissant, en vision directe, en photographie, en contraste de phase, en contraste interférentiel, en champ noir, en radiation polarisée, en fluorescence, en micro-projection. Et toujours plus aux agrandissements les plus forts.

Dans le § 22.6.1 (fig. 93) on a vu la dépendance des différentes propriétés d'un filament de tungstène de la tension d'alimentation V (en abscisse), et en particulier la dépendance du flux (**f** dans la figure), et par suite de la luminance. Flux et luminance dépendent en effet de la température T qui dépend de la tension V. Le rapport entre tension et température est donné par la (76); par contre, le rapport entre énergie totale émise par un filament et température est donné par la loi de **Stefan - Boltzmann**[152]:

$$W = \sigma T^4 \tag{78}$$

dans laquelle W (exprimée en erg) représente l'énergie totale émise par un "corps noir"[153] (la loi est valide avec quelque approximation pour beaucoup de corps chauds, y compris le tungstène), T est la température absolue (en °K) et **σ** (sigma, lettre **s** grecque minuscule) est une constante. La dépendance de l'énergie émise (à une certaine température) de la longueur d'onde est décrite par une loi plus complexe (loi de **Planck**[154]) qui indique comme la longueur d'onde de plus grande émission augmente avec le diminuer de la température. En autres mots, sous alimentant une lampe à incandescence, se baisse la luminance et grandit la longueur d'onde de plus grande émission, c'est-à-dire diminue la TC: la radiation émise apparaîtra au début jaune, puis orange, puis rouge. Survoltant, il arrive le contraire, et la couleur tend au bleu.

En plus, il faut considérer l'**angle solide d'émission uniforme**, c'est-à-dire l'angle à trois dimensions (le "cône de lumière") dans lequel la luminance est uniforme de façon acceptable, en relation aux exigences du travail. Tel angle solide ne doit pas être inférieur à l'ouverture du collecteur. Évidemment, cette propriété est plus importante en photographie. La raison de l'importance de l'uniformité d'émission réside en cela: le faisceau conique que le collecteur utilise correspond au "champ objet éclairé" du microscope (le collecteur ou le diaphragme de champ sont conjugués avec l'objet) et chaque irrégularité dans la luminance du corps lumineux dans les différentes directions correspond à une luminosité irrégulière du champ éclairé. Ce problème est sérieux avec les ampoules à basse tension et à filament concentré, d'où le fréquent usage de verres dépolis dans les microlampes, et il est grave avec les lampes à tension de réseau, avec filament étendu. Ces dernières en effet sont utilisées seulement si elles sont accompagnées par un diffuseur, peut-être constitué par la paroi même de l'ampoule. L'homogénéité directionnelle de la luminance est meilleure

---

[151] Aujourd'hui le stilb est remplacé souvent par le nit (n); 1 n = 10^{-4} sb.

[152] Joseph STEFAN (1835 – 1893) et Ludwig BOLTZMANN (1844 – 1906), physiciens autrichiens.

[153] Voir le § 22.6.

[154] Max PLANCK (1858 – 1947), physicien allemand, un des fondateurs de la physique quantique.

dans les lampes à arc et dans celles à flamme.

Dans le § 12.4 on a parlé des conséquences des irrégularités dans la structure du filament.

La **tension d'alimentation** doit être aussi considérée au moment du choix d'une microlampe: pour les lampes à tension de réseau est suffisante une prise reliée au réseau de distribution de l'énergie électrique. Pour les lampes à basse tension, il y a des alimentateurs plus ou moins sophistiqués de type électromécanique ou électronique, avec tension de sortie variable par saccades ou avec continuité, avec protection vers les court-circuits, instrument indicateur de la tension de sortie, etc., mais il peut suffire un simple transformateur. Le praticien devra vérifier seulement que l'ampoule qu'il monte dans sa microlampe corresponde à la tension de sortie maximale de l'alimentateur dont il dispose. Une petite différence peut faire "brûler" rapidement l'ampoule. Étant donné que certains alimentateurs avec tension de sortie variable font usage de semiconducteur et produisent une tension de sortie de type impulsif, il n'est pas facile de mesurer la valeur utile de cette tension de sortie: ce qui est important est sa "valeur efficace", pendant que beaucoup d'instruments indiquent la valeur de pic (voltmètres "électroniques"), ou la valeur moyenne (voltmètres à bobine mobile); l'instrument le plus indiqué à ce but est celui "à fil chaud", difficilement disponible.

Pour les lampes à arc il faut par contre un alimentateur encombrant, lourd et cher, contenant au moins un transformateur, une impédance-série et un circuit pour l'impulsion d'allumage. En voie accessoire il peut y avoir un redresseur (on a déjà expliqué que l'alimentation en courant redressé est préférable), un compte-heures pour connaître la "vie" de la lampe, un ampèremètre pour contrôler que la lampe ne soit pas traversée par un courant supérieur à celui nominal (ceci en raccourcirait rapidement la durée), un organe pour changer le courant d'alimentation, etc.

Aussi la **dissipation** de chaleur de la source a importance. On sait que le rendement d'une source de radiation optique est toujours bas. Si pour **rendement** on veut parler du rapport entre énergie émise dans le spectre optique et énergie totale émise (essentiellement infrarouge) on a des valeurs de 3-4% pour les lampes à incandescence. Le rendement est un peu meilleur pour les lampes au quartz-iode, beaucoup mieux dans les lampes à arc, mais en somme presque toute la puissance électrique absorbée par une source à alimentation électrique est dissipée en chaleur.

Comme règle pratique, on rappelle qu'une puissance de 20 W est le maximum accordée à une microlampe incorporée dans le pied d'un microscope; jusqu'à 100 W il faut une enceinte extérieur au statif, des dimensions d'environ 1 dm^3, si possible munie d'ailettes de refroidissement et de trous d'aérage. Au-delà des 100 W, il faut des enceintes proportionnellement plus grandes. Les trous d'aérage doivent être conçus de façon à laisser fuir le moins possible de lumière, qui dérange en tout cas.

Il sera un soin du constructeur éviter que la chaleur engendrée par la microlampe se transmette, par convection ou par conduction, à certain parties sensibles du statif comme les mouvements de focalisation et certaines parties optiques. Telle transmission de toute façon ne doit pas produire des altérations de l'image quand on exécute des photographies à longue pose ou des mesures quantitatives.

Tous les matériels thermo-sensibles présents dans la microlampe (plastique, peintures, isolants électriques, etc.) doivent être capables de résister à la température de régime[155]. Les parties métalliques externes doivent être protégées du surchauffage de façon à ne pas provoquer des brûlures en cas de contact accidentel; on obtient ceci avec des entretoises qui isolent thermiquement, avec des doubles enveloppes métalliques, etc.

Les parties en verre (lentilles, filtres, miroirs) doivent résister soit à la température de régime qu'aux bonds de température conséquents à l'allumage et à la coupure. Il n'est pas rare de trouver telles parties fendues après un certain temps. Pour ce motif seraient préférables les lentilles en silice, résistantes à la chaleur et transparentes à l'UV, mais tel matériel est cher. En particulier, les filtres bleus et les filtres d'excitation pour la fluorescence, qui absorbent beaucoup d'IR, tendent à se réchauffer et à se casser. Une "trempe" opportune, c'est-à-dire un traitement thermique particulier, peut conférer à beaucoup de verres une plus grande résistance au réchauffement; parfois tels

[155] C'est la température que l'enveloppe atteint après un temps illimité de fonctionnement à la température ambiante et avec alimentation nominale.

filtres sont marqués avec la lettre “g” (= gehärtet = durci, tempéré, en allemand).

Pour le même motif on ne met jamais dans les microlampes des lentilles collées et chaque lentille devrait être montée sans la serrer dans son logement pour laisser place à la dilatation du verre.

Les **dimensions** du corps lumineux sont bien importantes pour ce qu’on a dit dans le § 22.2 et avec la (73) on a vu avec quelles autres propriétés elles déterminent les dimensions du faisceau qui frappe sur le diaphragme d’ouverture. Encore une fois, il faut répéter que la substitution d’une ampoule avec une “équivalente” doit tenir compte, en outre, des dimensions du filament: s’il est trop grand, une partie de son image fuit du condensateur et elle va perdue; s’il est trop petit, même son image est trop petite et on réduit l’ouverture utilisable du condensateur.

On a aussi expliqué que la forme du corps lumineux, pour s’adapter à la forme ronde du diaphragme, devrait être au moins carrée, et ça est ce qu’on tâche d’obtenir avec les filaments concentrés et avec les arcs compacts. Par contre beaucoup d’ampoules (du type de celles en usage sur les véhicules, par ex.) sont à déconseiller en tant qu’elles contiennent un filament trop allongé. Un pis-aller peut être donné par l’usage du miroir sphérique postérieur, plusieurs fois cité, qui permet d’aborder au filament allongé une image réelle du même, qui en double la largeur.

Aussi la distance entre corps lumineux et parois du bulbe a de l’importance, en tant qu’elle ne doit pas dépasser la distance frontale du collecteur (voir le § 22.2.1). Normalement, le projeteur sait coordonner les différentes propriétés du système en utilisant des ampoules commerciales. Le praticien doit être seulement bien attentif dans la substitution d’un type d’ampoule avec un autre et avoir sous la main toujours quelque pièce de rechange.

Trop de fois on voit des statifs même de valeur abandonnés et oubliés dans quelque cave seulement parce qu’on ne trouve plus l’ampoule convenable.

22.7 – La FOCALISATION du CORPS LUMINEUX

Dans le § 12.4 on a expliqué que l’agrandissement longitudinal provoque un fort allongement, en direction axiale, de l’image du filament produite par le collecteur; ainsi telle image résulte plus à moins au point aussi où elle ne devrait pas l’être, par ex. dans le plan de l’objet.

Malgré cela, au moins pour ne pas empirer les choses, il faut focaliser le corps lumineux par rapport au collecteur de façon à obtenir, pour son image, la position de meilleur compromis. Il peut être mobile le collecteur ou l’ampoule; ce qui a de l’importance est que soit variable la distance entre ces deux éléments. Les dispositifs mécaniques pour obtenir ce résultat sont très variables et il n’est pas nécessaire de les décrire tous: on fera référence, chaque fois, aux instructions du constructeur.

Le procédé général à suivre est celui-ci: on crée un écran au niveau du diaphragme d’ouverture du condensateur, ou en y appuyant un bout de papier ou simplement en fermant le diaphragme. Sur tel écran on verra l’image du corps lumineux et on la focalisera jusqu’à avoir l’image la plus nette possible (figure suivante). L’image sera atteinte de fortes aberrations et elle sera donc peu nette, mais on peut limiter ce défaut en fermant légèrement le diaphragme de champ et en réduisant ainsi les aberrations du collecteur.

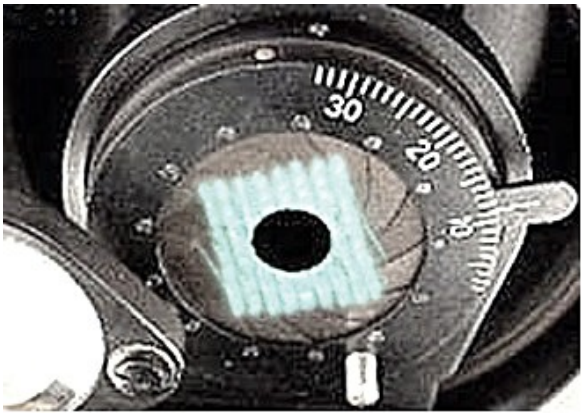


Fig. 95b

Nous avons dit en “fermant légèrement” étant donné qu’en fermant trop le diaphragme de champ, qui agit comme diaphragme d’ouverture pour le collecteur, il est bien vrai que se réduisent les aberrations du collecteur, mais on augmente sa profondeur de foyer pour laquelle il est plus difficile d’apprécier la position de meilleure mise au point.

Une autre manière de focaliser le corps lumineux peut être d’observer dans l’oculaire un champ visuel “vide” (préparation peu coloré ou même un porte-objet propre).

On utilise l'objectif le plus faible de façon à voir dans l'oculaire la plus grande surface possible du collecteur; on augmente éventuellement la focale du condensateur (par ex. en écartant la lentille frontale), on baisse la tension d'alimentation de l'ampoule (ou en insère un filtres gris), de façon à ne pas être ébloui. Le condensateur et le miroir mobile éventuel soient centrés et correctement focalisés (le diaphragme de champ apparie net et centré).

Tôt ou tard, en changeant la focalisation de la microlampe, on verra apparaître une trace confuse de la forme du corps lumineux ou des spires du filament. Alors on cherchera la position qui donne l'homogénéité maximale dans la luminosité du champ.

En beaucoup d'instruments modernes on utilise encore des ampoules à incandescence "précentrées" dans lesquelles l'ampoule est fixée à un culot spécial avec des références mécaniques précises; étant donné que la tolérance dans la position du filament par rapport au culot normal est trop forte pour les applications de la microscopie, on réalise une seconde greffe ou culot spécial sur laquelle on fixe l'ampoule avec tolérance assez étroite. Le culot spécial est inséré dans la microlampe de telle manière à trouver aisément une position précise. Dans ce cas, la position du filament peut être assez correcte pour qu'un mécanisme de focalisation devienne inutile (jamais se fier!).

22.8 – Le CENTRAGE de la MICROLAMPE

Nous voulons parler du centrage du corps lumineux par rapport au collecteur, ou vice versa.

Si l'ampoule est "précentrée" (voir ci-dessus), en théorie elle irait dans la position correcte dès qu'on appuie le culot spécial sur ses surfaces de référence. En pratique, quelque faute reste souvent; il s'agit d'une solution plus expéditive, mais pas optimal du point de vue technique. En plus, les lampes précentrées sont très chères et elles sont trouvables seulement près du constructeur de l'instrument ou son réseau de vente. Dans le temps, il est facile qu'elles ne soient plus fournies.

Si l'ampoule n'est pas précentrée, son support ou le collecteur doivent être centrables, à moins qu'il n'y ait pas dans le système un diffuseur fort. Le centrage est nécessaire s'il s'agit d'un bon illuminateur d'après Köhler et il doit être répété au moins après chaque substitution de l'ampoule. Il y a trois cas possibles:

1) La microlampe est fixée rigidement dans ou au côté du statif. On espère que le constructeur ait correctement centré les différentes parties. Pour le centrage du filament, on procède comme on a expliqué pour la focalisation: on projette l'image du filament sur le diaphragme d'ouverture (tout fermé - figure plus haut), on ferme légèrement le diaphragme de champ et on déplace la partie mobile (ampoule ou collecteur), tant que l'image est centrée par rapport au diaphragme d'ouverture.

2) La lampe est externe, mais fixée rigidement au statif avec une pièce métallique, avec une "base commune" ou avec autres moyens. Si telle lampe a déjà été alignée a priori, on retombe dans le cas 1). Si elle doit être alignée, voir le cas 3).

3) La lampe n'a pas été alignée. Mises à part les différentes solutions spéciales suggérées par le constructeur, la chose la plus simple est pointer la microlampe vers un mur, avec le diaphragme de champ presque ou totalement ouvert. Autour de l'image du filament (qui doit être focalisée) on verra des halos en partie colorés (aberration sphérique et chromatique). On centre le filament jusqu'à quand les halos résultent de même largeur, intensité et couleur de tous les côtés de l'image.

Maintenant nous parlons de l'alignement de toute la microlampe dans son complexe, comme si ce fût un bloc unique. On suppose qu'elle ne soit pas fixée rigidement au statif et donc qu'elle ne soit pas alignée par le constructeur, comme il était prévu dans le cas 1).

Eh bien, on doit orienter la microlampe jusqu'à quand l'image du filament soit au centre du miroir (ou du premier miroir) qui se trouve entre collecteur et condensateur. Si dans cet emplacement il y a une lentille à grand champ fixe, on suppose qu'elle ait été centrée par le constructeur. Si elle est escamotable, il vaut mieux l'enlever et si jamais par la suite la centrer, avec la même méthode utilisée pour centrer le condensateur (§ 21.9). Ils devraient y avoir des vis spéciales. Si l'image du filament n'est pas bien visible sur le miroir, on peut y souffler l'haleine pour l'embuer

ou on peut y appuyer un petit bout de papier mince qui permette d'apercevoir les bords du miroir même.

Si le miroir sous le condensateur est orientable, comme dernière chose on l'aligne en le bougeant jusqu'à quand l'image du filament tombe au centre au diaphragme d'ouverture, que il est mieux tenir fermé dans cette phase.

Ce type de lampe externe, qui doit être alignée par le praticien, est en train de disparaître: le constructeur tâche de simplifier le travail du praticien en réunissant rigidement entre eux lampe et statif et, quand la puissance dissipée est basse, la lampe vient souvent incorporée dans le pied ou dans la colonne du statif. Dans ce cas cependant, soit pour les tolérances de fabrication, soit pour des légers déplacements graduels dans le temps (dérives thermiques par ex.), soit pour des chocs occasionnels, le système ne résulte pas toujours centré au mieux; et n'étant pas prévue une régulation de la part de l'utilisateur, il n'y a pas de possibilité de correction et le système reste décentré d'une façon permanente. Tant pire pour l'efficacité.

22.9 - FAUTES dans le CENTRAGE de TOUT le SYSTÈME ÉCLAIRANT

À ce moment, il devrait être clair comme on doit procéder pour mettre au point l'entier système éclairant. Il s'agit d'opérations importantes étant donné que même le microscope le plus parfait peut produire des images très détériorées si on commet quelque faute banale dans la régulation du système éclairant.

Nous avons à peine décrites les opérations de centrage du corps lumineux et de la microlampe, qui ne sont d'ailleurs pas nécessaires dans le cas des ampoules et microlampes précentrées. Dans le § 8.9 nous avons décrites les opérations générales d'alignement du système de Köhler; ayant maintenant examiné en détail les différentes parties du système éclairant, nous voulons résumer ici les opérations fondamentales en soulignant les fautes possibles et leurs conséquences.

On suppose déjà centrés ou fixes le filament de l'ampoule et la microlampe dans son complexe.

Le pire cas se présente quand on a deux ou trois parties singulièrement centrables sur un axe commun. Par ex., pour centrer l'image du diaphragme de champ (voir le § 8.9, alinéa 6) il est possible de centrer le condensateur ou un miroir sous-jacent ou quelque lentille intermédiaire. Dans ces cas il est bien de centrer d'abord le condensateur (en observant l'image du diaphragme d'ouverture qui se forme dans la pupille d'objectif, comme on a dit dans le § 21.9) et puis centrer l'image du diaphragme de champ au moyen du miroir (ou de la lentille à grand champ).

Un autre cas est celui d'objectifs singulièrement centrables par rapport au revolver et d'un condensateur centrable. Heureusement, dans ces cas la platine est tournante autour d'un axe fixe (comme il arrive souvent dans les microscopes polarisateurs) et sur celui-là on centre chaque objectif; puis on centre le condensateur par rapport aux objectifs, en regardent l'image du diaphragme de champ **Dc**. Si cependant même la platine est centrable, il y n'a plus de référence et il faut centrer les objectifs sur la position "moyenne" de la platine ou vice versa.

Mais nous laissons de côté les cas spéciaux et nous veinons au cas le plus commun d'un illuminateur de Köhler avec ampoule précentrée, microlampe incorporée ou fixée au statif, miroir fixe, condensateur centrable, objectifs pas centrables.

Il convient alors partir d'une focalisation au moins approchée de l'objet au moyen d'un faible objectif; même si le système éclairant est encore à régler, on devrait avoir ce peu de lumière qui suffit à focaliser.

Ceci fait, on doit identifier l'image du diaphragme de champ **Dc**; on se débarrasse d'autant que possible des éléments diffusants, on ferme au moins en partie le diaphragme de champ Dc (et peut-être le diaphragme d'ouverture **Da**), on focalise le condensateur et éventuellement on le déplace avec les vis de centrage prévues afin de centrer le champ éclairé. À la fin on doit voir net ou avec quelque halo le bord de Dc, concentrique au champ visuel. En ouvrant Da, les halos qui entourent Dc s'élargissent et il faudra peut-être refocaliser le condensateur jusqu'à quand les halos

apparaissent couleur pourpre (réduire la dominante de couleur dans le champ éclairé en faisant de manière que les halos soient constitués par les couleurs extrêmes du spectre comme le rouge et le bleu-violet).

La focalisation du condensateur doit être retouchée quand on change la préparation ou quand on focalise l'objectif sur une préparation de forte épaisseur. Son centrage doit être retouché quand on change l'objectif ou quelque système intermédiaire "de tube" comme un changeur d'agrandissement. Tel centrage est plus critique évidemment aux agrandissements les plus forts.

Le Dc doit être ouvert jusqu'à éclairer tout le champ visuel et pas plus, et telle régulation va répétée si on change l'objectif ou l'oculaire ou quelque système intermédiaire. Si le champ éclairé résulte encore trop petit (avec Dc tout ouvert) ou trop grand (avec Dc tout fermé) il faut changer la focale du condensateur comme déjà dit dans les §§ de 21.1.1 à 21.1.6, peut-être en éliminant ou en insérant la lentille frontale ou une éventuelle lentille à grand champ.

On peut régler le Da visuellement en cherchant le meilleur compromis entre résolution + luminosité (Da ouvert) et contraste + pénétration (Da fermé). La luminosité de l'image doit être réglée en changeant la tension de la lampe (pourvu qui ne s'agit pas d'une lampe à arc et on ne fasse pas des photos aux couleurs, à cause de la température de couleur), ou en insérant des filtres diffuseurs ou neutres. JAMAIS NE VARIER LA LUMINOSITÉ DE L'IMAGE EN FOCALISANT LE CONDENSATEUR (voir le § 21.4) OU EN RÉGLANT SON DIAPHRAGME. Pour une plus correcte régulation de Da voir tout ce qu'on a discuté dans le § 8.9, point 8.

Maintenant nous voyons quelques possibles difficultés et leurs causes.

Il peut arriver qu'un porte-filtres sous le condensateur, devant la lampe ou au dessus de l'objectif, ou un prisme ou une lentille à grand champ escamotables se trouvent en position intermédiaire et la monture mécanique fasse de l'ombre et une partie ou tout le champ image se rende sombre. La même chose peut arriver avec le revolver porte-objectifs ou avec un changeur d'agrandissement qui n'ait pas été tournés jusqu'à la position d'arrêt. Aussi un condensateur décentré peut oblitérer en partie le champ éclairé.

Si la monture qui fait de l'ombre occupe seulement une partie latérale du faisceau éclairant de manière qu'il devienne globalement oblique, l'image peut apparaître normalement illuminée, mais on aura un effet d'ombrage et la position des détails de l'image changera latéralement quand on focalise l'objectif ou le condensateur. Dans les rares cas dans lesquels le diaphragme d'ouverture est decentrable, même une position excentrique du diaphragme, surtout si partiellement fermé, peut créer l'éclairage oblique ou rendre obscur tout le champ.

Il peut arriver aussi que, avec tout centré, le champ reste encore sombre. À part les causes évidentes (ampoule éteinte ou brûlée, miroir mobile mal incliné, corps étrangers le long du chemin optique, revolver interchangeable à coulisse partiellement extrait, etc.), il peut arriver qu'il soit inséré un des diaphragmes annulaires pour le contraste de phase ou le champ noir, et simultanément que le diaphragme d'ouverture ne soit pas complètement ouvert; la pupille du condensateur se présente ainsi tout à fait oblitérée.

L'éclairage pas uniforme peut dépendre aussi d'une faute de centrage de l'ampoule (si elle est précentrée, elle peut être mal serrée dans son logement), de sa mauvaise focalisation (si elle est précentrée elle pourrait être été introduite à l'envers), du choix d'une ampoule du type ne pas convenable, d'une distance erronée entre statif et microlampe (si cette dernière est indépendante du statif). Il peut arriver aussi, avec des faibles objectifs et un condensateur à forte ouverture, qu'on doive ou on veuille fermer le plus possible le diaphragme d'ouverture; dans ce cas, la profondeur de foyer du condensateur devient élevée et sur le plan de l'objet peuvent résulter plus ou moins au point beaucoup de surfaces de la microlampe avec toutes les irrégularités possibles (grains de poussière, surfaces dépolies, spires du filament, etc.) qui apparaissent comme taches sombres. Il n'y a pas qu'augmenter la focale du condensateur, (par exemple en extrayant sa lentille frontale) et en élargir le diaphragme, ou introduire un verre dépoli au dessous du condensateur.

Parfois, pour les raisons dites dans le § 12.4, l'éclairage de l'objet est irrégulier parce qu'il reporte la structure à hélice du filament. Au-delà de focaliser mieux le filament et le condensateur, il

ne reste pas qu'insérer un filtre dépoli (si possible entre ampoule et collecteur pour réduire la perte photométrique).

Il est évident que la saleté, sur beaucoup de surfaces, peut provoquer des taches plus ou moins défocalisées.

Il peut être le cas d'éclairage insuffisant. Nous excluons les défauts de projet sur lesquels l'utilisateur a bien peu possibilités d'intervention. Par contre, en supposant que les centrages soient corrects, de la part de l'utilisateur il peut y avoir:

•• tension insuffisante à l'ampoule; •• ampoule vieille au bulbe opacifié; •• filament défocalisé; •• diaphragme de champ trop fermé, avec condensateur défocalisé; •• éventuel miroir mobile mal orienté; •• diaphragme d'ouverture trop fermé; •• condensateur trop baissé ou très décentré; •• lentille frontale du condensateur ou lentille à grand champ inséré ou escamotée par erreur;

•• préparation opaque; •• présence de filtres ou de diviseurs de faisceau (par ex. vision-photographie) non souhaités.

23 – Les FILTRES OPTIQUES

Un filtre optique est un dispositif partiellement transparent ou réfléchissant capable d'altérer l'intensité d'une radiation de longueur d'onde **λ** comprise entre 200 et 10.000 nm. Si la transmission ou la réflexion du filtre est indépendante de λ dans une certaine région spectrale, le filtre se dit "**neutre**" ou "**gris**" dans cette région; si elle varie en fonction de **λ**, le filtre se dit "**sélectif**"; si la variation en fonction de λ se vérifie dans la région optique du spectre, le filtre est "**coloré**.

La radiation ne pas transmise par le filtre peut être en prévalence absorbée (filtres à absorption) ou réfléchie (filtres à réflexion) ou diffuse (diffuseurs) ou déviée du chemin optique principal (certains polarisateurs à prisme). Les filtres interférentiels (voir plus loin) sont à réflexion, ceux en verre coloré ou gélatine ou solutions liquides sont à absorption. Tous les filtres absorbent ou réfléchissent au moins quelque pour-cent de la radiation incidente, pendant que la partie diffuse ou déviée peut être très réduite. La partie absorbée peut se transformer en autres radiations électromagnétiques comme l'IR ou la radiation optique (fluorescence et phosphorescence), mais en général elle se transforme en chaleur pour lequel tous les filtres, surtout ceux à absorption, se réchauffent beaucoup quand ils sont éclairés.

Le comportement optique d'un filtre à transmission est défini par la fonction T_{λ}, c'est-à-dire par la variation de la **transmission T** au changer de **λ**. Telle fonction est représentée graphiquement avec une "**courbe de transmission**" dans laquelle T se trouve en ordonnée, en échelle linéaire, logarithmique ou log-log (double-logarithmique[156]). **λ** est en abscisse. T est définie par le rapport entre l'énergie émergente du filtre (E) et l'énergie incidente (I):

$$T = E/I \tag{79}$$

Dans un filtre à absorption on peut négliger la réflexion aux surfaces du filtre et étudier le rapport **τ** (**transmission pure**)[157] entre l'énergie qui arrive à la surface de sortie du filtre (**e**) et l'énergie qui pénètre au-delà de la surface d'entrée (**i**). Tel rapport:

$$\tau = e/i \tag{80}$$

dépend de la seule absorption dans la masse du filtre.

Dans un filtre à absorption il existe la relation:

$$T = R\,\tau \tag{81}$$

dans laquelle R est le "**facteur de réflexion**" qui tient compte des réflexions aux surfaces et varie de 0,96 à 0,90 pour incidence normale. **τ** est liée à l'épaisseur **d** du filtre par la relation exponentielle:

$$\tau = \tau_o^{\,d} \tag{82}$$

dans laquelle τ_o est la "transmission unitaire" correspondante à **d** = 1 mm.

La (82), toujours avec **d** exprimée en mm, peut être écrite:

$$\tau = e^{-ad} \tag{83}$$

dans laquelle **e** est le numéro de Neper[158] (égal à 2,718...) et **a** est le "**coefficient d'absorption**":

---

[156] **x** = 1 - log log 1/**τ** = 1 - log a - log d, dans laquelle **τ, a** et **d** sont ceux de la (83) et **x** est l'ordonnée du graphique. (86)

[157] **τ** est la lettre **t** minuscule grècque (tau).

[158] Sir John NEPER ou NAPIER, baron de Merchinson, mathématicien écossais (1550-1617).

$$a = - \log_e \tau_o \qquad (84)$$

En pratique, si d = 2 mm, on a une transmission pure qui est le carré de la transmission valide pour d = 1 mm; pour d = 3 mm, on a le cube, etc.

La formule, (83) exprime la "**loi de Bouguer - Lambert**"[159] dans laquelle le coefficient **a** est égal à zéro si le filtre est totalement transparent; il est égal à l'infini pour un corps totalement opaque.

Les courbes de transmission avec τ linéaire s'interprètent aisément, mais les petites valeurs de τ se lisent mal et en changeant **d** la courbe change de forme; si les ordonnées sont dessinées par contre en échelle double-logarithmique (voir la note 156), les basses valeurs de τ se lisent mieux et en variant **d** on a seulement un déplacement vertical de la courbe.

La transmission d'un filtre peut être exprimée aussi comme "**densité optique**", indiquée avec D:

$$D = \text{Log } 1/\tau \qquad (85)$$

dans laquelle D néglige le coefficient R et elle est donc directement proportionnelle à **d** ; l'avantage d'utiliser la grandeur D est celui-ci: en mettant en série différents filtres, la densité résultante est la somme des densités partielles. En utilisant la transmission τ il faudrait par contre calculer le produit.

TABLEAU V

D	0,00	0,1	0,3	0,5	1,0	1,3	2	3
τ	1,00	0,79	0,50	0,32	0,1	0,05	0,01	0,001

La valeur de τ peut s'exprimer en % en la multipliant par 100.

Étant donné un système optique avec une source qui émet dans un certain spectre, une courbe de transmission globale déterminée et un récepteur avec une certaine courbe de sensibilité, on peut calculer le rapport entre l'énergie utile reçue par le récepteur après l'introduction d'un filtre et l'énergie sans filtre. Ce rapport exprime la réduction d'énergie utile dans la gamme de travail du système et il s'appelle "**facteur de filtre**." Il n'est pas donc une propriété du filtre seul, mais du système global dont le filtre fait partie.

En photographie, le facteur de filtre fait référence aux sources à spectre continu et aux émulsions normales et il est utile pour le multiplier au temps d'exposition calculé (ou mesuré) en absence de filtre.

Les filtres en microscopie sont souvent ronds, avec diamètre 30 - 33 mm (ou 50 mm pour les microlampes) ou plus petits (à fixer sous ou sur les oculaires ou à insérer à l'intérieur du tube). Pour les microlampes ils existent aussi des filtres carrés ou rectangulaires ou d'autre forme.

23.1 – La COMPOSITION des FILTRES

 Filtres liquides. Ils sont constitués par des liquides ou solutions contenues dans des bacs de verre à faces bien planes et parallèles. Nous rappelons le nitrite de sodium au 2 % dans l'eau qui absorbe bonne partie de l'UV et de l'IR et le sulfate de cuivre, lui aussi anticalorifique, de couleur bleuâtre.

 Filtres en gélatine. Il s'agit de gélatine coagulée, étirée en feuilles polies protégées avec de la laque ou des lames en verre. Ceux-ci sont des filtres économiques qui peuvent avoir un grand nombre de courbes de transmission différentes. Ils sont sensibles cependant à la chaleur qui les dé-

[159] Pierre BOUGUER (1698-1758), physicien et géodésien français; Johann Heinrich LAMBERT (1728-1777), matematicien, physicien et philosophe allemand.

forme et les fait décolorer (la couleur est obtenue en général avec des colorants organiques qui sont thermolabiles); ils ne supportent pas le nettoyage s'ils ne sont pas protégés entre verres. Ils sont construits par Eastman Kodak Co., Rochester, NY (USA), par Ilford Ltd, Ilford Essex (GB), etc. Les Kodak existent en deux séries: Wratten et "Color Compensating" (CC); les Ilford s'appellent "Microfilters".

 Filtres en verre coloré. Il s'agit de lames à faces planes et parallèles, en verre optique spécial. Ils sont plus chers et ils existent en variété de types plus petite de ceux en gélatine: en effet ils ne peuvent pas contenir des colorants organiques qui viendraient détruits pendant la fusion du verre. Ils sont résistants cependant aux agents chimiques et physiques, y compris la chaleur. Rares types avec le temps se ternissent à la surface. Quelques-uns sont fluorescents, et ils émettent une lumière jaune-rouge s'ils sont frappés par l'UV; ceci est nuisible dans les filtres "d'arrêt" pour la fluorescence en UV, qui doivent donc être protégés avec un autre filtre contre l'UV.

Les filtres passe-bas (voir le § 23.2) ont en général des courbes très raides (T va de 90% à 1 % dans une bande de 50 nm); les filtres verts ont des courbes peu nettes, vers le rouge parfois remontantes; encore pire pour les filtres bleu-violets.

Le facteur de réflexion pour incidence normale (R) peut descendre à 90 % et on peut l'améliorer avec les traitements anti-réfléchissants.

Construisent des verres colorés: Jena Glasswerk Schott & Gen. Mainz (Allemagne); Chance-Pilkington Optical Works, S. Asaph, Flintshire, North Wales (GB); Parra-Mantois (Paris, France); Corning Glass Works, Corning, NY (USA); Hoya Glass Works, Tokyo (Japon), et nombreux autres.

 Filtres interférentiels. Tels filtres, comme les "miroirs froids" (§ 22.1.3), les traitements anti-réfléchissants (§ 17.1.2), certains semi-réfléchissants à basse absorption, etc. se basent sur le principe de l'interféromètre de Fabry et Pérot, constitué dans le schéma de base par deux surfaces semi-réfléchissantes séparées par une couche de matériel transparent avec une épaisseur de l'ordre de grandeur d'une fraction de λ. Tel système, frappé par un faisceau, crée une série de faisceaux réfléchis et une série de transmis avec des rapports de phase constants, pour lequel la réflexion et la transmission du filtre sont liées aux interférences positives ou négatives à l'intérieur de la série des faisceaux (fig. 91, § 22.1.1). En étant le déphasage entre les faisceaux partiels lié à l'épaisseur de la couche transparente et à son index, à l'angle d'incidence et à $\boldsymbol{\lambda}$, les propriétés du filtre dépendent de sa structure et de l'angle d'incidence, et la transmission T n'est pas constante dans le spectre.

Les couches minces dont le filtre est composé viennent déposées sur la surface d'une lame de verre par évaporation, sous vide poussé, de matériels convenables.

Avec cette technique on peut avoir des filtres avec une largeur de bande de 10 - 50 nm, chose impensable avec les autres types de filtres. En plus, en étant la courbe de transmission liée aux propriétés physiques du filtre, il est possible de projeter et construire un filtre avec une courbe de transmission préétablie, "sur mesure", pour un problème donné.

L'énergie non transmise est en grande partie réfléchie: l'absorption et le chauffage sont donc minimes.

Les désavantages des filtres interférentiels sont: •• coût élevé •• sensibilité aux agents physiques (chauffage, chocs, frottement) •• dans les régions de moindre transmission, T n'est pas inférieure en général à 0,001 (10^{-3}), pendant qu'avec le verre et la gélatine on peut arriver à 10^{-6}: cette limitation est grave dans les filtres pour la fluorescence •• la transmission maximum en général ne dépasse pas 0,45 dans les filtres à bande étroite. Avec des filtres à couches multiples il est possible cependant d'obtenir des courbes de chaque type et avec des valeurs de T très d'élevées.

Les filtres "calorifuges" interférentiels réfléchissent l'UV et l'IR et transmettent le visible avec une plus grande efficacité des filtres analogues en verre; en outre, ils se réchauffent moins parce que l'IR n'est pas absorbé mais réfléchi. De différente manière fonctionnent les "miroirs froids" déjà cité dans le § 22.1.3.

Il y a des filtres interférentiels "polychromes" ayant différentes bandes étroites de transmission distribuées dans un ample spectre.

Comme déjà mentionné, le fonctionnement des filtres interférentiels est lié à l'épaisseur de la

couche transparente traversée par la radiation, et par suite à l'angle d'incidence (**i**). Dans les filtres complexes à beaucoup de couches, la variation de l'incidence provoque des phénomènes complexes; dans les filtres simples à bande étroite, une augmentation de **i** équivaut à une augmentation d'épaisseur des couches minces et la bande de transmission se déplace vers les petites valeurs de λ:

TABLEAU VI

Incidence **i**	5°	10°	15°	30°	**45°**	60°
Déplacement de la bande de transmission en nm (valeurs indicatives valides à l'intérieur du spectre optique)	0,6	2,5	6	30	55	100 nm

La variation de la bande permet de couvrir avec un seul filtre une région spectrale de 50 - 100 nm, dans le visible, et avec quelques filtres toute la région optique. Pour changer l'incidence sur le filtre on construit des porte-filtres tournants spéciaux. En augmentant **i** , cependant, la bande, au-delà de se déplacer, s'élargit (jusqu'à 10 fois) et elle devient bifide au sens qu'elle présente deux maxima de transmission voisins correspondants à deux faisceaux polarisés parallèlement et perpendiculairement au plan d'incidence[160].

 Filtres mixtes. Les filtres interférentiels, au-delà de la bande souhaitée, transmettent aussi sur des bandes passantes non souhaitées; pour éliminer ces dernières, et pour réduire la transmission résidue dans les régions de transmission (presque) nulle, "de rejet", on construit des **filtres mixtes** en collant un opportun verre coloré sur un filtre interférentiel. Le filtre résulte ainsi en partie à réflexion et en partie à absorption. Pour que le verre coloré ne se réchauffe pas, il est bien tourner vers la source le côté du filtre interférentiel, c'est-à-dire le plus réfléchissant.

Construisent des filtres interférentiels et mixtes la déjà rappelée Schott & Gen. à Mayence, la Balzers AG, Balzers (Liechtenstein), la C. Zeiss, le Bausch & Lomb (USA), le Seavom d'Argenteuil, S. & O., France, etc.

 Filtres polarisateurs. Ils peuvent servir pour les observations en radiation polarisée ou comme atténuateurs de lumière. Ils peuvent être constitués par un jeu de prismes biréfringents ou par des feuilles en plastique contenants des microcristaux ou molécules vivement dichroïques. Ces feuilles en plastique ("Polaroid") sont en général protégées avec des lames en verre, elles sont économiques et très diffuses (voir aussi le § 30.7).

Un polarisateur à prisme comme celui de **Nicol**[161] ou un bon Polaroid se conduit, à part l'effet polarisant, comme un filtre gris avec T = 40 % environ; deux "Nicol" en série avec les directions principales parallèles ont T = 30%; si cependant les directions ne sont pas parallèles, la T peut descendre à des valeurs très basses selon le cosinus de l'angle entre les deux directions[162]. Deux polarisateurs dont on puisse changer l'orientation réciproque peuvent donner ainsi un filtre gris variable avec une T maximal de 30 %.

Les Polaroid sont sensibles à la chaleur de la source et il faut les protéger avec un filtre calorifuge.

23.2 – La FONCTIONS des FILTRES

 Filtres passe-haut et passe-bas

Il s'agit de filtres "à coupe nette", c'est-à-dire avec un passage plus brusque possible entre deux bandes de transmission maximum et minimum possible. La somme de ces deux régions doit occuper au moins le spectre optique. Dans un filtre passe-haut la région de meilleure transmission se trouve à plus petite λ, c'est-à-dire à plus grande fréquence de l'autre; vice versa pour le passe-

[160] Comme règle pratique simplifiée, on peut dire que, pour un angle d'incidence de 45°, la longueur d'onde de meilleure transmission diminue d'environ 10%.

[161] William NICOL (1768 - 1851), physicien écossais.

[162] En nous rapportant au § 2.2.1 et à la fig. 2, le cosinus de l'angle α est donné par: c_1 / i .

bas. Les meilleurs passe-haut sont interférentiels; les meilleurs passe-bas sont en verre ou mixtes.

Tels filtres sont définis par la position du "**gradin**" de transmission, et précisément par la valeur de λ pour laquelle T est égal à une valeur «seuil» (par ex. 5, 10, 37 % ou autres valeurs). Il faut définir aussi la "**pente**" du gradin comme différence de λ entre les points de la courbe pour lesquels T = 5% et 70% (ou autres valeurs arbitraires). On défini même l'"**extension**" en longueur d'onde des régions transmise et supprimée.

 Filtres passe- bande

Une bande de transmission maximum confine ici avec deux bandes de transmission minimum ou "**supprimée**." On peut avoir aussi le contraire. La position de la bande transmise, ou supprimée, est définie comme λ "moyenne" (centre de la bande); la "**largeur de bande**" comme différence entre les longueurs d'onde extrêmes pour lesquelles T devient la moitié du maximum ("**largeur à moitié hauteur**"[163]). La λ "moyenne" alors est la moyenne arithmétique entre les deux longueurs d'onde extrêmes. On définit la pente des flancs de la courbe, en plus de la "largeur à moitié hauteur", comme "largeur de base", c'est-à-dire différence entre les longueurs d'onde pour lesquelles T est égal à 5 % du maximum.

On doit en plus définir la valeur maximum de T et l'étendue des bandes supprimées ou "de rejet" (régions de moindre transmission) pour lesquelles T est plus petite de 1 %.

S'il y a une bande supprimée entre deux bandes transmises, la largeur de bande se mesure pour T = 37% et on définit la transmission minimum de la bande supprimée.

Les meilleurs filtres passe-bande sont mixtes. Des filtres à bande étroite (de 5 à 100 nm) existent seulement du type interférentiel ou mixte, et la position de la bande varie beaucoup avec l'incidence (voir le tableau VI). Sont interférentiels purs les filtres à plusieurs bandes étroites (polychromes). Les filtres en verre à bande large sont mauvais; sont meilleurs les mixtes.

Sont des filtres à bande large les calorifuges en verre (les "KG" de Schott, par ex.) et mixtes ("Calflex" de Balzers, par ex.). Verres à bande supprimée sont les "didymes" (verres au néodyme et praséodyme) qui atténuent fortement le vert, et ils apparaissent de couleur rose (par ex. BG 36 de Schott, ON 16 de Chance).

 Filtres de compensation

Dans ces filtres il y a un passage lent et graduel entre une région spectrale de grande T et une de T plus petite. Il n'y a pas ni gradin net ni bande supprimée. La courbe a une petite pente. Ces caractéristiques ne s'obtiennent pas des filtres interférentiels, mais seulement de ceux en gelatine et en verre comme les FG (Farbtonglas) de Schott et les "Color Compensating" Wratten de Kodak. Un filtre de compensation dans la région optique altère toujours le rapport entre "bleu" et "rouge", donc la température de couleur ou TC (voir le § 22.6). Si T' et T" sont les TC avant et après le filtre, son effet (T" – T') s'exprime avec la valeur "**Mired**" ("Micro reciprocal degree" ou "degré inverse millionième") ou avec le "**Decamired**" (DM) qui est égal à 10 Mired:

$$\text{Mired} = (1/T' - 1/T'') \cdot 10^6 \tag{87}$$

Un filtre qui réduise le rouge plus que le bleu apparaît bleu et la TC augmente; alors T" est plus grande de T' et le Mired est négatif. Dans le cas contraire le filtre apparaît rose-ambré et la TC baisse: le Mired est positif; le signe de la valeur Mired indique si la TC descend ou monte. Le Mired d'une série de filtres est égal à la somme des Mired singuliérs, compte tenu du signe.

On utilise la valeur Mired aussi pour indiquer la TC d'une source:

$$\text{Mired}_{\text{source}} = 10^6/\text{TC} \tag{88}$$

Par ex., une source au tungstène à 2.900 °K a un Mired de 345; en ajoutant un filtre bleu avec un Mired = - 33 on a une radiation avec un Mired = 345 - 33 = 312 et TC = 3.200 °K, convenable pour les pellicules pour lumière artificielle, type B. Le ciel, avec une TC = 5.500 a un Mired = 182.

Le Mired d'une radiation est donc la somme algébrique des Mired de la source et des filtres

[163] On indique souvent cette grandeur avec FWHM (Full Width at Half Maximum), ou avec HPBW (Half Power Bandwidth).

interposés.

Pour utiliser une pellicule “daylight” avec une source à incandescence (TC = 3.200 – 3.400 °K), il faut un filtre de compensation avec un Mired = - 120 environ (- 12 DM). Tels filtres sont souvent indiqués justement avec le paraphe B 12.

La densité D d’un filtre de compensation est calculée en base à la valeur moyenne de T, et en général elle ne dépasse pas 0,5 (la T moyenne est plus grande de 32%).

Sont de compensation les filtres “de balancement” et “color compensating” qu’en photographie corrigent la TC de la source pour l’adapter à la sensibilité de l’émulsion, y compris les “skylight”.

 Filtres gris ou neutres (voir le § 23)

Ils sont définis par la valeur moyenne de transmission ou densité, par les limites de la bande dans laquelle ils sont neutres et par la différence entre la T maximum et minimum dans cette bande. Les types interférentiels n’absorbent pas et ils ne se chauffent pas, mais ils sont chers; sont plus économiques ceux en verre ou à dépôt métallique.

 Filtres diffuseurs

La radiation transmise est principalement diffuse, indépendamment de l’ouverture et de l’incidence du faisceau incident. Le diffuseur parfait (“de Lambert”[164]) est celui qui possède la même luminance B dans toutes les directions mais pas le même rayonnement: pour les directions qui forment un angle **α** avec la normale, B est constante seulement si l’énergie émise pour chaque cm^2 est égale à $\mathbf{I_o \cos \alpha}$ dans laquelle $\mathbf{I_o}$ est l’énergie émise selon la normale. Le rayonnement change donc suivant $\cos \alpha$.

Les diffuseurs “opale” ont une transmission totale inférieure à 50%, c’est-à-dire une forte absorption, mais ils se conduisent presque comme diffuseurs de Lambert. Étant donné que l’énergie est répandue dans toutes les directions, si un filtre opale est éclairé avec un faisceau collimé, il augmente l’ouverture de ce faisceau par rapport à celui transmis et la luminance diminue; en pratique, un filtre opale introduit entre collecteur et condensateur peut baisser l’éclairage dans l’image finale de 100 - 500 fois.

Le verre dépoli a un rendement beaucoup plus grand étant donné qu’il a une T totale d’environ 75%, mais aussi parce qu’il est partiellement directionnel, au sens que le faisceau diffus est relativement étroit. Malheureusement, en certains cas le “grain” du verre dépoli peut nuire. Un bon verre opale n’a pas de grain.

23.3 – Les FILTRES en MICROSCOPIE GÉNÉRALE

 Filtres “diurnes” ou “à lumière solaire”

Il s’agit de filtres de compensation qui élèvent la température de couleur TC d’une source d’un millier de °K; dans l’observation visuelle ils donnent à une source au tungstène une couleur plus agréable, moins jaunâtre, et on peut les tenir constamment dans le condensateur; la transmission est de l’ordre de 70 %. En photographie aux couleurs ils ne sont pas utiles, étant donné que l’élévation de TC qu’ils opèrent est trop petite et, avec les lampes à incandescence («tungsten» ou «indoor»), elle ne correspond pas à celle demandée par les émulsions normales pour «lumière du jour». Ils sont appelés parfois «skylight» (= lumière du ciel).

 Filtres neutres ou gris

Avec un petit agrandissement total en champ clair, un bon illuminateur de Köhler éblouit l’œil et ils sont nécessaires des réducteurs de luminance sous forme de filtres neutres. Baisser la tension d’alimentation de la source à incandescence, où possible, baisse beaucoup la TC. Fermer le diaphragme d’ouverture ou baisser le condensateur, comme il a été expliqué, est très irrationnel. La seule intervention correcte est basée sur les filtres gris.

---

[164] Johann Heinrich LAMBERT, mathématicien, physicien et philosophe allemand (1728 – 1777), déjà cité dans la note 159.

 Filtres verts

Les objectifs achromatiques sont corrigés de l'aberration sphérique seulement pour une longueur d'onde dans la région du vert; leur focale coïncide pour le "bleu" et le "rouge", mais elle est plus petite pour le vert et maximal pour le violet. Un objet foncé en lumière blanche apparaît donc bordé de violet (image défocalisée à courte λ), ou de vert (image défocalisée à λ intermédiaire) ou de pourpre (rouge et violet donnent un résidu de sphérique). En photographie, le halo violet est nuisible pour la grande sensibilité des pellicules (même de celles en B-N) au violet. Tout ceci se réduit avec un filtre passe-bande vert, si possible du type mixte (qui a une courbe aux flancs plus raides). On améliore ainsi la définition de l'objectif, naturellement en renonçant aux couleurs.

Le filtre vert est inutile avec les systèmes les plus corrigés. Il est par contre utile en contraste de phase pour diminuer les effets de la dispersion de l'anneau de phase et augmenter le contraste.

Le filtre vert empêche la reconnaissance des couleurs et il n'est pas utilisable dans la photographie aux couleurs.

 Filtres bleus

Comme nous a dit la (52) dans le § 18.3, l'usage de radiations à courte longueur d'onde augmente la résolution d'un objectif: en effet, baisser la λ c'est comme augmenter les dimensions de l'objet. Nos yeux cependant sont peu sensibles dans cette région spectrale et les filtres bleu-violets sont utilisables seulement pour la photographie en blanc et noir. En plus ils ne sont pas conseillables avec les objectifs achromatiques, étant donnée la correction insuffisante de ces systèmes aux extrêmes du spectre optique.

 Filtres calorifuges

Ils sont des passe-bande à bande large qui transmettent presque tout le "visible" et ils suppriment les plus possibles l'UV et l'IR. Il y en a d'excellents en verre comme le KG1 de Schott, mais ils se réchauffent et ils rayonnent à leur tour de la chaleur, qui doit être arrêtée avec un second filtre du même type. Les types interférentiels se réchauffent beaucoup moins et ils ont une bande aux flancs plus raides, mais la transmission moyenne peut être inférieure. La transmission est de toute façon d'au moins 50 % (facteur de filtre: 1,6 ×). L'absorption dans les types en verre est en général un peu plus grande dans le rouge, pour lequel la couleur est vert-bleue et on a une élévation du TC de 50-100°K.

En fluorescence, les filtres calorifuges absorbent beaucoup d'UV, mais ils n'endommagent pas trop quand on excite la fluorescence avec des radiations dans le spectre optique, et de toute façon on ne peut pas en faire à moins à cause de l'haute dissipation des sources et de la forte absorption IR des filtres d'excitation, qui tendent à se casser.

On rappelle que beaucoup d'instruments, surtout de vieille date, utilisent pour le collage des lentilles le Baume du Canada, qui est une résine naturelle qui ramollit à chaud; les bonds de température de toute façon ne conviennent pas aux lentilles collées. Par suite un ou deux filtres calorifuges peuvent être laissé d'une manière stable dans le système éclairant.

Même beaucoup de filtres colorés absorbent l'IR, ils tendent à se réchauffer et il est bien les protéger avec un calorifuge si la source dissipe plus de 20 W.

L'UV, au-delà à décolorer la préparation et tuer les micro-organismes vivants éventuels, est nuisible aux yeux: avec les sources à arc il est nécessaire, au-delà du calorifuge, un filtre spécifique anti-UV, naturellement mis au devant de l'objet. Quand on utilise la technique de la fluorescence, un filtre anti-UV peut être constitué par le "filtre d'arrêt", mais il est mis dans ce cas après l'objet et il protège seulement les yeux. Un éventuel filtre anti-UV devant l'objet doit être enlevé en fluorescence.

 Diffuseurs

Dans un illuminateur de Köhler on peut mettre entre collecteur et condensateur un ou plus diffuseurs, avec perte d'éclairage et de contraste (lumière diffuse); ils sont moins nuisibles s'ils se trouvent entre corps lumineux et collecteur, pour les raisons déjà illustrées dans le § 22.2.4. On les utilise seulement si aucun autre moyen est possible pour rendre plus uniforme l'éclairage du champ; aux bas agrandissements, il vaut mieux augmenter la focale du condensateur ou l'enlever du tout.

 Filtres de contraste

Un objet coloré faiblement, sur fond clair, apparaît plus contrasté s'il est éclairé avec une radiation de couleur complémentaire à la sienne; en effet il absorbe principalement les radiations de couleur complémentaire. En photographie, cette astuce est précieuse (blanc et noir). Vice versa un objet coloré apparaît bien moins contrasté s'il est éclairé avec une radiation de la même couleur. Cette règle est très utile dans l'examen de préparations décolorées ou surcolorées et en cas spéciaux, comme la cuticule des Insectes, qui devient transparente en radiation "rouge" ou IR.

Si l'objet est coloré avec différentes couleurs ou avec des couleurs pas pures, la règle sur citée est d'application difficile; on procède par tentatives, peut-être en utilisant des filtres polychromes. En cas spéciaux (frottis de sang ou de cellules) l'objet est coloré souvent avec deux couleurs aux extrêmes du spectre optique, rouge-roses pour l'éosine, violets pour l'hématoxyline, et l'application de la règle du contraste demanderait un éclairage avec radiation mixte "violette" et "rouge"; ceci est possible avec un filtre didyme (§ 23.2) qui a la transmission maximale pour les extrêmes du spectre et il absorbe le jaune-vert, c'est-à-dire la région spectrale qui est inutile aux buts du contraste. Filtres interférentiels didymes existent avec des courbes plus nettes de ceux en verre, et sont appelés "dichromatiques".

Aussi les filtres polychromes à bandes étroites ou larges, c'est-à-dire interférentiels ou en verre, peuvent être utiles pour améliorer le contraste et on rappelle que les interférentiels peuvent être inclinés en obtenant en général un déplacement de toutes les bandes vers le violet. Les filtres polychromes peuvent être utiles aussi pour améliorer le rendement des couleurs d'une caméra de télévision ou aussi d'une photo aux couleurs, mais il faudra procéder par tentatives étant donné que le résultat dépend de l'objet, de la sensibilité spectrale du détecteur et du spectre d'émission de la source.

24 – Les TUBES PORTE-OCULAIRES

Dans les microscopes de vieille fabrication, et encore aujourd'hui dans les modèles économiques, on peut voir une structure comme celle de la fig. 96 dans laquelle l'oculaire est inséré par le haut dans un véritable **tube porte-oculaire**, cylindrique, droit, en ligne droite avec l'objectif (T dans la figure). Entre le tube T et l'objectif il y a le revolver R et le "**corps**" C. Les parties T et C déterminent le centrage réciproque et la distance entre objectif et oculaire. Le corps C peut être beaucoup plus court que le tube T; ce qui a de l'importance est la somme de leurs longueurs, étant donné que, en ajoutant l'épaisseur du revolver R, elles déterminent la "**longueur mécanique** du tube" ou **Lm** (voir le § 10).

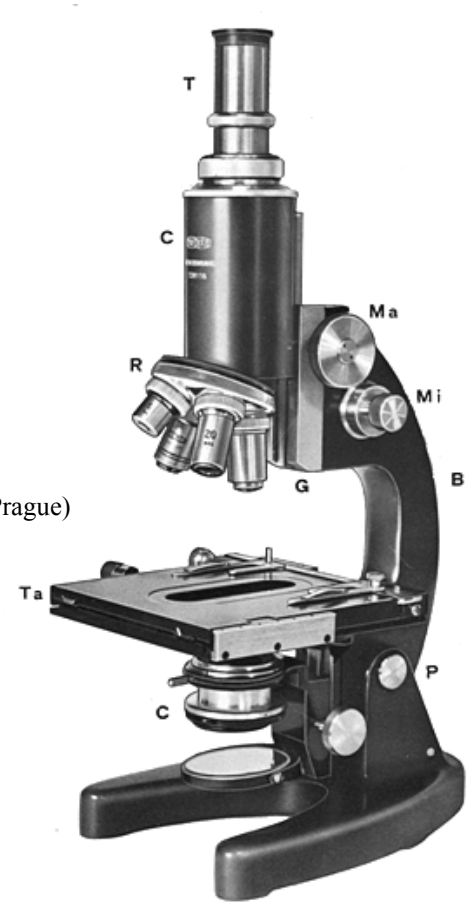


Fig. 96 (d'un Catalogue Meopta, Prague)

Un tel "**tube monoculaire droit**" a l'avantage de ne pas demander aucun élément optique accessoire entre objectif et oculaire, en éliminant la radiation diffuse par réflexion sur les surfaces en verre de ces éléments, cause de perte de contraste. Il est en outre très économique. Par contre il a un grave défaut: l'oculaire est vertical et il demande une inclinaison forte de la tête qui peut provoquer une fatigue précoce. Pour obvier à ça, beaucoup de constructeurs, comme dans le cas de la fig. 96, rendent le "**bras**" (B dans la fig. 96) inclinable avec la platine **Ta** et le condensateur **C** au moyen du pivot **P**. Le tube entier s'incline ainsi à volonté dans la position la plus confortable. On peut comparer l'instrument de la fig. 96 avec celui de la figure à la page 2.

Mais un autre inconvénient survient ici: même la platine s'incline et la préparation peut ainsi glisser et les liquides éventuels (préparation de micro-cultures, huile d'immersion, etc.) coulent. Pour avoir la platine horizontale et l'oculaire incliné on recourt aux "**tube monoculaires inclinés**" ou "**à coude**" comme celui de la fig. 97. Dans ce cas il y a un prisme comme celui de la fig. 34 / B (au § 11) qui incline l'axe optique sans produire des pertes considérables de la qualité de l'image. Le prisme provoque évidemment un "avancement" de l'image (voir le § 3.2), mais de cela on tient compte en manière que la longueur "équivalente" du tube (Lm), celle qui a valeur du point de vue des conjuguées de l'objectif, reste la même prévue par le projet de l'objectif même. On a vu dans les §§ 13.2.3.1 et 19.1.2 quelles sont les conséquences d'une altération de la longueur du tube.

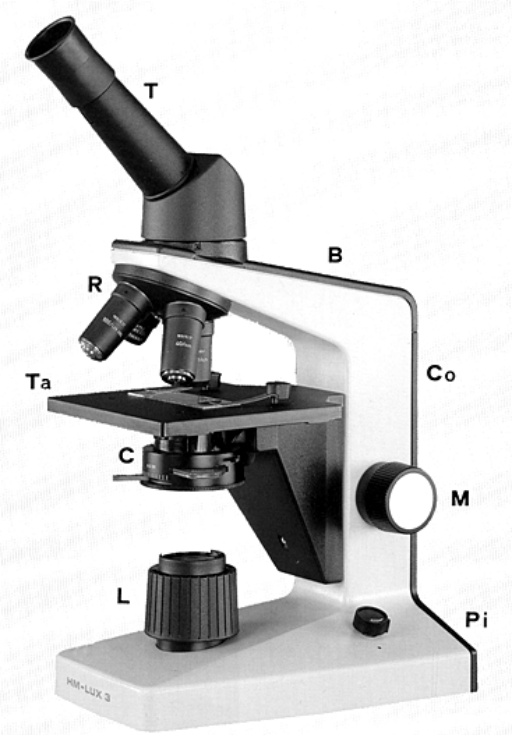


Fig. 97 – (d'un catalogue LEICA, Mod. HM LUX 3)

On remarque aussi que le prisme de la fig. 34-B contient deux surfaces réfléchissantes: la double réflexion fait oui que l'image finale résulte orientée comme elle serait en absence du prisme. Une surface seule renverserait l'image dans le sens haut-bas mais pas en sens droite-gauche: pour cela on évite de mettre à cette place un miroir simple.

L'inclinaison du tube à coude n'est pas standardisée: même dans les différents modèles du même constructeur on peut trouver des fortes différences; l'angle entre l'axe du tube et l'horizontal peut être 45°, 35°, 30°, 25° jusqu'à 15°. La valeur de cet angle est importante quand on fixe au tube certains accessoires qui font référence au plan de la table: chambres claires, tube pour dessin, etc. Et en outre c'est un problème de commodité à cause de la position de la tête[165].

En général le tube à coude est tournant (peut-être en desserrant une vis) autour de l'axe vertical de l'objectif. Ceci facilite l'observation à deux ou plus personnes assises autour de l'instrument.

Dans un statif comme celui de la fig. 97, le tube à coude, dans le cas d'un observateur unique, peut être tourné de la part du bras B ou de la part opposée (comme dans la figure). Cette dernière disposition facilite la visibilité de la platine et de l'objet mais déplace le barycentre plus loin de la colonne verticale **Co**. On peut dire la même chose des tubes bioculaires, qui sont beaucoup plus lourds.

Un tube monoculaire, droit ou incliné, est en général interchangeable avec les autres types sous décrit, bi - ou trio-oculaires. Le mécanisme de fixation peut être à vis ou "à queue d'aronde circulaire": ce dernier se compose à la base du tube d'un encastrement rond, avec bord proéminent, qu'en section apparaît comme un trapèze ("**queue d'aronde**"). Tel encastrement s'appuie sur trois pointes au bout du bras dont une sera extractible, et peut-être à ressort, pour permettre la substitution du tube. Les autres deux pointes sont fixes et elles déterminent le centrage du tube. Le blocage à trois pointes est rapide, stable et robuste, et en outre il élimine du tout les jeux étant donné qu'il rentre dans la catégorie des fixages "cinématiques".

Parfois les tubes monoculaires sont "télescopiques", c'est à dire à longueur variable, en tant qu'ils sont constitués par deux parties de différent diamètre qui rentrent l'une dans l'autre, comme dans une longue-vue. Ils sont utiles au moins en deux cas: •• correction d'un résidu d'aberration sphérique dans l'objectif, peut-être dû à l'épaisseur erronée de la lamelle (voir le § 13.2.3.3); •• variation de l'agrandissement de façon à arrondir l'**équivalent micrométrique** de l'objectif (voir les §§ 12.1 et 12.3). Naturellement, on sait que la variation de Lm a quelque conséquence (§§ 13.2.3.1 et 19.1.2).

Une échelle spéciale permet de régler les tubes télescopiques à la valeur voulue de longueur (longueur total Lm), qui peut changer toujours de quelques centimètres par ex. de 15 à 19 cm. Il faut vérifier toujours la fidélité de telle échelle qui, surtout dans les instruments de vieille date, peut ne pas correspondre à la valeur réelle de Lm.

Et encore, les tubes droits verticaux sont presque obligatoires quand on utilise une microcaméra du type à appliquer sur l'oculaire, fixée au tube porte-oculaires. Telle microcaméra a toujours un poids considérable et elle doit se trouver sur l'axe de l'objectif, comme on peut faire justement avec un tube vertical. Par contre, si on l'appliquait sur un tube incliné, son poids ferait levier sur l'attelage du tube et il léserait la stabilité et la robustesse de l'instrument.

24.1 – Les TUBES BI-OCULAIRES

On remarque tout de suite la graphie "**bi-oculaires**", qui indique les tubes avec deux oculaires qui reçoivent la même image, distinguée de "**binoculaires**", qui indique les tubes faits comme une jumelle, avec deux oculaires et deux objectifs, qui produisent deux images distinctes. Les tubes binoculaires sont utilisés dans les microscopes stéréoscopiques pour donner la vision stéréoscopique, c'est-à-dire la sensation du relief, et nous en parlerons dans le § 29.

[165] Quelques instruments sophistiqués possèdent des tubes "ergonomiques" à inclinaison variable mais, même en leur absence, beaucoup de problèmes se résolvent avec une chaise à hauteur réglable.

Dans les microscopes normaux on utilise par contre des tubes bioculaires, construits selon le schéma de la fig. 98. Nous examinons la figure suivante.

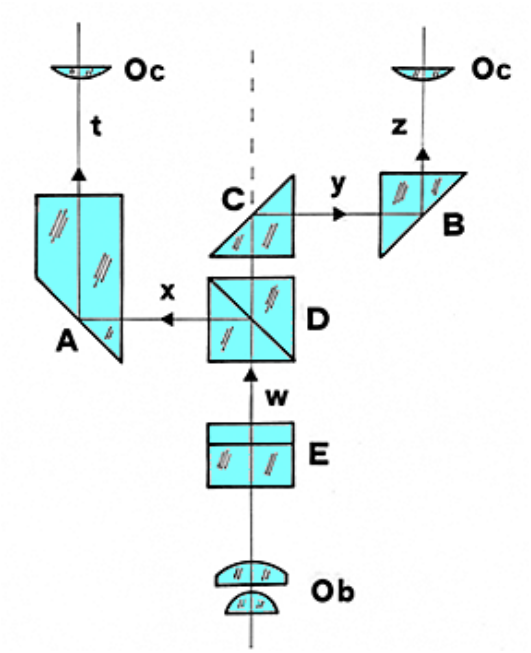


Fig. 98

Le faisceau W, provenant de l'objectif Ob, peut éventuellement traverser un prisme E qui incline l'axe optique comme dans les tubes monoculaires à coude (voir plus haut); le prisme E fonctionne en général avec le principe du prisme à deux réflexions internes, comme celui représenté dans la fig. 34 - B. Il peut être absent[166], étant donné que la fonction d'incliner l'axe optique peut être déroulée par un autre organe présent dans un tube intermédiaire (voir plus loin).

Eh bien, le faisceau W est celui qui émerge de l'objectif - ou de la lentille de tube pour les objectifs à conjuguée infinie - et qui converge dans l'image intermédiaire.

En traversant le prisme D, le faisceau W est divisé en deux parties identiques par la surface semi-réfléchissante diagonalement disposée dans le prisme, inclinée à 45° sur les faces du prisme même. Le prisme D est décrit dans le § 11 (fig. 34-C).

La surface semi-réfléchissante est optiquement plane et elle ne doit pas altérer la structure géométrique de l'image réfléchie ou transmise; les deux images partielles obtenues (faisceaux **x** et **y**) peuvent être photométriquement égales si les coefficients de réflexion et de transmission du prisme sont égaux.

À ce moment, avec des autres prismes à réflexion interne (A, B et C), du type du prisme de la fig. 34-A, on reporte les faisceaux partiels **x** et **y** à être parallèles (voir les faisceaux **t** et **z** dans la fig. 98). Au dessus des prismes A et B se forment les deux images intermédiaires et se trouvent les oculaires (Oc). Tout se déroule comme si chacun des deux oculaires, à part la perte photométrique, reçussent de l'objectif le faisceau W directe, avec en plus l'épaisseur en verre des prismes D + A ou D + C + B. Telle épaisseur, à part les pertes par absorption ou par réflexion (au moins 4 % pour chaque surface, beaucoup moins pour les surfaces "traitées" contre les reflets), provoque l'apparition de différentes aberrations, surtouts chromatiques. Le constructeur peut tenir compte de ça dans le projet de l'objectif ou du système entier, mais il est évident qu'un accouplement objectif-oculaire peut être optimisé (du point de vue des aberrations) pour l'usage avec la série des prismes du tube bioculaire ou en absence des prismes (tube droit monoculaire), mais il ne peut pas être optimisé pour toutes les différentes situations. En pratique, le contrôle d'un objectif + oculaire, surtout pour la chromatique latérale, doit être fait avec tous les tubes prévus pour cet instrument, et entre l'un et l'autre on remarquera quelque petite différence.

24.1.1 - Correction dioptrique et parfocalité

Dans la fig. 98 sont schématisés les deux oculaires (Oc) centrés sur les axes optiques partiels **t** et **z**. Les deux oculaires doivent être enfilés dans deux tubes (ou "embouts") porte-oculaires parallèles[167] (voir la fig. 99 dans le § 24.1.3).

---

[166] Voir la figure 100.

[167] Certains constructeurs rendent les axes des deux oculaires légèrement convergents pour accorder une légère convergence aux yeux de l'observateur, mais ceci stimule la manifestation de l'"effet du tube" (voir le § 4.2 et ce qui suit ici).

Maintenant, les deux images doivent être identiques et simultanément au point: pour avoir cela doivent se vérifier quelques conditions. Avant tout, les épaisseurs en verre traversés par les deux faisceaux partiels (**x - t** et **y - z** dans la fig. 98) doivent être identiques, et ainsi l'index et la dispersion du verre; en deuxième lieu, les deux tubes porte-oculaires doivent porter les oculaires à la même distance de l'image intermédiaire, c'est-à-dire les deux canaux doivent être parfocales entre eux (c'est-à-dire la longueur équivalente du tube **Lm** doit être la même pour les deux oculaires). Naturellement, la parfocalité suppose aussi que les deux oculaires soient identiques: égal agrandissement V, égal index de champ **s'**, et surtout égale distance entre la battée (voir les §§ 10 et 20.4) et le premier foyer. Dans le § 20.5 on a parlé en détail de l'équivalence des oculaires.

Normalement, même dans les tubes bioculaires, les choses sont faites de manière que, avec focalisation correcte, l'image ou les images finales soient «à l'infini»; l'observation est ainsi possible sans que l'observateur doive "accommoder" et forcer l'œil. Mais une complication naît ici: pour beaucoup de personnes il y a une différence de puissance "sphérique" (sphérique, en excluant donc l'astigmatisme) entre les deux yeux, c'est-à-dire une "**anisometropie sphérique**"; pour voir net avec les deux yeux, telle personne devrait mettre au point séparément les deux chemins du tube bioculaire. En pratique, cela est rendu possible en rendant réglable la longueur d'un ou des deux tubes porte-oculaires au moyen d'une bague à laquelle correspond une vis dans la surface interne des tubes.

Nous considérons le cas dans lequel un seul des deux tubes porte-oculaires soit réglable. On met au point le canal à tube fixe avec les normaux mécanismes de mise au point, peut-être en fermant l'autre œil. Cela fait, on regarde dans l'autre canal à tube réglable et, sans altérer la mise au point, on tâche de récupérer l'image le plus possible nette en réglant la bague qui change la longueur du tube. Dans cette régulation, on rappelle tout ce qu'on a dit dans le § 12.1 à propos de la régulation des oculaires micrométriques: pour éviter de faire intervenir l'accommodation de l'œil, il convient partir de la position "tout dehors", c'est-à-dire tout extrait, de l'oculaire.

Si par contre tous les deux tubes porte-oculaires sont réglables, il convient en tenir un fixe dans la position "0" et régler l'autre comme on a dit.

La position "0" ou "de repos" est toujours indiquée, au moins avec un trait ou un point, sur la bague de régulation de l'oculaire. Elle devrait correspondre à la distance idéale entre objectif et oculaire, celle prévue par le projet. Mais il est toujours opportun de vérifier l'exactitude de cette position[168]: on mette au point un préparation mince (un frottis, un réseau, un micromètre objet); puis on tourne rapidement le revolver pour vérifier la focalisation avec les différents objectifs, en particulier avec le plus faible et avec le plus fort[169]; on tourne la bague de l'oculaire en la mettant en différentes positions, et on répète chaque fois la substitution des objectifs, jusqu'à obtenir la meilleure parfocalité des objectifs (voir le § 19.1.2). Celle-là est la position optimale. Si on ne réussit pas à obtenir la parfocalité entre les différents objectifs, cela signifie que cette possibilité n'a pas été prévue dans le projet de l'instrument.

En plus de la position de "0", la bague porte souvent une graduation avec quelque encoche et quelquefois des numéros. Cette graduation est utile seulement comme référence quand on doit retrouver la position optimale pour un certain observateur, mais elle n'a pas une valeur absolue: l'effet de la rotation de la bague (le déplacement de l'image finale) diffère en fonction de la focale de l'oculaire (voir la note 128 dans le § 20.10, pag. 212).

24.1.2 – L'"effet du tube" et la convergence

Dans le § 4.2 est expliqué ce phénomène psychologique nommé "effet du tube" pour lequel un

---

[168] La bague de régulation est en général fixée avec trois petits "grains" (vis sans tête) et elle peut ensuite se desserrer et tourner en position erronée sans que l'opérateur s'en aperçoive; c'est sur la bague qu'on fait force pour tourner le tube porte-oculaires réglable.

[169] On utilise les plus forts à sec pour éviter l'embarras de l'immersion et le risque de salir d'huile les autres objectifs forts.

observateur mal préparé, pendant qu'il rapproche l'œil de l'oculaire, il "accommode", c'est-à-dire il force l'œil à focaliser sur l'intérieur du tube plutôt que sur une distance infinie; de cette manière, même l'image finale du microscope viendra rapprochée à une petite distance plutôt qu'à l'infini, et pour obtenir ce résultat ça suffit une retouche aux boutons de mise au point.

Ainsi, au-delà à fatiguer l'œil inutilement, on altère les conjuguées de l'objectif avec les conséquences bien connues.

L'effet du tube se présente aussi avec les tubes bioculaires avec les mêmes effets, de plus avec le risque que l'accommodation ne soit pas la même pour les deux yeux et ainsi surgisse une anisometropie temporaire. Mais il y a une complication: quand nous observons à l'œil nu un objet rapproché, inconsciemment nous exécutons deux opérations différentes:

•• nous utilisons l'accommodation, c'est-à-dire nous altérons la courbure de la lentille cristalline des yeux de façon à rapprocher le plan de la vision distincte;

•• nous convergeons, c'est-à-dire nous déplaçons les axes des deux yeux l'un vers l'autre de manière qu'ils se croisent dans le même point de l'objet rapproché. En état de repos, nos yeux, s'ils sont normaux, sont focalisés pour un objet à distance infinie et les deux axes sont parallèles.

Eh bien, **accommodation** et **convergence** sont des phénomènes automatiques et reliés entre eux. Cela signifie que, dès qu'il se vérifie l'effet du tube, l'accommodation involontaire traîne avec soi la convergence, et les axes des deux yeux ne sont pas plus parallèles. Mais les axes des oculaires dans un tube bioculaire sont parallèles[170] (justement pour permettre l'observation avec les yeux détendus, ne pas accommodés). Alors les axes des yeux ne sont plus parallèles à l'axe des oculaires correspondants et les images rétiniennes ne sont plus congruentes: en mots pauvres, "on voit double". Ceci peut être la cause de fatigue et maux de tête.

24.1.3 – La distance inter-pupillaire

La distance entre les axes des deux yeux, supposé qu'ils soient parallèles, comme il doit arriver au microscope, s'appelle "**distance interpupillaire**" ou, simplement, "**distance pupillaire**"; elle peut changer, grosso modo, de 55 à 75 mm.

Ainsi dans les tubes bioculaires il doit exister un mécanisme pour changer la distance entre les axes des oculaires et la faire coïncider avec la distance pupillaire de l'observateur. Nous faisons encore référence à la fig. 98 (§ 24.1): pour changer la distance entre les axes finals **t** et **z** il y a essentiellement deux manières.

1) Déplacer chaque oculaire avec le prisme, respectivement, A et B dans le plan du dessin, c'est-à-dire dans la direction des axes **x** et **y** ; naturellement ce mouvement doit se vérifier symétriquement par rapport à l'axe centrale W de manière que les chemins optiques des deux canaux restent identiques. Le mouvement du groupe oculaire + prisme arrive pour chacun des deux canaux au moyen d'une glissière à "queue d'aronde" et les deux glissières peuvent être commandées à la main ou par un bouton centrale ou un levier, avec un mouvement symétrique (un mécanisme opportun rend solidaire les deux mouvements). Sur les glissières ou sur le bouton il peut y avoir une échelle graduée de 55 à 75 mm, laquelle indique la distance pupillaire établie. C'est celle-ci la solution de la fig. 99 qui permet de coller entre eux les prismes C et D de la fig. 98.

Mais il y a un problème: pendant le mouvement des glissières change aussi la longueur des trajets partiels **x** et **y** et par suite la distance objectif-oculaire, avec toutes les conséquences plusieurs fois citées entre lesquelles une variation de la "valeur micrométrique" utilisée dans les mesures géométriques (voir le § 12.3). Pour obvier à ceci, quelques constructeurs (vieille production Zeiss, par ex.) rendent réglables les deux tubes porte-oculaires et sur les bagues correspondantes ils gravent une échelle numérotée de 55 à 75: la valeur établie de distance pupillaire est reportée sur les deux bagues et avec ceci la variation de longueur des chemins **x** et **y** est compensée par le déplacement axial des oculaires: la longueur équivalente du tube reste ainsi celle idéale. Si cette

[170] Nous avons déjà fait remarquer que quelque instrument du passé a été construit avec des oculaires légèrement convergents (Galileo, Spencer, etc.), mais cette solution n'est pas "physiologique" et elle a été abandonnée.

compensation n'est pas exécutée avec soin, on a une autre cause de variation de l'agrandissement et de la "valeur micrométrique", et par suite une autre cause de faute dans les mesures.

En effet, ce mécanisme de compensation en pratique ne marche pas: la distance pupillaire doit être changée chaque fois que change l'observateur, et personne n'a ni le temps ni l'attention de lire la valeur de distance sur l'échelle spéciale, la reporter sur un oculaire, puis sur l'autre et reprendre le travail. En pratique, les bagues des oculaires sont laissées dans une position quelconque, difficilement celle correcte, et souvent différente pour les deux oculaires. Un désastre. Au moins un des tubes porte-oculaires devrait être fixe pour servir de référence à l'autre.

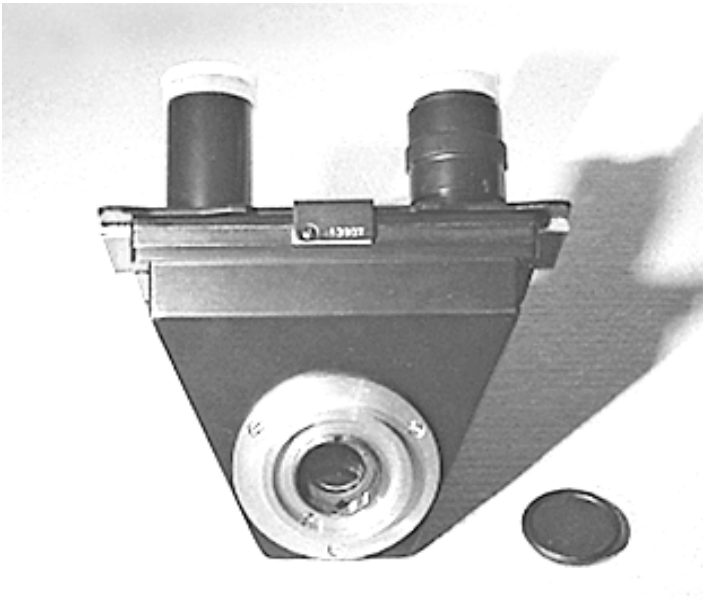


Fig. 99 (de: photo originale de produit PZO, Varsovie). Tube à glissières.

Une meilleure solution consiste à relier les deux glissières porte-oculaires à un mécanisme qui leur fait exécuter un mouvement à 45° par rapport à l'axe W (toujours dans le plan du dessin de la fig. 98) de manière que, dès qu'on change la distance pupillaire, change automatiquement la hauteur des oculaires, des deux, et les deux mouvements se compensent (Leitz). Cette solution est plus chère que la précédente, et le tube résulte plus lourd et encombrant.

En chaque cas, le mouvement des prismes dans le plan du dessin de la fig. 98 a un avantage: pendant la variation de la distance pupillaire les oculaires ne tournent pas autour de leur axe, ni autour du centre de l'image; ceci est précieux quand l'oculaire contient un réseau ou une silhouette de genre différent (voir plus loin).

2) La distance pupillaire peut changer d'une autre manière (fig. 100).

Le système optique du tube (fig. 98), peut se diviser en deux parties: le prisme A est solidaire avec celui D et roue autour d'un un axe coïncident avec W; le prisme B est solidaire avec C (peut-être il s'agit d'un prisme unique) et il tourne sur le même axe W. Alors les deux moitiés du tube tournent par rapport à la base du même tube, qui peut contenir le prisme E. Normalement, les deux moitiés du tube restent repliées l'une sur l'autre, comme dans la fig. 100, et en changeant leur inclinaison peut changer la distance pupillaire (distance entre les axes **t** et **z** de la fig. 98) dans la mesure indiquée plus haut. De cette manière, le tube ressemble à une jumelle, à part le manque des deux objectifs.

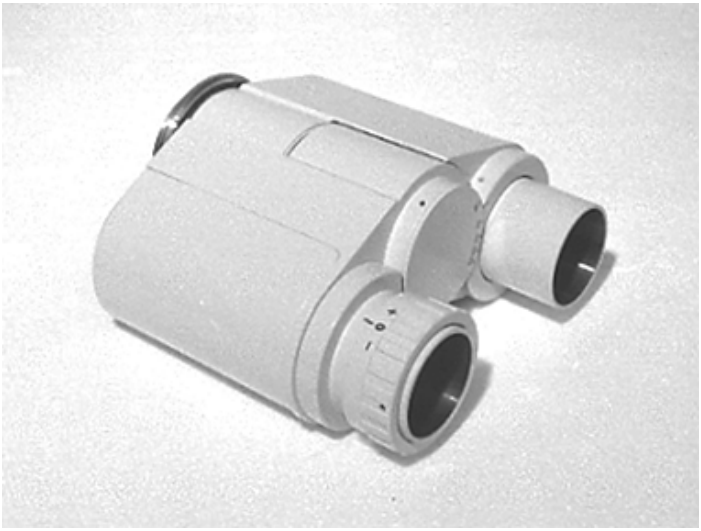


Fig. 100 (de: photo originale de produit Aus Jena, Jena, DDR) Tube selon Siedentopf.

L'avantage de cette solution est que la longueur des faisceaux partiels **x** et **y** reste constante et aussi la longueur équivalente du tube. En changeant la distance pupillaire on n'a pas d'altération de foyer, ni de parfocalité des objectifs, ni d'agrandissement. Cette solution est en effet très diffuse et elle va sous le nom de **Sieden-**

topf.[171]

Mais il y a ici aussi un inconvénient: en tournant les deux moitiés du tube tournent aussi les oculaires sur leur axe et avec eux les réseaux éventuels contenus à leur intérieur. Ceci est intolérable en cas spéciaux: systèmes photographiques et relatifs réseaux de cadrage, microscopes polarisateurs avec fils en croix, etc. Dans ces cas on recourt à d'autres solutions, ou on complique le tube avec un système de cames qui font tourner les oculaires en sens inverse aux deux moitiés du tube (Zeiss).

24.1.4 – Le centrage

On a dit jusqu'à présent que les axes des deux oculaires (**t** et **z** dans la fig. 98) sont parallèles, et ceci est obtenu aisément avec précision suffisante avec les techniques normales de fabrication mécanique. Mais il faut aussi que dans les champs visuels des deux oculaires apparie la même partie du champ objet, c'est-à-dire que les deux images intermédiaires aient la même position par rapport aux diaphragmes de champ visuel des deux oculaires. On peut parler de "**parcentralité**" intrinsèque du tube bioculaire.

Celui-ci est un centrage très critique au sens qu'il peut être suffisant à donner quelque difficulté de fusion des images rétiniennes. En outre, le centrage réciproque des deux canaux peut changer pendant qu'on change la distance pupillaire à cause de petits défauts mécaniques ou aussi pendant que les oculaires tournent à l'intérieur du tube pour les inévitables jeux et les fautes de centrage des lentilles des oculaires mêmes.

Pour ces motifs, dans un tube bioculaire il est difficile qu'il existe et se conserve un centrage réciproque parfait des images, et celui-ci est souvent la cause de fatigue à la suite d'observations prolongées.

Le remède consiste dans une retouche de la position de quelqu'un des prismes (fig. 98) ou de la position transversale d'une ou des deux bagues porte-oculaires. Mais pour ça il faut une certaine expérience, au moins parce que, dans le but louable de centrer les images, on risque de perdre le parallélisme entre les axes (voir dans ce site l'article n° 37 qui explique un simple procédé).

Quand ensuite, à cause d'un choc, une chute, le décollement des mastics, etc., un ou plus des prismes de la fig. 98 subit une translation et/ou une rotation, il y a beaucoup de formes possibles de désalignement. Une correction est difficile sans des références optiques opportunes comme celles offertes par des appareils spéciaux. Il faudra contrôler aussi que les axes **t**, **z** et **w**, au-delà à être parallèles entre eux, ils passent par le centre de l'objectif: un petit télescope spécial (un microscope auxiliaire avec réseau, par ex.) soit introduit à la place de l'oculaire et focalisé sur la pupille de l'objectif, qui doit résulter au centre du champ.

24.1.5 – Le facteur de tube

En plusieurs cas, le constructeur réussit à faire en manière que le chemin optique du tube bioculaire, compte tenu de l'avancement d'image (voir le § 3.2) provoqué par les prismes, soit égal à celui prévu par le projet de l'objectif.

En tels cas le tube ne contient pas des lentilles et le grossissement final est égal à celui qu'on aurait avec un tube droit monoculaire avec la longueur prévue. On dit que le "facteur de tube" est égal à 1×.

Mais souvent l'encombrement des prismes est tel que l'oculaire se trouve plus loin de l'objectif de combien il ne devrait pas l'être. Pour mettre au point, il faudrait augmenter la conjuguée image de l'objectif mais cette opération, on a plusieurs fois expliqué, porte à trop de consé-

[171] Heinrich Friedrich Wilhelm SIEDENTOPF (1872-1940), physicien allemand, collaborateur de la maison Zeiss à Jena.

quences. Il ne reste pas qu'élever de la mesure correcte l'image intermédiaire, sans altérer les conjuguées de l'objectif. D'habitude, on obtient ceci en mettant à l'entrée du tube une lentille divergente de puissance opportune, qui rend moins convergent le faisceau qui concourt dans l'image intermédiaire et il déplace vers le haut le plan dans lequel se forme l'image même. De cette manière, cependant, l'image devient légèrement plus grande et le "facteur de tube" devient 1,25× ou 1,5× jusqu'à 1,6×. Ce facteur supérieur à l'unité peut être utile en certains cas pour augmenter le grossissement total, mais on court toujours le risque de dépasser l'"agrandissement utile" (voir le § 18.12) et de toute façon il diminue la définition, exprimée en lignes/mm dans l'image finale. À ce point on pourrait utiliser des oculaires plus faibles de façon à ne pas altérer le grossissement total, mais cela normalement arrivera au détriment du champ angulaire de l'oculaire (voir les §§ 7.1 et 20.1).

On pourrait obtenir un allongement du chemin, sans altérer le grossissement, au moyen d'un "telan" (voir le § 3.2.2 et la fig. 17), mais celle-ci est une solution souvent ignorée par les constructeurs.

24.1.6 – L'équipollence des tubes

D'un constructeur à l'autre, en général, la fixation mécanique des tubes porte-oculaires est différente et leur interchangeabilité est impossible. Mais, pour un même constructeur, ils existent en général différents types de tube, mécaniquement interchangeables. Cependant, il faut s'assurer de leur équivalence ou **équipollence** optique, comme on a fait à propos des objectifs (§ 19.4), des oculaires (§ 20.5) et des condensateurs (§ 21.6).

Entre temps, il est évident qu'il devra être égal le diamètre interne des bagues porte-oculaires, mais aussi leur longueur devra être suffisante à permettre aux oculaires les plus longs de pénétrer complètement. Ensuite, il faudra tolérer quelques résidus d'aberrations, surtout chromatique latérale, pour les raisons illustrées dans le § 24.1. Mais surtout il doit exister la **parfocalité** des tubes: en passant de l'un à l'autre il ne doit pas être nécessaire de retoucher la mise au point, autrement cela signifie que la longueur équivalente du tube n'est pas la même pour tous les tubes: elle peut être correcte pour un d'eux, mais pas pour les autres. Pour une vérification, on mette au point avec un certain tube une préparation mince, si possible avec un faible objectif[172] et un fort oculaire. Puis, sans rien toucher, on substitue le tube; avec le même oculaire, on doit retrouver la mise au point. Si celle-ci va perdue, c'est-à-dire les deux tubes n'ont pas la même longueur équivalente, on comprendra quelle est celle correcte en observant lequel de deux tubes assure la meilleure parfocalité des objectifs (voir le § 24.1.1).

En passant d'un tube monoculaire à un bioculaire on aura naturellement une perte photométrique: avant tout le semi-réfléchissant D de la fig. 98 n'envoie à chaque canal pas plus du 50 % du faisceau reçu par l'objectif (W); en second lieu, les surfaces des prismes, et quelquefois les surfaces réfléchissantes si elles ne sont pas à réflexion totale, font perdre quelque pour-cent d'énergie pour chaque surface. Malgré cette perte photométrique, le tube bioculaire est préféré en général étant donné que la fusion psychique des deux images rétiniennes aide à mettre en relation l'information portée par les deux nerfs optiques et par suite à compléter mentalement la structure discrète de l'information fournie par la rétine (qui est formée d'éléments sensibles isolés) et à neutraliser les défauts locaux présents en elle. En autres mots, la vision bioculaire aide la "résolution physiologique" de l'image, pendant que la résolution instrumentale, dans le meilleur des cas, reste la même.

Le tube monoculaire est par contre à préférer quand l'image est peu lumineuse, comme dans les observations en champ noir, fluorescence, radiation polarisée, etc.

---

[172] Un faible objectif a en général la pupille de sortie et l'ouverture côté image plus grande d'un objectif fort; donc il devient plus critique pour évaluer la position de l'image intermédiaire.

24.2 – Les TUBES TRIOCULAIRES

Au-delà de la vision dans un ou dans les deux oculaires, il peut être utile une autre image à utiliser pour la photographie, la photométrie, la télévision, l'élaboration électronique, etc.

Pour obtenir ceci, il y a différentes solutions.

24.2.1 – Un tube intermédiaire

Il peut y avoir un tube intermédiaire (voir le § 25), interposé entre le corps du microscope et le tube bioculaire, dont le fonctionnement se base encore sur l'usage d'une surface semi-réfléchissante, en général à l'intérieur d'un prisme comme celui de la fig. 34 C, capable de fournir deux images intermédiaires identiques, au moins géométriquement.

Ce tube intermédiaire devra posséder une fixation opportune pour le tube bioculaire et une seconde "sortie" de laquelle émerge la seconde image intermédiaire.

Sur la seconde sortie on peut installer ou un tube "droit monoculaire" (voir le § 24) ou un raccordement d'autre type. Dans le tube droit monoculaire on peut insérer un troisième oculaire, de type normal, et avec ceci permettre, en alternative: •• la vision à un second observateur; •• la photographie, avec une microcaméra dessinée pour être appliquée sur un oculaire; •• la prise de télévision, avec un raccordement spécial; •• mesures et élaborations différentes sur l'image, micro-photométrie, micro-spectroscopie, etc.

Si la seconde sortie (verticale) prévoit un raccordement spécial, dans celui-ci il peut n'y avoir aucune lentille dans les rares cas destinés à la cinématographie ou aux prises TV, ou bien un "projectif" pour la photographie (§ 20.7) ou autre. Dans ces cas, la vision peut ne pas être possible pour un second observateur.

L'introduction du tube intermédiaire entre le bras et le tube bioculaire altère nécessairement la structure géométrique du système et par conséquence elle change la longueur équivalente du tube. Pour ce seul fait s'altérerait la mise au point, l'agrandissement, la parfocalité des objectifs, etc. Le remède est essentiellement de trois types:

•• objectifs avec "conjuguée infinie" (la distance objectif - lentille de tube est indifférente et elle peut être augmentée par l'interposition du tube intermédiaire, sans conséquences); la lentille de tube doit se trouver naturellement à l'entrée du tube bioculaire et par suite après le tube intermédiaire;

•• une lentille divergente faible située à l'entrée du tube intermédiaire, comme on fait pour certain tubes bioculaires (voir le § 24.1.5). L'image intermédiaire est soulevée de tant qu'il faut, sans altérer les conjuguées de l'objectif, mais l'agrandissement augmente et le "facteur de tube" est supérieur à 1×.

•• un système Telan (voir le § 3.2.2.) dont la lentille divergente est mise à l'entrée et la convergente à la sortie du tube intermédiaire (en réalité on aura deux lentilles convergentes, une pour chaque sortie du tube). Cette solution, par rapport à la précédente, a l'avantage de ne pas altérer l'agrandissement.

Comme mentionné plus haut, le faisceau provenant de l'objectif est subdivisé en deux faisceaux géométriquement identiques par une surface semi-réfléchissante plane ("**beam splitter**" ou "diviseur de faisceau", comme il arrive dans les tubes bioculaires (prisme D dans la fig. 98)). Il s'agira en général de la surface diagonale d'un prisme cubique comme celui de la fig. 34-C (§ 11), éventuellement combiné avec un prisme du type illustré dans la fig. 34 - B pour avoir l'inclinaison de l'axe optique pour le tube bioculaire; il peut s'agir aussi d'un prisme unique qui combine les deux fonctions, avec la surface semi-réfléchissante inclinée par rapport à l'axe optique d'un angle différent de 45° (s'il était de 45°, l'axe des oculaires serait horizontal: un peu inconfortable).

S'il y a un prisme diviseur de faisceau unique et fixe, la surface semi-réfléchissante peut avoir un rapport de division 1:1 (50 % du faisceau dans le canal vision, 50 % dans le canal "photographique" ou vertical), mais on préfère souvent faciliter le canal photo (par ex. 80 %) à détriment de celui pour la vision: on parle de tubes "20/80", par ex.

Dans les cas les plus sophistiqués, le prisme est mobile et éventuellement interchangeable avec des autres prismes de différent rapport de division; les prismes sont montés sur une glissière commune manœuvrable de l'extérieur. Si on a seulement un prisme, on peut avoir une position 0/100 (tout le faisceau dans le canal photo, prisme diviseur absent) et une position 20/80 ou 50/50. Si on a trois positions et deux prismes, on aura en général une position 0/100 (sans prisme), une position 50/50 ou 25/75 ou 20/80) et une 100/0 (tout dans le canal vision, prisme seulement réfléchissant).

Les rapports indiqués semblent diviser le faisceau en deux fractions, par ex. 80 % et 20 %, telles que leur somme produise 100 %; telle indication suppose que la surface semi-réfléchissante ne produise aucune perte photométrique, et ceci est assez vrai s'il s'agit de systèmes interférentiels à couches minces (§§ 17.1.2 et 22.1.3), mais s'il s'agit de métallisations simples, la fraction absorbée peut arriver à 30 %.

Une performance qu'on doit exiger d'un système trioculare c'est le **parcentrage**, c'est-à-dire le centre du champ visuel, comme il apparaît dans les oculaires, doit coïncider avec le centre du champ dans le canal vertical. Ce centrage se contrôle aisément, surtout si dans le canal vertical il y a un oculaire. Moins facile c'est le modifier, en déplaçant le prisme diviseur, c'est-à-dire en déplaçant l'image réfléchie mais pas l'image transmise par le prisme même (pour l'image transmise, le prisme n'est qu'une lame a faces planes et parallèles; sa rotation ne déplace pas sensiblement l'image transmise – voir la fig. 4 dans le § 2.3.2).

Autre exigence est la **parfocalité** des deux canaux: si l'image est au point dans les oculaires (on l'apprécie mieux en mettant sur l'oculaire une longue-vue de 3 - 5 agrandissements focalisée à l'infini), elle doit être au point aussi dans le canal vertical. Si dans celui-ci il y a un système photographique, il faut ouvrir la microcaméra, appuyer un verre dépoli[173] à la place de la pellicule, avec la surface dépolie (ou rayée) du côté de l'émulsion, et observer l'image sur cette dernière avec une forte lentille d'agrandissement, en soignant d'avoir au point simultanément le "grain" (ou les lignes) du dépoli et l'image microscopique. Si la microcaméra dispose d'un propre viseur latéral, sous forme d'une petite longue-vue pour la mise au point, la parfocalité est moins nécessaire, même si souhaitable, étant donné que la mise au point finale pour la photo est exécutée dans ce cas dans le viseur.

Fig. 101 – Un simple tube trioculaire avec le tube vertical prévu pour l'introduction d'un troisième oculaire, pour la vision ou la photo.
(photo originale d'un produit PZO, Varsovie)

[173] Mieux un verre clair, 34 mm de largeur (un peu moins de la pellicule, en supposant un format 35 mm), avec quelque ligne produite par une pointe d'acier dur comme la pointe d'un "taraud" de mécaniciens. Soigner que le verre appuie sur les mêmes surfaces qui font de référence pour l'appui de la pellicule.

24.2.2 – Le tube unique

En autres cas, le tube bioculaire forme une seule unité avec le tube vertical (fig.101).

Dans la partie basse de ce "**tritube**" il y a le prisme diviseur fixe ou la glissière avec deux ou plus prismes. Même ici, le tube vertical peut être prévu pour porter un oculaire plus certaines microcaméras normales prévues pour cette application, comme dans le tube de la fig. 101, ou être convenable pour d'autres accessoires avec autres types de système optique.

Il y a ici aussi le problème du parcentrage et de la parfocalité et sont disponibles types différents de prismes avec différents rapports de division du faisceau: le rapport le plus commun est environ 20-25 % dans la branche vision, le reste dans la branche "photo". En outre, la partie bioculaire peut être inclinée en degré différent par rapport à l'axe de l'objectif.

24.2.3 – Le bras à deux sorties

Dans la figure à la pag. 4 ou dans la fig. 107 à la page 298 on voit un gros bras horizontal qui porte au devant le tube bioculaire et, tout de suite au dessus, une «porte» sur laquelle est prévu un tube ou un raccord vertical pour la photographie ou pour une télécamera.

Il peut y avoir d'autres portes pour différentes fonctions.

Il ne s'agit plus d'un tube intermédiaire, mais d'un bras qui fait le deux (ou plusieurs) fonctions.

Les problèmes de parcentrage, de parfocalité, etc. sont résolus à l'avance.

25 – Les TUBES INTERMÉDIAIRES

Le "tube intermédiaire" décrit dans le § 24.2.1 est le type le plus simple des innombrables accessoires qui s'interposent entre l'objectif (avec le revolver, peut-être fixé au bout d'un bras) et le tube porte-oculaires. Chaque constructeur propose quelque modèle différent de "tube intermédiaire".

Il constitue un accessoire, dans les instruments d'usage général, ou une partie essentielle, dans les instruments pour applications spéciales; il peut avoir les formes les plus différentes, et seulement le souvenir d'instruments simples comme celui de la fig. 96, très diffus autrefois, peut justifier le terme "tube". En chaque cas, il est bien vérifier quel est le "**facteur de tube**" (Ft), c'est-à-dire l'agrandissement additionnel de ces accessoires. On va en général de 1× à 2×. Un bas "facteur" est toujours préférable, mieux si 1×, soit pour limiter la perte de luminosité et de définition, soit pour ne pas compliquer le calcul du grossissement total. Dans le § 12.7.3 on parle de la méthode pour la mesure du facteur de tube.

En outre, s'il y a deux ou plus "sorties", on doit exiger la parfocalité et la parcentralité entre elles, comme aussi la parfocalité et la parcentralité entre l'instrument muni ou privé du tube intermédiaire.

À l'intérieur d'un "tube intermédiaire" on peut trouver des parties optiques et mécaniques avec les fonctions les plus variées, dont nous essayons à énumérer le plus diffuses.

25.1 – Les LENTILLES SIMPLES

Il peut y avoir la "lentille de tube" (convergente, avec focale d'habitude égal à 160 - 250 mm), demandée par les objectifs avec seconde conjuguée infinie (voir le § 3.2.3 et la fig. 18).

Il peut y avoir la faible lentille divergente cité dans les §§ 24.1.5 et 24.2.1, qui sert seulement à déplacer axialement l'image intermédiaire, en changeant en même temps l'agrandissement sans altérer la longueur équivalente du tube.

Avec les objectifs à "seconde conjuguée finie", on peut avoir aussi un système "Telan" (§ 3.2.2;[174]) qui déplace l'image intermédiaire sans changer l'agrandissement. On a expliqué que, entre les deux lentilles du Telan, le faisceau est conjugué "à l'infini", au sens que, pour chaque point de l'objet, on a un faisceau parallèle ou "**télécentrique**". Eh bien, souvent le système Telan est utilisé justement pour exploiter le parcours télécentrique en tant que, entre les deux lentilles, on peut introduire des filtres ou des prismes sans déplacer l'image intermédiaire, et cela on a déjà expliqué dans le § 3.2.2. Mais, dans le parcours télécentrique, on peut introduire aussi des autres systèmes de lentilles, pourvu qu'ils soient "afocaux". On appelle "**afocal**" un système de lentilles sans foyer, sans plans de convergence, c'est-à-dire un système pour lequel soit l'objet que l'image sont à l'infini. Est telle une longue-vue ou un télescope correctement au point (image finale à distance infinie). En microscopie, on utilise souvent des systèmes "Galiléens", c'est-à-dire des longues-vues avec objectif convergent et oculaire divergent, de petit agrandissement et de petites dimensions, selon le schéma de la long-vue de Galilée. Tels systèmes peuvent agrandir ou même rapetisser (en inversant les lentilles) et on les utilise pour introduire un facteur d'agrandissement différent de 1× dans un système intermédiaire. Il peut s'agir de "variateurs d'agrandissement", qui contiennent différents systèmes galiléens et opèrent par valeurs discrètes, non pas par variation continue, comme il arrive au contraire dans les systèmes "pancratiques" (voir dessous).

[174] Voir aussi, dans ce site, l'art. n° 45 (en italien).

En pratique, on utilise des valeurs peu différentes de 1: 0,8×, 1,25×, 1,5× et semblables (voir aussi le § 19.2.4).

En changeant la distance entre les lentilles, un système galiléen peut devenir non plus afocal; si sa focale totale devient égale à 160-250 mm, il peut fonctionner de lentille de tube pour un objectif "à conjuguée infinie", mais avec un facteur d'agrandissement différent de 1×.

Il y a des tubes intermédiaires contenants un tambour tournant et sur le tambour sont montés plusieurs de ces systèmes, avec double fonction, lentille de tube et variateur d'agrandissement, et avec différents facteurs.

Dans les instruments dédiés à la fluorescence, il peut y avoir des tambours avec différents groupes de filtres.

25.2 – Les LENTILLES COMPLEXES

Il y a des variateurs d'agrandissement du type "**pancratique**" ou "**zoom**", c'est-à-dire des systèmes de lentilles dont il est possible de changer avec continuité quelque propriété optique parmi lesquelles la focale et l'agrandissement. On obtient une telle variation en déplaçant axialement un ou plus groupes de lentilles par rapport à d'autres groupes qui sont fixes; le déplacement est obtenu avec une commande extérieure (bague centrée sur l'axe, bouton, levier, etc.).

Un tel "variateur d'agrandissement" peut permettre une variation selon un rapport qui est différent d'un système à l'autre, et il peut arriver à 10:1. Dans les microscopes normaux, il y a toujours le danger de dépasser la limite du "grandissement utile" (§ 18.12)[175], et les rapports utilisés ne dépassent pas en général 5:1; dans les microscopes stéréoscopiques on peut être moins exigeants, en tant que le grossissement utile est souvent très dépassé pour d'autres motifs (réduction de NA, voir le § 29.1), et on utilise des rapports plus élevés.

De n'importe quel système zoom on doit s'attendre une **parfocalité** raisonnable: en changeant le rapport d'agrandissement du minimum au maximum, on ne devrait pas remarquer aucune variation de mise au point. Cette parfocalité est d'habitude assuré entre le début et la fin de la course, mais pas toujours pour les positions intermédiaires. Le praticien peut obtenir quelque amélioration en changeant la longueur du tube, la quelle chose est facile quand le ou les tubes porte-oculaires sont réglables, en tant que MÊME ce type de parfocalité est très conditionné par la position de l'image intermédiaire, c'est-à-dire par les conjuguées de l'objectif. Il faut exiger aussi un **parcentrage** intrinsèque raisonnable, au sens que l'image ne doit pas se déplacer latéralement pendant la manœuvre du zoom.

Les systèmes zoom sont très utilisés dans les objectifs de reprise photographique, cinématographique et de télévision.

Dans d'autres "tubes intermédiaires" peut être contenu quelque accessoire utile pour le travail en radiation polarisée: lentille d'Amici-Bertrand, diaphragme de Wright, analyseur, compensateurs. De la première on a déjà parlée dans le § 19.5.5, et on a aussi spécifié quelles autres fonctions elle peut dérouler[176]. Du deuxième nous disons seulement qu'il sert à limiter le champ objet utilisé quand on observe les "figures d'interférence" en conoscopie (voir les §§ 19.5.5 et 30.7) justement avec la lentille d'Amici.

En d'autres cas, le tube intermédiaire contient une "**lentille-relais**": il s'agit d'une lentille convergente de moyenne puissance, mise entre objectif et oculaire, mais beaucoup au dessus de l'image intermédiaire. Soit $\mathbf{f_r}$ la focale de telle lentille, et on la fasse travailler comme schématisé dans la fig. 12 (§ 2.6.2.3), c'est-à-dire avec M =1: objet et image se trouvent de la lentille à une distance $\mathbf{a = a' = 2\ f_r}$ [177]. Si donc la lentille-relais est éloignée de l'image intermédiaire d'une longueur égale à $\mathbf{2\ f_r}$, la lentille créera, plus haut encore, à la distance $\mathbf{2\ f_r}$ de soi même, une image ré-

---

[175] D'une façon générale, un système zoom provoque aussi une variation de l'ouverture utile de l'objectif, et il compense en partie la perte de résolution (coté image), conséquente à l'augmentation de l'agrandissement.

[176] Voir aussi, dans ce site, l'art. n° 44 (en italien).

[177] Ici, l'objet pour la lentille-relais est donné par l'image intermédiaire.

elle de l'image intermédiaire, des mêmes dimensions mais renversée, et par suite droite par rapport à l'objet.[178] Au dessus de cette seconde image intermédiaire se trouve l'oculaire. De cette solution on a quelques effets:

•• la distance entre objectif et oculaire augmente d'une longueur égale à environ quatre fois $\mathbf{f_r}$;

•• l'image dans les oculaires est droite par rapport à l'objet, au lieu que renversée, comme il arrive normalement;

•• la première image intermédiaire ne se trouve pas à l'intérieur de l'oculaire, mais dans un espace libre, entre objectif et lentille-relais. Dans telle position on peut mettre par suite des autres éléments optiques (compensateurs, réseaux, micromètres, etc.) qui autrement devraient être insérés dans des oculaires spéciaux, étant donné qu'ils ne trouvent pas place dans un oculaire normal. Avec l'avantage que, en cas de vision bioculaire, le réseau apparaît dans les deux oculaires, étant donné que la subdivision du faisceau dans les deux canaux oculaires arrive après l'image intermédiaire et après la lentille-relais.

On pourrait se demander à ce point si toutes ces lentilles, simples ou complexes, ne soient pas nuisibles aux buts de la qualité de l'image finale du microscope et si, donc, il ne vaille pas mieux chercher les instruments les plus simples, avec moins d'éléments optiques entre objectif et oculaire.

En réalité, tels éléments interposés ont en tout cas un effet: chaque élément possède au moins deux surfaces air-verre et chaque surface réfléchit une partie de la radiation qui la traverse (même moins de 1 % pour une surface "traitée" contre les reflets, beaucoup plus pour les surfaces ne pas traitées et très recourbées); toute cette radiation réfléchie contribue à la "lumière diffuse" à l'intérieur de l'instrument et baisse le contraste (voir le § 17.1.2). En outre chaque surface présente quelques irrégularités, traces de poussière, etc. et ceci va au moins au détriment de la définition. Sans compter que la "lumière diffuse" représente aussi une perte photométrique.

En ce qui concerne les aberrations, le problème par contre n'est pas grave: tous les systèmes intermédiaires ont ouverture modeste, petit champ et petit agrandissement; donc il n'est pas difficile de "les corriger".

25.3 – Les PRISMES

On a déjà parlé dans les §§ 11 (fig. 34 C) et 24.2.1 des prismes diviseurs de faisceau, uniques ou interchangeables. Autres prismes sont utilisés pour les cas spéciaux des microscopes polarisateurs (prismes de Nicol, Ahrens, Glan-Thompson, etc.) et il ne s'agit pas de prismes en verre, mais en cristaux biréfringents, même d'épaisseur considérable.

Il y a des prismes cubiques avec une surface semi-réfléchissante diagonale interne qui sont utilisés dans les tubes pour l'éclairage épiscopique, dont on parle ailleurs (§ 30.1). Au lieu de prismes, on utilise aussi des lames minces en verre, avec une surface recouverte par la couche semi-réfléchissante, inclinées de 45° sur l'axe optique.

Autres prismes pour éclairage épiscopique, à réflexion totale, sont disposés de manière à occuper seulement une moitié de la pupille de l'objectif, et ils demandent un dispositif de soutien et d'extraction. Lames et prismes peuvent encore être interchangeables (voir le § 30.1).

Tous ces tubes intermédiaires pour éclairage épiscopique portent latéralement une fenêtre d'entrée laquelle est réunie à une source de radiation ou une microlampe complète avec des diaphragmes, d'ouverture et de champ, porte-filtres, etc.

Tubes et microlampes très similaires sont utilisés pour la fluorescence en épiscopie (§ 30.6), avec la différence que le corps lumineux est donné en général par une lampe à vapeurs de mercure et les surfaces semi-réfléchissantes ne sont pas neutres, comme dans l'épiscopie normale, mais "**dichromatiques**" (elles réfléchissent essentiellement sur une partie du spectre optique et elles

[178] La présence d'une lentille-relais se révèle, souvent, justement parce que le microscope fournit une image droite de l'objet. Dans d'autres cas, il peut y avoir un jeu de prismes.

transmettent sur la partie résiduelle)[179].

Les semi-réfléchissants à lame, par rapport à ceux à prisme, sont plus économiques, mais ils introduisent un léger astigmatisme sur tout le champ.

Il y a parfois des tubes intermédiaires destinés exprès à porter les prismes biréfringents de Wollaston[180] - Nomarski pour le DIC (contraste interférentiel différentiel). Il s'agit d'une technique de contraste qui utilise des prismes complexes, formés par deux prismes biréfringents collés, à forme de coin mince, mais de petite épaisseur (§ 30.5).

25.4 – Les FILTRES

Beaucoup de tubes intermédiaires sont destinés, exclusivement ou avec d'autres fonctions, à l'introduction ou à la substitution de filtres de type différent.

Il peut se traiter de filtres d'arrêt pour la fluorescence, filtres polarisateurs minces, compensateurs biréfringents, filtres gris, etc. Tels filtres sont du type en verre optique, mixtes ou interférentiels (§ 23.1), ou en gélatine, ou du type "Polaroid"; la forme est en général discoïdal, avec diamètre de 10 à 33 mm en général, épaisseur de 1 à plusieurs mm. Étant donné qu'il s'agit de systèmes avec des surfaces planes et parallèles, une leur légère inclinaison ne produit pas un détriment de la qualité de l'image; les constructeurs les plus avisés en effet montent tels filtres de manière que leur plan forme avec l'axe optique un angle de 85 - 89°. Cette disposition a l'avantage que le faisceau réfléchi par le filtre n'est pas parallèle à l'axe optique et il va tomber sur les parois internes du tube sans contribuer à la lumière diffuse et à la perte de contraste.

Dans le cas de la fluorescence en épiscopie, il peut y avoir des "blocs" contenants tous les filtres nécessaires (d'excitation, semi-réfléchissant dichromatique, d'arrêt), qui ont à peu près la forme d'un cube. Deux ou plus "cubes" peuvent être montés sur un dispositif à coulisse ou à revolver de façon à être rapidement interchangeables et permettre un passage rapide d'un système de filtres à un autre; il est ainsi possible de comparer en temps rapides l'image de fluorescence obtenue avec des bandes d'excitation différentes, et cela est précieux quand l'objet est traité simultanément avec différents fluochromes.

En chaque cas, sont préférables les filtres "traités" contre les reflets, en rappelant cependant que les "traitements" sont mécaniquement délicats et ils se rayent aisément avec les normales opérations de nettoyage.

Les filtres doivent être toujours extractibles, interchangeables ou au moins inspectables (pour contrôler la présence d'ébrèchement, pour le nettoyage, etc.). Les dispositifs mécaniques qui permettent ce remplacement peuvent être à coulisse transversale, à disque tournant (revolver), etc. La propreté de ces filtres est importante, même quand elle ne semble pas nécessaire (on rappelle tout ce qu'on a dit à propos des "ternissures" dans le § 19.5.1), étant donné qu'ils se trouvent dans le système formateur d'image, contrairement à ceux placés entre objet et microlampe.

---

[179] Les miroirs dichromatiques viennent souvent nommés "dichroïques", mais il s'agit d'une faute car le dichroïsme consiste dans une variation de couleur dépendante de l'orientation d'une radiation polarisée par respect à un cristal.

[180] William Hyde WOLLASTON (1766-1828), chimiste, physicien et physiologiste anglais (pron. uòllaston).

26 – Les PLATINES

La **platine porte-objets** (“stage” en langue anglaise, “tavolino” en italien, “tisch” en allemand) est l’organe qui se trouve sous l’objectif et sert à l’appui, à la fixation et éventuellement au mouvement de l’objet (“lame porte-objet” ou autre). Elle représente la première partie du microscope de nature exclusivement mécanique dont nous traitons. Elle, au moins, n’est pas destinée à recevoir des parties optiques, comme au contraire le porte-condensateur, le revolver, la microlampe ou les types différents de tubes traités jusqu’à présent.

Sa fonction consiste à soutenir l’objet dans la position correcte par rapport à l’objectif et éventuellement à en faciliter les mouvements[181]. Tels mouvements peuvent être quatre, le premier essentiel, les autres accessoires:

 Translation en direction axiale, au sens de changer la distance entre objet et objectif. Celle-ci est la “mise au point” ou “focalisation” qui établit la conjuguée objet de l’objectif, liée, comme tout le monde connait, à la conjuguée image, c’est-à-dire à la position de l’image intermédiaire et à d’autres facteurs. Tel mouvement comporte une variation de la distance objet-objectif, mais ce n’est pas toujours l’objet, la platine, à se déplacer: il peut se déplacer le revolver avec l’objectif ou le tube qui porte le revolver (R + C + T dans la fig. 96) ou le bras entier (2 dans la fig. 102, voir le § 27.2.2).

 Translation en deux directions orthogonales entre elles, et orthogonales à l’axe optique. Ce mouvement sert à explorer une certaine surface de l’objet, toujours en le maintenant dans le même plan, et par suite au point.

 Rotation autour d’un axe parallèle à l’axe optique. Celle-ci sert essentiellement dans la photographie pour orienter l’objet par rapport au format photographique; aussi dans les microscopes polarisateurs est essentielle la rotation de l’objet; dans ce cas l’axe de rotation ne doit pas être seulement parallèle, mais coïncider avec l’axe optique de l’objectif. De ceci on traitera à propos des différents types de platine.

Dans certain instruments exclusivement dédiés à l’observation épiscopique d’objets opaques (métaux, roches, charbons, etc.) la platine peut être prive de trou et par suite totalement opaque. Mais en général il est prévu un trou centrale qui permet d’observer l’objet en transparence (en diascopie ou “lumière transmise”). Le diamètre de tel trou est varié (au moins un centimètre); son bord supérieur en général est à arête vive; il est évasé inférieurement étant donné qu’il doit accueillir la partie supérieure du condensateur. En effet, en conditions normales, la surface supérieure du condensateur (lentille frontale) est très proche de la surface inférieure du porte-objet, c’est-à-dire elle ne doit pas dépasser la surface supérieure de la platine; ainsi la platine, inférieurement, en correspondance du trou, doit présenter un logement capable de recevoir l’encombrement du condensateur.

Le trou est d’habitude très grand, mais partiellement occupé par une mince bague. Un trou trop grand n’est pas admissible, étant donné que la préparation y tomberait dedans; la bague mince présente un trou plus petit, mais elle est toujours emportable, avec l’avantage de faciliter le nettoyage et l’accès au condensateur, et de pouvoir ensuite reporter le diamètre du trou au moindre possible. La bague est en général métallique; rarement en verre.

Dans le cas de la “platine à chariot” ou “translateur” (“mechanical stage” en anglais, “kreuztisch” en allemand, “tavolino traslatore” en italien - voir plus loin), le trou n’est pas circulaire mais allongé, pour permettre un des mouvements de la platine, et la bague en décalque la forme (voir, plus loin, la fig. 105).

---

[181] Sauf dans le cas des microscopes stéréoscopiques, le plan de la platine dait étre rigoureusement perpendiculaire à l’axe optique – voir plus loin.

Il est sous-entendu que la surface supérieure de la bague doit coïncider avec la surface supérieure de la platine, avec tolérance de peu de microns, pour éviter que la préparation soit inclinée par son poids quand elle s'appuie sur le bord de la bague.

Il est bien définir la tolérance acceptable dans la **perpendicularité** du plan de la platine par rapport à l'axe optique. Les considérations à faire seraient nombreuses, mais en pratique on peut procéder ainsi: on prenne une préparation mince (frottis de sang ou bactéries, micromètre, etc.) et on l'observe avec un objectif moyen à forte ouverture, plan ou pas, et avec le diaphragme d'ouverture tout ouvert. On mette au point avec soin un point aux marges du champ visuel (utiliser un oculaire avec le plus grand index de champ possible), et puis on observe tous les autres points marginaux: on ne doit pas percevoir aucune différence de mise au point.

Pour une plus grande précision, et pour une mesure quantitative du désaxement, on recourt à un auto-collimateur appuyé sur la surface de référence du tube porte-oculaires, et on observe les reflets créés par une lame de verre plan-parallèle appuyée sur la platine, comme un porte-objet (après avoir enlevé l'objectif et autres lentilles interposées éventuels). L'erreur admissible est de l'ordre de 4 minutes (environ 0,06°). Pour éliminer l'éventuelle erreur de parallélisme de la lame, la tourner autour de l'axe de 180° et contrôler que le désaxement ne s'inverse pas. Soigner aussi qu'entre lame et platine n'existe pas quelque pépin solide, ça suffit peu (pour une méthode simplifiée, voir dans ce site l'article n° 27, pages 1-2).

La fixation de la platine dépend en général d'un étrier ou "étagère" (10 dans la fig. 102) à laquelle elle se visse par-dessous. Telle étagère peut être fixe (par rapport au pied) dans le cas que la mise au point soit confiée au bras ou au tube, comme dans le modèle de la fig. 96, ou mobile quand la mise au point soit confiée à la platine (comme dans les figures 97, 102, 106 et 107). La platine de cette manière est appuyée "en porte-à-faux" et elle est beaucoup moins rigide que si elle était appuyée des deux côtés opposés, comme il arrive dans des modèles très rares. La fixation "en porte-à-faux" a l'avantage de faciliter l'accès à tout ce qui repose sous la platine (condensateur, microlampe, porte-filtres, etc.) et elle est plus simple mécaniquement, mais … tant pis pour la rigidité.

Dans les meilleurs statifs, la platine est aisément interchangeable avec d'autres de type différent. Dans ce cas, sa fixation n'arrive pas avec des vis, mais avec des moyens plus confortables. Il est souhaitable que toutes les platines prévues pour un certain instrument soient parfocales, c'est-à-dire de la même épaisseur, de façon à ne pas demander une altération de la fin-course de la focalisation de l'objet et du condensateur.

Et encore, l'idéal serait que la position verticale de la platine restât définie même si elle est sujette à la pression normale des mains ou au poids de l'objet. Mais pour "définie" on doit entendre qu'elle ne sort pas des limites de la profondeur de foyer des objectifs; pour les objectifs les plus forts, telle profondeur est d'une fraction de micron et aucun instrument n'est capable d'assurer telle rigidité à la platine. Même si la platine n'est pas portée par un mouvement de mise au point, la seule souplesse élastique des matériels est suffisante à faire perdre le foyer sous le poids d'une main.

Si la souplesse élastique de la platine, du bras, etc. est inévitable, on doit au moins exiger l'absence de déformations plastiques: une pression normale (le poids d'une main, par ex.) ne doit pas produire une perte **permanente** de la focalisation, non plus avec les forts objectifs; au cesser de la pression, le foyer doit être récupéré.

Quelque constructeur moderne offre des platines qui, au-delà de l'éventuel mouvement vertical de "mise au point" par boutons, permet un abaissement rapide de beaucoup de millimètres par une simple action de la main, et aussi un retour rapide à la position initiale. Ceci permet de temporairement éloigner la préparation de l'objectif (pour le nettoyage de l'huile, la substitution de la préparation, etc.) et tout de suite de retrouver la mise au point précédente. On parle de "refocusing stage".

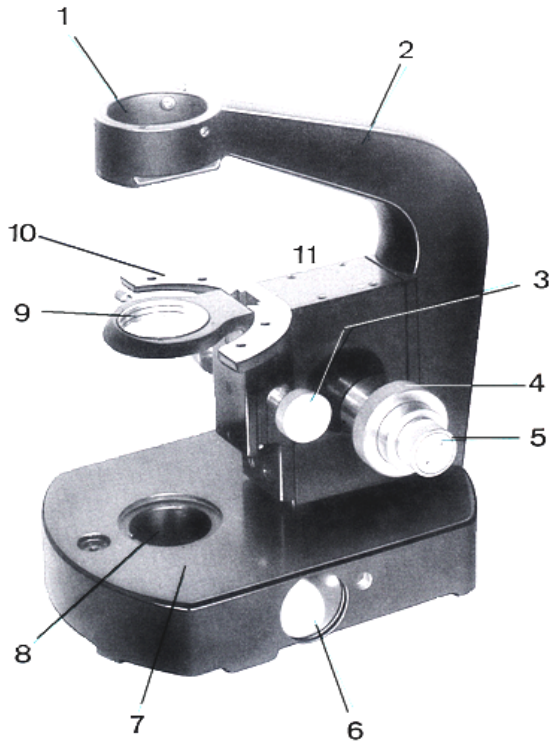


Fig. 102 – Statif Wild, mod. M 20
1 – Extrémité du bras (2) pour la fixation des tubes.
3 – Focalisation du condenseur
4 – Mouvement macrométrique
5 - Mouvement micrométrique
6 – Fixation de la microlampe
7 – Pied
8 – Emplacement de la lentille à grand champ centrable
9 – Bague porte-condenseur
10 – Étagère de fixation de la platine
11 – Boite du mécanisme de mise au point
(De: Catalogue Wild Heerbrugg, Mi 604, S. Gallen (Suisse))

26.1 - PLATINES FIXES

Il s'agit de platines immobiles par rapport à leur étagère de support, comme il est indiqué avec **Ta** dans la fig. 97. La forme en général est rectangulaire ou carrée, rarement ronde. Le trou central est rond; ses dimensions sont telles à permettre la montée de la lentille frontale du condensateur mais, en même temps, elles sont les plus petites possibles pour offrir à la préparation l'appui le plus ample. Manquent les moyens pour déplacer la préparation dans le plan de la platine, à moins qu'on la pousse à la main.

Pour la fixation de la préparation il y a deux "valets" de forme caractéristique (dans la fig. 97 on en voit bien un; voir aussi la fig. 81, § 21) constitués par un pivot de 4 ou 5 mm de diamètre avec la tête godronnée et par une lame flexible plus ou moins perpendiculaire au pivot. Le pivot s'introduit dans un trou spécial de la platine tant que la lame flexible s'appuie élastiquement sur la préparation. La réaction élastique de la lame pousse le pivot à se disposer dans le trou obliquement et elle le bloque ainsi par une forte friction.

Les platines fixes en général sont construites en métal: une plaque de fusion avec des nervures de raidissement dans la surface inférieure, en général en aluminium ou ses alliages (voir la fig. 87 au § 21.6 dans laquelle on voit une branche de l'étagère et la surface inférieure de la platine avec les nervures). Si les platines sont construites en matériel plastique, au-delà à être rayées aisément par le bord des préparations, elles sont aussi beaucoup moins rigides. Si elles sont peintes, tôt ou tard la peinture se consumera et la couleur claire du métal apparaîtra. Au moins, il doit se traiter de peintures durcies "au feu." Encore meilleure est un traitement de "**anodisation**" qui rhabille l'aluminium d'une couche dure de oxyde d'aluminium (Al_2O_3), chimiquement identique au minéral corindon, qui occupe la neuvième place dans l'"échelle des duretés" de Mohs[182], et a sa variété granulaire "émeri". L'anodisation peut donner au métal une couleur noir polie ou opaque. Certaines platines modernes sont rhabillées par une couche de matériel céramique, qui est aussi dur (Leica, etc.). C'est inutile de dire que la planéité de la surface supérieure de la platine doit respecter une tolérance de peu de microns pour que la préparation ne balance pas quand elle y est appuyée.

[182] Friedrich MOHS, minéralogiste allemand (1773-1839); son échelle des duretés comprend dix termes, du talc au diamant.

26.2 – Les GUIDE - OBJETS
(chariots ou surplatines)

Beaucoup de constructeurs, comme accessoire à une platine fixe, offrent un dispositif à fixer à la platine même, qui est capable de serrer la préparation en la tenant adhérente à la surface de la platine et de la faire déplacer en deux directions orthogonales. Ceci est le "guide-objets".

Étant donné que la platine est encore fixe, le mouvement de la préparation est confié seulement à la pince sous décrite et le trou au centre de la platine est par suite encore rond et le plus petit possible.

L'amplitude des mouvements doit être au moins de 20 mm en direction sagittale (dite aussi, par ressemblance avec les diagrammes cartésiens, direction Y ou "Nord-Sud") et de 40 mm en direction transversale (dite aussi X ou "Est-Ouest"). Les mouvements peuvent être mesurés sur deux échelles millimétrées spéciales, numérotées de 0 à 30 ou de 0 à 50 en direction Y , et de 60 à 100 ou de 50 à 130 ou semblables, en direction X (on choisi une numération supérieure à 50 de façon à ne pas l'embrouiller avec l'autre échelle). Une telle numération permet, avec un seul couple de chiffres, d'identifier une position du guide-objets et par suite un point défini de la préparation. En montant successivement la même préparation, orienté de la même façon, sur le même guide-objets, il est possible de retrouver tout de suite n'importe quel point de cette préparation, pourvu qu'on ait pris note des coordonnées du point. Cette opération de pointage se fait plus précise (au moins 0,1 mm) si les escaliers sont dotés de "nonio" (en italien)[183] ou vernier[184], comme on fait normalement, et comme il est en usage dans beaucoup d'instruments pour la mesure d'angles ou de longueurs (les normaux "calibres" pour mécaniciens, par ex.).

À propos de la structure des guide-objets, il y a en général une partie allongée en direction Y, bloquée sur la platine avec une ou deux vis, qui porte une glissière "à queue d'aronde" poussée par une crémaillère. Étant donné que la préparation est disposée normalement avec le côté le plus long (75 mm) en direction X, le mouvement Y peut être seulement de 20 - 25 mm, et explorer avec ceci le côté court de la préparation (25 mm le plus souvent).

Sur le guide Y est monté un second guide à queue d'aronde[185] allongé en direction X, qui se déplace en haut ou en bas, en direction Y , quand on actionne la crémaillère Y . Le guide X est plus long (déplacement d'au moins 40 mm pour comprendre la plus grande partie du côté long de la préparation) et il porte une **pince** à deux bras (éloignés entre eux au moins de 75 mm) qui saisit la préparation par les côtés courts.

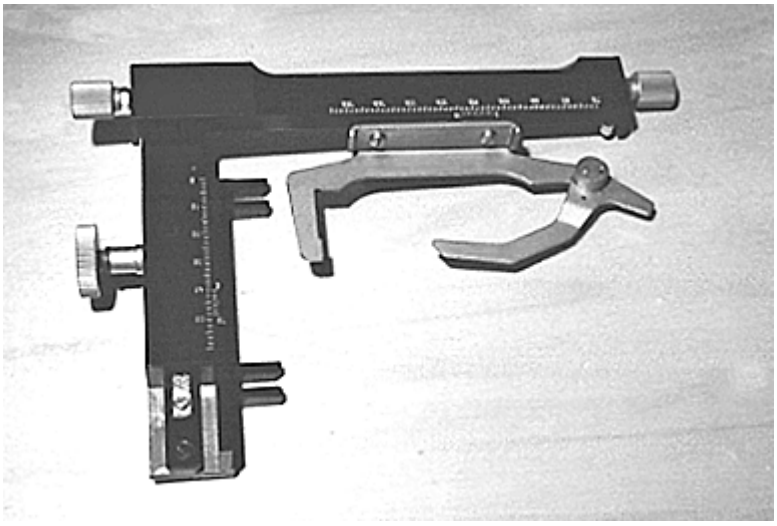


Fig. 103 (photo originale de produit Galileo, Florence)

[183] Il parait que quelque chose de ce genre ait été inventé par le mathématicien et cosmograph portugais Pedro NUNES ou Petrus NONIUS (1492-1577, mais il s'agissait d'un instrument pour la mesure des angles, différent du moderne vernier.

[184] Le mathématicien français Pierre VERNIER (1580-1637), commandant du château d'Ornans, introduisit en 1631 un artifice pour la lecture des graduations qui aujourdhui nous appelons "vernier" en souvenir de lui.

[185] Il ne s'agit pas toujours d'une queue d'aronde trapézoïdale classique; pour réduire les frottements on utilise aussi des guides prismatiques à galets ou à sphères.

La pince se déplace en direction X au moyen d'une autre crémaillère ou d'une vis, commandée par un ou deux boutons.

Les boutons X et Y peuvent être disposés sur un côté, à l'hauteur de la platine, comme dans la fig. 103, ou tournés vers le bas, avec l'axe verticale, pour en faciliter l'usage avec le bras appuyé sur la table (voir les figures 106 et 108). En tel cas ils sont souvent coaxiaux. Les deux boutons sont rarement tournés en haut (fig. 103b, page suivante) pour éviter d'heurter l'objectif.

Dans la fig. 103 on voit bien les deux échelles graduées avec un vernier (plus longue la X); le bouton X est double, au sens qu'il y a un bouton à gauche et un à droite. On voit aussi (sur le côté interne du guide Y) les deux fourches qui servent à fixer le guide à la platine par-dessous, avec deux vis. Toujours dans la fig. 103 est bien visible la pince porte-préparation. Il y a des pinces à bras fixes, peut-être avec des valets, mais il y a d'habitude un bras fixe (le plus court dans la fig. 103) et un mobile, articulé et recourbé, qui pivote près d'un extrême du guide X et est poussé par un ressort interne à se refermer vers le bras fixe de façon à bloquer la préparation. Tel bras mobile, à cause de sa ressemblance avec les pattes des araignées "faucheurs", est dit "patte d'araignée". Parfois, les deux bras sont montés sur des petites pièces à queue d'aronde, qui glissent sur le guide X de façon à pouvoir changer leur distance réciproque.

Il peut arriver que la pince, en serrant la préparation, la tienne légèrement soulevée par rapport à la platine et peut-être non pas parallèle à la platine même. Ceci équivaut à une erreur d'inclinaison de la platine, la quelle chose porte à un foyer pas uniforme sur tout le champ visuel (voir le § 26). En outre, pendant ses déplacements, la préparation changera de distance par rapport à l'objectif et on perdra la mise au point globale. Ceci est un contrôle à faire toujours devant une platine qu'on ne connaît pas, mais la perte de foyer pendant les mouvements de la préparation peut dépendre de causes plus banales: ça suffit un pépin de poussière ou un petit éclat de verre pour incliner la préparation.

La mécanique de la pince est délicate et critique, et elle peut donner des autres inconvénients: ça suffit par ex. que les bras de la pince soient trop flexibles ou que le pivot de la patte d'araignée présente quelque jeu: la préparation tendra à s'enfiler sous les bras et à se bloquer. Si en plus les bras sont trop épais, plus que la préparation, et ils sortent par rapport à la surface supérieure de la préparation, il peut arriver que les objectifs forts, pendant la rotation du revolver, les heurtent, et ceci en général est cause de rayages ou ruptures de la lentille frontale. Mais le problème des interférences mécaniques entre objectifs et guide-objets est plus ample: les guide-objets (pas les bras) sont toujours d'épaisseur très supérieure à celle de la préparation. Le cas de chocs entre le guide-objets et l'objectif peut se vérifier en trois cas; et tels cas peuvent se présenter même simultanément: □□ mouvements du guide-objets, surtout en direction Y ; □□ rotation du revolver et déplacement de l'objectif; □□ rotation de la platine, dans le cas que celle-ci soit tournante.

Ce dernier cas est le plus grave.

Avant de commencer le travail avec un instrument inconnu il est donc bien vérifier toutes les possibilités d'interférence; de toute façon tous les mouvements de la platine, du guide-objets et du revolver doivent être exécutés avec soin, et en exerçant la plus petite pression possible. Aussi les valets (§ 26.1) des platines fixes peuvent interférer avec les objectifs pendant la rotation du revolver, au moins quand ils sont tournés vers le plan médian de l'instrument.

Reste le problème de chocs entre objectif et platine (ou tout ce qu'il y est appuyé) pendant la focalisation. Mais de cela on parlera dans les §§ 26.5.5 et 27.2.2.

26.3 – Les PLATINES TOURNANTES

Dans le § 26 on a cité les cas de la photographie et des microscopes polarisateurs dans lesquels il est essentiel de pouvoir tourner la platine autour d'un axe parallèle ou coïncident avec celui de l'objectif. Les moyens mécaniques pour obtenir la rotation sont différents; pour la réduction des jeux il est bien que le mouvement arrive sur pistes à roulement avec des sphères, et ceci réduit

aussi les frottements[186].

En général, une platine tournante sera ronde, même s'ils existent des platines rectangulaires qui tournent seulement de 90° ou 180°.

Il est bien que l'axe de rotation de la platine coïncide au mieux possible avec l'axe optique de l'objectif: de cette manière, la rotation de la platine maintient constante la position du centre du champ-objet; en cas contraire, en tournant la platine, le point central de la région visible de l'objet se déplace et il peut sortir du champ visuel. La coïncidence des axes peut être obtenue avec des objectifs singulièrement centrables (§ 19.1.4.1), ou avec une platine centrable. On obtient la première solution en déplaçant le système de lentilles à l'intérieur de la monture de l'objectif, avec des vis, des cames ou autre, ou en déplaçant l'objectif entier qui est vissé sur une bague centrable à l'intérieur du revolver. Cette solution est préférée dans les microscopes polarisateurs, mais elle est mécaniquement complexe. L'axe de rotation de la platine dans ce cas peut être fixe. La seconde solution (platine centrable) est plus simple, mais elle a le désavantage que, en passant d'un objectif à l'autre, il faudra en général répéter le centrage de la platine pour la non parfaite parcentralité des objectifs (voir le § 19.1.4).

Pour centrer la platine on utilise en général deux vis horizontales directes vers l'axe qui poussent contre une troisième pointe à ressort, comme on fait pour les condensateurs. La partie déplacée par les vis est une bague dans laquelle roule la platine, et qui est caché sous la platine même. Les vis peuvent aussi servir à déplacer la platine avec l'objet qui y est fixé (avec deux valets, par ex.), mais de cette manière évidemment on perd le centrage. Dans la fig. 104 (page suivante) est visible une platine tournante simple et centrable; on voit aux bords les deux vis de centrage, et en outre les deux valets bloque-préparation et la bague mince au centre. Entre les pivots des deux valets ils y a trois trous bien visibles pour la fixation d'un guide-objets éventuels, le trou au centre pour une vis, les deux latéraux pour les goupilles d'orientation.

Presque toutes les platines, fixes ou rondes, acceptent en effet un guide-objets du type de celui illustré au chapitre précédent. Mais souvent, surtout dans les microscopes polarisateurs, les guide-objets sont un peu différents: afin d'éviter au mieux les interférences entre objectif et guide-objets, ce dernier est très aminci ou aplani, avec des boutons à axe verticale tourné en haut, de forme lenticulaire.

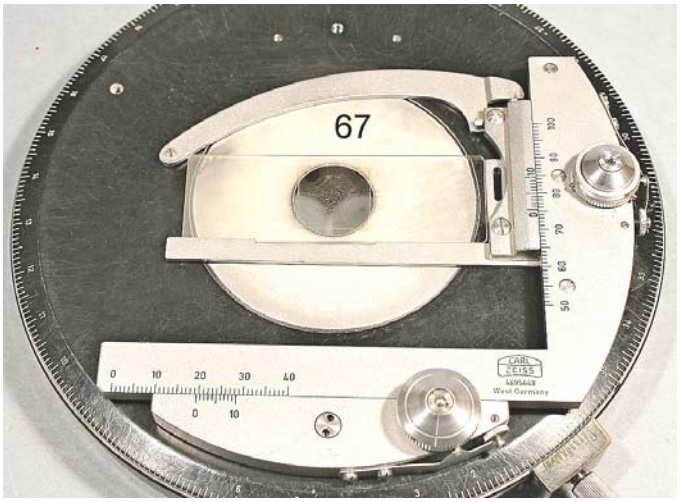


Fig. 103b – Platine tournante pour microscope polarisateur avec guide-objet surbaissé et boutons lenticulaires.
(produit Zeiss W)

Étant donné qu'au microscope polarisateur on examine souvent des sections de roches, et il est nécessaire d'explorer une surface déterminée en comptant les différents types de cristaux présents, il est bien d'avoir une manière confortable de mesurer les mouvements de la préparation sans exécuter chaque fois la lecture des échelles et des verniers. Ceci est réalisé avec les "saute-points"; il s'agit de simples mécanismes basés sur des boutons dentelés et des lames à ressort qui y frottent contre: pendant la rotation des boutons, et par suite pendant le déplacement de la préparation, on avertit des petits déclenchements à chacun desquels correspond un avancement fixe de la préparation. Parfois, en remplaçant quelques parties du mécanisme, il est possible de changer le déplacement correspondant à chaque déclenchement du bouton, par ex. de 0,1 à 0,2 ou 0,5 mm. De cette manière il sera possible, pour les principaux objectifs, faire de manière que pour chaque déclenchement le champ objet vu dans l'oculaire sorte du champ visuel et sois remplacé par un champ contigu. Il est ainsi possible d'explorer entièrement une surface donnée de l'objet, d'abord

[186] Il doit naturellement exister un mécanisme, d'habitude une bague à vis, qui permet d'approcher entre eux les deux surfaces du guide de façon à réduire à zéro le jeu entre sphères et guide.

par des champs contigus, puis par séries contiguës de champs.

Dans les microscopes polarisateurs, la platine ronde peut posséder des autres accessoires, que nous citons seulement, car il s'agit d'un sujet examiné ailleurs (§ 30.7): pinces pour le bloc de la rotation; déclenchements équidistants pour établir des orientations préférentielles de la platine (d'habitude chaque 45°), échelle avec vernier pour mesurer la rotation, platines "universelles" pour tourner la préparation selon trois ou plus axes, etc.

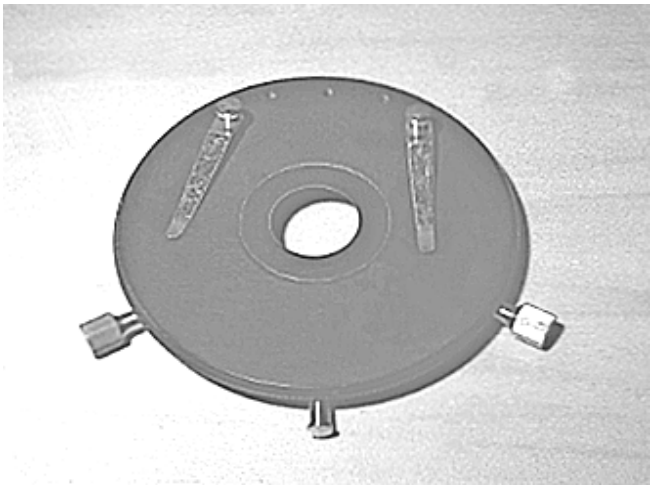


Fig. 104 - Platine tournante simple avec deux valets et deux vis de centrage.

26.4 - PLATINES de TRANSLATION

Il est impossible de décrire toutes les solutions mécaniques adoptées par les constructeurs. La majorité des "**platines à chariot**" ou "translateurs" peuvent cependant se reconduire à un type de base, que nous examinons avec quelque détail.

En substance, la platine à chariot se compose d'une partie fixe à étagère ("sous-platine"), et d'une partie qui glisse sur elle, d'habitude en direction Y. L'accouplement entre les deux parties peut être constitué par un guide à queue d'aronde linéaire, par des guides à cylindres de glissement (deux guides à V qui serrent des petits cylindres avec l'axe parallèle au guide sur lequel ils glissent), par des guides à roulement avec des cylindres ou sphères, etc. La partie mobile de la platine assure ainsi le déplacement de la préparation en direction Y. Pour le déplacement en X, il y a une pince, fixée à un second guide, orthogonal à l'autre. Tel guide X est d'habitude très étroit, environ 1 cm, et incorporé dans la partie mobile de la platine. La pince est du type de celle décrite à propos des guide-objets.

Telle structure complexe des platines à chariot justifie le terme anglais "mechanical stage"; le fait que les mouvements soient orthogonales entre eux justifie le terme "**platine orthogonale**". Une platine à chariot sera toujours plus lourde d'une platine simple, même tournante.

Le mouvement Y est dû en général à une crémaillère, souvent commandée par un ou deux boutons. Le guide X est au contraire souvent déplacé par une vis à pas large, commandée par deux boutons des deux côtés de la platine; autrement, par une autre crémaillère.

Parfois, les boutons X et Y sont horizontaux et coaxiaux (figure à côté) ou à axe verticale, d'habitude révoltés en bas, séparées ou coaxiaux: ceci facilite leur manipulation avec le bras appuyé sur la table (fig. 108).

Ils existent aussi des platines à chariot en version double, avec des boutons à droite ou à gauche (pour les personnes gauches), sur demande.

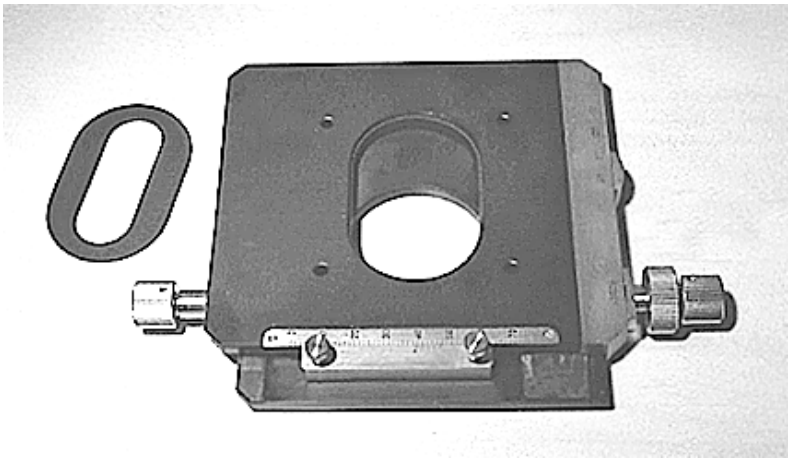


Fig. 105 – Produit Meopta, Prague.

Il y a des platines à chariot orthogonales qui permettent aussi la rotation, au moins sur 180°. Elles présentent les avantages des deux types de platine, mais elles sont lourdes et encombrantes, et elles exaltent le problème des interférences avec l'objectif.

Dans la fig. 105 on voit une platine à chariot typique avec des boutons sur les deux côtés: à droite le bouton est double, coaxial, pour les mouvements X et Y; le bouton est unique à gauche, pour le mouvement X. Sont visibles les deux échelles millimétrées avec vernier; manque la pince bloque-préparation, mais on voit les deux vis qui servent à fixer la pince au guide X. Ce guide émerge dans la fig. 105 sur le côté inférieur de la platine, mais souvent il émerge sur la surface supérieure.

Au centre de la platine mobile il y a un ample trou, à travers lequel on voit le trou correspondant de la sous-platine fixe. Le trou supérieur est allongé en direction Y, justement pour permettre le mouvement dans cette direction, et il est donc beaucoup plus ample du trou d'une platine fixe. À gauche est visible la bague mince, elle aussi l'allongée, qui ferme partiellement le trou de la platine mobile pour permettre un meilleur appui de la préparation. Ces trous, dans la sous-platine fixe et dans la platine mobile en Y, devront encore une fois être assez amples, et avec bord aminci, pour permettre la course vers le haut du condensateur.

26.5 - PROBLÈMES MÉCANIQUES

Dans la platine entendue en sens générique ils existent des organes mobiles qui assurent la translation de la préparation et son blocage, en deux directions orthogonales, à côté de quelque mécanisme particulier, comme celui cité des platines rondes et centrables. Pour chacun de ces mouvements ils se présentent des problèmes que nous examinons séparément.

Nous faisons remarquer que tels problèmes sont communs aux autres organes mobiles déjà traités (porte-condensateur, régulations dans les tubes bioculaires, etc.) ou à traiter (revolver, mise au point, etc.), mais l'usage fréquent fait oui que la platine à chariot soit la partie du microscope qui plus souvent tombe en panne, et elle est aussi des plus difficiles à réparer.

26.5.1 – La rigidité

Dans le § 26 on a déjà parlé de la rigidité de la platine en elle même. Encore plus critique est la rigidité d'un guide-objet mobile ou d'une pince.

En plus, la pince n'oblige souvent pas la préparation à adhérer parfaitement à la platine et la moindre pression des doigts fait perdre la mise au point. Pour réduire cet effet, quelques constructeurs ajoutent aux mâchoires rigides de la pince ou à la patte d'araignée deux languettes élastiques qui poussent la préparation vers le bas, ou bien les mâchoires possèdent, dans le côté qui touche la préparation, un bord émoussé en plan incliné, qui tend toujours à transformer le mouvement horizontal des mâchoires dans un appui vers le bas.

Quand la platine ou les guide-objets possèdent des boutons proéminents, ceux-ci représentent un bras de levier qui peut amplifier l'effet de la pression des mains: il est très difficile de trouver une platine qui n'altère pas la mise au point pendant les mouvements de la préparation. Les guide-objets appliqués, dans ce sens, sont beaucoup plus critiques des translateurs intégrés.

26.5.2 – Les jeux

Quand deux parties mécaniques sont couplées de manière rigide, avec des vis ou autre, les surfaces en contact peuvent être serrées entre elles sans pièces intermédiaires. Quand l'accouplement doit par contre permettre le mouvement réciproque des parties, il faut laisser entre elles

un moindre espace sans lequel le frottement empêcherait le glissement des surfaces. Telle espace s'appelle "**jeu**". Le jeu et un lubrifiant opportun sont les éléments essentiels de tous les mouvements mécaniques. Le jeu cependant, au-delà du mouvement prévu, consent en général un autre mouvement, en direction perpendiculaire au premier, qui est nuisible. Ça suffit de penser à un pivot qui flotte ("dance") dans un trou trop grand, en se déplaçant aussi en direction perpendiculaire à l'axe, au-delà de tourner.

Étant donné qu'au microscope, au-delà de l'image de l'objet, sont agrandis aussi les mouvements de ce dernier, les jeux peuvent résulter très fastidieux. Par ex., si on déplace l'objet dans une direction donnée avec le bouton relatif, il peut se déplacer spontanément dans une autre direction, non pas désirée. Donc, de ce point de vue, les jeux devraient être éliminés.

D'autre part, comme on a expliqué, il doit exister un moindre jeu, de construction, pour éviter l'encollage des parties. Pour ne pas réduire trop les tolérances de travail, et pour éviter que, dans les pièces particulières, le jeu de construction soit trop variable, on adopte nombreux systèmes de réduction ou **"reprise**" des jeux. Nous ne pouvons pas ici entrer dans les détails. Nous disons seulement que l'usure tend toujours à réduire les dimensions des pièces avec des surfaces de glissement pour laquelle le jeu, avec le temps, tend à augmenter. Le constructeur tâchera de réduire l'usure en utilisant des matériels et lubrifiants opportuns, mais avec le temps, pendant l'entretien, seulement une reprise intelligente des jeux peut permettre de contrarier les effets nuisibles de l'usure.

Du point de vue de la résistance à l'usure et du frottement, un des matériels les plus convenables est le laiton, qui cependant est lourd et cher. Il faut se méfier des parties en alliage d'aluminium et en plastique.

Sous nombreux aspects, les **guides à glissement** (à queue d'aronde ou semblables), pour le seul fait de contenir des surfaces qui frottent l'une sur l'autre ("frottement rasant"), sont dépassés par les **guides à roulement** dans lesquels le mouvement entre la partie fixe et celle mobile n'est pas confié au frottement entre deux surfaces planes ou courbes, mais au roulement d'éléments sphériques ("sphères") ou cylindriques ("rouleaux"); on a ainsi un "frottement roulant". Le frottement dans les guides à roulement est très petit, en étant le frottement "roulant" beaucoup plus petit de celui "rasant"; ceci permet de serrer beaucoup plus le guide et par suite de réduire les jeux pratiquement à zéro sans augmenter trop la friction.

Dans un mouvement complexe avec des organes de commande, comme un guide de platine à chariot traîné par une crémaillère, il y a au moins trois accouplements mobiles doués de jeux: celui entre axe et logement du bouton; celui entre pignon (roue dentée) et crémaillère et celui entre partie fixe et partie mobile du guide. Les effets des différents jeux peuvent s'additionner. Au moment de l'entretien il y a beaucoup de moyens pour réduire ces jeux: changer l'épaisseur de la partie "mâle" de la queue d'aronde, courber et/ou ajouter des cales sous la crémaillère[187], refaire les bagues des pivots, etc. mais il s'agit essentiellement de technologies mécaniques.

Parfois quelque **reprise des jeux** est à disposition même du praticien; en effet, beaucoup de guides à roulements ou à sphères sont représentés par des pièces séparées, au moins d'un côté, fixées à la structure de la platine par des vis. En exploitant le jeu entre les trous des vis, peut-être avec le secours de spéciaux "grains" (vis sans tête) d'appui, latéraux, il est possible de changer les jeux du guide. Aussi certains guides à queue d'aronde possèdent sur un côté de la partie "femelle" une barrette mobile ("lardone", en italien), poussée elle aussi par des vis ou grains, qui permet de réduire à volonté les jeux. En serrant trop cette barrette on augmente naturellement le frottement de glissement du guide.

[187] C'est-à-dire introduire des minces épaisseurs (feuilles d'aluminium, par ex.) entre la crémaillère et sa surface d'appui.

26.5.3 – L'hystérésis

Considérons un mouvement, par ex. d'une platine à chariot, commandé par une crémaillère, à son tour poussée par un bouton. Ce n'est qu'un exemple, mais les idées de base sont valides aussi dans d'autres cas.

On considère dans ce mouvement un seul des jeux possibles, par ex. entre pignon et crémaillère. Maintenant on s'imagine de déplacer la platine en tournant le bouton: les dents du pignon s'appliquent et poussent sur les dents de la crémaillère qui est fixée au guide et déplace la platine. Maintenant nous inversons le mouvement. La rotation du pignon change de sens; les dents du pignon poussaient sur un côté des dents de la crémaillère, avant de l'inversion; maintenant ils appuient sur le côté opposé, prêts à reprendre le mouvement. Mais entre les deux positions, appui sur un côté, appui sur l'autre, il y a quelque jeu; il faut une certaine rotation du pignon pour passer d'un appui à l'autre. La conséquence de ceci est que, quand on inverse la rotation du bouton, le mouvement de la platine ne s'inverse pas tout de suite, mais seulement après un certain temps, au moins après que le mouvement du bouton a parcouru un certain trait à vide.

Le retard dans l'inversion d'un mouvement par rapport à l'inversion de la commande s'appelle **hystérésis** et c'est une conséquence directe du jeu dans les organes de transmission du mouvement. Ou mieux, si dans un mouvement, comme on a dit, il y a différents jeux, il est probable que leurs effets s'additionnent pour augmenter l'hystérésis. D'ici un autre motif pour soigner la reprise des jeux.

Dû à des causes différentes, comme l'élasticité des matériels, c'est par contre le "**retard**" ou "**incohérence**": quand cesse la force appliquée sur le bouton, il peut arriver que le mouvement se prolonge pour un certain temps; quand la force commence à agir, le mouvement peut commencer en retard; ceci arrive parce que, pour un certain temps, la force appliquée sert seulement à vaincre l'élasticité des différentes parties.

Incohérence et hystérésis peuvent se superposer et influer l'une sur l'autre. On peut exécuter un contrôle global de ces défauts simplement en observant à fort agrandissement un point défini dans une préparation et en déplaçant en avant et en arrière chacun des mouvements du guide-objets: quand le bouton de commande reprend la même position, même l'objet doit revenir à la même place, indépendamment de quel côté il y est arrivé, et sans retard. Le mouvement doit être "**répétable**", et suivre fidèlement et instantanément la commande.

26.5.4 – Les embrayages

N'importe quel mouvement comporte des surfaces en glissement réciproque et par suite des frottements. En conséquence, la commande de ce mouvement rencontre toujours une résistance. Les lubrifiants, nécessaires pour réduire l'usure, réduisent aussi les frottements, mais d'autre part la viscosité du lubrifiant oppose toujours une résistance qui s'ajoute au frottement.

On pourrait réduire la viscosité en recourant aux lubrifiants liquides (huiles), mais celui-ci est à éviter en général étant donné que, avec le temps, l'huile coule des parties lubrifiées et les laisse pratiquement sèches. Cela est encore plus valide dans le cas des roulements à billes. En outre l'huile, dans le cas du frottement rasant, peut créer une forte **friction de décollement**: les deux pièces qui doivent glisser l'une sur l'autre semblent collées; seulement en appliquant une force très supérieure à celle nécessaire pour maintenir le mouvement on obtient le décollement des parties; à ce point la friction tombe brusquement et le mouvement se conserve avec une force beaucoup plus petite. En général, un des premiers contrôles à exécuter sur n'importe quel mouvement est justement celui-ci: la friction de décollement doit être très similaire à la friction offerte par le mouvement continu.

Donc, saufs cas spéciaux, dans un microscope on doit utiliser seulement des lubrifiants solides; dans la majorité des cas, est préférable une bonne "graisse pour roulements à billes".

Mais revenons à la résistance offerte par les mouvements mécaniques. Qu'on ne croie pas qu'elle doive être le plus petite possible. En effet, un mouvement trop fluide se déplace au moindre choc involontaire et il devient instable. Alors, les frottements que nous avons vu peuvent être utiles. Non seulement, mais on tâche souvent de les augmenter en serrant opportunément entre elles les parties en glissement avec un mécanisme spécial ("**embrayages**")[188].

Cette fonction vient déroulée de mille manières différentes, même avec des boutons spéciaux ou des vis mais, pour être efficaces, ces mécanismes doivent être réglables. Seulement ainsi on pourra, chaque fois, adapter le mécanisme aux exigences du moment et aux goûts personnels, contrarier les effets de l'usure ou le durcissement progressif de certaines graisses (en cas de désuétude prolongée on peut arriver au bloc total), et éviter que le mouvement devienne de toute façon trop dur ou trop lâche pour être pratique.

Alors, chaque mouvement doit être allié à un mécanisme de friction, si possible réglable. Si le constructeur ne pourvoit pas d'une manière adéquate, tôt ou tard le mouvement deviendra inutilisable. Souvent, les mêmes mécanismes qui réalisent la reprise des jeux ne font pas que changer la pression entre les parties en mouvement et donc ils influencent les frottements en déroulant ainsi la fonction de friction plus ou moins réglable. Avec l'utilisation de composants élastiques (rondelles à tasse ou à spirale, ressorts, guides flexibles, etc.) on peut obtenir une pression plus ou moins constante entre les parties en glissement: ceci peut suffire à rendre constante aussi la friction et le jeu, c'est-à-dire à constituer une reprise automatique et permanente du jeu.

Il s'agit des petites habilités qui distinguent le constructeur sérieux et compétent de celui superficiel.

26.5.5 – Les fins de course

Tous les mouvements, sauf quelques mouvements de rotation (platines, par ex.) ont une étendue limitée, au sens que, aux deux extrêmes, il y a un arrêt ou une "**fin de course**" qui le limite. Aussi ici la réalisation pratique peut suivre des solutions variées, mais une fin de course doit obéir de toute façon à quelques conditions.

 Position - Les fins de course doivent être tels à consentir à l'organe mobile de dérouler sa fonction mais pas de provoquer des dégâts. Par ex., un guide objets doit déplacer une préparation pour toute la zone utile, mais il doit se maintenir dans des limites telles à ne pas heurter les objectifs. De la même façon, le porte-condensateur ne doit pas porter le condensateur à heurter la préparation vers le haut, ou le miroir ou la microlampe, vers le bas.

 Possibilité de régulation - Il peut être opportun de changer l'extension d'un mouvement pour des cas spéciaux: par ex. explorer seulement une partie limitée d'une préparation déplacée par un guide-objets. Dans le cas d'un condensateur ou d'un objectif, il faudra qu'à ces organes sois empêché de heurter la préparation (fracture de la préparation ou de la lentille frontale); mais les préparations n'ont pas toujours la même épaisseur et la fin-course réglable sera précieuse (§ 19.1.3).

 Sensibilité - Les fins de course doivent provoquer une augmentation de la résistance présentée par le bouton de commande; telle augmentation doit être aisément perceptible pour éviter que le mouvement soit forcé involontairement.

 Sûreté - La partie mobile, quand la fin de course est atteinte, va généralement à pousser contre une partie fixe. Si les deux parties qui se rencontrent sont rigides, on dit que la fin-course est "positive". Cela rend plus sensible la fin de course et, si les parties au contact sont suffisamment robustes, elle bloque le mouvement. Cependant en certains cas (par ex. les vis micrométriques, voir plus loin), le mouvement est démultiplié; si la fin de course est disposée à la fin du mouvement démultiplié, l'augmentation de résistance peut être imperceptible, et l'utilisateur peut forcer la fin de course sans s'en apercevoir. Étant donné que le mouvement est démultiplié, il

[188] Ceci devient particulièrement nécessaire quand un mouvement donné est vertical, et porte un organe lourd qui tend à descendre à cause de la gravité (porte-condensateur, mouvement macrometrique, etc.).

exercera une forte pression sur la fin de course avec le danger de déformations ou ruptures. Pour éviter ceci on peut utiliser deux solutions.

En premier lieu, le mouvement peut être muni d'un "embrayage"[189], c'est-à-dire d'une liaison qui peut glisser de manière que, une fois atteinte la fin de course, le mouvement même ne soit plus transmis et il ne produise pas des dégâts.

En second lieu, la fin de course peut être placée au début de la chaîne, de façon à recevoir une pression pas encore renforcée par la démultiplication; par ex., pour limiter le nombre de tours d'un bouton, on peut utiliser une série de rondelles, chacune avec une dent repliée; chaque rondelle, après un tour complet, applique sa dent sur la dent de l'autre qui, après un autre tour, s'applique sur la suivante et ainsi de suite. Après un nombre de tours égal au nombre des rondelles, le mouvement se bloque.

26.5.6 – La vitesse

On peut définir vitesse le déplacement correspondant à un tour entier du bouton de commande.

D'un côté est utile une basse vitesse, c'est-à-dire un lent mouvement de la préparation, pour rendre plus faciles les petits déplacements; de l'autre côté est utile une vitesse élevée pour sauter rapidement entre deux point éloignés de la préparation. Chaque fois le constructeur cherche le meilleur compromis.

Évidemment, la vitesse d'un mouvement dépend seulement du type de mécanisme et du démultiplicateur utilisé.

Nous verrons que, dans le cas de la mise au point, on concilie les exigences contrastantes de la basse et de la haute vitesse en divisant le mouvement en deux mécanismes différents, avec des vitesses très différentes, même si elles agissent dans la même direction. Cette double commande n'est jamais nécessaire dans les mouvements des guide-objets, du condensateur ou des tubes.

Dans rares cas, la mise au point est confiée à trois différents mouvements avec différentes vitesses. Où on fait usage de l'électronique, la vitesse du mouvement peut être réglable à volonté avec des moyens électriques.

26.6 – Les PLATINES à GLISSEMENT

Il y a des platines spéciales de construction simple et de coût réduit, constituées par une partie inférieure fixe et une supérieure mobile, simplement appuyée sur celle fixe, les deux en général rondes. La surface le long de laquelle les deux parties entrent en contact est travaillée avec beaucoup de soin de façon à avoir une planéité élevée et une basse rugosité. En mettant sur ces surfaces un voile de graisse à moyenne viscosité, on obtient une mobilité de la platine dans toutes les directions, à la simple pression de la main. Naturellement, un bord opportun replié dans la partie mobile, ou un autre dispositif, rend impossible le décollement de la même partie.

Il est surprenant comme une telle platine "**à frottement gras**" soit résistante à un brusque choc casuel et soit par contre docile et sensible à une pression prolongée.

Le but précis de ces platines est de permettre les mouvements de l'objet dans toutes les directions et avec une seule main, pendant que l'autre est disponible pour la mise au point. Cette possibilité est précieuse quand on observe des objets mobiles en suspension liquide, par ex. des micro-organismes vivants en micro-cultures. Les mouvements de ces êtres sont vifs et imprévisibles et il n'est pas possible de les poursuivre avec un translateur normal muni de deux boutons séparés qui

[189] Dans ce contexte, le terme "embrayage" devient synonyme de "accouplement entre deux parties avec la possibilité de glissement", pendant que plus en haut "friction" et "frottement" signifiait "présence de difficulté raisonnable dans le mouvement réciproque entre deux parties".

doivent être utilisés avec deux mains, ou avec la même main, mais en temps successifs.

Étant donné que la transmission du mouvement est directe, les platines à glissement sont exemptées de tous les problèmes à peine discutés: hystérésis, jeux, incohérence ou répétabileté. Elles ne sont pas répandues comme leur utilité pratique le ferait supposer, peut-être seulement parce qu'elles sont trop simples et par suite elles ne sont pas appréciées. Leur seul, réel, inconvénient est qu'elles ne permettent pas d'explorer toute la surface de l'objet par champs contigus alignés et par files parallèles de champs.

27 – Le STATIF

On peut définir “statif” l’ensemble des parties mécaniques du microscope, en excluant donc seulement les parties avec des fonctions optiques (lentilles, miroirs, prismes, lames transparentes, filtres).

Mais dans beaucoup de systèmes optiques (objectifs, oculaires, condensateurs, etc.), la partie optique fait étroitement partie d’une monture mécanique au point que, en démontant les lentilles, les miroirs, etc. le système perd toute fonction optique, au moins à cause des pertes inévitables du centrage et des corrects rapports géométriques. Dans le § 19.5.2 on a vu, par ex., comme soit critique le centrage d’un objectif et on a constaté (voir le § 13.2.4) que, dans la majorité des forts objectifs, il existe une lentille flottante, le centrage de laquelle va perdu immédiatement dès qu’on démonte le paquet des lentilles de l’objectif même.

En conséquence, on peut considérer comme systèmes optiques d’ensemble, pas divisibles, beaucoup de parties du microscope déjà examinées: objectifs, oculaires, condensateurs, tube porte-oculaires, tubes intermédiaires, microlampe, etc. En enlevant tels systèmes, il reste alors une structure exclusivement mécanique qu’on peut appeler “**statif**” en sens étroit, constituée par:

- Base ou pied, de poids considérable, qui donne stabilité à l’instrument par rapport au plan sur lequel il appuie (7, dans la fig. 102).
- Bras (B, dans la fig. 96 et 2, dans la fig. 102), éventuellement décomposable en **bras** véritable, plus ou moins horizontal, et **colonne**, plus ou moins verticale (B et Co dans la fig. 97), qui soutient la plus grande partie de ce qui suit.
- Platine avec support relatif (voir le § 26 et en outre **Ta** dans la fig. 96, 97, 106, etc.).
- Revolver porte-objectifs (R dans la fig. 96 et 97), ou au moins un dispositif pour sa fixation (1, dans la fig. 102).
- Porte-condensateur (9, dans la fig. 102).
- Parfois il y aura des structures pour la fixation de la microlampe (6 et 8 dans la fig. 102).

Étant donné qu’il porte les différents systèmes optiques et il en assure la position et les mouvements relatifs, le statif représente un véritable “banc optique”.

Alors que les mouvements de l’objet dans un plan perpendiculaire à l’axe sont confiés à la platine, ceux de l’objet par rapport à l’objectif (ou vice versa), en direction de l’axe, sont confiés aux mécanismes contenus dans le statif même. Autant on peut dire pour le porte-condensateur.

La position et les mouvements relatifs des différentes parties du microscope sont sujets à des exigences très poussé; ça suffit de penser que la pénétration et la résolution des objectifs les plus forts descendent à des fractions de micron. Pour avoir une image stable, la position relative de l’objet et de l’objectif devrait rester constante dans les mêmes limites. En outre, le pouvoir d’agrandissement du microscope ne se limite pas à l’objet, mais il intéresse aussi ses mouvements dans toutes les directions: n’importe quel oscillation de l’objet (due à l’élasticité, aux jeux, etc.) est amplifiée dans la même mesure du grossissement. En conséquence, aucun instrument n’est parfait du point de vue mécanique: au moins, la flexibilité des différents supports fait changer la mise au point et la position de l’objet à la seule pression des mains, au moins aux forts grossissements. D’ailleurs, les tolérances les plus étroites, toujours aux forts grossissements, se présentent dans la position relative de l’objet et de l’objectif, mais telles parties se trouvent aux extrêmes d’une longue chaîne de structures. On considère un statif classique comme celui de la fig. 96 ou 97 ou 102: de la préparation on a une fixation pas toujours univoque par rapport au guide-objets; cette partie se déplace par rapport à la platine au moyen de guides; la platine peut être fixe par rapport au bras (fig. 96), mais dans ce cas le tube est mobile; si le tube est fixe (fig. 97), la platine est mobile; du bras on passe au tube, puis au revolver, à la monture de l’objectif et finalement au barillet général rentrant (voir le § 19.1).

Tous ces accouplements sont une source de jeux et chaque partie est plus ou moins flexible élastiquement. Les exigences mécaniques posées au statif sont donc très poussées: la somme des jeux et des flexibilités de toutes les parties de la chaîne à peine décrites doit être réduite le plus possible.

27.1 - Les TYPES FONDAMENTAUX

Comme pour toutes les autres parties du microscope, et comme il arrive pour tous les produits de haute technologie, on peut voir pour le statif des solutions infinies, soit dans la production actuelle que dans le passé.

En relation aux connaissances scientifiques, aux possibilités techniques, aux demandes du marché, aux modes, au talent des projeteurs, à l'application des techniciens, on a vue, pour le même problème, des solutions très différentes. Beaucoup de ces solutions ont été abandonnées bientôt, ou pour variation des goûts, ou pour des motifs subjectifs. Des autres sont tombées à cause des hauts coûts, de criticité excessive des mises au point, de détérioration rapide de quelques composants. Des autres solutions se sont révélées peu pratiques, ou utile seulement en cas spéciaux. Toutes cependant représentent le fruit de grands efforts de projet et de construction et elles conservent au moins une valeur historique.

On regrette en outre que certaines découvertes ou lignes entières de production aient été abandonnées, sans soin à leur valeur technologique, pour des motifs simplement commerciaux; ouvriers de qualification élevée et vraies traditions et centres de culture technique viennent supprimés pour la cessation de l'activité d'une maison, pour la fusion d'une maison avec une autre qui étouffe la première, pour la fermeture des marchés, etc. Et beaucoup de productions, même techniquement raffinées, viennent délaissées par l'indifférence et l'incompétence d'usagers et de vendeurs.

Dans d'autres cas, beaucoup de produits sont ignorés, spécialement en pays différents de celui de production, pour manque d'un réseau de distribution.

En revanche, certaines solutions techniques qui se sont démontrées efficaces et économiques se retrouvent toujours, après leur introduction 100 ou 150 ans avant, avec des légères variantes. La technologie optique est peut-être une du plus conservatives. Ainsi, les modèles principaux de statifs que nous illustrons brièvement sont valides aujourd'hui, comme ils l'étaient dans la deuxième moitié du 19ème siècle.

27.1.1 - Statif droit

Dans certains statif, il existe une colonne verticale, fixe par rapport au pied, qui porte la platine et le tube (avec l'intermédiaire d'un bref bras). En principe, il s'agit d'instruments simples et économiques. Cette solution était beaucoup en usage dans les siècles derniers et elle peut être utile dans les instruments portatifs en permettant une réduction des encombrements.

Il manque souvent une microlampe incorporée, et même un condensateur. Le tube en général est droit et monoculaire, donc vertical (voir la figure à côté).

En outre, pour des raisons d'encombrement, dans certains cas sont abandonnés les standards mécaniques habituels (diamètre et longueur du tube, pas de vis et longueur des objectifs, etc.), pour lequel ces instruments ne peuvent pas accepter des systèmes optiques d'autres constructeurs. Ceci n'enlève pas qu'on en ait construits de qualité excellente.

27.1.2 - Statif à goujon

Un exemple typique est celui de la fig. 96; il s'agit encore d'instruments économiques, mais il y en a des versions de qualité excellente. La caractéristique saillante est donnée par un bras souvent recourbé (B dans la fig. 96) sur lequel sont fixés directement le corps de tube (C), avec le tube (T) vers le haut (droit et monoculaire dans les modèles les plus économiques) et le revolver (R) vers le bas, la platine (Ta), le porte-condensateur et le porte-miroir. Tel bras est pivotant par rapport au pied en P et avec lui peuvent s'incliner toutes les parties solidaires avec lui.

Avec le tube vertical, on a ces avantages:

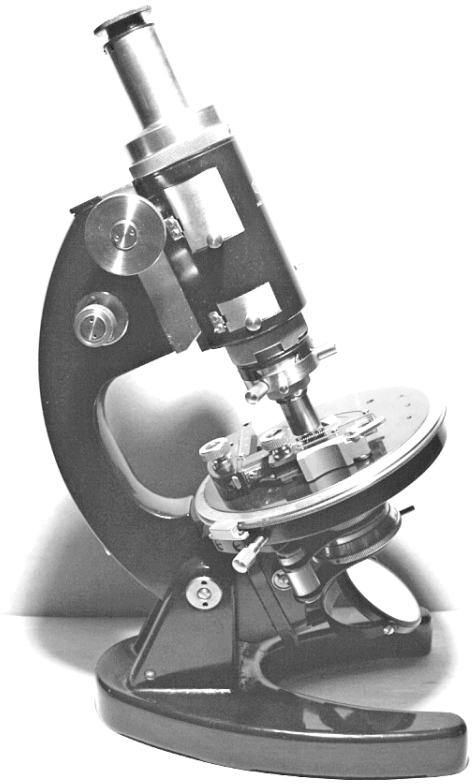
- une microcaméra éventuelle ou autres accessoires fixés au tube déchargent leur poids directement sur le guide porte-tube (G), sans "faire levier";
- la platine est horizontale et il ne se vérifie pas donc le glissement de la préparation ou l'écoulement des liquides éventuels présents sur elle;
- dans la micro-projection, le bras articulé peut porter le tube à l'horizontal, en évitant l'usage d'un miroir sur l'oculaire.

Les désavantages du tube vertical restent essentiellement dans l'inconfort : il faut regarder avec l'œil tourné en bas et par suite plier beaucoup le cou. Justement pour éviter ça, le bras est inclinable à volonté, mais alors deux des avantages qu'on a décrit deviennent des désavantages: 1) les accessoires fixés au tube se trouvent "à porte-à-faux", avec le barycentre pas sur la vertical du guide; 2) la platine n'est plus horizontale.

En quelque cas, le tube T est "à coude": même si l'axe optique da l'objectif est vertical, un prisme opportun permet d'incliner le tube T et l'oculaire: l'observation est confortable et la platine reste horizontale (fig. 97).

Platine, condensateur et porte-condensateur peuvent être de n'importe quel type. Même le revolver ne trouve pas des limitations spéciales. La microlampe vice versa doit être externe, indépendante du statif, à moins que dans quelque très petit modèle elle soit prévue à la place du miroir.

La limitation la plus forte sera dans les tubes porte-oculaires, difficilement bioculaires, et dans les tubes intermédiaires. Même les illuminateurs épiscopiques, les accessoires pour radiation polarisée, etc. trouvent place difficilement sur ces statifs (voir la figure à côté, un microscope polarisateur, produit Meopta). Il est par contre facile d'appliquer les accessoires pour le contraste de phase, le champ noir, la fluorescence, au moins en diascopie, etc.



Optiquement, un tube simple et droit comme celui de la fig. 96 a de toute façon les avantages liés à l'absence d'éléments optiques entre objectif et oculaire, comme décrit dans le § 24, sans compter l'absence de résidus d'aberrations que les systèmes intermédiaires peuvent toujours introduire.

Ce type de statif est en train de disparaître étant donné que les tubes à coude comme celui de la fig. 97 réunissent l'avantage de la vision avec l'axe inclinée et de la platine horizontale. À la faveur d'un tube droit vertical reste la possibilité d'appliquer une microcaméra ou autres accessoires: dans un statif comme celui de la fig. 97, pour appliquer la microcaméra, il faudra démonter le tube à coude et le remplacer avec un tube droit.

Dans les statif à goujon, la focalisation arrive en général en déplaçant le tube (T + C + R dans la fig. 96) par rapport au bras B. Les commandes de mise au point (voir le § 27.2.2) sont deux: **Ma** et **Mi** avec des boutons et des guides séparés. Le tube T peut être "télescopique", c'est-à-dire à longueur variable. Ceci permet de changer légèrement le grossissement, arrondir les "valeurs micrométriques" (§ 12.3) et corriger une épaisseur erronée de la lamelle (§ 13.2.3.3), sans recourir aux objectifs "à correction" (§ 13.2.3.2). Mais on a vu les inconvénients d'une déviation de la longueur du tube de la valeur nominale.

27.1.3 – Statif à colonne

Maintenant nous comparons la fig. 97 et la 106, d'un côté, avec la 102 de l'autre. Malgré l'apparente diversité, la structure fondamentale est la même: un bras recourbé, (2 dans la fig. 102) ou une colonne verticale (Co dans la fig. 97 et fig. 106), prolongée dans un bras horizontal (B dans la fig. 97 et fig. 106) est fixe par rapport à la base (Pi dans la fig. 97, 7 dans la fig. 102, fig. 106) de manière absolument rigide, d'habitude avec quatre grosses vis par-dessous. La platine est toujours horizontale, le tube porte-oculaires est toujours incliné, peut-être composé par le vrai tube sans coude, fixé à une pièce intermédiaire à coude comme dans la fig. 106.

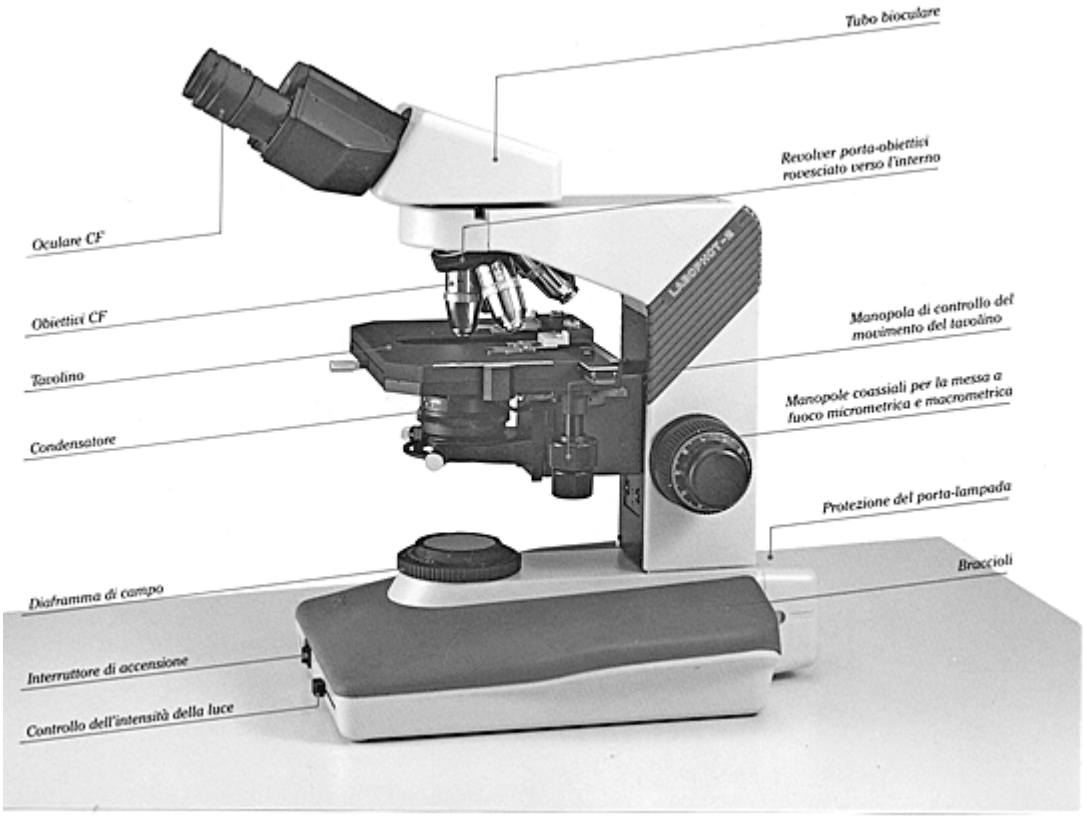


Fig. 106 (de: catalogue NIKON Inc., mod Labophot 2)

Sur le bras recourbé (2 dans la fig. 102) ou horizontal (B dans la fig. 97 et fig. 106) sont fixées toutes les autres parties du système formateur d'image: revolver (R), fixe (fig. 97 et 106) ou interchangeable (fig. 102 et 107), tube porte-oculaires, tubes intermédiaires, microcaméra, etc.

L'accouplement entre les tubes porte-oculaire (ou intermédiaires) et le bras est donné souvent par une queue d'aronde circulaire (voir le § 24).

Avec beaucoup de variantes, aujourd'hui le statif à colonne est le plus diffus. Dans celui de la fig. 106 on peut voir beaucoup de détails spéciaux absents dans celui de la fig. 97. Nous comparons les deux modèles.

Le tube est monoculaire dans la fig. 97, bioculaire dans la fig. 106, mais ces statifs acceptent d'habitude différents types de tube. Le revolver est tourné du côté de l'oculaire dans la fig. 97, du côté opposé dans l'autre modèle. Cette dernière solution facilite l'accessibilité à la préparation et à la platine. Il est bien vrai que le tube porte-oculaires peut être tourné du côté opposé, c'est-à-dire du bras (la queue d'aronde circulaire permet de le tourner de n'importe quel côté): en tel cas la platine serait plus accessible dans le modèle de la fig. 97. Mais cette solution n'est pas utilisée normalement étant donné que la visibilité de la platine serait de toute façon oblitérée par la colonne Co.

Dans la fig. 97 la platine est simple, fixe, mais il est normalement possible d'ajouter un guide-objets comme celui de la fig. 103. Dans la fig. 106 on voit un translateur classique avec les boutons coaxiaux révoltes en bas, sur le côté droit. On aperçoit aussi la pince porte-préparation.

Le condensateur C de la fig. 97 est simple, sans crémaillère pour la mise au point. On voit, proéminent à gauche, le levier de régulation du diaphragme. Dans la fig. 106 est peu visible le mouvement de focalisation du condensateur; on voit cependant deux vis, proéminentes à gauche, pour le centrage du même.

Sur le pied, on remarque dans la fig. 106 un diaphragme de champ, absent dans l'autre modèle. Dans les deux cas, le pied contient la microlampe. Dans la fig. 102 on voit le logement de la microlampe (6) et d'une lentille à grand champ (8), la régulation en hauteur du condensateur (3) et les deux étagères pour le condensateur (9) et pour la platine (10); le bout du bras (1) porte les trois pointes pour la queue d'aronde circulaire du tube, supérieurement, et la queue d'aronde linéaire du revolver, qui est interchangeable, inférieurement.

La mise au point est obtenue avec deux boutons coaxiaux dans la fig. 102 (4 et 5) et dans la fig. 106, pendant que dans la fig. 97 il existe un bouton seul (M) qui déroule les deux fonctions (pour les détails voir le § 27.2.2).

27.1.4 - Statif pour la recherche

Ce terme n'a pas un sens précis: il indique seulement les instruments le plus complexes et capables de fournir des performances pas standard, qu'on préfère dans le travail de recherche.

La variété des performances est obtenue par deux voies différentes:

- le statif est mécaniquement et optiquement conçu selon un schéma "modulaire" de façon à pouvoir accepter des accessoires de type différent et pour des exigences spéciales; en particulier, on peut installer et remplacer, avec des simples opérations, le tube porte-oculaires, les tubes accessoires intermédiaires et d'autres pour les différentes techniques de contraste, le revolver, modèles différents de platine et de condensateur, la microlampe, les porte-filtres, une microcaméra ou une caméra de télévision, etc.;
- le statif est de type "intégré" au sens qu'il porte incorporés d'une manière stable quelques accessoires qui sont normalement séparés: une ou plus microcaméra, illuminateur épiscopique, variateurs d'agrandissement, systèmes zoom, etc.; il peut y avoir aussi un jeu de miroirs qui permet l'échange rapide entre deux ou trois microlampes, fixées d'une manière stable au statif, parfois avec usage simultané (pour appliquer des techniques différentes en recouvrement comme le contraste de phase en diascopie et la fluorescence en épiscopie).

Il doit être remarqué que ces statifs de haut bord offrent une facilité d'emploi plus grande du normal, surtout pour leur structure composite et modulaire. Mais ils ne peuvent pas avoir, pour les raisons à son temps illustrées, un plus grand pouvoir résolutif, une plus grande définition et souvent non plus un plus grand champ image, à moins qu'on ne fasse pas la comparaison avec des

instruments économiques qui acceptent seulement certains types de systèmes optiques aux performances limitées. Dans la majorité des microscopes simples il est possible d'appliquer des systèmes optiques de genre différent, capables de fournir des images théoriquement avec la meilleure qualité possible, surtout à l'égard de résolution et définition. Il peut même arriver que, pour la plus grande complexité des systèmes optiques et des tubes intermédiaires, un statif de recherche comprenne un plus grand nombre d'éléments entre objectif et oculaire, donc quelque perte de définition et de contraste (plus grande contribution à la lumière diffuse, résidus d'aberrations).

En général, un statif de recherche possède d'habitude, comme accessoires à ajouter ou déjà incorporés, les éléments nécessaires pour certaines techniques spéciales, qu'en autres cas demandent l'usage d'un instrument à part, spécialement prévu: épiscopie, fluorescence, radiation polarisée, photographie, etc.

Fig. 107 (de: catalogue Nikon Inc., mod. Microphot, 2 CE MXVH 1, 1990)

Remarquer la microlampe externe (à droite en bas), les deux vis de centrage du condenseur, etc.

La structure générale d'un statif de recherche est souvent du type à colonne, déjà illustré. Dans la fig. 107 on voit un exemple typique. Voyons quelque détail.

Le tube porte-oculaires est fixe, pas tournant comme dans les exemples précédents; le bras horizontal est très massif étant donné qu'il ne sert pas seulement de support au revolver et aux oculaires, mais il s'agit d'un tube intermédiaire complexe qui contient différents accessoires comme la lentille d'Amici et des diviseurs de faisceau, et présente deux "sorties" ou "**portes**" supplémentaires sur la face supérieure. De telles sorties émergent des faisceaux secondaires, obtenu du faisceau principal au moyen de miroirs semi-réfléchissants ou miroirs mobiles, capables de fournir autant d'images finales. Sur les "sorties" on peut fixer une microcaméra, une caméra de télévision, ou, en alternative, un micro-photomètre, un analyseur d'image, etc. Sur la colonne on peut fixer simultanément deux différentes microlampes pour des buts différents. Entre revolver (interchangeable) et bras, on peut insérer des tubes intermédiaires pour les techniques spéciales: radiation polarisée, epi-fluorescence, épiscopie, etc. Dans le pied est logée une partie du système éclairant, avec diaphragme de champ, porte-filtres à boutons, etc. Les circuits électriques d'alimentation de la microlampe sont aussi contenus dans le pied. La microlampe même est par contre externe au pied, étant donné que sa dissipation de chaleur est excessive. La platine est tournante autour de l'axe optique et interchangeable. Même du condensateur il y a beaucoup de modèles pour les différentes applications. Sont possibles différentes "techniques de contraste", mais ça est commun dans les instruments d'un certain niveau.

27.1.5 – Statif renversé

Nous mentionnons à peine une catégorie de statifs pour des applications spéciales, dans lesquelles le parcours optique est renversé par rapport au normal.

Fig. 108 (de: catalogue NIKON Inc., mod. Diaphot, 2 NOUS MYRH 4, 1991)

Observons la fig. 108: la platine est bien visible, avec deux valets pour fixer la préparation. Au dessus, renversé vers le bas, c'est le condensateur (de phase); encore plus haut, une microlampe avec glissière porte-filtres. La préparation est éclairée donc par dessus.

Sous la platine, semi-caché, le revolver. Dessous le revolver, un jeu de prismes divise le faisceau formateur d'image en deux ou trois parties: l'une fournit le canal pour la vision (tube porte-oculaire incliné); une autre fournit l'image photographique (microcaméra en bas sur le plan médian); une troisième sortie, sur le côté gauche de l'instrument (pas visible dans la figure) permet la reprise cinématographique ou de télévision. Remarquez les boutons pour la commande de la platine (mouvements X – Y) avec un axe très long, à droite, qui permet de tenir le bras appuyé sur la table.

La mise au point s'applique au seul revolver (le plus souvent), ou à la platine.

Eh bien, dans un tel statif renversé tout le parcours optique procède du haut vers le bas, sauf pour les oculaires. L'objet est éclairé donc par-dessus et observé par-dessous. L'utilité de cette disposition reste dans la possibilité d'observer des préparations liquides (micro-cultures, micro-aquariums, bacs, boîtes de Petri[190], etc.) par-dessous, en mettant à point les éléments qui se déposent sur le fond. On parle en certains cas, un peu improprement, de "microscopes à plancton"[191] (voir aussi à cet égard le § 16.1).

Les principes de fonctionnement sont les mêmes des instruments normaux; change seulement la disposition géométrique générale. Normalement, en prévoyant l'observation de cellules ou micro-organismes vivants non pas colorés, sont prévues les techniques de contraste, comme le contraste de phase, le DIC, etc.

Le problème le plus grave de ces instruments est donné par le fait que l'objectif observe

[190] Cité dans le § 21.3.

[191] Du grec "plagkton" = errant; le terme indique l'ensemble des organismes, en général petits, qui vivent suspendus dans l'eau sans avoir les moyens de contrarier les courants du liquide, et sans rapports avec le fond. Le microscope renversé est dédié par contre à ceux qui se déposent sur le fond.

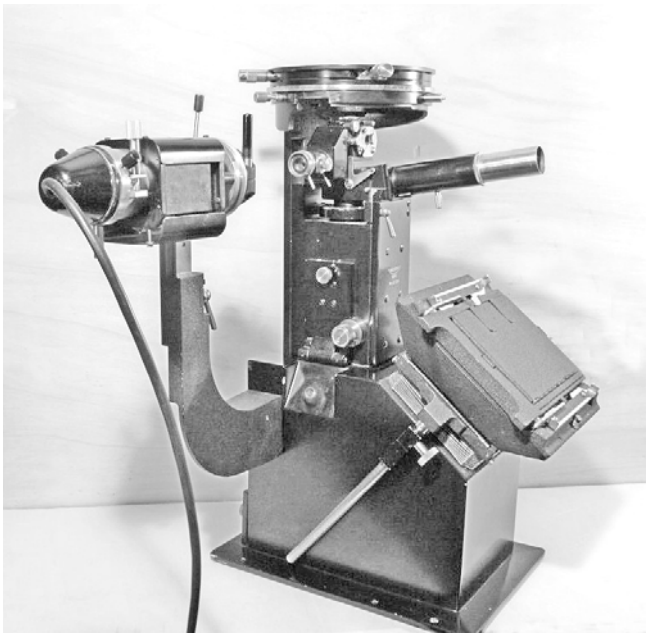
l'objet à travers le fond du récipient, bac ou autre. On peut utiliser des récipients construits exprès ou de la verrerie ordinaire de laboratoire.

Dans le premier cas, il s'agit en général de cylindres creux, même d'hauteur considérable, dont le fond est fermé avec des colles spéciales (adhésifs, bagues OR en gomme spéciale, etc.) au moyen d'une lame en verre aux caractéristiques optiques contrôlées: les surfaces de la lame doivent être planes et parallèles, le verre doit avoir un index préétabli et homogène, etc. Naturellement, sur toutes ces lames, spécialement sur la planéité des surfaces, il y a des tolérances que nous ne pouvons pas spécifier ici; mais ça suffit de dire que ces lames doivent avoir des caractéristiques comparables à celles d'une lamelle. En particulier, pour leur épaisseur vaut tout ce que on a expliqué dans les §§ 12.1 et 13.2.3.3; dans ces pages, on a spécifié lesquels sont les tolérances sur l'épaisseur en fonction de l'ouverture de l'objectif. Si le bac est fermé par une lame d'épaisseur 0,17 mm, sur le microscope renversé il est possible d'utiliser des objectifs normaux, calculés exprès pour des lamelles de telle épaisseur, donc de type normal. Souvent cependant on utilise des lames de grande épaisseur, et alors il faut des objectifs spéciaux. On rappelle de toute façon que, jusqu'aux ouvertures NA plus petites de 0,4, la tolérance sur la valeur de **d** est très élevée.

Les choses changent quand on utilise des récipients pris parmi la verrerie normale pour usage en laboratoire: le fond des récipients est souvent irrégulier quant'à l'épaisseur, planéité, index, etc. Au-delà à devoir travailler avec des objectifs calculés pour une épaisseur de verre très supérieure au normal, il faut se limiter aux petites ouvertures, et par suite aux petits agrandissements: la conscience de ces limitations de la part des praticiens et des vendeurs est souvent insuffisante.

Les microscopes renversés comme celui de la fig. 108 peuvent servir aussi pour l'observation de préparations avec "lames" et "lamelles" normales: il faut appuyer la préparation sur la platine avec la lamelle en bas et naturellement utiliser des objectifs calculés pour une lamelle normale (d = 0,17 mm). Impossible dans ce cas utiliser des préparations dans lesquelles entre porte-objets et lamelle il y a une couche liquide (préparations temporaires avec des cultures aqueuses, préparations fraiches dans lesquelles la résine n'est pas encore durcie, etc.) étant donné que le liquide coulerait.

Il y a aussi des **microscopes renversés** destinés aux observations exclusivement **épiscopiques**, c'est-à-dire pour des objets opaques comme roches, charbons, céramiques, et surtout alliages métalliques (**microscopes métallographiques**).



(voir la figure à côté, produit Reichert, Wien, mod. MeF1 – remarquer la platine en haut pour grands échantillons).

En tel cas, comme on déclara dans le § 19.2.5 et comme on expliquera mieux dans le § 30.1, l'éclairage arrive à travers l'objectif même; le système éclairant visible en haut dans la fig. 108 est inutile et il est remplacé par un "illuminateur" spécial qui se trouve entre objectif et oculaire.

L'avantage de cette disposition est que la surface de la platine est complètement libre et sur elle on peut appuyer des objets de grandes dimensions avec la surface polie à observer tournée en bas.

Comme on a expliqué, l'éclairage épiscopique déconseille l'usage de la lamelle pour lequel les objectifs doivent être du d type **d = 0**, à utiliser sans lamelle.

Il s'agit d'une technique particulière, avec des exigences différentes de celles des microscopes normaux. Le principe de fonctionnement est cependant toujours le même. Voir à cet égard le § 30.1.2.

27.2 – La STRUCTURE du STATIF

La structure mécanique général du statif doit obéir à certaines conditions requises qui en partie ont déjà été mentionnées, et en partie sont intuitives.

Toutes les parties mécaniques doivent posséder une rigidité le plus possible élevée, même si jamais suffisante; en tout cas, les déformations qu'elles subissent dans l'usage normal doivent être de type élastique, réversible, jamais plastique. L'absence de déformations irréversibles implique une bonne reprise des jeux même dans tous les accouplements.

Quant'à la rigidité, on observe un statif à colonne comme celui de la fig. 97 ou 106 ou 107: beaucoup des parties sont fixées et reposent avec leur poids sur l'extrémité du bras: revolver, tubes porte-oculaires ou intermédiaires, microcaméra éventuels, etc. Et il y a jusqu'ici à s'attendre seulement un fléchissement élastique, constant, du bras. Mais le bras est sujet aussi à différentes sollicitations rapidement variables: mouvements de l'obturateur photographique, actionnement d'organes différents (changeurs d'agrandissement, prismes etc.), et surtout contacts des oculaires avec la tête ou les mains de l'opérateur. Il en dérive des oscillations qui influent sur la distance objectif-objet et par suite sur la focalisation, et elles produisent aussi des mouvements latéraux de l'image, qui apparait nuancée («bougée»).

Pour minimiser ces instabilités de l'image, quelque constructeur avisé (Zeiss Jena, par ex.) a choisi une solution décisive: au bout supérieur de la colonne on établit deux bras superposés: l'inférieur porte le revolver seul, qui est la partie la plus sensible, et ne va pas sujet aux chocs, sauf que pour l'échange de l'objectif. Le bras supérieur par contre porte tout le reste, et il peut subir sans effet des pressions même assez fortes.

De la structure de la platine et de ses mouvements on a déjà parlé (§ 26).

Du porte-condensateur on a parlé dans les §§ 21.4 et 21.6. Beaucoup de problèmes mécaniques liés à la focalisation du condensateur sont identiques à ceux décrits en parlant des mouvements de la platine, et nous ne nous répéterons pas: rigidité (26.5.1), jeux (26.5.2), hystérésis (26.5.3), frictions (26.5.4), fin de course (26.5.5), vitesse (26.5.6).

27.2.1 – La base

La base ou **pied** est la partie qui donne appui et stabilité au microscope. Elle peut être très simple et ne pas contenir aucun composant (fig. 96) mais, le plus souvent, avec la colonne, elle peut contenir différentes parties, comme la microlampe ou au moins une partie du système éclairant (collecteur, diaphragme de champ, porte-filtres, lentille à grand champ, alimentateur électrique de la lampe, etc.).

À partir des premières formes, comme celle classique à fer de cheval de la fig. 96[192], aujourd'hui on est passé aux formes plus ou moins rectangulaires, douées de surfaces d'appui pour les mains, bien visibles dans les figures 106 et 107. La forme rectangulaire, en donnant logement au moins en partie au système éclairant, contient aussi le miroir qui renvoie vers le condensateur le faisceau éclairant. Sur la base on voit donc seulement une "fenêtre" pour la sortie de ce faisceau, fenêtre toujours fermée par une lame en verre pour éviter l'entrée de la poussière. Sur la fenêtre il peut y avoir un porte-filtres à une ou plus positions et dessous, parfois, le diaphragme de champ. Dans la figure 97 on voit une petite lampe cylindrique fixée directement à la base (L).

Quand par contre est prévue une microlampe extérieure, le pied peut porter le miroir rond classique. Dans la fig. 96 le miroir est fixé à la partie basse du bras B. Il sera possible en général

[192] La base à fer de cheval, très diffuse parmi les constructeurs européens, fut introduite par Oberhauser en 1848.

de réunir au pied de l'instrument la base d'une microlampe externe au moyen d'une pièce spéciale, douée d'adents opportuns.

Sauf le cas des instruments portatifs ou "de voyage", il est bien que le pied soit le plus possible lourd, soit pour des raisons de stabilité, que d'insensibilité aux vibrations.

La base du microscope doit être munie de petits "petons" en gomme ou feutre qui évitent le contact entre le métal de la base et la table. Mieux les petons en feutre, pour faciliter les déplacements de l'instrument sur le plan d'appui et pour mieux atténuer les vibrations. Beaucoup de constructeurs oublient ces détails.

27.2.2 – La mise au point

Celui-ci est certainement le mécanisme le plus important et le plus délicat du microscope; il change la distance entre objet et objectif, donc la position de l'image intermédiaire et de l'image finale; de lui dépend si l'image finale (virtuelle, pour l'observation, ou réelle, pour la photographie, la projection etc.) atteint le maximum de "netteté" permis par la définition (c'est-à-dire par la correction des aberrations) et de la résolution (c'est-à-dire par l'ouverture) de l'objectif.

Étant donné que la profondeur de foyer des objectifs les plus forts descend à fractions de micron, celle-ci doit être la "résolution" de la mise au point, c'est-à-dire le plus petit mouvement obtenu par un actionnement normal[193] d'un bouton. Ceci implique évidemment une basse vitesse (voir le § 26.5.6) et par suite une forte démultiplication. Une basse vitesse signifie cependant un mouvement lent: si un tour du bouton doit correspondre, par ex., à 100 ou 200 μ, pour un déplacement de 1 cm il faut 50 ou 100 rotations du bouton. Parfois, pour observer des objets très épais ou pour rendre rapidement accessible la zone de la préparation, il faut soulever l'objectif peut-être de quelques cm; et alors une vitesse de focalisation de 100μ par tour ne suffit pas. On réalise ainsi un double mouvement: la "**vis micrométrique**" ou "**mouvement lent**" ou "**focalisation fine**", avec une vitesse de 100 à 500μ par tour, et une "**vis macrométrique**" ou "**mouvement rapide**" ou "**grossier**" ("coarse" en anglais) avec une vitesse de beaucoup de millimètres par tour. Il y a rarement des mécanismes à trois stades (Leica, etc.). Dans les microscopes stéréoscopiques, il ya souvent le seul mouvement rapide. De toute façon, tous changent la distance entre objectif et objet.

Parfois, le mouvement de focalisation s'applique seulement au revolver (qui est séparé du tube) ou au tube qui le porte, comme dans la fig. 96: la macrométrique **Ma** déplace le tube C + T avec le revolver R par rapport au guide G; la micrométrique **Mi** déplace le guide G par rapport au bras B. La platine est immobile. Dans le statif de la fig. 102 la macrométrique déplace le bras 2 par rapport au bloc 11, solidaire avec la base, et elle déplace par suite le revolver; la micrométrique déplace le porte-platine 10. Dans les statifs de la fig. 97, 106 et 107 les deux mouvements agissent tous les deux sur la platine. Dans le statif renversé de la fig. 108, la mise au point agit sur le revolver, mais cette disposition se trouve aussi dans certains statif droits, comme déjà dit.

L'avantage de la platine immobile est double: faciliter l'application d'un micro-manipulateur ou d'accessoires lourds et permettre une longue course vers le haut de l'objectif et du bras, et éventuellement le démontage du bras; on peut observer ainsi des objets de grande épaisseur et libérer du tout le platine. L'avantage du bras immobile est de ne pas charger sur le mouvement de focalisation le poids de la microcaméra, des tubes intermédiaires, etc. mais la course du mouvement, de la platine, sera plus petite, parce qu'elle est limitée vers le bas par l'encombrement du groupe condensateur qui va au contact avec le pied, et vers le haut par l'objectif, fixe.

La micrométrique est donc très démultipliée et nous ne pouvons pas illustrer ici tous les mécanismes jusqu'à présent imaginés par les différents constructeurs: vis, cames, leviers, engrenages, systèmes à sphères en friction, etc. Nous pouvons rappeler cependant que la démultiplication pro-

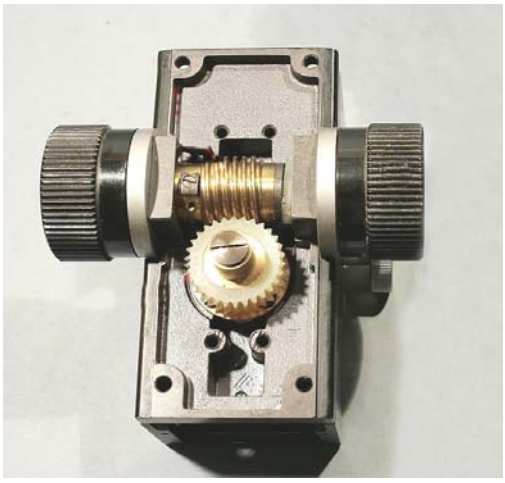
[193] Pour "normal" nous entendons ici une petite rotation d'un bouton, comme on peut obtenir en 1 - 2 secondes sans attention spéciale. Sur cette "normalité" influent le diamètre du bouton, sa friction, l'adresse et l'expérience de l'opérateur, etc.

voque un ralentissement du mouvement, mais aussi une augmentation de la force appliquée, comme il arrive dans un "levier favorable". Comme on a expliqué dans le § 26.5.5, quand le mouvement fin atteint la **fin-course**, ou l'objectif touche la préparation, la force exercée sur l'obstacle peut être très forte sans que l'utilisateur avertisse une augmentation sensible de la résistance offerte par le bouton. Telle force peut provoquer des dégâts à la structure mécanique ou la rupture de la préparation, peut-être avec décollement de la lentille frontale de l'objectif. On a vu en outre, toujours dans le § 26.5.5, comme la fin de course puisse être disposée de façon à éviter le contact entre objectif et préparation ou, si ceci est impossible à cause de la variabilité de l'épaisseur des préparations, comme le problème soit résolu avec les objectifs «télescopiques» (voir les §§ 19.1, 19.1.3 et 26.5.5). En particulier, la fin-course inférieure (moindre distance objet-objectif) doit être telle à permettre la focalisation des préparations plus minces (0,8 mm), sans cependant aller au-delà, afin de réduire les contacts entre objectif et préparation. D'autre part, la fin-course doit laisser une certaine marge pour tenir compte de l'épaisseur variable des préparations, avec le résultat que les objectifs les plus forts peuvent toujours toucher une préparation de grande épaisseur: voilà parce que les forts objectifs de qualité sont rendus toujours télescopiques (à ressort)(voir le § 19.1 et en outre le § 26.5.5). Mais on a aussi discuté de la manière d'éviter les dégâts possibles quand le mouvement atteint la fin-course. Il est toujours utile de toute façon que la fin-course inférieure soit réglable selon l'épaisseur des objets chaque fois utilisés.

La fin-course de la focalisation peut être commune au mouvement lent et au rapide, au moins quand la micrométrique agit comme démultiplication de la macrométrique; il peut arriver dans certains statif que, quand la fin de course micrométrique est atteinte, le force contraigne la macrométrique à tourner en sens inverse en déchargeant la force et en évitant les dégâts.

Quand les deux mouvements sont indépendants, aussi les fin-courses devront l'être.

La "course", c'est-à-dire le déplacement maximum effectué par la micrométrique, peut être seulement de 1 - 2 mm, et ceci arrive surtout quand ce mouvement est indépendant. Quand la micrométrique agit par contre comme démultiplication de la macrométrique, la course des deux mouvements peut être la même.



La course de la macrométrique peut suffire en général de quelque mm, mais en certains cas (objets épais, manipulations sur la préparation, etc.) il est bien qu'elle soit la plus ample possible.

Le mouvement macrométrique est obtenu d'habitude avec un mécanisme à pignon et crémaillère, avec des dents inclinées pour les raisons exposées dans le § 21.4. S'il est de bonne facture, il doit consentir la focalisation d'un objectifs jusqu'à 40:1 sans recours à la micrométrique. Les boutons "macro" et "micro" peuvent être indépendants, comme dans la fig. 96 (**Ma** et **Mi**) ou coaxiaux, comme dans la fig. 102 (4 et 5) 106, 107, 108[194].

Par contre, dans la fig. 97 il y a un bouton unique (M) qui déroule une double fonction: pour environ un tour, il se conduit comme une micrométrique mais, à la fin de cette rotation limitée, s'engrene un second mouvement qui agit comme macrométrique (voir la figure ci-dessus).

Le bouton macrométrique en général ne porte pas des graduations, mais la micrométrique, au moins d'un côté, est graduée, et chaque rainure correspond à un déplacement de 1 à 10μ. Le but de cette graduation est expliqué dans le § 12.3.

Près d'un des boutons macrométriques il y a souvent une bague ou un levier qui sert à régler la dureté de ce mouvement, la "friction" (voir le §26.5.4). En autres cas, la friction se règle en tournant en sens opposé les deux boutons. La friction doit être telle qu'elle ne provoque pas une perte PERMANENTE de la mise au point après un certain temps.

Quelque chose doit être dit à propos du sens des mouvements: il est spontané de s'attendre

[194] Les mouvements coaxiaux furent introduits par C. Zeiss en 1950.

que, en tournant un bouton avec la partie haute dirigée vers la platine, on ait un abaissement de l'objectif (ou une élévation de la platine); nous pouvons appeler ce sens de mouvement "direct" ou "physiologique"; un mouvement "inverse" peut créer souvent un trouble, mais ça arrive. Devant à un instrument inconnu, il est bien de faire une vérification pour éviter d'imposer à l'objectif un mouvement contraire à celui prévu et le faire écraser sur la préparation. Au moins on doit exiger que les deux mouvements aient le même sens.

On a à peine dit que la graduation de la micrométrique peut présenter des rainures correspondantes à un mouvement d'un ou plus microns. Mais la "résolution" du mouvement doit être inférieure à la moindre profondeur de champ (environ 0,6µ, voir le § 14), c'est-à-dire environ 0,1µ. Dans ce sens, pour résolution de 0,1µ nous entendons qu'il doit être possible de changer de 0,1µ la distance objet-objectif avec une rotation praticable de la micrométrique, de l'ordre de 1° ou peu moins.

En ce qui concerne l'**incohérence**, vaut tout ce qu'on a dit dans le § 26.5.3.

En ce qui concerne l'**hystérésis**, les mouvements de focalisation sont toujours verticaux et donc ils sont avantagés; en effet, le poids de la partie mobile (platine ou tube ou revolver) repose directement sur le mécanisme, parfois aidé par un ressort disposé exprès, et donc il peut assurer une complète reprise des jeux.

Une certaine attention va posée aussi sur le parallélisme entre la direction du mouvement et l'axe optique de l'objectif: la tolérance sur ce parallélisme est d'environ 5'; il est intuitif que, si ce parallélisme est faible, un mouvement axial de l'objectif par rapport à l'objet provoque aussi un mouvement transversal: pendant la focalisation on voit l'image qui se déplace latéralement. Si on devait révéler ce défaut dans un microscope, il faut rappeler cependant que la cause peut être une autre, et c'est-à-dire un centrage erroné du faisceau éclairant (condensateur, microlampe, ampoule, porte-filtres déplacé, etc.).

Il peut arriver, même à l'expert, de ne pas réussir à mettre au point avec un objectif fort; ceci peut arriver même avec une préparation qui avait été observée avec succès avec un objectif faible. Celles-ci sont les causes les plus communes:

- sur la frontale d'un objectif à sec s'est déposée une goutte d'huile d'immersion qui agit comme lentille convexe; ou, il peut y être resté attaché un fragment solide qui empêche l'approche entre objectif et préparation (fragments de lamelles, baume du Canada, etc.);
- la lamelle est trop épaisse ou trop de résine est restée entre objet et lamelle: il faut refaire la préparation;
- la préparation est renversé (seulement dans les microscopes renversés la lamelle doit rester en bas). Pour s'assurer de quelle côté se trouve la lamelle, on en cherche le bord avec la pointe d'une aiguille (pas avec le doigt qui l'enduirait). S'il s'agit d'un frottis sans lamelle, le côté qui porte l'objet est celui qui apparaît moins poli.

Avant de fermer ce chapitre sur les mécanismes de focalisation, il est bien rappeler certain variantes modernes (Leica, par ex.) basées sur des organes électroniques ou électro-mécaniques: la platine est déplacée par un petit moteur électrique, souvent du type «pas à pas» et cela est piloté par un circuit électronique. Le bouton de mise au point est unique et il n'agit pas sur des organes mécaniques, mais sur un circuit; avec commandes opportunes il est possible de changer entre d'amples limites la fin-course, la vitesse du mouvement (voilà parce qu'un bouton unique sert soit de micro- que de macro-métrique), etc. Il peut être présent un display qui fournit la position de la platine avec résolution jusqu'à 1µ. Avec ces variantes, on peut avoir une mesure digitale des déplacements, envoyer ces données à un ordinateur, etc. mais, naturellement, on augmente la complexité du dispositif, la fréquence des pannes, la difficulté de trouver certaines pièces de rechange électroniques ou électromécaniques spéciales, etc. Ce sans-gêne de l'électronique dans un champ traditionnellement confié à la mécanique porte une plus grande complexité des manœuvres, une plus petite fiabilité des instruments, surtout à long terme, des plus grandes difficultés dans l'entretien, etc.

27.2.3 – Le revolver

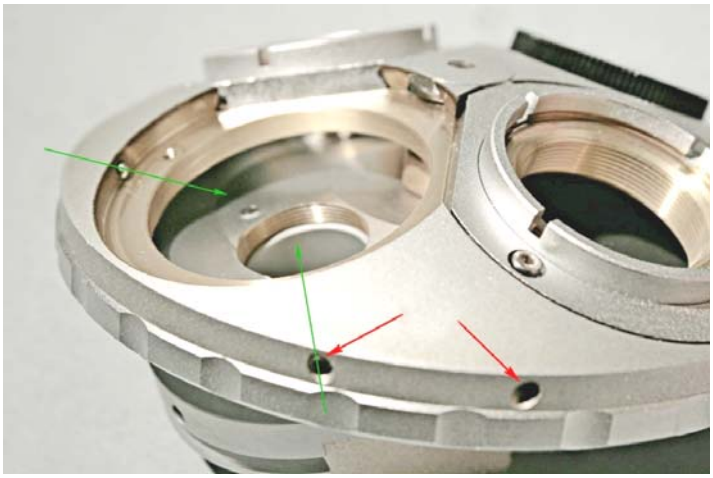
Il s'agit d'un organe qui est absent seulement dans les instruments très simples ou en cas spéciaux, comme dans le cas d'objectifs épiscopiques à champ noir qui peuvent avoir des grandes dimensions ou d'objectifs pour radiation polarisée, pour lesquels on préfère une fixation à coulisse.

Comme on a expliqué dans le § 19.1.1, le revolver est un dispositif pour l'échange rapide des objectifs. Il a la forme d'une calotte sphérique avec un nombre variable de trous taraudés (de deux à sept): chaque trou loge un objectif.

La fonction du revolver pourrait être déroulée aussi par un organe discoïdal plan; mais en tel cas les objectifs pas en usage effleureraient la platine et rendraient difficile l'accès à la préparation en facilitant les chocs entre les objectifs et les guide-objets ou la pince. La forme convexe comporte un axe de rotation central incliné par rapport à l'axe optique pour lequel les objectifs pas en usage se soulèvent par rapport à la platine. Cette disposition est très ancienne et, parmi toutes les parties du microscope, c'est celle qui, au cours du temps, est moins changée. Une des peu variantes consiste dans la commande à moteur, par boutons, plutôt qu'à la main.

Le diamètre du revolver est lié au nombre et au diamètre des objectifs qu'il doit accueillir, et naturellement au diamètre de la vis de fixation des objectifs mêmes (voir le § 19.1.1).

En outre, quand le centrage de chaque objectif est important (microscopes polarisateurs, etc.), au-delà des objectifs intrinsèquement centrables (§ 19.1.4.1), on utilise des revolvers à trous centrables dans lesquels les différents trous ne sont pas directement percés dans la calotte sphérique, mais dans des bagues qu'à leur tour sont centrables par rapport à la calotte. Pour chaque bague, c'est-à-dire pour chaque objectif, il y a deux vis de centrage, dirigées vers le centre de la bague, qui émergent sur le bord de la calotte et agissent contre un ressort interne; on les actionne d'habitude avec des clefs spéciales à trou carré. Le diamètre des bagues et le mécanisme de leur centrage influent à leur tour sur le diamètre du revolver.



Un exemple de revolver à trous centrables. La bague à gauche a été enlevée. Les flèches vertes indiquent l'axe des vis de centrage des objectifs; les flèches rouges montrent les petits trous à travers lesquels on peut regler le deux vis de centrage (deux vis sans tête pour chaque objectif).

Autres modifications à la structure de base du revolver viennent de certaines techniques de contraste comme le DIC (contraste interférentiel différentiel) pour lequel on prévoit quelques fois, au-dessus de chaque trou pour les objectifs, le logement pour petites glissières contenants des prismes biréfringents (prismes de Wollaston, § 30.5). En autres cas, surtout pour l'observation de circuits électroniques intégrés, on veut éviter que la poussière tombe sur l'objet; donc il faut réduire à la limite les manipulations de l'opérateur sur la platine, en particulier l'usage des mains pour tourner le revolver. Ainsi ont été introduits les revolvers motorisés cités plus haut.

Comme on a déjà expliqué, dans les normaux statifs à colonne, l'opérateur peut rester du côté de la colonne ou du côté opposé; naturellement, à condition que le tube porte-oculaires puisse être orienté des deux côtés. Dans un statif comme celui de la fig. 97, si l'opérateur se pose à droite, le

tube T sera tourné du même côté, le revolver ne contrarie pas la vision de la platine. Mais normalement l'observateur reste du côté opposée à la colonne; le tube est disposé du même côté, ou il ne peut pas être disposé autrement, comme il résulte dans la fig. 107, et alors on a la meilleure visibilité de la platine avec le revolver du côté de la colonne (fig. 106 et 107). Celle-ci devrait être la solution universelle. Mais il y a un inconvénient: dedans, sous ou sur le bras doivent être placés certains tubes intermédiaires comme les illuminateurs pour l'épiscopie, l'epi-fluorescence, etc. Si le revolver est tourné vers la colonne, le tube intermédiaire doit rester sur le bord le plus haut du revolver, c'est-à-dire plus en haut de ce qu'arriverait avec le revolver tourné en opposition à la colonne. Ceci augmente la distance entre objectif et éléments situés au-dessus, et il crée différents problèmes optiques. Dans ces cas, un revolver de ce dernier type est donc préférable. L'alternative peut être de disposer sur le revolver un jeu de prismes ou miroirs qui confèrent au chemin optique un parcours à gradin, capable de dépasser le bord supérieur du revolver (Zeiss). Dans les instruments «à conjuguée infinie», ce problème ne se présente pas parce que le chemin optique au dessus de l'objectif est «à l'infini».

Sur la construction mécanique du revolver il y aurait beaucoup à dire: il s'agit de l'organe qui détermine plus des autres la position de l'objectif, son centrage, son alignement, sa focalisation. En substance, le revolver est constitué par une partie discoïdale ou à calotte, fixée au tube ou au bras, et par une autre calotte, tournante sur la première, avec les trous taraudés pour les objectifs. L'accouplement entre les deux parties peut être confié à des surfaces de glissement (un pivot au centre, le bord des deux parties à la périphérie), mais en tel cas seront supérieurs les jeux et les frottements; on utilise autrement des pistes de roulement à sphères, soit sur le pivot que sur le bord, en réduisant les frottements et les jeux.

Comme tous les organes en mouvement, le revolver présente les problèmes déjà discutés des jeux, de la friction, de la rigidité. Le problème "vitesse" ne se pose pas en général étant donné qu'il n'y a pas de démultiplication. Le problème de l'hystérésis se présente avec ces caractères: quand on porte en position de travail un objectif donné en venant de droite ou de gauche, l'objectif devrait prendre la même position; avec les forts objectifs, cette condition est évidente mais elle n'est pas jamais parfaitement satisfaite: on verra un certain point de l'objet qui change position selon le sens de la dernière rotation du revolver.

Très important est par contre l'orientation de l'axe de rotation et de l'axe des trous (et par suite l'orientation des objectifs) par rapport à l'axe optique général du microscope. Si les deux axes, de l'objectif en position de travail et du microscope, ne coïncident pas et/ou ils ne sont pas parallèles on peut parler de **décentrage** ou, selon le cas, de **désalignement** de l'objectif. En autres mots, l'axe optique de l'objectif ne traverse pas le diaphragme de l'oculaire dans son centre, mais hors centre; il est comme si, dans un microscope idéal, l'oculaire eût été déplacé perpendiculairement à l'axe de l'objectif. Il en résulte que le champ de l'oculaire est déplacé latéralement par rapport au centre du champ de l'objectif.

Une première conséquence de ceci est que, au centre du champ visuel, peuvent apparaître les résidus d'aberrations extra-axiales de l'objectif; et une manière de révéler les désaxements en question est justement de chercher au centre du champ une trace de chromatique latérale: on observe un objet bien contrasté comme un réseau ou un micromètre objet ou une suspension de limage métallique. La méthode est sensible en utilisant des objectifs ou combinaisons peu corrigées de chromatique latérale, par ex. un objectif achromatique faible avec un oculaire compensateur.

Une seconde conséquence d'un désaxement du revolver est que, avec un objectif non plan, le point le plus bas de la surface de meilleure mise au point n'est pas au centre du champ mais désaxé: la zone au point du champ n'est pas centrée.

Une autre conséquence, plus évidente, de l'inclinaison erronée du revolver est que la pointe de l'objectif (dans laquelle se trouvent les lentilles dans les forts objectifs), est déplacée par rapport à l'axe, en supposant que la partie supérieure, et le trou taraudé dans le revolver, soit sur l'axe. Il est comme si l'objectif fût bien aligné et l'objet fût déplacé. Il en dérive que, pour tous les objectifs, l'image intermédiaire est déplacée latéralement dans le même sens, mais avec une différence: le déplacement de l'image est proportionnel à l'agrandissement de l'objectif. En pratique, en passant de l'objectif le plus faible à ceux toujours plus forts, on voit le centre de l'image qui se déplace de

plus en plus vers la périphérie. Pour révéler une faute d'inclinaison du revolver, la manière la plus simple est justement celle-ci: identifier une perte de parcentrage GRADUELLE en passant des objectifs faibles aux forts, toujours dans le même sens et en mesure croissante en fonction de l'agrandissement.

Avec un auto-collimateur, appuyé sur la surface de référence du tube porte-oculaires, et avec un miroir, appuyé chaque fois sur le bord des différents trous du revolver, il est possible d'exécuter une mesure précise. La faute acceptable dans l'inclinaison du revolver, basé sur le fondement qu'on ne doit pas sortir du champ visuel avec l'objectif le plus fort, est de 5'- 10'.

Il est important aussi le mécanisme de déclenchement qui détermine les positions de service du revolver, c'est-à-dire les positions de travail des objectifs. Une faute dans ces positions donne tout de suite une perte de parcentrage (voir le § 19.1.4); un jeu porte par contre à l'instabilité de l'image. Le mécanisme est donné en général par une pointe ou une petite sphère, suspendue en sens radial, qui frotte sur le bord, interne ou externe, du revolver et pénètre dans des encoches spéciales. De la position de ces encoches dépend la précision des positions d'arrêt du revolver. Il y a parfois une encoche unique sur un ressort fixe à forme de lame et beaucoup de petites sphères d'acier enchâssées sur le bord du revolver.

27.3 - PROBLÈMES MÉCANIQUES

Des problèmes mécaniques par rapport à la platine on a déjà parlé dans le § 26.5 et beaucoup de réflexions valent aussi pour le statif en général, pour lequel nous ne nous répéterons pas. Par ex., la stabilité de la mise au point n'est pas liée à la rigidité de la seule platine, mais de tout le statif.

On a aussi expliqué qu'aucun instrument n'est pas si rigide pour que le foyer et la position de l'image ne soient pas altérés par la pression normale de la main sur le bras, sur le revolver ou sur la platine, au moins aux agrandissements supérieurs. L'important est que cette pression, exercée sur n'importe quelle partie du microscope, sauf le cas d'une rotation des boutons, ne provoque jamais des altérations STABLES de la mise au point et de la position de l'image. Tout doit être réversible. En cas contraire, on doit penser aux frictions lâchées, aux jeux (peut-être dûs à l'usure), aux vis pas bien serrées, etc.

Mais il faut considérer aussi le régime dynamique du statif, c'est-à-dire lesquels sont les effets des **vibrations**, au-delà des effets des pressions stables.

En particulier, intéressent la composante axiale de la vibration, celle qui implique une variation de la distance entre objet et objectif, donc une variation de la mise au point, et la composante transversale, qui implique une oscillation latérale de l'image. Idéal serait que, dans les conditions normales d'usage, tous ces effets des vibrations restassent contenus dans les limites de la pénétration et de la résolution théorique du système, de façon à résulter inefficaces. Mais dans les cas les plus critiques (mesures, photographies à long temps de pose, etc.) il faudra se servir d'opportuns systèmes d'**amortissement** interposés entre la base du microscope et la table: ce sont les "**bases antivibratiles**" de structure mécanique très variée.

Les causes extérieures des vibrations sont plusieurs: trafic routier, fermeture de portes, pas sur le plancher, manipulation d'objets sur la table, etc. Le spectre de fréquence des oscillations issues de cette façon est normalement au-dessus de 30 Hz pour lequel le statif devrait être étudié pour présenter une fréquence de résonance propre inférieure à 30 Hz. Dans cette direction, le constructeur peut opérer sur les masses en jeu, sur leur forme et par suite sur leur élasticité ("bourrelets" ou nervures internes, etc.), sur les bras de levier, sur le choix des matériels, etc.

Il y a aussi des causes de vibrations internes (actionnement d'obturateurs photographiques, de platines ou revolvers motorisés, etc.), mais telles causes opèrent en général dans les temps morts de l'observation. En chaque cas on doit exiger qu'aucune oscillation ne provoque pas des variations PERMANENTES de la mise au point et de la position de l'image.

De la part de l'utilisateur, quelque adresse est possible: ne pas disposer le microscope au cen-

tre de la table mais près des pattes, où la flexibilité est plus petite; utiliser une table le plus possible lourde ou au moins lui appuyer au dessus une plaque de matériel lourd: il peut suffire un "panneau de particules" de 30 mm; éloigner les causes de vibrations, en particulier tous les appareils avec des masses en mouvement (centrifugeuses, agitateurs, etc.); disposer au dessous du microscope une feuille de feutre de quelques mm d'épaisseur, pas de gomme qui, en étant élastique, transmet bien les vibrations dans une ample gamme de fréquences. Il peut bien servir une pièce de "moquette".

27.4 - Les CENTRAGES

On a plusieurs fois expliqué que le microscope est un système complexe de lentilles sphériques centrées sur un axe optique commun, et ceci vaut même si l'axe optique est replié plusieurs fois par des surfaces spéculaires planes.

Toutes les lentilles et leurs supports doivent donc être centrés sur cet axe, avec des tolérances qui vont de quelque dixième de mm (oculaires) à quelques microns (objectifs forts). On a aussi expliqué que le **centrage** (position de tous les centres des lentilles sur le même axe) doit être joint avec l'**alignement** (parallélisme des axes optiques de tous les éléments).

Les problèmes constructifs liés à ces conditions sont énormes et ce n'est pas ici le lieu pour les traiter. Les peu opérations de centrage laissées à l'utilisateur (de la microlampe, du condensateur, etc.) ont déjà été décrites. D'autres opérations de centrage sont liées aux techniques spéciales (contraste de phase, contraste interférentiel, radiation polarisée, etc.) traitées dans le § 30.

Par contre, il faut de la part de l'opérateur beaucoup de précaution pour éviter des actions, qui font perdre le centrage. Telles opérations peuvent consister en chocs involontaires, vibrations pendant le transport, démontages imprudents, etc.

Il y a parfois des parties destinées à être démontées et remplacées par l'opérateur (tubes de tout genre, revolvers, condensateurs, etc.). La fixation de telles parties est conçue souvent de façon à assurer le centrage automatique de la pièce après la fixation: exemple typique la "queue d'aronde" circulaire qui appuie sur deux pointes fixes, capables de donner le positionnement correct par accouplement "cinématique." Mais parfois il est possible de fixer la pièce en position non correcte sans s'en apercevoir: les surfaces de référence des deux parties à serrer peuvent ne pas coïncider au moment dans lequel la troisième pointe mobile, celle qui assure le blocage, entre en prise.

Cependant, le cas le plus dangereux est celui des pièces dont le démontage n'est pas prévu de la part de l'utilisateur.

La fixation d'une pièce sur une autre peut être confiée à des mécanismes différents: pour les pièces annulaires ou cylindriques il peut y avoir un pas de vis sur la surface externe ou interne; ceci peut porter à des petites incertitudes au moment du serrage, mais sans trop de problèmes dans le cas des oculaires, des condensateurs, des microlampes, des lentilles de tube, etc. En tels cas, le démontage de la part de l'utilisateur ne crée pas de difficultés.

En autres cas, la fixation est confiée à quelque vis, au moins deux. Mais le trou des vis doit être toujours un peu plus grand des vis mêmes, et il y a toujours du jeu. Le démontage de telles parties est donc toujours cause de perte de centrage et il est à éviter. Dans le cas le plus heureux, les parties serrées par des vis sont portées en position correcte par des "**goupilles**" ou "**goujons**": il s'agit de barrettes métalliques cylindriques ou coniques qu'on introduit dans un trou de même diamètre qui traverse les deux pièces à fixer. Tels trous sont pratiqués avec des outils de précision (aléseurs) après que les deux parties ont été centrées et serrées par les vis. De telle manière, pour le démontage, on tire d'abord les goupilles et en suite les vis de serrage. Pour le remontage, on remet les pièces en position, on monte les vis sans les serrer, de façon à permettre quelque petit mouvement des pièces, on enfile les goupilles dans leur trou (cela résulte possible seulement quand les deux pièces sont poussé à la main dans la position correcte), et seulement alors on serre les vis. La présence des goupilles permet toujours de retrouver le centrage des parties après le démontage, mais leur installation demande du temps et beaucoup de constructeurs l'omettent.

Par suite, même si la tentation de démonter certaines parties, surtout aux fins du nettoyage, est irrésistible, il convient être très prudents ou remettre l'opération à du personnel expert.

D'ailleurs, le centrage complet d'un microscope ne peut pas être réalisé en général sans des outils spéciaux, construits sur mesure de chaque modèle particulier, réalisés par le constructeur pour son propre usage et ne pas mis en commerce. Ils sont indispensables pour disposer des références optique-mécaniques nécessaires sur lesquels centrer les différentes parties. Le technicien plein de bonne volonté peut parfois les réaliser avec un peu d'adresse et une vision claire du schéma général du système. Les pages qui précèdent pourraient être utiles dans ce sens. Voir aussi, dans ce site, les articles (en italien) n° 10, 20, 23, 27, 31, 36, 37 et 49.

27.5 – Le CHOIX du STATIF

Même ici, les considérations à faire seraient nombreuses. Mais le critère essentiel est celui de chercher l'instrument qui permet non seulement de résoudre les problèmes du moment, mais aussi d'appliquer les accessoires pour résoudre les problèmes futurs éventuels.

Il faut que l'acheteur projette et prévoie ses exigences présentes et futures, et ensuite il cerche l'instrument capable de les satisfaire avec le meilleur rapport performance-prix, en se méfiant des constructeurs sur lesquels il n'a pas des renseignements sûrs, et en se méfiant aussi des maisons plus connues pour lesquelles parfois on paie le nom plus que la qualité.

Maintenant, à propos de la capacité d'un statif de se prêter à différentes applications, les parcours suivis par les constructeurs sont essentiellement deux, citez déjà dans le § 27.1.4:

 Prévoir un statif modulaire compliqué, sur lequel il est possible d'appliquer un grand nombre d'accessoires convenables à réaliser des techniques spéciales les plus variées. Cette solution n'augmente pas seulement la complexité et le coût de l'instrument, mais elle le rend plus critique à l'égard des centrages, possibilité de démontage, etc. Un statif semblable est celui de la fig. 107.

 Projeter différents statif plus simples, plus économiques et plus stables, dans lesquels sont incorporés définitivement ("intégrés") certains accessoires spéciaux, spécifiquement prévus à une fin spéciale. Ceci rend plus économique l'instrument particulier et plus simple le passage d'une technique à l'autre, mais il oblige à changer d'instrument pour résoudre des problèmes spéciaux comme l'épiscopie, la radiation polarisée, la fluorescence etc. Un instrument pour usage spécifique peut être celui de la fig. 108.

La première solution, celle du statif modulaire "*factotum*" est la plus convenable dans les cas de programmes de travail pas encore bien définis. Mais il doit être dit qu'aussi les statifs de niveau modeste comme ceux de la fig. 97 et 106 acceptent en général les accessoires pour quelque technique spéciale: contraste de phase, champ noir, fluorescence, photographie, etc.

La solution des statifs intégrés "spécialisés" du second type sera à préférer par contre quand le travail à dérouler est bien défini et il reste tel pour long temps.

27.6 – Les CONTRÔLES et l'ENTRETIEN du STATIF

Nous avons déjà examiné différents aspects des parties mécaniques du microscope, leurs points faibles, les solutions adoptées, et le lecteur devrait déjà savoir lesquels sont les points qui méritent grande attention (jeux, hystérésis, cohérence, répétabileté, vitesse des mouvements, frictions, sensibilité et sûreté des fins de course, rigidité des supports, etc.).

En évitant les répétitions, nous pouvons ajouter ici quelque suggestion.

Les signes de l'usure se révèlent en général avec des jeux et de l'hystérésis et avec la friction insuffisante des mouvements, mais les mêmes symptômes dérivent d'un relâchement de certaines vis. Vice versa, un instrument peu ou point utilisé pour des longues périodes montrera souvent les mouvements durcis à cause de l'augmentation de la viscosité des graisses lubrifiantes. Sont peu les maisons (Wild, par ex.) qui utilisent des lubrifiants hautement stables dans le temps. Le durcis-

sement peut arriver au bloc total du mouvement et alors un utilisateur peu averti aura la tendence à forcer le mouvement pour le débloquer et à ce moment quelque chose doit se casser ou déformer. Parfois, quand le guide, la crémaillère, etc. sont aisément accessibles, comme il peut arriver pour beaucoup de condensateurs et platines, on peut tenter une intervention de pis-aller en déposant quelque goutte d'huile de vaseline ou pétrole "blanc" sur les guides ou les pivots, et en attendent quelque jour que le liquide pénètre dans le mécanisme[195]. Mais le remède souverain consiste à démonter tout, laver les pièces en essence ou pétrole et re-lubrifier les surfaces à glissement avec une bonne graisse pour roulement à billes, jamais avec de l'huile. Il peut arriver cependant que certaines parties (queues d'aronde linéaires, par ex.) puissent être démontées seulement en découvrant certaines vis qui apparaissent seulement dans une certaine position du guide. Pour le démontage il peut donc se rendre nécessaire un mouvement du guide bloqué, qui est justement ce qui peut provoquer des dégâts. Il ne reste pas que tenir au bain dans le pétrole les parties bloquées, même pour des semaines, et ensuite tenter le décollement avec quelque petit coup très sec.

Pour le nettoyage des lentilles, on a déjà donné des instructions dans le § 19.5.1. Pour le statif, utilisez un tissu ou papier doux, éventuellement humecté avec pétrole ou essence; l'alcool est dangereux pour certaines peintures et mastics.

L'ennemi principal du microscope c'est l'air, pour les raisons dites dans le § 19.5.1: elle porte en suspension de la poussière et des très fines gouttes de goudron. Le statif et les accessoires en conséquence doivent être toujours couverts dès qu'on en interrompe l'usage: un sachet de polythène va bien, de ceux utilisés pour les vêtements ou pour les aliments, pourvu qu'il soit bien propre et sans trous. Un tiroir ou une boîte ne suffisent pas tous seuls. Toujours pour réduire le dépôt d'aérosol sur les lentilles, il est hautement recommandé de ne pas fumer dans la même pièce où se trouvent des instruments d'optique. Pour éviter les effets de la corrosion, chaque agent chimique, surtout acide, doit être tenu loin du microscope, même si il est contenu dans un récipient fermé.

Les lentilles exposées à l'extérieur comme les oculaires, devraient être couvertes avec des capsules en plastique tendre. Les trous éventuels dans les tubes ou dans la base, qui sont utilisés pour l'introduction des glissières porte-filtres ou autres accessoires, seront toujours fermés avec les couvercles spéciaux ou avec un ruban adhésif. Les tubes en particulier et les "sorties" pour microcaméra, caméra de télévision, etc. doivent être tenu toujours bien fermés. Les trous du revolver ne pas occupés par un objectif doivent être fermés avec des bouchons en gomme. Si un oculaire est démonté de sa position, il doit être tout de suite remplacé avec un bouchon. Si on démonte un objectif, tout de suite le remettre dans l'étui spécial qui va toujours tenu fermé, même si vide. L'omission de ces simples précautions peut signifier, dans quelques ans, le ternissement complet des lentilles et un long travail de révision, que personne n'a envie de faire.

L'humidité peut se déposer sur l'instrument quand on le transporte d'une pièce froide à une chaude. Dans ce cas il doit être tenu couvert par le sac en plastique pour quelques heures jusqu'à quand il se porte en équilibre thermique avec le milieu. Dans les climats humides, l'humidité est dangereuse, non seulement pour l'oxydation des parties métalliques, mais pour la prolifération de champignons inférieurs ("moisissures", "fungus") à la surface des éléments en verre qui en deviennent entamés d'une manière stable. Pour éviter tels dégâts, il faut conserver le microscope dans une petite armoire fermé dans laquelle on peut mettre des substances fongicide; mais il peut suffire d'introduire une source modeste de chaleur (une ampoule de 40 W, par ex.) capable d'élever la température interne de quelque degré sur celle externe; on a ainsi une réduction draconienne de l'humidité relative à l'intérieur de la petite armoire.

Spécialement dans le cas de magasinage prolongé, l'usage de fongicides à l'intérieur de l'enveloppe est de toute façon utile; comme fongicide solide on peut conseiller le paraformaldéhyde en pilules ou en poussière; comme liquide on utilise le p-chlore-m-crésol dissous en alcool avec lequel on imbibe des rubans de carton ou d'autre matériel poreux. Quand les rubans perdent toute odeur elles doivent être renouvelées. Si le fongicide est mis à l'extérieur du sachet de couverture, le microscope doit être couvert avec du papier, toile ou autre matériel perméable aux gaz; si le fongicide est mis à l'intérieur du sachet, cela peut être constitué par un matériel plastique im-

[195] Le procès est facilité en mettant les parties dans un endroit tiède, près d'un radiateur, par ex.).

perméable.

27.7 – Les ACCESSOIRES SPÉCIAUX

Il est bien rappeler tout ce qu'on a dit au début du § 27.1 à propos de la variété des solutions techniques adoptées au cours de l'histoire de la microscopie. Comme pour le statif, même pour les accessoires dédiés à la solution de problèmes spéciaux, l'imagination des projeteurs et l'adresse des constructeurs sont stupéfiantes. Nombreux de ces accessoires sont liés aux techniques spéciales, qui rentrent dans le champ de la **microscopie spéciale**, traitées dans le § 30. Mais aussi en nous limitant à la **microscopie générale**, la variété des accessoires est presque sans limites et l'espace nous contraint à énumérer seulement les principaux, en les réunissant en groupes sur la base de la région du microscope dans laquelle ils sont insérés: du côté de l'oculaire, du tube, de l'objectif, de la platine, du condensateur, de la base.

27.7.1 – Côté oculaire

Beaucoup d'accessoires sont placés sur ou au lieu de l'oculaire. Dans cette catégorie on peut inclure les oculaires spéciaux pour la photographie décrits dans les §§ 20.6 et 20.7. Dans le 20.8 sont énumérés quelques types d'oculaires et instruments de mesure.

Certaines mesures (photométriques, spectre-photométriques, fluorimétriques) demandent cependant des véritables instruments à appliquer sur ou à la place du tube porte-oculaires. Le même on peut dire des systèmes photographiques et de la télévision; même les **analyseurs d'image** partent d'une reprise de télévision pour arriver à une conversion digitale de l'image et à son élaboration de la part d'un ordonnateur.

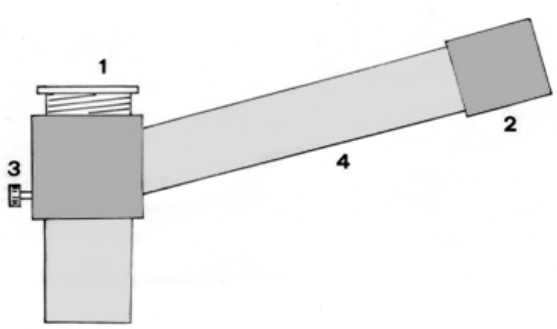
L'image finale du microscope, au-delà de la vision et de la reprise de télévision, peut servir à la **projection**. Même ici existent des accessoires, à mettre sur ou à la place de l'oculaire. Pour la projection murale, il est souvent suffisant un miroir disposé sur un oculaire normal. La formule (61) dans le § 18.12 permet de calculer l'agrandissement linéaire de l'oculaire (M_{ok}) en fonction du tirage **x'** (distance entre oculaire et écran). En multipliant M_{ok} par l'index de champ de l'oculaire (s') on obtient le diamètre de l'image projetée. En général il faut des oculaires spéciaux à longue focale (voir le § 20.7). Pour la projection à brève distance, pour peu d'observateurs, il faut une image plus petite (de 20 à 40 cm, par ex.). En tel cas, au-delà d'un miroir ou d'un prisme à réflexion totale, on peut utiliser un oculaire normal; comme écran, peut servir le plan de la table.

Mais on peut projeter l'image finale aussi par derrière, sur un écran translucide (verre dépoli ou semblable). On a en général un accessoire spécifique, un **viseur**, qui se pose à la place du tube porte-oculaires et est nommé aussi "**tube de démonstration**". Il s'agit d'une enveloppe enflée, avec la forme d'un demi-œuf (figure à côté) ou de tronc de pyramide, qui possède inférieurement une queue d'aronde ou autre fixation, identique à celle des autres tubes. Au dessus de la queue d'aronde il y a un système projectif, semblable à un oculaire photographique, avec un agrandissement en général de 10:1.

Encore au dessus, un petit miroir renvoie le faisceau vers le bout pointu du viseur, et ici un second miroir de quelques cm de diamètre renvoie le faisceau vers la partie dilatée, c'est-à-dire la base du tronc de pyramide ou du demi-œuf: on trouve ici un verre dépoli qui résulte ainsi

éclairé par l'intérieur[196].

Fig. 109



Le dépoli est accouplé d'habitude avec une lentille de Fresnel[197] (lentille mince à zones concentriques prismatiques qui simule une lentille épaisse, en général en matière plastique et par suite légère et incassable), qui fait oui que la luminosité apparie uniforme sur l'écran[198].

Le grain du dépoli cependant apparaît superposé à l'image et il est très fastidieux. Pour réduire cet inconvénient, les meilleurs viseurs sont munis d'un petit moteur, qui met en oscillation ou rotation rapide le dépoli: l'œil ainsi ne réussit plus à discerner le grain.

De plus ils existent des "**oculaires pour deux observateurs**" à forme de Y asymétrique (fig. 109), qui remplacent l'oculaire normal. Leur partie inférieure a le même diamètre de l'oculaire (23,2 mm d'habitude), et donc elle doit être insérée à la place de l'oculaire.

Vers le haut, il y a normalement un tube court et droit (1, dans la fig. 109), qui porte un système oculaire normal, par ex. 10×; le tube incliné latéral (4) porte au bout supérieur un autre système oculaire (2), d'habitude identique à celui en 1, et avec le même grossissement. La présence du long tube 4 est due à la nécessité de tenir à distance raisonnable les têtes des deux observateurs qui regardent en 1 et en 2 simultanément, mais elle comporte la nécessité d'un système de transport de l'image intermédiaire qui se forme un peu dessous le système 1. Il s'agira en général d'une lentille-relais (voir les §§ 2.6.2.3 et 25.2), qui a comme effet de renverser l'image intermédiaire. L'image visuel en 2 sera donc droite par rapport à l'objet mais renversée par rapport à l'image en 1.

Il va de soi que, entre le système 1 et le tube 4, il doit exister un miroir semi-réfléchissant capable de dédoubler le faisceau en deux.

Pour permettre la correction des différences de métropie entre deux observateurs ou des défauts d'amétropie sphérique pour un des deux, il faut qu'au moins un des oculaires sois réglable (voir le § 12.1, aussi pour les modalités de régulation).

Sur le corps du double oculaire est prévu en général un bouton mobile dans un plan horizontal (3 dans la fig. 109) qui correspond à une pointe interne placée dans le plan de l'image intermédiaire primaire. Telle pointe est donc vue simultanément par les deux observateurs. Avec cette pointe, un des deux, par ex. un professeur, peut indiquer un point quelconque de l'image, avec la certitude de rappeler l'attention de l'autre (par ex. un étudiant) sur le même point. Tels dispositifs trouvent application justement dans la didactique.

Les "**oculaires à dessiner**" se basent sur le principe de la "chambre claire" d'Abbe (fig. 110). Un oculaire normal (1 - 2 dans la figure) reçoit le faisceau qui forme l'image intermédiaire d'un objectif (ne pas représenté), le long du trajet 5; le faisceau émergent (6) peut être observé comme d'habitude. La "chambre claire" véritable se compose d'un miroir (3) qui réfléchit une partie du faisceau incident 5 vers un écran opaque qui l'absorbe (faisceau 10). Cependant l'observateur, au-delà de l'image microscopique (faisceau 5), reçoit par réflexion du semi-réfléchissant 3 le faisceau provenant du plan de la table 9, à travers le miroir 4 (faisceau 8 - 7 – 6). En autres mots, au-delà de l'objet du microscope, l'observateur voit le plan de la table, et éventuellement la feuille de papier et le crayon là disposés. Un ou plus filtres gris ou opportuns diaphragmes aident à comparer la luminosité des deux plans qui sont vus superposés. On peut ainsi détourer l'objet et le dessiner avec une espèce de calquage optique, avec la certitude d'en respecter les proportions.

---

[196] Le diamètre utile de tel écran est normalement de 15 - 20 cm. Il peut être même rectangulaire (Zeiss Jena).

[197] Cité dans le § 17.1.2.

[198] Elle projette une image réelle de la pupille de sortie du projectif dans l'oeil de l'observateur, qui devra donc prendre une position très précise. Avec cet engin, seulement un observateur à la fois peut voir l'image bien eclairée: celui qui met une de ses pupilles à la place correcte.

Dans les “oculaires à dessiner” les deux miroirs 3 et 4 sont incorporés dans la même structure, qui présente une petite fenêtre latérale pour le faisceau 8. En d’autres “chambres claires” le miroir 4 est plus grand et fixé à l’oculaire par un long bras en manière que le chemin 8 peut être vertical.

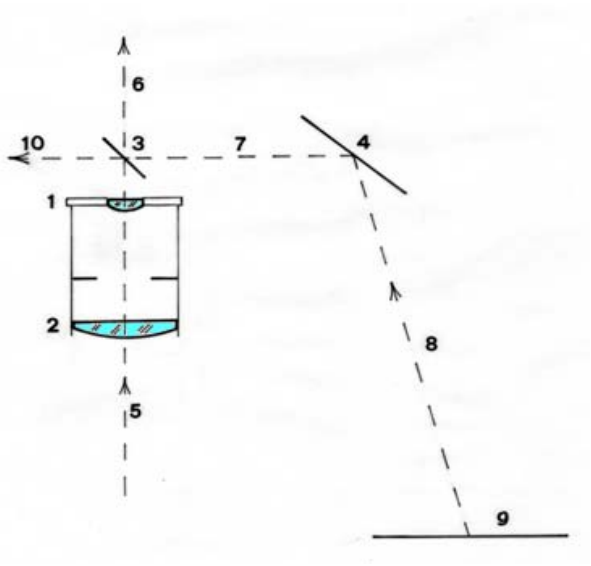


Fig. 110

Il est utile naturellement, que le plan de dessin 9 soit perpendiculaire au faisceau 8 pour éviter une altération de la perspective. Si le tube porte-oculaires est vertical et le chemin 7 est court, comme dans la fig. 110, il faut incliner le plan 9 avec un support spécial en bois.

Si l’axe de l’oculaire est incliné par rapport à la verticale, il faut que l’angle entre les axes 5 et 8 soit tel à rendre le chemin 8 perpendiculaire au plan 9, en éliminant peut-être le support incliné. Étant donné que l’angle d’inclinaison des tubes porte-oculaires n’est pas standardisé, on doit être très prudents en utilisant un oculaire à dessiner sur un statif d’un différent constructeur.

27.7.2 – Côté tube

Dans le § 25 on a déjà décrit différents types de **tubes intermédiaires**; nous pouvons ici ajouter que quelques fonctions exécutées par les oculaires spéciaux à peine décrits (oculaires pour deux observateurs, oculaires à dessiner, microphotomètres, par ex.) peuvent être déroulées par quelque tube intermédiaire.

Les **tubes pour deux observateurs** peuvent avoir une forme de T , avec un trait horizontal de forte longueur . Le trait vertical, très court, s’insère sur la même fixation où normalement est fixé le tube porte-oculaires. Aux deux bouts du tube horizontal on fixe deux tubes porte-oculaires, mono - ou bi-oculaires, pour deux observateurs. Même ici, pour compenser les éventuelles anisometropies entre les deux observateurs, il est bien qu’il existe un mécanisme qui permette une différente mise au point dans les deux canaux.

Dans la figure à côté: tube pour Leica DM LS.

Autres fois, le tube double est à forme de V, avec les deux tubes porte-oculaires sur des axes convergents (Zeiss Jena). Ils existent aussi des systèmes pour cinq ou six observateurs, mais la subdivision du faisceau est répétée plusieurs fois et le système apparaît “peu lumineux” (Olympus).

Soit dans les “tubes” que dans les “oculaires pour deux observateurs”, il peut y avoir un indicateur sous forme de pointe mobile, déjà cité à propos des oculaires, ou de fléchette lumineuse qui apparaît superposée à l’image.

Les tubes **à dessiner** sont basés encore sur le schéma de la chambre brillante de la fig. 110 et ils déroulent une fonction analogue, mais le semi-réfléchissant 3 se trouve dans un tube intermédiaire, au dessus de l'objectif. Le tube intermédiaire se prolonge latéralement dans un tube horizontal, qui porte le miroir 4. Si le tube horizontal est assez long, le chemin 8 peut être vertical et la feuille de dessin peut reposer sur le plan de la table.

Ces tubes à dessiner peuvent être très raffinés, en contenant des systèmes optiques pour mieux focaliser le plan du dessin et pour changer la luminosité (avec des diaphragmes ou des filtres gris), et en outre des systèmes zoom pour changer l'agrandissement de l'image du dessin vue dans les oculaires, etc.

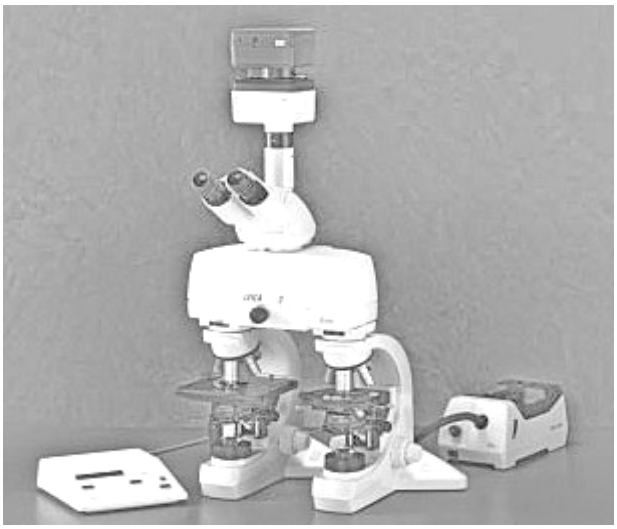
Sur le tube à dessin on doit poser quelque fois un tube porte-oculaires à part, si ce tube n'est pas déjà présent dans le bras, comme on voit ici à côté (Reichert, Polyvar Met).

Sur le plan du dessin il est possible de mettre aussi des échelles graduées, dessins, réseaux, silhouettes, etc. Telles silhouettes se voient superposée à l'objet et elles ont par suite les mêmes applications des micromètres oculaires (§§ 12.3 et 20.8), mais avec un avantage: au lieu de déplacer l'objet, pour le porter à coïncider avec le réseau oculaire, la quelle chose est très critique aux forts agrandissements, il est plus immédiat déplacer à la main une graduation sur le plan de la table.

Cette utilisation du tube à dessiner comme instrument pour des mesures géométriques sur l'objet est très peu diffuse, et c'est dommage étant donné que, surtout aux fins d'une comparaison, il est possible de construire chaque fois avec des normaux outils pour dessin les silhouettes de comparaison et les réseaux les plus utiles. En effet, telles silhouettes et dessins viennent vues à travers le tube à dessiner plus ou moins en grandeur nature et les imperfections d'un normal dessin à main libre ne nuisent pas. Évidemment, il est bien que la silhouette soit dessinée à l'encre blanc sur un carton noir pour ne pas créer un fastidieux "fond" de lumière diffuse.

Une espèce de tube intermédiaire est le "**tube de comparaison**" (ou "**oculaire de comparaison**"): il s'agit d'un tube horizontal qui porte inférieurement, à chacun des deux bouts, une fixation; les deux fixations doivent être introduites à la place des (ou dans les) tubes porte-oculaires de deux statifs placés côté à côté, ou ils sont fixés sur les deux bras, après avoir enlevé les deux tubes porte-oculaires (voir à côté).

En position centrale, vers le haut, on trouve un oculaire (ou un tube bioculaire) le champ duquel est divisé en deux parties égales par une ligne verticale: dans le demi-champ de droite on observe la moitié de l'image fournie par le microscope de droite, dans le demi-champ de gauche on voit moitié de l'image de l'autre instrument. La possibilité de voir simultanément, côté à côté, les images de deux objets différents est précieuse pour exécuter une comparaison; par ex. en criminalistique, entre les rayures de deux projectiles ou entre des cheveux dont on soupçonne une origine différente. (Statif Leica CF M2)



27.7.3 – Côté objectif

Il y a des accessoires qu'on peut mettre à la place de l'objectif, peut-être sur le revolver même.

Les **micro-durimètres** sont des dispositifs semblables à un objectif, avec la même fixation à vis ou à coulisse, et que, au lieu du système des lentilles, portent à l'extrémité une pointe de diamant à forme de pyramide à base carrée (Vickers) ou rhombique (Knoop) ou triangulaire (Berkovich). Avec la mise au point, ou avec un dispositif interne, la pointe est faite appuyer sur la surface de l'objet (métal, roche, etc.) avec une force déterminée, constante ou variable. Les dimensions de l'"**empreinte**", c'est-à-dire de la fossette creusée par la pointe dans l'échantillon, sont en fonction de la force appliquée, du temps d'application, de différents propriétés secondaires, mais surtout de la dureté de l'échantillon; et c'est celle-ci la grandeur à la mesure de laquelle est destiné chaque durimètre.

À ce point, il faut mesurer les dimensions de l'empreinte. On peut faire ça en tournant le revolver et en insérant un objectif opportun, en même temps à l'introduction d'un micromètre oculaire. Mais, en certains cas, la pyramide de diamant est fixée au centre de la surface externe de la lentille frontale de l'objectif: de cette manière il est possible d'exécuter en même temps soit l'empreinte que la mesure de ses dimensions.

Et encore, les **marqueurs** sont des dispositifs qu'on monte à la place de l'objectif et servent à retrouver la zone observée de la préparation.

Si, pendant l'exploration de l'objet, on relève un point particulièrement intéressant, qu'on désire par la suite retrouver ou indiquer avec certitude à une autre personne, il y a différents méthodes. Une d'elles est le relèvement des coordonnés orthogonales du point au moyen d'échelles gravées sur les guides de la platine à chariot ou des guide-objets (voir le § 26.2): la méthode fonctionne seulement si on reporte la préparation sur la même platine et avec la même orientation. Une autre méthode est celle des "**chercheurs anglais**" (préparations des dimensions d'une préparation normale, traversées par un réseau de petites cellules numérotées et aisément trouvables); après avoir identifié un point intéressant dans la préparation, on la tire sans toucher les boutons du translateur, on la substitue avec le chercheur et on relève le numéro de la cellule qui apparaît dans le champ visuel. Ensuite, ce numéro permettra de retrouver la cellule et par suite le point sélectionné de la préparation, même sur un autre instrument.

Plus simple est l'usage du **marqueur**: on le monte sur le revolver près de l'objectif en usage, on observe la préparation et on met au centre le point intéressant; sans plus déplacer la préparation, on insère le marqueur et on marque la lamelle sur le point intéressant; par la suite, avec un faible objectif, il sera facile de retrouver le marquage. Certains marqueurs portent une pointe de diamant excentrique, à excentricité variable, qui peut graver un petit cercle sur la lamelle; des autres portent trois pointes en fibre de verre, semblables aux stylo-feutres, qui dessinent trois points à triangle sur la lamelle même.

Toujours comme accessoires spéciaux, à mettre à la place de l'objectif, on peut considérer certains objectifs très faibles, avec un agrandissement de 1 ou 2×, qui permettent d'observer l'entière largeur d'un porte-objet normal, c'est-à-dire, 25 mm. On ne peut pas les comparer aux autres objectifs étant donné que, au moins dans certains cas, ils doivent travailler avec des systèmes de lentilles additionnelles qui doivent être insérés au dessus de l'objectif.

27.7.4 – Côté platine

Au-delà des différents types de platines décrits au § 26, il y a aussi des modèles spéciaux pour des buts particuliers.

Les "**cassettes**" sont des supports spéciaux pour porte-objets, qui n'ont pas la "pince" habi-

tuelle à deux bras (voir le § 26.2), mais un système à insertion rapide qui se déplace à coulisse sur un véritable translateur. La particularité de la "cassette" est d'appuyer la préparation vers le haut: c'est la surface supérieure de la préparation qui trouve une référence dans des guides spéciaux. De cette manière, les variations d'épaisseur des porte-objets n'influent pas sur la mise au point et, si l'objet est adhérant au porte-objet même, il se trouve automatiquement au point. En effet, certains statif avec des guide-objets à cassette sont dépourvus de vis macrométrique (Zeiss Jena, Zeiss W.). Ce système est précieux pour les examens de routine en biologie et médecine.

Les **platines chauffantes** sont des platines qui doivent remplacer celle normale, ou qui s'appliquent sur elle, et ont le but de réchauffer l'objet au-dessus de la température ambiante. Le maximum de température réalisable peut être de 70 - 80 °C, si ces accessoires sont à utiliser avec du matériel biologique, ou il peut arriver à 1.500 – 2.000 °C pour des échantillons métalliques, etc. Quand la température est élevée, l'objet doit être contenu dans une "**chambre**" fermé supérieurement par une "**fenêtre**" en matériel thermorésistant, par ex. silice, de pas trop petite épaisseur, en général 2 mm. L'objectif doit naturellement être très faible, ou corrigé pour un "couvre-objet" de cette épaisseur et de cet index; en plus sa distance de travail (§ 19.1.3) doit permettre d'introduire la "fenêtre" citée. Le but de la fenêtre est d'éviter la dissipation de chaleur, tout en permettant l'observation.

Il y a aussi des **platines refroidissantes** ou avec une double fonction. On obtient souvent le chauffage avec des résistances électriques incorporées; le refroidissement exploite souvent l'effet Peltier[199]. Dans d'autres cas on utilise la circulation de fluides chauds ou froids.

La notion de "chambre" fermé dans laquelle confiner l'objet porte à des spéciales **chambres à gaz** dans lesquelles l'objet vient immergé dans une atmosphère de composition voulue et avec le degré voulu d'humidité.

Pour l'observation de préparations pétrographiques en radiation polarisée, parfois on utilise une "**platine universelle**" dans laquelle la préparation peut être tournée autour de trois ou quatre axes différemment inclinés. Pour pouvoir être observée malgré son inclinaison variable, la préparation est renfermé entre deux hémisphères de verre ("**segments**"), qui sont produits en petites séries avec différent index, à choisir en relation à l'index de l'objet; l'objectif, en général faible, devra posséder une distance de travail supérieure au rayon des hémisphères (voir les §§ 19.3.4 et 30.7).

Pour l'observation systématique par champs contigus de grandes surfaces de la préparation ils existent des **platines motorisées** dans lesquelles les deux mouvements X et Y sont commandés par des moteurs électriques, et des **platines digitalisées** dans lesquelles les mouvements sont traduits en signaux électriques par des opportuns **codeurs**. Un circuit adéquat peut être programmé de façon à imposer à l'objet un parcours quelconque (à l'intérieur de certaines limites) avec n'importe quel vitesse ou avec des sauts progressifs avec une quelconque valeur du pas. Cet accessoire est très utilisé dans l'examen systématique de préparations cytologiques, comme en cytogénétique pour la recherche des "plaques métaphasiques", ou dans l'examen des grands «chips» dans la fabrication des circuits intégrés. Il y a des platines avec des mouvements jusqu'à 25 × 25 cm, de dimensions très supérieures au normal, qui demandent un statif spécial, soit pour leurs dimensions que pour leur poids, avec une commande manuelle ou motorisée.

27.7.5 – Côté condensateur

Au-delà du condensateur normal ou à grand champ, on peut trouver dessous la platine un changeur de condensateurs (voir le § 21.1.5) ou un condensateur avec un revolver discoïdal qui porte les différents prismes pour le contraste interférentiel différentiel (DIC, § 30.5), ou les différents diaphragmes annulaires pour le champ noir (§ 30.2) ou le contraste de phase (voir les §§ 21.8

[199] Jean Charles Athanase PELTIER, physicien français (1785-1815); il a découvert l'effet thermoélectrique qui porte son nom et qui consiste dans l'apparition d'une différence de température entre les joints d'un circuit constitué par deux métaux de nature différente, quand tel circuit est traversé par un courant électrique.

et 30.4). En quelque cas, le condensateur peut être englobé dans un accessoire unique avec le diaphragme de champ et quelque fois une microlampe (voir le condensateur à deux diaphragmes cité dans le § 21.1.6).

Pour l'usage en radiation polarisée, le condensateur porte souvent des organes accessoires comme le polarisateur (à filtre mince ou à prismes de calcite) et un "compensateur". Telles parties cependant peuvent être fixées aussi à la base.

Parfois, indépendants ou solidaires avec le condensateur, il y a des systèmes de porte-filtres à plusieurs positions. Ils existent aussi des supports inclinables pour filtres interférentiels (§ 23.2) et des supports pour filtres "gradués" de forme rectangulaire allongée, la transparence (ou la couleur) desquels varie le long de leur grande dimension.

Il y a aussi des illuminateurs, à placer au dessous du condensateur, contenants une lampe-éclair ("**flash**") pour la reprise photographique avec des brefs temps d'exposition d'objets en mouvement. Ces illuminateurs peuvent être complexes et contenir, au-delà du flash, d'habitude de type électronique, une microlampe avec une ampoule à incandescence pour exécuter avec éclairage constant les opérations préliminaires (cadrage, mise au point, mesure posemétrique, etc.).

27.7.6 – Côté base

Les accessoires particuliers réunis ou incorporés dans la base du microscope feront partie en général du système éclairant: alimentateurs électriques pour la microlampe ou pour le système photographique, porte-filtres multiples, lentilles à grand champ, diaphragme de champ, une ou plus microlampes, posemètre, etc.

Une microcaméra peut être incorporée, parfois dans les tubes intermédiaires, parfois dans la colonne. Rarement dans la base (microscopes renversés et métallographiques - voir la fig. 108 à la pag. 299 - 300).

Incorporée ou unie à la base il peut y avoir une "base anti-vibratile", c'est-à-dire un élément contenant des dispositifs d'amortissement qui réduisent la transmission des vibrations (voir le § 27.3). Comme on a expliqué, cet accessoire peut être important pour la photographie avec des longs temps d'exposition, étant donné qu'une photo peut résulter "bougée" même quand on ne voit pas des sources évidentes de vibrations dans les environs: ça suffit la fermeture d'une porte ou d'un tiroir ou le passage d'une personne dans la pièce.

Ils existent beaucoup de types de "**bases pour deux lampes**" ou "**bases éclairantes**". Naturellement il s'agit d'accessoires indépendants de la véritable "base" du microscope (§ 27.2.1), surtout de grandes boîtes planes sur lesquelles on appuie l'instrument. Dans ces bases éclairantes on trouve une, deux ou trois microlampes avec beaucoup d'accessoires (collecteur, diaphragme de champ, porte-filtres, lentilles à grand champ, peut-être interchangeables, etc.). La "base" peut porter une colonne pour la fixation d'une microlampe à forte dissipation, avec son cortège de miroirs, filtres, etc. Le but est de tenir loin du microscope les sources de chaleur. Un jeu de miroirs rabattables ou de semi-réfléchissants permet d'employer l'une ou l'autre ou simultanément les deux lampes; ceci peut être utile pour des observations "mixtes", par ex. en superposant l'image en contraste de phase avec celle en fluorescence.

Dans la "**base éclairante**" il y aura une fenêtre de laquelle émerge le faisceau éclairant qui arrive au condensateur du microscope à travers un trou spécial dans le pied de ce dernier. Naturellement, le microscope et la base éclairante doivent être fixés rigidement entre eux. À ceci pourvoient des étriers spéciaux ou des pinces.

Une ou deux microlampes peuvent être fixées à une espèce de boîte verticale, qui se fixe à son tour à la colonne du microscope. Dans telle boîte il y aura le jeu habituel de miroirs nécessaires à la commutation d'une microlampe à l'autre, et à la déviation du faisceau éclairant par-dessous, pour la diascopie, ou du haut, avec un tube spécial, pour l'épiscopie ou l'épifluorescence.

En général, on y trouve aussi les commandes pour le centrage et la mise au point du corps lumineux (voir la figure à la page suivante).

Per ex., le gros statif de la maison Reichert (Wien), le Polyvar-Met, peut fixer à la colonne un grande boite métallique contenante une lampe à vapeurs de mercure (200 W), avec tous le dispositifs pour la focalisation et le centrage de la lampe.
Au niveau du logo «POLYVAR», dans l'extremité superieure de la colonne, una lampe alogène de 100 W.

28 – La VISION MICROSCOPIQUE

La vision normale des objets qui nous entourent est effectuée en exploitant la radiation qu'ils réfléchissent ou diffusent. Les objets sont plongés dans l'air et ils sont éclairés par une source plus ou moins lointaine avec des faisceaux de rayons parallèles ou diffus dans la pièce. L'image des objets qui se construit dans nos yeux se base sur des phénomènes de réflexion et diffusion; on pourrait dire que normalement on observe en épiscopie.

À part les cas spéciaux comme la stéréo-microscopie et l'épiscopie, l'objet microscopique est par contre mince et transparent, et il est observé par transparence comme une diapositive, c'est-à-dire en diascopie. Au microscope en diascopie, en outre, l'objet ne peut pas être plongé dans l'air étant donné qu'en naîtraient des phénomènes de réflexion et réfraction si forts à cacher la structure fine de l'objet même. Ce dernier va donc immergé dans un liquide (liquide de culture, par ex.) ou dans une résine liquide qui peut ensuite même solidifier.

Et encore: la vision normale arrive avec les deux yeux, qui observent l'objet d'un point de vue différent et ils en construisent une image différente. On a une vision stéréoscopique binoculaire et les deux "axes visuels" de nos yeux convergent vers l'objet que nous fixons; ceci nous donne la sensation du relief des objets (voir le chapitre suivant).

L'accommodation nous permet en plus de focaliser l'image d'objets à différente distance et elle nous aide dans la perception du relief.

La vision microscopique n'est pas au contraire jamais stéréoscopique (sauf justement le cas du microscope stéréoscopique), étant donné que les deux images éventuelles fournies par les tubes bioculaires sont identiques et elles ne peuvent pas donner la sensation du relief. Non plus l'exploitation du pouvoir d'accommodation nous aide; l'œil en effet dans l'observation microscopique correcte doit fixer une image à l'infini et il n'y a pas aucun avantage à tirer de l'accommodation: étant donnée la courte focale totale du microscope, la plus grande variation de l'accommodation de l'œil porte à des déplacements négligeables du plan de meilleur foyer. Dans les tubes bioculaires en outre les axes optiques des deux oculaires sont normalement parallèles et il n'y pas de place pour la convergence des yeux.

Alors, pour "lire" l'objet au microscope dans la troisième dimension il n'y a pas autre moyen que manœuvrer la vis micrométrique; on obtiendra ainsi la vision successive de plans parallèles contigus dans l'objet. Si on voit au point seulement un plan à la fois dans l'objet, on reconstruit mentalement son développement en profondeur, en fondant dans notre cerveau les images des plans successivement mis au point.

Aujourd'hui, la photographie digitale et l'élaboration électronique permettent de fondre dans une seule image différentes photos prises à différente profondeur, de façon à faire apparaître complètement au point un objet avec n'importe quel relief. Ils existent à ce but differents programmes.

Dans les objets transparents vivement colorés et contrastés l'absorption change d'un point à l'autre, et ces différences d'absorption provoquent des différences dans l'amplitude de la radiation qui traverse l'objet. Les objets colorés s'appellent donc "**objets d'amplitude**" et leur image est déterminée par leur transmission sélective, comme dans le cas d'une diapositive. Un objet d'amplitude idéale possède le même chemin optique en tous les points, c'est-à-dire la même épaisseur et le même index de réfraction (le chemin optique dans un objet en effet est donné par le produit de l'épaisseur traversée par la radiation, multipliée par l'index dans cette région de l'objet). Ce qui est différente c'est seulement la transmission T . L'observation d'un objet d'amplitude ne donne pas lieu en général à des fausses interprétations.

Il y a par contre des objets dans lesquels le pouvoir de transmission est constant d'un point à l'autre et en général plutôt élevé. Ce qui diffère est seulement le chemin optique, c'est-à-dire

l'épaisseur ou l'index ou les deux. Il peut s'agir d'objets transparents d'épaisseur variable ou d'objets transparents immergés dans un liquide de différent index. Ces objets ne donnent pas des différences d'un point à l'autre dans l'amplitude de la radiation qui les traverse en ayant une transmission uniforme; ils modifient seulement la phase, justement par leurs variations de chemin optique, qui se traduisent dans un différent retard de la radiation qui les traverse. Alors on parle de "**objets de phase**".

Les objets de phase n'ont pas de comparaison aisée dans la vie quotidienne et leur interprétation est moins spontanée et plus sujette à des erreurs. En microscopie, les objets de phase sont constitués en général par des micro-organismes ou cellules ne pas colorées, produits industriels transparents, produits chimiques et microcristaux, fibres textiles ne pas colorées, etc. plongé dans des liquides transparents de différent index.

L'image d'un objet de phase est créé par les radiations réfractées, réfléchies ou diffractées par l'objet, et en elle se produisent des contrastes difficilement interprétables, parce qu'ils ne sont pas liés à l'absorption de l'objet. Spécialement la diffraction crée sur les bords des objets certaines franges ou bordures claires et sombres qui n'ont pas de comparaison dans l'objet et qu'on appelle donc, avec un terme vague, "**artefacts**" (voir le § 18.1 et, dans ce site, l'art. n° 14, en italien).

À ces franges se superpose la "**ligne de Becke**", une bordure claire-sombre qui entoure les marges de l'objet transparent, et naît de phénomènes de réfraction et de réflexion totale sur les marges mêmes. Cette ligne change légèrement de dimensions (et donc porte à des erreurs dans la mesure du diamètre) et elle inverse le contraste, elle passe de claire à sombre ou vice versa, quand on retouche la mise au point; de toute façon, elle même est l'œuvre de phénomènes optiques à l'intérieur de l'instrument et elle ne reflète pas des structures réelles de l'objet. Un autre artefact.

Pour reconnaître la nature optique des artefacts on peut tâcher d'en changer l'aspect en changeant les conditions optiques du système: l'ouverture du condensateur, l'éclairement oblique, la longueur d'onde de la radiation employée, etc. La distance entre les franges de diffraction augmente, en particulier, quand diminue l'ouverture et augmente la longueur d'onde. Si les franges et les bordures correspondaient aux structures réelles de l'objet, leur aspect serait invariable.

Qu'il se traite de franges de diffraction ou de la ligne de Becke, le remède souverain reste de toute façon l'élargissement du diaphragme d'ouverture, qui les réduit toutes; naturellement, aux dépenses du contraste!

En particulier, dans les objets de phase l'aspect de l'image diffère beaucoup suivant que l'objet ait un index de réfraction plus grand ou plus petit du milieu environnant. En substance, l'objet se conduit comme une lentille convergente s'il a une forme enflée et il est plus réfringent que le milieu, et c'est ça le cas des globules de graisse sphéroïdaux suspendus dans l'eau, ou s'il est plus mince au centre et il est moins réfringent que le milieu. L'objet se conduit par contre comme une lentille divergente s'il est gonflé et moins réfringent du milieu, et c'est ça le cas des bulles d'air, ou s'il est creux et plus réfringent, comme il arrive pour les globules rouges humains au frais, plongés dans l'air ou l'eau. Étant donné que les petits objets ont en général une forme renflée, on peut dire qu'ils se conduisent comme des lentilles convergentes ou divergentes s'ils sont respectivement plus réfringents (ex. graisse), ou moins réfringents (ex. air), par rapport au milieu environnant (ex. eau).

Pour distinguer entre ces deux catégories d'objets, on observe une règle élémentaire de base, applicable avec quelque discernement à tous les cas spéciaux: un objet assimilable à une lentille convergente (enflé et plus réfringent) montre une zone centrale claire qui devient plus étroite en LEVANT l'objectif ou en baissant l'objet; un objet assimilable à une lentille divergente (enflé et moins réfringent) montre une zone centrale claire qui devient plus étroite en BAISSANT l'objectif.

Ces apparences s'expliquent aisément sur la base de phénomènes de réfraction et réflexion totale provoqués par la surface de l'objet qui sera reconductible à une lentille sphérique.

Même pour la **ligne de Becke** il existe une règle pratique: en changeant la mise au point, de façon à lever l'objectif, ou baisser l'objet, la ligne claire se déplace vers la partie à plus grand index de réfraction. Dans le cas de grains ou corpuscules immergés dans un liquide, le sens du déplacement de la ligne indique si le grain est plus ou moins réfringent du liquide; quand la ligne

disparaît, grain et liquide ont le même index. En remplaçant le liquide dans lequel plonge le grain jusqu' à obtenir la disparition de la ligne, il est ainsi possible de mesurer l'index de réfraction du grain, même si de moindres dimensions: en effet on mesure aisément l'index du liquide avec un réfractomètre ou on le connaît à priori. Cette méthode "de la disparition de la ligne de Becke" représente donc une technique pour la micro-réfractométrie[200].

Une autre différence entre observation normale et microscopique repose dans le fait que l'éclairage en transparence se fait communément en regardant en direction d'une source lointaine, c'est-à-dire avec des rayons plus ou moins parallèles ou diffus. Par contre en microscopie l'objet se trouve au sommet d'un faisceau éclairant conique à forte ouverture et cela modifie l'aspect de l'image.

En outre, même l'observation n'arrive pas avec une petite ouverture, comme en conditions normales: l'observation "à l'œil nu" est faite avec une pupille petite et lointaine (on ne peut pas regarder de moins de 250 mm de distance comme valeur conventionnelle, avec une pupille d'environ 2 mm de diamètre, c'est-à-dire avec une ouverture relative d'environ f# = 250/2. La pupille d'entrée du microscope, c'est-à-dire de l'objectif, reçoit par contre un cône de rayons à fort ou très forte ouverture; il est comme regarder l'objet simultanément de différents points de vue. Nous faisons un exemple: quand on regarde une petite boule à l'œil nu on observe en réalité avec chaque œil la projection d'un cercle maximum de la sphère, lequel donne assez bien la notion du diamètre de la sphère et les deux cercles maximum, observés par les deux yeux, sont de peu inclinés entre eux. Par contre, une petite boule sous l'objectif du microscope est vue avec des rayons d'inclinaison très différente, et on voit en réalité le recouvrement d'infinis cercles maximum différemment inclinés. Cette projection intégrale a donc un diamètre plus grand du cercle maximum et à la fin la sphère apparaît plus grande. Pour quantifier, une petite boule apparaît plus grande, avec une erreur en excès près de 50 % avec une ouverture d'objectif de l'ordre de 0,7.

Le microscope fournit donc une fausse perspective des objets, et tant plus que l'ouverture de l'objectif est plus grande.

Une autre considération va surtout sur les lois mécaniques qui s'appliquent au niveau d'objets microscopiques. Telles lois sont certainement les mêmes que nous connaissons dans notre expérience quotidienne au niveau macroscopique, mais la différente échelle des dimensions produit certainement des manifestations surprenantes. Nous faisons une paire d'exemples.

Quand on observe des très petits objets à l'œil nu, par ex. une pincée de sable ou de farine, personne n'a jamais vu les grains particuliers se remuer spontanément. Si nous observons par contre des fins grains au microscope (par ex. une goutte d'encre de chine très diluée dans l'eau ou les granulations cytoplasmatiques ou même les grains éventuels dans le suc cellulaire des vacuoles végétales) il ne sera pas difficile, avec un agrandissement moyen-fort, d'observer le mouvement continu, irrégulier et tremblotant des grains particuliers. Il s'agit des bien connus "mouvements Browniens"[201] dus au fait qu'un corps très petit ressent des chocs des molécules du liquide dans lequel il est suspendu, pas au sens qu'il ressent le choc d'une molécule particulière, mais il ressent la résultante occasionnellement pas nulle des chocs de nombreuses molécules qui se heurtent simultanément avec le grain même.

Une autre série de phénomènes mécaniques apparaît de manière inusuelle au microscope en vertu des rapports d'échelle. Voilà de quoi il s'agit en peu de mots: un très petit objet, en échelle microscopique, a des dimensions et par suite un volume et un poids parallèlement plus petit; s'il s'agit d'un animal par ex., même ses masses musculaires sont plus petites dans la même mesure. Étant donné que poids et masse musculaire (et par suite la force) sont tous les deux proportionnels au volume, même la longueur de natation, de saut, etc. est la même pour un animal grand et un petit; mais avec cette différence: si deux animaux, par ex. un chat et une puce sont les deux capables

[200] La sensibilité de la méthode augmente si on augmente le contraste dans l'image avec une des "techniques de contraste" comme le contraste de phase (§ 30.4): la précision peut dépasser le troisième chiffre décimal.

[201] Du nom du botaniste écossais Robert BROWN (1773 – 1858) qui les décrivit en détail pendant l'étude des tissus végétaux et du contenu de leurs cellules.

de sauter à un demi mètre d'hauteur, pour le chat cela signifie sauter pour trois fois son hauteur, pour la puce trois-cents fois au moins. Le fait même d'être plus petit confère au petit animal une "force" proportionnellement plus grande.

Et ainsi certains très petits insectes ont le même poids spécifique d'un chat, à peu près; mais un chat ne peut pas marcher sur le poil de l'eau sans couler, pendant que beaucoup d'insectes réussissent à courir et sauter sur le poil de l'eau, étant donné que leur poids devient insuffisant à interrompre la pellicule élastique qui se crée à la surface du liquide à cause de la "**tension superficielle**", c'est-à-dire de la cohésion entre les molécules.

DONC, LE FAIT MÊME QUE LE MICROSCOPE NOUS INTRODUIT DANS UN MONDE GÉOMÉTRIQUEMENT EN ÉCHELLE RÉDUITE, NOUS MONTRE UN COMPORTEMENT DE LA MATIÈRE TRÈS DIFFÉRENT DU NORMAL ET IL NOUS OBLIGE À VIVRE UNE NOUVELLE EXPÉRIENCE, À NOUS FORMER UNE NOUVELLE MANIÈRE D'OBSERVER ET DE COMPRENDRE LE MONDE.

29 - STÉRÉO - MICROSCOPIE

Dans le microscope “normal”, parfois nommé génériquement “biologique”, décrit jusqu’à présent, il y a seulement un objectif et une image unique de l’objet. Quand il y a deux tubes porte-oculaires, c’est-à-dire deux oculaires, portés par un tube bioculaire unique (§ 24.1 et fig. 98) il s’agit d’un faisceau unique, subdivisé en deux faisceaux identiques par une surface semi-réfléchissante plane (diagonal dans le prisme D de la fig. 98). Les deux oculaires, et les deux yeux de l’observateur, reçoivent ainsi deux images identiques.

On a aussi expliqué que les deux oculaires, dans ce cas, ont les axes optiques parallèles. Tout se déroule comme si un observateur emmétrope fixât sans “accommodation” un objet très lointain (en pratique, au moins quelque dizaine de mètres): les deux yeux forment la même image, selon deux axes visuels parallèles[202]. Dans ces conditions, la perception du relief n’est pas possible. Dans l’expérience quotidienne, notre système visuel et nerveux peut nous donner la sensation du relief, de la profondeur, de la “troisième dimension”, seulement si aux deux yeux parviennent deux images différentes du même objet, deux images reprises par deux points de vue différents[203]. Normalement, ceci arrive quand nous observons d’une distance de pas plus de quelque mètre des objets lointains: la distance entre nos yeux (de 55 à 75 mm, sauf exceptions) est suffisante pour que les images qui se forment à leur intérieur soient légèrement différentes; sauf le cas naturellement d’objets plans et perpendiculaires à l’axe visuel moyen, et pour des raisons évidentes.

Si puis nous observons un objet “tout près”, à la distance conventionnelle de 250 mm, au-delà à contracter le muscle ciliaire du cristallin et par suite à “mettre au point” l’œil sur la distance réduite (phénomène de l’“**accommodation**”), “nous **convergeons**”, c’est-à-dire nous utilisons les muscles oculomoteurs pour faire oui que “les deux axes visuels” de nos yeux se rencontrent sur le point “voisin” que nous sommes en train d’observer. Nos axes visuels ne sont pas plus parallèles et, pour un point à 250 mm de distance, ils se rencontrent avec un “**angle de stéréo**” d’environ 15° [204]. Justement cette diversité du point d’observation crée cette légère différence entre les deux images rétiniques à partir desquelles notre cerveau reconstruit la profondeur de l’objet. Celle-ci est la “**vision stéréoscopique**” (du grec “stereon” = solide, avec référence à l’observation d’objets solides, à trois dimensions). C’est celle-ci notre manière normale d’observer les objets relativement voisins, et nous pouvons maintenant comprendre quelle est la différence par respect à l’observation des objets lointains: diversité entre les deux images rétiniques, convergence, accommodation.

Maintenant, le pouvoir de l’“accommodation” permet d’observer un objet voisin et comme ça nous fait apparaître l’objet même sous un plus grand angle, c’est-à-dire nous le fait “voir plus grand”. La lentille de grossissement aide dans ce sens étant donné qu’elle permet d’observer de plus près encore l’objet et nous le montre sous un angle plus grand qu’à l’œil nu. Mais nous avons vu les limites de la lentille de grossissement (§ 1.2.1) qui nous donne de toute façon une vision monoculaire. En conséquence, l’idéal pour l’observation d’un petit objet serait de le tenir à 250 mm des yeux, le regarder avec les deux yeux pour avoir la perception du relief et, de cette distance, l’observer avec un “angle de stéréo” entre les axes visuels d’environ 15°, le tout cependant avec l’introduction, entre chaque œil et l’objet, d’un système d’agrandissement. En substance, ob-

---

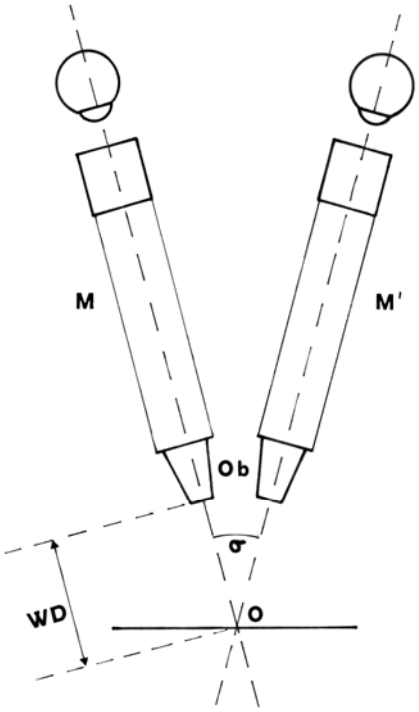
[202] En optique, l’idée de "parallèle" est relative, comme celle d’"infini" ou de "point"; on en a déjà parlé.

[203] Nous faisons abstraction des cas dans lesquels le relief des objets nous est indiqué par l’expérience et par la connaissance préventive de la forme et des dimensions de l’objet.

[204] En optique on appelle "axe visuel" de l’oeil la direction de fixation: nous fixons normalement un point-objet en déplaçant l’oeil en manière que l’image de ce point se forme sur la région la plus sensible, ou à la plus grande résolution, de la rétine ("fovea"). Entre l’axe visuel et l’axe optique de l’œil (axe de symétrie géométrique, comme on l’entend dans le cas des lentilles) il y a un angle d’environ 5°.

server l'objet comme on fait à l'œil nu, mais avec un microscope pour chaque œil, interposé entre œil et objet. Donc, deux microscopes avec les axes inclinés d'environ 15° entre eux, et qui se dirigent sur l'objet comme il est indiqué dans la fig. 111.

Fig. 111



Dans la figure, O est l'objet; **σ** (lettre **s** minuscule grecque ou "sigma") est l'angle de stéréo; M et M' sont les deux microscopes; Ob sont les objectifs.

Un instrument selon le schéma de la fig. 111 est un "microscope stéréoscopique" ou "**stéréo-microscope**". Souvent on utilise le terme "binoculaire", mais ceci est à éviter en pouvant engendrer la confusion avec le terme, de sens bien différent, "bioculaire" (voir le § 24.1)[205].

Nous avons ainsi un instrument qui, en principe, devrait donner une vision très naturelle, physiologique, justement pour la différente direction des deux axes visuels. Et il est ainsi. Mais il y a une forte limitation: solutions spéciales sauves, l'agrandissement est limité.

La raison est simple: si les deux objectifs (Ob, dans la fig. 111) doivent être éloigné de l'objet O d'une distance WD, d'un simple calcul trigonométrique on déduit que la distance entre les centres des lentilles frontales est égal à WD/4 (avec un angle **σ** = 15°, tan **σ** = 0,268 = 1 / 4 environ).

Un fort objectif peut avoir une WD = 0,2 mm, par ex., et ses lentilles frontales devraient avoir un diamètre pas supérieur à la distance entre les centres (0,2/4 = 0,05 mm environ) et un rayon inférieur évidemment à 0,025 mm, étant donné qu'il faut laisser un certain espace pour la monture des lentilles. Dans ces conditions, l'ouverture numérique serait, pour un objectif à sec, inférieure à tg α = 0,025 / 0,2 ≈ sen α [206] = sen 7,2° = 0,125. Alors le grossissement utile sera (formule (57) dans le § 18.12) inférieur à 125×. Si on considère des autres valeurs de WD, rien change étant donné que le rapport entre diamètre maximum de la lentille frontale et WD reste 1/4, en étant lié à l'angle de stéréo, et celle-là est la limite supérieure pour ouverture, résolution et agrandissement utile. En pratique, les exigences mécaniques et optiques portent à un maximum d'agrandissement d'environ 100× et, respectivement, 50× pour les deux types fondamentaux de stéréo-microscopes sous décrit. On en reparlera.

29.1 - Les CARACTÉRISTIQUES SAILLANTES

Nous pouvons alors définir un microscope stéréoscopique comme un microscope composé, double, à bas grossissement, formé par deux systèmes optiques identiques, unis rigidement entre eux de manière que les deux axes optiques forment un angle d'environ 15°. Le point axial du champ objet (en peu de mots, le centre de l'objet) doit être le même pour les deux systèmes.

Allons maintenant dans les détails.

On a à peine expliqué que le grossissement maximum est limité par l'encombrement des lentilles, c'est-à-dire par l'angle de stéréo et il ne change pas en fonction de la distance de travail WD. En conséquence, le constructeur en profitera et tâchera de réaliser la plus grande valeur pour WD et de faciliter la manipulation de l'objet: étant donné que l'agrandissement est petit,

[205] Les stéréo-microscopes, par égard pour une des leurs applications les plus communes, sont appelés aussi "pour minéralogie" ou, en pensant à l'étude anatomique d'organes ou de petits organismes, "à dissection".

[206] On a déclaré dans le § 2.2 que, pour des petits angles, il est possible dans beaucoup de cas assimiler sinus et tangente.

l'instrument se prête à observer des objets de grandes dimensions, de forme variée (insectes, fleurs, cristaux, etc.) et donc une forte distance de travail est essentielle. Une seconde caractéristique du stéréo-microscope est exactement la grande distance de travail, souvent autour de 8 - 10 cm.

Maintenant nous parlons de la profondeur de foyer ou **pénétration**. On déclara (voir le § 14, formule (38)) que telle pénétration augmente avec l'inverse du carré de l'ouverture. Étant donné que le diamètre de la lentille frontale, et par suite l'ouverture, de l'objectif d'un microscope stéréoscopique, est limité par l'impuissance de faire pénétrer entre eux les deux objectifs, la profondeur de foyer sera plus élevée que dans un objectif normal. Le constructeur tâchera d'augmenter le plus possible cette valeur, comme aussi la distance de travail, au détriment de l'ouverture et par suite de la résolution; UN STÉRÉOMICROSCOPE EN GÉNÉRAL AURA UNE RÉSOLUTION PLUS PETITE D'UN MICROSCOPE NORMAL, À ÉGALITÉ DE GROSSISSEMENT.

D'ailleurs, la tendance à augmenter la pénétration, même au détriment de la résolution, a un autre fondement, au-delà de la commodité d'usage: la perception du relief (stéréoscopie) arrive seulement jusqu'à ce que l'objet apparaisse raisonnablement net, c'est-à-dire à l'intérieur de la pénétration.

La grande distance de travail et la grande profondeur de foyer facilitent donc l'observation et la manipulation d'objets irréguliers, même de grandes dimensions, au fort relief. Dans ces conditions, très fréquentes dans le travail du naturaliste et dans la technologie, il est possible et très confortable de tenir l'objet entre les doigts, le tourner dans toutes les directions et en explorer la profondeur, c'est-à-dire le mettre au point plus en haut ou plus en bas, simplement en le levant ou en le baissant avec les mains. On rentre donc dans la notion d'observation "naturelle", en conditions très semblables à celles de la vision ordinaire à petite distance.

Mais il faut ici respecter une autre condition: la manipulation de l'objet, spécialement si elle est exécutée avec les mains, impose que l'image visuelle (celle qu'on observe avec les yeux, pas celle photographiée) soit droite par rapport à l'objet. Dans le microscope composé, on a expliqué en son temps, l'image intermédiaire est renversée par rapport à l'objet; l'oculaire fournit une image virtuelle, droite par rapport à celle intermédiaire, donc renversé par rapport à l'objet. Un microscope stéréoscopique doit prévoir un dispositif capable de retourner l'image de 180°, donc, le haut devient le bas, la droite devient la gauche, etc. Les solutions pratiques pour obtenir cette rotation sont variées. Rarement on utilise une lentille-relais, comme décrite dans le § 2.6.2.3 (fig. 12), et c'est dommage, étant donné que l'instrument devient de cette manière plus léger et compact[207]. Il s'agit presque toujours d'une "boîte" de miroirs ou prismes à réflexion totale qui, avec un jeu de réflexions multiples, obtiennent la rotation de l'image d'abord verticalement et puis horizontalement, ou vice versa. La "boîte" se trouve toujours entre objectif et oculaire. Nous en parlerons d'ici peu.

Une autre caractéristique de la microscopie stéréoscopique est donc d'offrir une image visuelle droite.

Mais revenons à la notion de "vision naturelle" ou "physiologique". Dans l'expérience normale, notre champ de vue est limité seulement par la structure de notre œil (en moyenne, notre champ visuel "binoculaire", commun aux deux yeux, est de 120° en horizontal, de 140° en vertical). Aucun oculaire ne peut donner un champ angulaire semblable: on a vu (§§ 7.1 et 20.1), quel est le champ réel des oculaires et lesquels sont les inconvénients d'un champ excessif. La tendance des constructeurs est d'offrir de toute façon un champ angulaire le plus ample possible, en recourant à deux astuces citées à son temps: augmenter l'index de champ **s'** et par suite aussi le diamètre extérieur de l'oculaire (souvent 30 mm); augmenter l'agrandissement V_{ok} de l'oculaire, en diminuant sa focale.

Ce dernier expédient, souvent utilisé par les incompétents pour forcer le bas grossissement du stéréomicroscope, porte cependant aisément à dépasser les limites de l'agrandissement utile, qui est bas dans ce cas, comme on a déjà dit. Un bon compromis entre champ angulaire et définition

[207] Il faut dire cependant que la lentille-relais augmente beaucoup la longueur des tubes, pour environ quatre fois sa focale (§ 2.6.2.3).

de l'image est un oculaire 10× avec **s'** = 20 - 25 mm (diamètre extérieur égal environ à 30 mm); au-delà de 10×, l'image stéréoscopique devient rapidement "peu nette", surtout pour les grossissements totaux supérieurs à 20×.

Quoi que se sois, l'ampleur du champ visuel du microscope stéréoscopique est un caractère à considérer positif, avec quelque réserve sur la définition et sur les aberrations aux marges du champ (contrôler toujours avec un réseau).

Nous pouvons alors résumer les caractères différentiels de la microscopie stéréoscopique de cette manière:

- vision binoculaire, avec deux objectifs et deux axes optiques inclinés entre eux d'un "angle de stéréo" d'environ 15°; donc "vision stéréoscopique";
- petit diamètre des lentilles de l'objectif et petite ouverture (par rapport aux objectifs normaux de même puissance), donc basse luminosité de l'image et basse résolution (souvent de l'ordre de 10μ); de ceci: bas grossissement total et bas grossissement utile, en général inférieur à 80×;
- en revanche, profondeur de foyer élevée et distance élevée de travail;
- image visuelle droite;
- grand champ angulaire des oculaires, qui sont souvent de diamètre supérieur au standard de 23,2 mm.

Voilà donc que le microscope stéréoscopique est complémentaire par rapport au normal (qui a la plus grande résolution mais la moindre distance de travail et la moindre pénétration); le travail qui peut être fait avec le premier n'est pas convenable pour le deuxième et vice versa.

Il doit être finalement remarqué que, dans les objectifs normaux, les plus faibles ont en général une plus grande résolution des forts, en considérant naturellement la résolution en lignes/mm dans l'image finale, et ceci parce que, tout compte fait, pour eux le rapport ouverture/grossissement (c'est-à-dire résolution/grossissement) est plus favorable (voir le § 18.12). Par contre, dans le stéréomicroscope, pour les raisons déjà dites, le maximum rapport entre diamètre de la lentille frontale et distance de travail est à peu près indépendant de la focale ou de l'agrandissement de l'objectif (limite donnée par l'angle de stéréo). Celui-ci est comme dire que la maximum ouverture est toujours environ la même, la NA ne dépasse pas en général 0,1, comme on a dit plus haut, et par suite la résolution dans le plan objet est elle aussi constante: suffisante aux bas agrandissements, insuffisante à ceux élevés.

Aussi la pénétration (formule (36)/(38)) est à peu près indépendante de l'agrandissement, au moins dans le membre "photographique", justement parce que l'ouverture est constante. On peut l'évaluer en un demi-millimètre en moyenne. Beaucoup plus dans l'observation, et dans ce cas elle sera plus grande aux petits grossissements.

29.2 – La "BOÎTE" des PRISMES

Les prismes utilisés pour le redressement de l'image, parfois remplacés par des miroirs (optiquement ça change peu[208]), sont constitués par des petits blocs en "verre optique" (avec des caractéristiques optiques contrôlées), limités par des surfaces "optiquement plans", c'est-à-dire avec des déviations du plan idéal contenues dans une fraction de micron.

Quelques-unes de leurs faces opèrent comme miroirs idéaux en tant que sur elles le faisceau grave de l'intérieur, en exploitant le phénomène de la **réflexion totale** (§§ 2.3.2 et 11). Parfois, telles surfaces sont rendues réfléchissantes avec une couche métallique (argent, aluminium, etc.) extérieurement protégée par une peinture noire, au but de les rendre insensibles à la poussière ou autre saleté; mais de cette manière la réflexion n'est plus totale et la réflectivité diminue.

Le système des prismes est contenu dans une boîte unique ou dans deux boîtes distinctes, interposées entre objectif et oculaire. Les solutions techniques choisies par les différents construc-

[208] Avec l'introduction des prismes, il y aura les influences habituelles sur les aberrations, sur l'avancement de l'image, etc., comme on a déclaré à propos des tubes bioculaires.

teurs pour la forme des prismes, leur monture mécanique et les dispositifs d'alignement sont assez variées. Nous donnons seulement quelque exemple sur le principe utilisé pour le renversement de l'image: voir la fig. 112.

En A est indiqué le classique couple de prismes à section de triangle rectangle isocèle, inventé par Porro[209] et aujourd'hui indiqué comme "1er système." Un prisme provoque le renversement haut-bas, un deuxième le renversement droite-gauche. Ce système à deux prismes est utilisé largement dans les jumelles "prismatiques", dans les oculaires "redresseurs" pour astronomie, etc. Les deux prismes peuvent être collés sur moitié des "faces hypoténuse", en devenant un bloc unique.

Avec quelque modification de ce schéma, on obtient le "prisme de Porro, 2ème système", constitué en général par deux prismes collés (fig. 112, B).

Moins encombrant c'est le prisme "à toit"; ("roof prism") ou "d'Amici"[210], toujours à section triangulaire isocèle dans lequel la face hypoténuse est remplacée par un couple de faces à 90° entre elles, disposées comme les pans d'un toit (fig. 112, C). Un seul prisme exécute le renversement complet. Le prisme d'Amici produit un fléchissement de l'axe de 90°. Pour avoir des angles plus petits, est fréquente la variante "de Schmidt"[211] dans laquelle la face d'entrée et celle de sortie (vertical et horizontale dans la fig. 112 C) ne sont plus inclinés entre elles de 90°, mais d'un angle plus petit et à l'intérieur du prisme on a quatre réflexions au lieu de deux (figures 112 D et E).

Dans la fig. 112 F, le prisme d'Abbe présente un moindre encombrement transversal et il exploite le "toit" plus deux réflexions internes; il est utilisé dans les jumelles ultralégères.

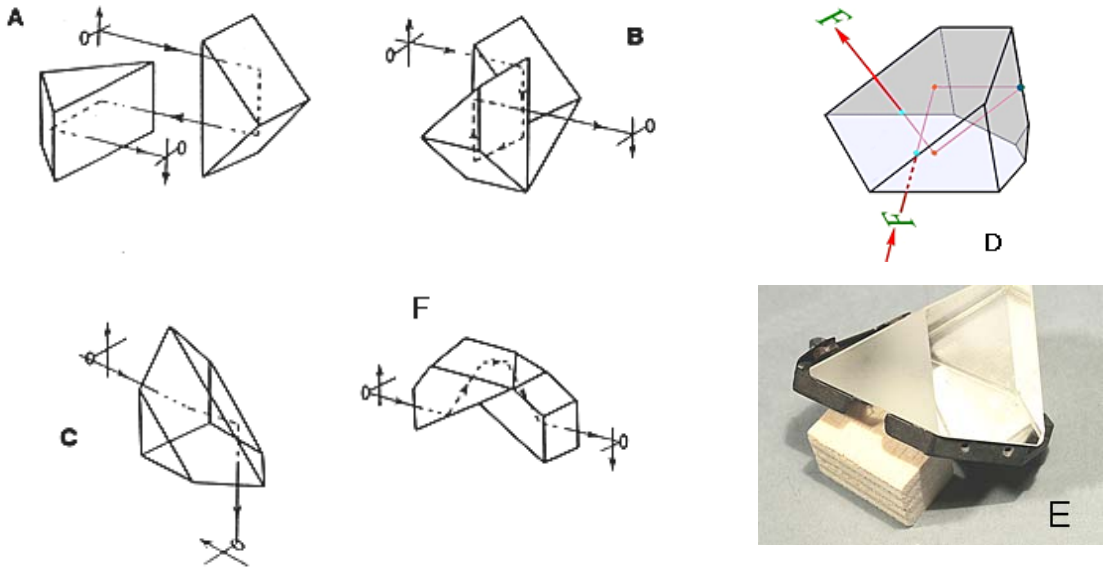


Fig. 112 (A, B, C et F de: W. G. Driscoll-"Handbook of optics", O.S.A.)

Maintenant, comme on a expliqué dans le § 24 (fig. 97) il est confortable d'avoir la platine porte-objet horizontale et les tubes porte-oculaires inclinés, par ex. de 45°. Ceci vaut aussi pour le microscope stéréoscopique. À ce but, au dessous des prismes redresseurs il peut y avoir un autre couple de prismes ou un prisme unique qui opère comme celui de la fig. 34 B (dans le § 11), ou bien les mêmes prismes redresseurs opèrent l'inclinaison de l'axe, comme celui de Schmidt à peine cité. La grande majorité des microscopes stéréoscopiques offre la platine horizontale et les oculaires inclinés.

[209] Ignazio PORRO (1801 – 1875), piémontais, topographe et constructeur d'instruments d'optique.

[210] Dejà cité dans le § 16.1.

[211] Bernhardt Voldemar SCHMIDT, opticien allemand (1879 – 1935).

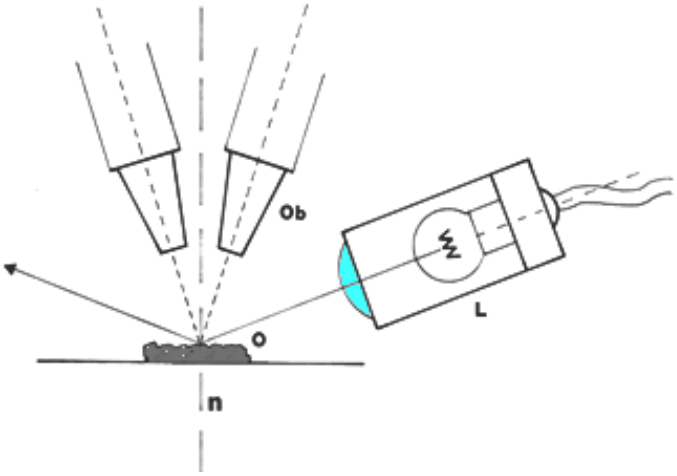
29.3 - FINS et APPLICATIONS

On a déjà expliqué pourquoi la distance de travail supérieure et la plus grande profondeur de foyer donnent au "stéréoscopique" la possibilité d'observer et manipuler des objets de grandes dimensions, de toute façon de forme accidentée et irrégulière, avec une forte épaisseur, un évident avantage par respect au microscope normal.

Parler d'objets grands et irréguliers signifie en général parler d'objets opaques, et donc le stéréoscopique est très utilisé souvent pour l'éclairage épiscopique (§ 8.1).

À part les cas spéciaux mentionnés dans les §§ 29.11.2 et 29.11.3 on utilise en général un éclairage épiscopique "à fond noir" ou "oblique" (fig. 113) dans lequel l'objet O est éclairé latéralement avec un faisceau plus ou moins collimé. On donne au faisceau éclairant produit par la lampe L une inclinaison assez forte pour que la radiation éventuellement réfléchie par un objet réfléchissant et plan, perpendiculaire à la bissectrice **n** de l'angle de stéréo, continue du côté opposé sans pénétrer dans les objectifs. Tel objet apparaît donc sombre, d'où le "fond noir", et seulement les irrégularités de sa surface apparaissent clairs étant donné qu'elles répandent la radiation dans toutes les directions et par suite aussi dans l'objectif.

Fig. 113



Mais l'objet est normalement irrégulier et diffusant, pour lequel on ne peut pas parler de structures claires sur un fond noir réfléchissant. C'est ça aussi le cas le plus commun dans l'observation à l'œil nu. Bien que pour ce type d'éclairage on utilise souvent des lampes spéciales équipées de collecteur (voir ici à côté), à grossissement moyen-bas peut suffire une commune lampe de table ou la lumière du jour, même la lumière diffuse du ciel à travers une fenêtre.

On réalise ainsi un éclairage épiscopique diffus, très semblable à tout ce qui arrive dans l'observation normale sans microscope.

À ce point, il est clair lesquels sont les objets les plus convenables à l'observation avec le microscope stéréoscopique: insectes, petits invertébrés et leurs parties, petites coquilles, sables, parasites, végétaux inférieurs, fleurs, graines, bourgeons, minéraux et roches, microfossiles, menuiseries mécaniques, composants électroniques, produit industriels, etc. Eh bien, ces objets peuvent être observés tels qu'ils sont, sans aucune préparation.

Comme il est connu, dans le microscope normal, soit pour la basse pénétration que pour la petite distance de travail, il faut que l'objet soit plan et/ou mince. Plan, s'il est opaque et il doit être observé en surface, en épiscopie; plan et mince s'il est transparent et il doit être observé en diascopie. Cela signifie que l'objet doit être aplani et poli si il est très compact (roches, charbons, métaux, céramiques, etc.), ou durci et sectionné en "tranches" minces, s'il est mou (tissus animaux ou végétaux, petits organismes, etc.). Les procédés de dégauchissage, lévigation ou section mince sont très longs et complexes.

Par contre, étant données les performances du stéréomicroscope, en général il n'est pas nécessaire d'exécuter aucune préparation sur l'objet: même si sa forme et sa surface sont très irrégulières, rien nous empêche de l'observer à l'état naturel, même à l'état vivant.

Ce simple discours fait comprendre l'utilité pratique et la simplicité d'usage du stéréomicroscope qui peut être mis en main à n'importe qui sans une préparation spécifique. Sont peu les objets qui ne puissent pas être mieux observés et connus par cet instrument, et sont peu les branches de la science et de la technique dans lesquelles il ne trouve pas d'application.

En outre, avec un stéréomicroscope on peut appliquer presque toutes les “techniques spéciales” de la microscopie comme la fluorescence, la radiation polarisée, le dessin, la photographie (avec quelques limites à l’égard de la résolution), la reprise de télévision.

Par contre, si l’objet à observer est plan (sections histologiques, échantillons métallographiques et pétrographiques polis, essais de presse sur papier, timbres, échantillons céramiques, etc.), il est évident que la vision stéréoscopique avec des axes inclinés est inutile: l’objet n’a pas de relief. L’usage du microscope stéréoscopique est justifié seulement avec des objets en relief et quand on cherche des agrandissements inférieurs à 20×, difficilement réalisables avec un microscope normal; mais résolution et définition seront en général inférieures, justement en comparaison à celles d’un microscope normal, à égalité d’agrandissement.

29.4 – PROBLÈMES PARTICULIERS

29.4.1 - Parcentralité

Dans le § 19.1.4 on a utilisé ce terme pour indiquer le centrage réciproque des champs image fournis par les différents objectifs montés sur un revolver et cela vaut aussi pour les éventuels revolvers du stéréomicroscope (voir plus loin). Mais nous entendons ici utiliser le même terme pour indiquer le centrage réciproque des deux images stéréoscopiques, comme on a fait dans le § 24.1.4 pour les tubes bioculaires: par rapport au diaphragme de champ visuel des deux oculaires, l’image de l’objet doit avoir la même position transversale, avec tolérance inférieure à 1/50 du diamètre du diaphragme même.

Même ici, les éléments qui influent sur ce parcentrage sont nombreux: position des tubes porte-oculaires, position et orientation des prismes, centrage des objectifs, etc. En outre, les deux axes optiques des deux oculaires devraient se rencontrer dans le centre du champ-objet (O, fig. 111 dans le § 29), ou au moins dans un point situé sur la bissectrice de l’angle de stéréo.

Mais, par rapport à un normal tube bioculaire, le stéréomicroscope présente une complication: la mise au point influe sur le centrage en direction transversale. Voilà pourquoi: dans la fig. 114 est schématisé un microscope stéréoscopique avec le deux objectifs Ob pointés et centrés sur le point de meilleur foyer O . Tout va bien. Maintenant nous supposons d’altérer la mise au point: le plan objet (PM) se déplace en PS, et il serait le même si il se déplaçait en sens opposé. Le centre du champ objet (O), qui d’abord était au point, et l’image duquel se trouvait au centre des deux champs visuels, se déplace en O’. Par rapport aux deux axes optiques, c’est-à-dire au centre des champs, O’ se trouve déplacé à gauche pour le canal gauche et à droite pour le canal droit. En autres mots, l’image est décentrée en direction opposée dans les deux oculaires. En actionnant la mise au point d’un stéréomicroscope et en fixant un point de l’objet (on observe mieux le phénomène si le point est près du bord droit ou gauche du champ) on verra que ce point se déplace latéralement.

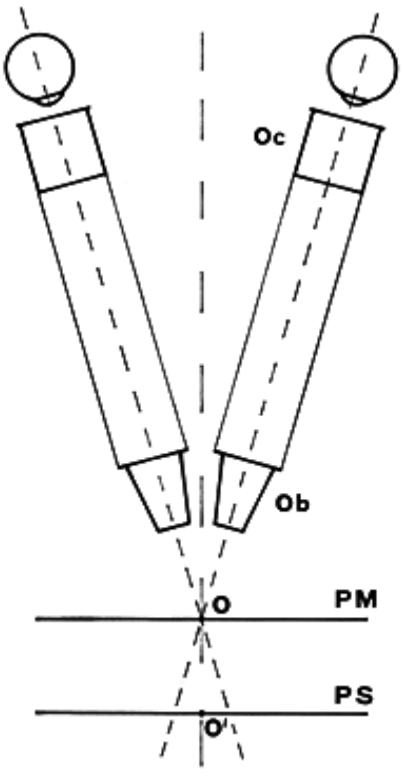


Fig. 114

Pour éviter ces pertes de centrage, il ne suffit pas cependant de soigner la mise au point. Il y a en effet différentes causes qui peuvent induire à des erreurs.

1) L’effet du tube (§ 4.2) pousse l’observateur à porter l’image finale virtuelle très voisine à l’œil; de cette manière on déplace axialement aussi l’image intermédiaire: la mise point du plan objet (O dans la fig. 114) n’est plus correcte.

2) Amétropies sphériques de l'observateur (myopie et hypermétropie): même avec l'œil ne pas "accommodé", un œil amétrope demande une image finale non pas à l'infini, et on retombe dans le cas précédent.

3) Les oculaires qui ont un premier foyer (et par suite un diaphragme de champ visuel DV et une image intermédiaire) en position non pas corrigée: en supposant que le vendeur ait équipé l'instrument avec les oculaires corrects (à vérifier !), la substitution des oculaires doit être faite avec beaucoup de sens critique. Ceci vaut aussi quand on substitue les oculaires afin de changer l'agrandissement total.

4) Tubes porte-oculaires réglables: comme dans les tubes bioculaires (§ 24.1.1), on prévoit qu'au moins un des tubes porte-oculaires du stéréomicroscope sois réglable en longueur de façon à changer l'hauteur de l'oculaire et par suite la position de l'image finale. Ceci a le but d'éviter qu'un œil amétrope doive altérer la mise au point pour voir net (voir le cas 2, à peine décrit) et qu'un observateur avec de l'aniso-metropie ne puisse pas voir au point simultanément avec les deux yeux.

En pratique, cependant, la régulation des tubes en relation à l'anisometropie et à l'amétropie est délicate; il faudrait chercher la meilleure mise au point en observant un objet bien plan et contrasté (un réseau, un micromètre objet, une lame couverte de poussière) et en mettant les lunettes "pour loin"; puis vérifier le tout en superposant à l'oculaire une petite longue-vue (avec un grossissement V = 3 - 6×) pour réduire l'effet de l'accommodation et rendre la régulation plus sensible. L'effet de la régulation sur le tube porte-oculaires cependant porte les mêmes effets d'une régulation du foyer pour laquelle, avec une faute dans une des deux régulations, on peut compenser une faute opposée dans l'autre: on voit net, mais la mise au point est incorrecte. Si en plus les deux tubes sont réglables, on ne sait pas lequel des deux il faut prendre comme référence, et on a déjà expliqué que l'éventuelle échelle gravée sur les tubes porte-oculaires a une valeur relative étant donné que l'effet de la régulation dépend de la focale de l'oculaire (voir le § 20.10).

Les instruments avec les deux tubes (ou les deux oculaires) réglables sont donc une source de fautes étant donné qu'ils peuvent porter à une position incorrecte de l'image intermédiaire. En espérant que le constructeur soit correct, il ne reste pas que mettre au point en regardant éventuellement avec un œil seul à travers un tube ou un oculaire réglable, TENU DANS LA POSITION DE "0" (tenir les lunettes "pour loin" en cas d'amétropies sphériques supérieures à 1 D); puis on regarde dans l'autre oculaire en évitant de remettre au point et on cherche la meilleure netteté en réglant seulement le tube relatif. Pour éviter des erreurs d'accommodation, l'usage de la petite longue-vue, sur cité, focalisée à l'infini, est toujours opportun.

En concluant, toutes les causes capables de déplacer de la position correcte l'image intermédiaire ou de changer la longueur mécanique Lm du tube (§ 10) peuvent produire un défaut de parcentralité entre les deux images, en direction transversale.

De la parcentralité entre les différents objectifs on parlera plus loin.

29.4.2 - Parfocalité

Tout ce qu'on a dit jusqu'à présent sur la parfocalité dans le microscope reste valide en stéréoscopie.

□□ Parfocalité entre les objectifs (voir le § 19.1.2)

Dans un microscope "normal" on demande que, quand on tourne le revolver, l'image reste au point assez à pouvoir reconnaître la structure de l'objet et comprendre de quel côté on doit retoucher la mise au point. Si l'image n'est pas reconnaissable, on risque d'agir sur la mise au point dans le sens incorrect, empirer les choses et perdre du temps.

Eh bien, dans un stéréomicroscope il peut y avoir un revolver avec deux ou plus couples d'objectifs (voir le § 29.5) ou, simplement, on substitue souvent le couple avec un autre. Dans d'autres cas, l'agrandissement se change avec des autres moyens (§§ 29.6 et 29.7); l'exigence reste de toute façon de ne pas perdre appréciablement le foyer au changer de l'agrandissement. À ce but sont nombreuses les exigences à lesquelles doit répondre le constructeur et le technicien de

l'entretien (position axiale opportune des systèmes de lentilles et des lentilles particulières dans les différents couples, etc.), mais l'utilisateur peut corriger ou provoquer une perte de parfocalité en changeant la longueur Lm des deux tubes, par ex. avec une régulation erronée des éventuels tubes porte-oculaires réglables[212]. Même ici, on peut espérer que la position de "0" indiquée par le constructeur corresponde à la longueur correcte du tube; telle longueur est en chaque cas, de toute façon, celle qui produit la meilleur parfocalité.

Quand l'objectif est du type à focale variable ou **pancratique** ("zoom") il peut tout seul donner une variation même forte de l'agrandissement; dans ce cas, la parfocalité implique que la mise au point ne varie pas appréciablement pendant la course entière du zoom. Il est sous-entendu qu'aussi le parcentrage doit se conserver.

□□ Parfocalité entre les oculaires (voir le § 24.1.1)

Celle-ci signifie que les deux oculaires doivent fournir une image virtuelle à l'infini et on peut par suite observer avec les deux yeux, emmétropes, détendus. Ceci peut arriver à quelques conditions: 1) la mise au point doit être correcte, au moins au centre du champ; 2) les oculaires doivent avoir le premier foyer à l'hauteur correcte et doivent être identiques; 3) la régulation des tubes porte-oculaires, et éventuellement des oculaires réglables, doit être faite sur le point "0"; et ici revient le discours sur l'anisometropie fait auparavant et au § 24.1.1; 4) la position des systèmes de lentilles et des prismes doit être identique dans les deux canaux. Ceci met des exigences sévères au moment du démontage et du réassemblage, comme le parcentrage.

29.4.3 - L'angle entre les axes

<

Nous entendons ici les axes optiques des deux oculaires.

À la suite de ce qu'on a dit dans le § 29 et à propos de la fig. 111, il semblerait que l'angle entre les axes des oculaires doive coïncider avec l'angle de stéréo σ. En effets, parfois cela arrive et en particulier, quand les tubes sont droits, pas à coude, les axes des oculaires sons d'habitude parallèles à ceux des objectifs.

Mais, entre objectif et oculaire, il y a toujours une boîte des prismes redresseurs (§ 29.2) et peut-être le prisme du "coude" qui incline l'axe optique. À ce point les choses se compliquent. Les axes de l'oculaire et de l'objectif de chaque côté peuvent être inclinés entre eux, en principe, dans n'importe quelle mesure, mais il faut aussi permettre la régulation de la distance interpupillaire (§ 24.1.3). Impossible décrire toutes les solutions techniques, mécaniques et optiques, imaginées par les projeteurs. Cependant, on n'a pas en général un mouvement des oculaires sur une glissière transversale, perpendiculaire à la bissectrice de l'angle formée par leurs axes, comme il arrive avec beaucoup de tubes bioculaires (§ 24.1.3). On a par contre un mouvement des oculaires autour d'un pivot, comme dans les tubes selon Siedentopf (fig. 100 dans le § 24.1.3) ou dans les jumelles, mais on ne peut pas avoir un pivot unique (les axes des deux oculaires doivent rester reliés aux axes des objectifs, qui ne sont pas parallèles); chaque oculaire aura un propre axe de rotation.

Alors, si l'axe mécanique de rotation est parallèle à l'axe optique de l'oculaire, on peut déplacer latéralement l'oculaire (et par suite changer la distance pupillaire) tout en restant l'axe optique parallèle à soi même (et à l'axe de rotation), comme il arrive dans une jumelle. Dans ce cas, l'angle entre les axes des oculaires ne change pas et il peut être égal à l'angle de stéréo.

Dans d'autres cas, l'axe de rotation des oculaires est incliné par rapport à leur axe optique (souvent de 45° dans les tubes à coude: d'habitude l'axe de rotation est vertical et l'axe des oculaires est incliné de 45°). Dans ces cas, quand les oculaires tournent, leur position azimutale change et l'angle entre eux peut changer dans des amples limites, en relation à la distance pupillaire établie. L'angle entre les axes des oculaires sera maximum quand la distance pupillaire est maximum et il peut s'annuler ou aussi s'inverser avec la moindre distance; on peut arriver au cas d'axes des oculaires qui deviennent divergents au lieu que convergents. L'angle de stéréo reste constant pour

[212] On rappelle tout ce qu'on a à peine dit à propos de l'effet de cette manoeuvre sur le centrage en direction horizontale!

les objectifs mais pas pour les oculaires. C'est évidemment une situation peu physiologique.

Mais il y a encore quelque chose: pendant la rotation des tubes porte-oculaires, l'orientation azimutale des deux images autour de leur axe peut rester constante, en certains cas, mais elle peut même changer: pendant la régulation de la distance entre les oculaires les deux images peuvent tourner autour de leur centre. Ceci correspond à un défaut de l'œil appelé **cycloforie**. Dans certaines limites, notre apparat visuel neutralise ces situations anomales, mais peuvent surgir différents symptômes de fatigue.

De toute façon, on peut dire que la vision stéréoscopique est plus critique que celle au microscope normal; l'observateur souvent ne dirige pas correctement les yeux, il "accommode" et par suite il ne met pas au point à la place correcte (perte de centrage latéral), il ne règle pas bien la distance pupillaire, il ne réussit pas à "fondre" psychiquement les deux images et il finit pour regarder avec un seul œil en perdant la performance essentielle de la vision stéréoscopique.

En plus, même la distance entre les yeux et les oculaires est plus critique au stéréomicroscope: dans un microscope normal, comme on a expliqué dans le § 8.8 et dans la fig.33, le fait de lever ou baisser l'œil par rapport à la position idéale (tout en restant la pupille sur l'axe) signifie seulement rétrécir le champ visuel. Par contre dans le microscope stéréoscopique, en changeant l'hauteur des yeux, la distance entre les axes optiques des deux oculaires, qui ne sont pas parallèles, varie et elle ne correspond plus à la distance des pupilles des yeux: en autres mots, toutes les fois que l'observateur lève ou baisse la tête il devrait retoucher la distance entre les oculaires. S'il ne le fait pas, il perd une des deux images et l'observation devient de nouveau monoculaire.

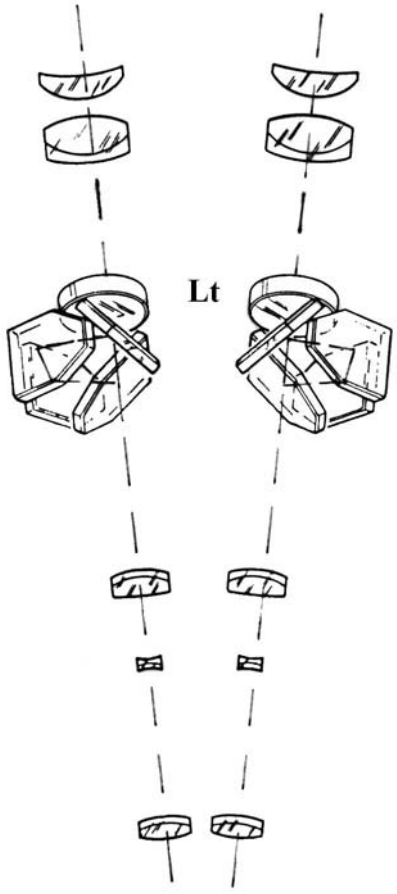


Fig. 115

29.5 – Le SCHÉMA de GREENOUGH

La fig. 111 illustre le schéma le plus intuitif et le plus logique du stéréomicroscope; il fut introduit, comme idée, par l'anglais F. H. Wenham (1861), il fut défini par le zoologiste américain Horatio S. Greenough (pron. Grìinou), en 1892, et construit par C. Zeiss à Jena en 1896-97.

Le schéma de la fig. 111 est plus défini dans la fig. 115, ici à côté (de: catalogue American Optical Corp, Buffalo, N.Y, SB 560 3/75).

Dans celle-ci on voit, du haut en bas, l'oculaire constitué par deux membres, une lentille intermédiaire ou "du tube" **Lt** (voir plus loin), un groupe de quatre miroirs pour le redressement de l'image, et finalement l'objectif, de trois membres.

Dans la fig. 116 on voit un instrument qui a maintenant une valeur historique n'étant plus produit depuis des décennies, après la disparition de la maison Koristka; ils existent cependant des modèles légers de production actuelle (à droite) qui lui ressemblent beaucoup. En haut à droite, dans l'illustration, on voit les deux oculaires; la boîte des prismes est double, identique à celle d'une normale jumelle, à part la convergence des axes; sous la boîte (à droite dans la figure à gauche), une petite lampe avec collecteur et, à gauche, le couple d'objectifs. Sur le plan de la table, deux couples d'objectifs interchangeables. Du support, un peu spécial, on dira plus loin.

À droite, dans la fig. 116, un instrument plus moderne (Euromex); sur la table, deux différents couples d'objectifs. Encore, la boîte des prismes est double. Pas de prisme "à coude". Axes des oculaires parallèles à ceux des objectifs.

Fig. 116a/b (de: catalogue Koristka, Milan, 1960)

29.5.1 - Les désavantages

Le désavantage de l'ouverture et de la résolution réduite a déjà été décrit comme conséquence de l'impuissance des objectifs de se pénétrer entre eux; sur ça il n'y a donc pas rien à ajouter, même si les schémas décrits dans les prochains chapitres permettent un petit avantage dans ce sens.

Un second désavantage se présente dans l'observation d'objets plans (surfaces planes d'objets opaques, sections minces ou frottis sur lame, par ex.). On considère un tel objet plan perpendiculaire ou presque à la bissectrice de l'angle de stéréo, donc incliné en mesure égale ou presque égale par rapport aux axes des deux objectifs: par ex. le plan PM de la fig. 114 (§ 29.4.1). Il est intuitif que, si le centre O du plan objet est au point, un point à droite d'O se trouve plus lointain (que O même) de l'objectif gauche et plus près à l'objectif droit. Le contraire pour un point à gauche d'O. Ceci signifie qu'on voit bien au point seulement un diamètre du champ visuel, diamètre perpendiculaire à l'axe de l'objectif et au plan du dessin (fig. 114). Une moitié du champ sera défocalisée parce qu'elle est trop lointaine d'un objectif et trop voisine de l'autre; l'autre moitié, le contraire.

Les instruments conçus selon le schéma de Greenough ne sont donc pas convenables pour des objets plans: on peut voir au point seulement une bande verticale du champ visuel (la bande se dédouble si le meilleur foyer n'est pas au centre du champ).

29.5.2 – Les avantages

Dans un schéma comme celui de la fig. 111, 114 ou 115, les deux objectifs **Ob** sont centrés par rapport à l'axe optique de chacun des deux microscopes, comme il arrive dans le microscope normal. Ceci permet la meilleure correction des aberrations, en particulier (§ 13.3) au centre du champ seront absentes les aberrations extra-axiales (chromatique latérale, coma, astigmatisme). Il est ainsi possible d'augmenter l'agrandissement utile (§ 29), en pratique même au-delà de 100× environ.

Cette condition, à première vue évidente, ne se vérifie pas dans les autres schémas de micros-

cope stéréoscopique décrits plus loin.

Celui qui désire une bonne définition de l'image sera donc mieux satisfait par un stéréomicroscope d'après Greenough, et il appréciera le plus cet avantage avec des objets pas plans.

Tout ceci peut devenir naturellement important en photographie.

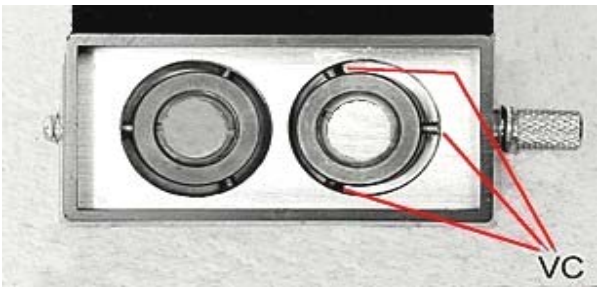
29.5.3 – La variation d'agrandissement

Avec le schéma de la fig. 111, 114 ou 115, la variation de l'agrandissement est effectuée avec deux moyens principaux:

□□ objectifs pancratiques, à focale variable ("zoom"; voir plus loin, § 29.9);

□□ objectifs interchangeables. La substitution des objectifs peut être effectuée de quatre manières principales:

1) Les couples d'objectifs (opportunément centrés entre eux et apparié sur une base commune) sont remplaçables singulièrement avec un encastrement (en général) à queue d'aronde linéaire. Deux de tels couples sont bien visibles en bas dans la fig. 116. Les différents couples, dans les bons instruments, sont parfocales et parcentrés entre eux: d'un couple à l'autre on conserve le foyer et le centrage de l'image. D'un couple à l'autre changera par contre, et beaucoup, la distance de travail WD.



En général, chaque objectif de chaque couple est fixé et centré au moyen de trois "grains" (vis sans tête) près de sa base (VC dans la figure à côté). Un déplacement des grains donne immédiatement une perte de parcentrage.

2) Revolver à axe verticale, semblable aux revolvers normaux (§ 27.2.3, sauf le fait que les objectifs sont remplacés par des couples). Nous en schématisons les deux types principaux dans la fig. 117 dans laquelle A-A, B-B, C-C indiquent les couples d'objectifs qui fonctionnent appariés.

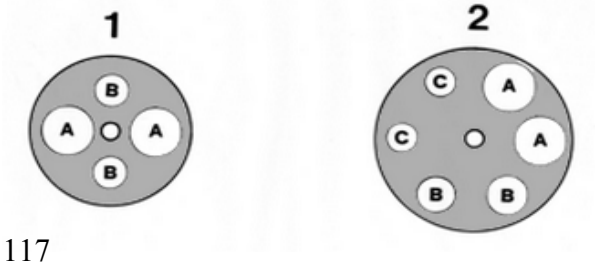
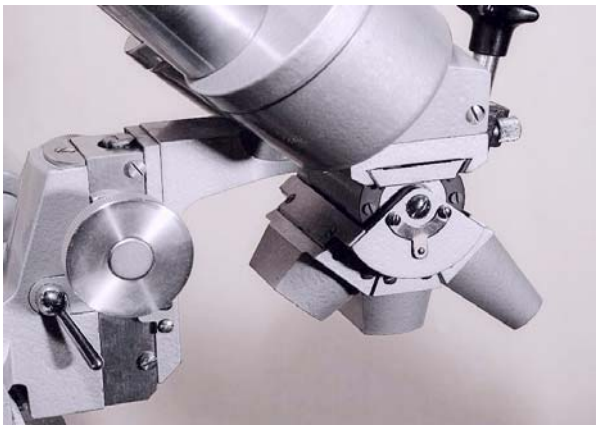


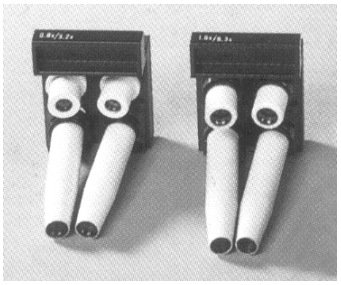
Fig. 117

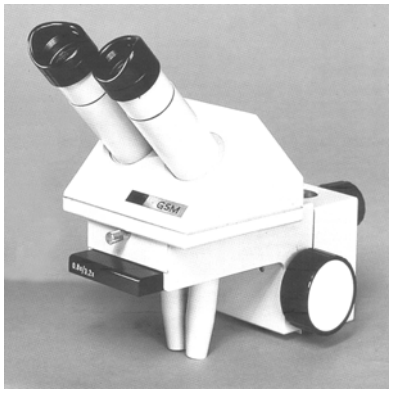
Dans le type 1 de la fig. 117 (deux couples) l'axe de rotation du revolver est au centre des deux objectifs de chaque couple; dans le type 2, l'axe de rotation est excentrique, comme dans les revolvers normaux; trois ou plus couples peuvent être reçus.



3) Revolver à axe horizontale, perpendiculaire à la bissectrice de l'angle de stéréo, perpendiculaire au plan médian de l'instrument; il s'agit d'un tambour plus ou moins cylindrique, qui porte les couples d'objectifs, qui divergent vers leur pointe (figure à côté, produit Reichert).

4) Glissière horizontale avec mouvement dans le plan sagittale, médian, de l'instrument; les couples remplacent l'une l'autre en glissant l'une après l'autre pour se mettre dans l'axe optique (Leitz, Askania)(figure à côté: deux guides avec deux couples d'objectifs chacune, et l'instrument complet).





En chaque cas, doivent être garantis la parfocalité et le parcentrage des différents couples.

Les objectifs des instruments d'après Greenough peuvent être du type "à conjuguée finie" ou "à conjuguée infinie" (voir le § 3). Dans le second cas, sur l'objectif, sur ou sous la boîte des prismes, doit exister la "lentille de tube" dont la fonction a été déjà décrite (Lt dans la fig. 115 – voir le § 3.2.3, fig. 18, pag. 38). La focale de telle lentille, dans les stéréomicroscopes, est inférieure en général à la valeur de 250 mm, très diffuse dans les microscopes normaux. Dans la fig. 115 on voit la lentille de tube tout de suite au dessus du groupe des miroirs.

29.6 – Le SCHÉMA d'ABBE à PUPILLE DIVISÉE

Nous mentionnons seulement un principe qu'en pratique a eu bien peu d'applications, mais qui est à la base de l'autre schéma, le CMO, décrit au chapitre suivant.

Qu'on se rappelle de tout ce qu'on a dit dans les §§ 8.8 et 9, fig. 32, à propos de la pupille de l'objectif (PU) et de son image rapetissée créée par l'oculaire (P)(disque de Ramsden). On compare la fig. 32 avec la 118: en 1 est schématisé l'objet plan, perpendiculaire à l'axe de l'objectif (2); en 3 est indiquée la pupille de l'objectif (PU); 4 est le groupe des prismes d'un tube bioculaire normal; 5 est l'image intermédiaire et 6 l'oculaire; ce qui nous intéresse est le plan 7 dans lequel se forme le disque de Ramsden (P).

Celui-ci est le schéma d'un microscope normal avec tube bioculaire. Mais on réfléchisse: en 7 il y a un diaphragme constitué par une cloison opaque avec bord droit, qui oblitère moitié de la pupille P (7); la moitié droite pour l'oculaire gauche et vice versa.

Le résultat est que les deux images partielles reçues par les deux yeux sont constituées par le faisceau qui traverse moitié de la pupille P et par suite moitié de la pupille d'objectif PU (3); il est comme dire que l'objectif (2) est divisé en deux parties, qui fournissent, chacune pour propre compte, deux images différentes. On a dit "différentes" étant donné que les deux moitiés de l'objectif (2) acceptent chacune un faisceau semi-conique dont le rayon "central" est à l'intérieur du cône global d'ouverture de l'objectif, mais les deux rayons centraux ("principaux") forment entre eux un certain angle (autant grand que est grande l'ouverture de l'objectif, environ la moitié de l'angle double d'ouverture = 2 **α)**. On a ainsi la vision stéréoscopique. L'avantage de ce schéma (E. Abbe, 1881) réside dans la possibilité d'utiliser des objectifs normaux, même de forte puissance, même à immersion.

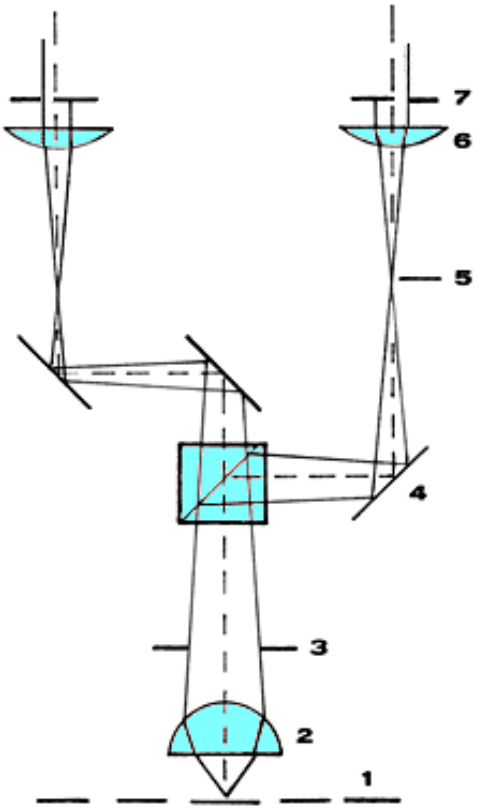


Fig. 118 (de: H. Beyer et H. Riesenberg, "Handbuch der Mikroskopie", p. 351, Veb Verlag Technik, Berlin, 1988)

Le désavantage est qu'en 7 doit se trouver un diaphragme exactement centré, et là devrait se trouver aussi la pupille de l'œil; en n'étant pas ceci possible, on a l'effet stéréoscopique seulement sur une partie du champ. Pour obvier à cet inconvénient, on peut subdiviser la pupille d'objectif (3) en deux moitiés occupées par deux filtres polarisants avec les directions principales croisées; si, près des deux oculaires, se posent encore deux filtres tournés de façon à avoir extinction avec l'une ou l'autre moitié de la pupille PU (3), on a encore la division de la pupille et l'effet stéréo, avec l'avantage que la pupille de l'œil peut rester dans la position correcte.

Mais même cette solution est suivie rarement (Nachet); d'ailleurs, il y a l'inconvénient que entre les deux filtres polarisateurs de chaque côté, celui sur l'objectif et celui au niveau des oculaires, se trouvent deux ou plus surfaces réfléchissantes qui altèrent l'état de polarisation de la radiation. Si en plus l'objet est capable de polariser au moins partiellement la lumière réfléchie, les choses se compliquent.

29.7 - L'OBJECTIF UNIQUE (CMO), C. Zeiss 1944

Parler d'un seul objectif dans un microscope stéréoscopique peut sembler un contresens mais, en repensant au schéma d'Abbe de la fig. 118, on comprendra que la chose est possible: il suffit d'utiliser deux parties distinctes d'un l'objectif unique, qui agissent comme deux objectifs séparés.

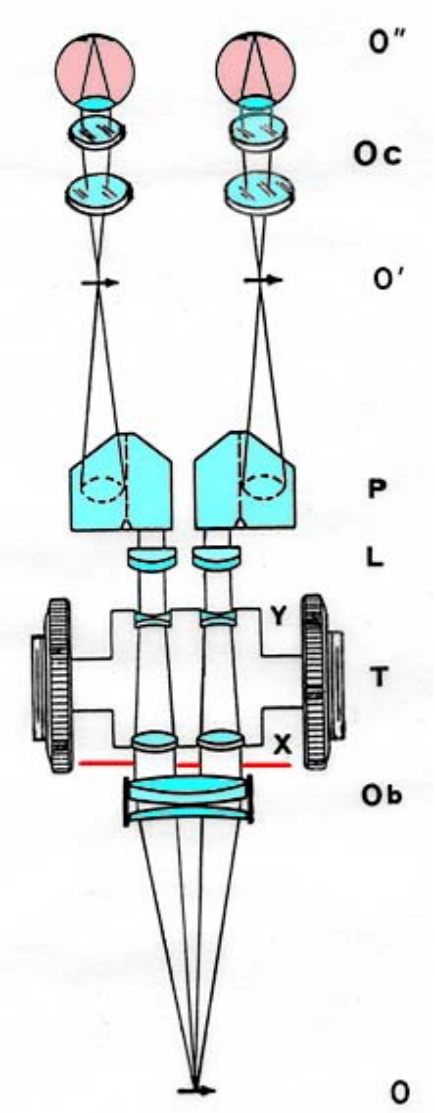


Fig.119 (de: catalogue Zeiss, Oberkochen, RFA, G 40 – 705)

Ce schéma, souvent indiqué avec l'acronyme CMO (Common Main Objective = objective principale commun) est présentée dans la fig. 119. Dans celle-ci, O est l'objet; O' est l'image intermédiaire (droite par rapport à l'objet à cause des prismes redresseurs), O" est l'image rétinique; Ob est l'objectif unique ou "commun", ou "principal"; L est la lentille de tube (nous verrons que l'objectif principal est en général à conjuguée infinie; sur la fonction de la lentille de tube, voir le § 3.2.3); P sont les prismes, il s'agit dans ce cas d'un prisme de Schmidt qui redresse l'image et incline l'axe (voir la fig. 112 D-E, § 39.2); Oc est l'oculaire, positif.

Eh bien, un diaphragme à deux trous mis tout près de l'objectif Ob (diaphragme indiqué dans la figure avec une ligne rouge) délimite deux faisceaux partiels, avec les rayons principaux inclinés entre eux (dans l'espace entre objectif et objet) comme s'il s'agît de deux objectifs séparés.

Étant donné que le centre du plan objet, O, se trouve dans le premier foyer d'Ob, les rayons qui émergent d'Ob sortent comme faisceau parallèle. Ainsi, le faisceau global qui, de chaque point de l'objet, traverse Ob et un des deux diaphragmes partiels, avant de joindre à la lentille de tube, est un faisceau parallèle. En autres mots, Ob fonctionne avec la seconde conjuguée infinie, le plan objet coïncide avec son premier plan focale et après l'objectif il doit exister une normale **lentille de tube** (L), ou mieux un couple de tels lentilles, afin d'avoir une image intermédiaire à la place correcte. Entre Ob et L le faisceau, correspondant à chaque point de l'objet ou de l'image, est "télécentrique" (voir, dans ce site, l'art. n° 45, pag. 4). Voilà comme le CMO peut fournir avec un objectif unique deux "canaux" convergents vers l'objet et par suite la vision stéréoscopique.

29.7.1 – Les désavantages

Ils résident essentiellement dans le fait que les deux objectifs séparés sont seulement une partie ne pas centrée d'un seul objectif; les faisceaux qui forment les deux images dans les deux canaux traversent l'objectif principal au dehors du centre; ceci crée, même au centre des deux champs visuels, des fortes aberrations extra-axiales (chromatique latérale, coma, astigmatisme) qui peuvent être réduites seulement en compliquant la recette de l'objectif principal: certains constructeurs offrent à ce but des objectifs "apochromatiques", (voir le § 13.2.1), sensiblement meilleurs des normaux, mais beaucoup plus chers.

Cette perte de définition contraint ces instruments à réduire l'agrandissement maximum: il est rarement possible de dépasser 50 ×.

29.7.2 – Les avantages

Le fait de posséder un seul objectif élimine le problème du centrage réciproque des axes des deux objectifs d'un couple Greenough. En outre, n'étant pas nécessaire une monture séparée pour chacun des deux objectifs, comme il arrive dans le système Greenough, il y a plus de place pour les deux parties utiles de l'objectif qui, à égalité d'angle de stéréo et de distance de travail, peuvent avoir une plus grande ouverture et résolution.

Sauf des cas spéciaux, on obtient le changement de l'agrandissement sans remplacer l'objectif principal pour lequel la distance de travail WD résulte constante (voir ici dessous).

L'avantage plus important reste dans le fait que ce schéma produit deux images intermédiaires également perpendiculaires aux deux axes secondaires, c'est-à-dire aux axes des deux oculaires, et par suite toutes simultanément au point, sauf l'effet de la courbure de champ. En effet, les deux images intermédiaires sont simplement les images d'un objet plan perpendiculaire à l'axe (de l'objectif commun), et par suite elles doivent, elles aussi, se former dans un plan perpendiculaire au même axe. Il est sous-entendu que les axes des deux canaux, créés par le double diaphragme, sont parallèles à l'axe de l'objectif, dans le trait après l'objectif même, et par suite ils sont parallèles entre eux, étant donné que l'objet est dans le foyer de l'objectif.

29.7.3 – La variation du grossissement

Certains modèles destinés à des buts spécifiques ou de type économique présentent un grossissement fixe. Mais en général on demande la possibilité de le changer. Voilà les solutions les plus communes dans le stéréomicroscope type CMO:

1) Systèmes zoom; il s'agira d'un couple de systèmes, en général à axes parallèles, interposés entre objectif et boîte des prismes. On en reparlera.

2) Objectif principal interchangeable. On peut montrer, comme pour les objectifs normaux à conjuguée infinie, que l'agrandissement d'un objectif CMO est donné par le rapport entre la focale de la lentille de tube et la focale de l'objectif (voir la formule (19) dans le § 3.2.3, en tenant compte que la focale de la lentille de tube dans les microscopes type CMO est souvent très inférieure à 250 mm). En remplaçant l'objectif avec un autre de différente focale, on change ainsi le grossissement total. En mesure inverse de l'agrandissement change aussi la distance de travail WD, qui est environ égale à la focale de l'objectif mais, si la WD augmente, diminue l'angle de stéréo, l'ouverture et la résolution. Il existe des modèles avec des objectifs principaux de focale entre 30 et 1.000 mm, avec un agrandissement propre de 0,2 à 6 ×.

3) Système intermédiaire. On a déjà expliqué que, dans le schéma CMO, comme pour chaque objectif à conjuguée infinie, l'espace entre objectif et lentille de tube est traversé (pour chaque point objet) par un faisceau parallèle ou télécentrique. Dans cet espace il est donc possible d'introduire un **système afocal**, c'est-à-dire un système optique qui prévoir soit le plan objet que le plan image à l'infini; tel système donc prévoit un faisceau parallèle à l'entrée comme à la sortie (on parle de "systèmes galiléens", voir plus loin). Celui-ci est le cas d'une longue-vue ou d'un télescope qui pointe vers un objet très lointain et fournit une image virtuelle à grande distance (la notion d'infini, comme on a expliqué, en optique est relative et est entendue comme "beaucoup plus grand que les grandeurs du système", par ex. la focale - voir aussi le § 25.1).

On peut donc mettre entre objectif et lentille de tube une petite longue-vue, mise au point "à l'infini", ce qui n'altère pas la position de l'image intermédiaire, et par suite la mise au point du microscope. Pour des raisons d'encombrement, on choisit presque toujours le schéma de la longue-vue de Galilée avec un oculaire divergent, qui donne une image droite (§ 25.1). Ainsi, dans la fig. 119, entre l'objectif Ob et la lentille de tube L est représenté un petit système "galiléen", évidemment double, avec un objectif convergent X et un oculaire divergent Y. Étant donné qu'un système galiléen est afocal, sa position latérale, c'est-à-dire son centrage, n'est pas critique; par contre est important le centrage de son oculaire par rapport à son objectif. Même la position axiale du système n'est pas critique, pendant que l'est la distance entre son objectif et son oculaire, c'est-à-dire sa mise au point intrinsèque, qui doit être toujours "pour l'infini".

Pour changer le grossissement, on ne se limite pas cependant à insérer ou extraire le système galiléen afocal; en effet, une longue-vue fonctionne aussi à l'envers (ses deux conjuguées comme on a expliquées, sont infinies); en regardant du côté de l'objectif on voit également à point, mais rapetissé. Donc, un système CMO comme dans la fig. 119, sans le système intermédiaire X – Y, donnera un grossissement "de base", en général compris entre 1,0 × et 2,0 × (oculaire à part); par ex. 1,6 ×. Avec le galiléen inséré, de grossissement propre 2 ×, par ex. (ou 0,5 × si renversé), il donnera un grossissement, par ex., de 3,2 × (droit) ou 0,8 × (renversé). Par suite avec un système galiléen seul (couple, évidemment) on a trois différents grossissements; il suffit de monter le galiléen sur un tambour à axe horizontale (T dans la fig. 119), qui permet de le tourner en deux positions opposées, avec l'objectif X en bas ou en haut; dans les positions intermédiaires, avec le système X - Y disposé transversalement, les lentilles X et Y sont au dehors du chemin optique et on revient au grossissement "de base".

Avec un seul galiléen on a ainsi 2 + 1 = 3 différents grossissements. On utilise d'habitude deux galiléens en obtenant 2 × 2 + 1 = 5 différents grossissements.

Les galiléens sont rarement montés sur un tambour à axe verticale: ils ne peuvent ainsi pas être renversés et il faut un différent système X - Y pour chaque valeur de grossissement (maison "Galileo", Florence – voir la figure à côté, dans la quelle on voit le couple des tambours; celui de gauche est dépourvu du diaphragme à 5 trous).

On remarque qu'avec les systèmes galiléens le changement de grossissement arrive en tenant fixe l'objectif commun et la distance de travail; par contre changera l'ouverture (pour le différent diamètre des lentilles X et Y) et par suite la luminosité (avec le carré de l'ouverture), la profondeur de champ (avec l'inverse du carré) et la résolution (avec une fonction linéaire de l'ouverture).

En concluant, le système CMO est plus convenable pour les objets plans et pour petits grossissements; en général le changement du grossissement est plus facile, et il ne comporte pas aucune variation de WD.

29.7.4 – Les systèmes mixtes

On a vu que, selon le schéma de Greenough, les deux axes optiques entre objectif et oculaire sont divergents; dans le schéma CMO, par contre, ils sont parallèles et ceci rend facile changer l'agrandissement total au moyen de systèmes galiléens afocaux très petits. Pour avoir dans le même instrument les avantages du premier schéma (meilleures corrections) et du second (chemins télécentriques parallèles entre objectif et oculaire) il est possible d'utiliser deux objectifs à axe inclinés selon Greenough et puis rendre les deux axes parallèles après les objectifs en mettant sur ceux-ci un couple de prismes cunéiformes avec les arêtes opposées. Tels prismes pourront être corrigés contre l'aberration chromatique évidemment, mais il restera un résidu d'astigmatisme. Ce schéma a été réalisé récemment par Zeiss W.

29.8 – Les OBJECTIFS ADDITIONNELS

On veut indiquer avec ce terme certaines lentilles convergentes ou divergentes, de diamètre semblable à celui de l'objectif principal, dans les systèmes CMO, ou tel à couvrir le couple d'objectifs, dans le système Greenough.

Ces lentilles, posées immédiatement sous l'objectif principal ou le couple, servent essentiellement à augmenter ou diminuer la focale du (ou des) objectifs principaux et par suite à diminuer ou augmenter l'agrandissement selon un "facteur propre" qui doit être multiplié pour l'agrandissement de base de l'objectif. On trouve des lentilles additionnelles pour facteurs de 0,2 × à 2 × ; celles qui augmentent l'agrandissement (facteur plus grand de 1 ×) diminuent proportionnellement la distance de travail WD, mais elles augmentent, linéairement, l'ouverture, la résolution et l'angle de stéréo, pendant qu'elles baissent la profondeur de foyer à raison du carré de l'ouverture. Le contraire arrive pour celles qui réduisent l'agrandissement. Le rapport ouverture/agrandissement reste donc plus ou moins constant; de façon que ces lentilles additionnelles ne donnent ni augmentation ni perte de résolution dans l'image finale.

Les lentilles additionnelles ou supplémentaires sont disponibles en général pour n'importe quel modèle de stéréomicroscope, mais il est souvent nécessaire d'utiliser sur un microscope donné la lentille additionnelle du même constructeur: c'est un problème de corrections et de dimensions mécaniques.

Telles lentilles sont confortables à utiliser; on les fixe sous l'objectif principal avec un pas de vis, une baïonnette, une vis latérale ou semblable. Leur inconvénient principal, à part la variation de WD, reste dans le fait que les deux "canaux" se trouvent en position excentrique par rapport à la lentille additionnelle et surgissent ainsi des aberrations extra-axiales déjà cites à propos du système CMO (§ 29.7.1).

29.9 - Les SYSTÈMES ZOOM

On veut parler, avec ce terme anglais "zoom", d'un système optique pancratique dans lequel la focale peut changer de manière continue entre deux valeurs extrêmes.

Dans un stéréomicroscope, le système zoom peut être utilisé pour changer le grossissement de manière continue. Son avantage principal est que, pendant la variation, l'image ne disparaît pas, comme il arrive avec les autres systèmes et il est ainsi plus facile suivre des objets en mouvement.

Le zoom est rarement unique (à la place de l'objectif principal dans un système CMO); en général il est double, et il remplace le couple des systèmes afocaux (systèmes CMO) ou le couple des objectifs (Greenough).

Comme pour tous les systèmes pour le changement du grossissement d'un stéréomicroscope, on doit exiger que, pendant la course entière du zoom, restent corrects et constantes: le parcentrage entre les deux oculaires; le parcentrage intrinsèque du zoom (un point au centre du champ y doit rester pour toute la course); la parfocalité entre les deux oculaires; la parfocalité intrinsèque (l'image doit rester au point en chaque position du zoom).

Un système zoom est constitué d'au moins trois membres[213]. Dans les systèmes économiques il y a deux membres solidaires entre eux qui se déplacent simultanément en direction axiale, pendant qu'un troisième membre, parfois aussi un quatrième, est fixe. Dans ce cas, la parfocalité intrinsèque sera modeste et la variation d'agrandissement réduite. Dans les systèmes les plus chers, il y a deux membres qui se déplacent en manière indépendante et la variation d'agrandissement ("rapport de zoom") peut arriver à 10:1.

Les moyens mécaniques pour obtenir le déplacement unique ou double des membres mobiles sont très variés et on ne peut pas les illustrer ici. De toute façon ils doivent créer des mouvements identiques dans les deux systèmes du couple, autrement on aurait un différent grossissement dans les deux canaux, chose que nos yeux tolèrent peu. Ce défaut peut intervenir simplement pour durcissement des graisses, qui empêche le mouvement libre des membres mobiles.

Aussi un stéréo-zoom peut prévoir les lentilles additionnelles à peine citées.

29.10 - Les ABERRATIONS

En supposant qu'il reste valable tout ce qu'on a dit dans le § 13, nous ajoutons quelque donnée spéciale sur les stéréomicroscopes.

Du fait des "canaux" qui opèrent excentriquement par rapport à l'objectif principal (système CMO), et des aberrations extra-axiales qui en dérivent, on a déjà parlé dans le § 29.7.1. Nous ajoutons seulement ça: la vision stéréoscopique naît des petites différences géométriques entre les deux images; une déformation des images mêmes (distorsion, voir le § 13.1.2) peut empirer aussi la perception du relief et de la forme d'un objet à trois dimensions; mais la distorsion est plus nuisible quand on observe un objet plan étant donné que il peut apparaître recourbé ("**effet cathédral**" ou "globe effect"). Même la courbure de champ fournit une image recourbée d'un objet plan et elle peut engendrer l'effet cathédral.

Au-delà des objectifs "apochromatiques" déjà cités, qui réduisent les aberrations extra-axiales, ou au moins la chromatique latérale, il y a dans le commerce aussi des objectifs "plan" avec réduite courbure. La planéité du champ est moins utile dans les systèmes Greenough, pour les raisons dites dans le § 29.5.1.

En plus, la courbure a un autre effet nuisible: pour voir au point tout le champ de vue (objet plan), elle oblige à déplacer la mise au point et ceci altère le centrage entre les deux oculaires en direction transversale (§ 29.4.1).

À propos de la chromatique latérale, elle est bien corrigée en général, au moins dans les objectifs du système Greenough, étant donné que les objectifs stéréoscopiques ont une focale relativement forte et la simple lentille hémisphérique frontale de la recette d'Amici n'existe pas (§ 19.3.1). En conséquence, dans les stéréo-microscopes on utilise en général des oculaires achromatiques.

[213] En optique, un "membre" est une lentille simple ou un système composés par des lentilles simples collées entre elles.

29.11 – L'ÉCLAIRAGE ÉPISCOPIQUE

29.11.1 - L'éclairage latéral

Une bonne partie du travail au stéréomicroscope, comme on a expliqué, se déroule sur des objets opaques de forme irrégulière, pas plans, soit dans les sciences que dans la technologie.

Dans ces cas, on se rapproche beaucoup à l'observation habituelle à l'œil nu dans laquelle l'objet vient éclairé de manière plus ou moins diffuse par une fenêtre ou par l'éclairage artificiel de la pièce. Aux petits agrandissements, cet éclairage peut suffire, il est très "naturel", et il est suffisant certainement dans le travail en plein air en plein jour, même sans la lumière directe du soleil.

Pour les agrandissements moyens et forts, au moins à l'intérieur, devient nécessaire une lampe *ad hoc*. Souvent peut suffire une normale lampe de table ou un "abat-jour"; autrement il faut une véritable microlampe (voir le § 22) constituée essentiellement par une ampoule à incandescence à basse tension (donc à filament compact - voir le § 22.6.1.2), mieux si du type "au quartz-iode" ou "aux halogènes" (QI - § 22.6.1.3), plus un collecteur (§ 22.2), avec porte-lampe, ailettes de refroidissement, etc. Ne sont pas nécessaires en général, étant données les réduites exigences, ni les mécanismes de centrage de l'ampoule, ni le diaphragme de champ. Il est par contre utile, en général, un mécanisme de mise au point du collecteur: pas seulement pour mettre au point le filament (il manque un condensateur sur lequel en projeter l'image), mais pour avoir sur l'objet un faisceau éclairant plus ou moins ample, moins intense qu'il est plus ample, évidemment: dans ce cas, le filament est éloigné de la lentille moins de la focale de celle-ci. Ces lampes portent, souvent, aussi un porte-filtres et, si possible, un filtre calorifuge.

La lampe sera portée en général par un bras articulé ou flexible qui permet d'éclairer l'objet, selon son relief, avec des faisceaux à inclinaison variable. Un vague schéma est celui de la fig. 113 dans le § 29.3. Si le bras articulé est fixé au pied, la lampe ne se déplace pas par rapport à l'objet pendant la mise au point (supposé l'objet appuyé sur le pied) et par suite, en explorant l'objet sur des plans différents, il est nécessaire de déplacer chaque fois la lampe. Plus confortable est une lampe fixée au "corps" de l'instrument qui suit la mise au point et éclaire toujours, si bien orientée, le plan de meilleur foyer du microscope.

Sont par contre à exclure les lampes fixées rigidement au statif ou à la colonne, sans bras articulé, qui ne permettent pas de changer l'inclinaison du faisceau éclairant et par suite de gouverner les ombres. Ces lampes à position fixe deviennent, malheureusement, de plus en plus répandues.

Si le bras porte-lampe est fixé au "corps", plus ou moins à l'hauteur de l'objectif, il est bien qu'il soit tournant autour de l'axe optique, de façon à permettre de changer non seulement l'inclinaison (zénith), mais aussi l'orientation (azimut) de l'éclairage.

En cas d'objets au fort relief (coquilles, insectes, etc.), surtout en photographie, une lampe seule peut produire des ombres très sombres sur un côté de l'objet. Pour éclairer le côté ombragé on peut utiliser:

- une seconde lampe, moins intense, capable de donner un faisceau rasant par rapport au plan d'appui de l'objet (rasant, pour que sur le plan même ne se forme pas une seconde ombre de l'objet);
- un miroir qui renvoie vers l'objet une partie du faisceau de la lampe (unique); le miroir peut être constitué par une feuille de papier d'aluminium recourbé qui aie un effet convergent, à forme de hémicylindre, avec l'axe verticale, appuyé sur la table;
- un cylindre de "papier calque" (papier translucide pour dessins "calqués") qui entoure l'objet et peut-être le microscope entier. Le cylindre sera éclairé de plusieurs côtés avec deux ou trois lampes, ou avec une lampe et un ou deux miroirs.

Il y a en outre des illuminateurs "aux fibres optiques" dans lesquels le faisceau éclairant est

acheminé sur l'objet au moyen d'un ou deux conducteurs de lumière en fibre de verre, en général flexibles. Ces dispositifs sont plus chers qu'une ou deux lampes normales et ils ne présentent pas d'avantages appréciables. En plus, la terminaison du conducteur de lumière doit rester très voisine à l'objet étant donné que le faisceau émergent est très ouvert. On peut obvier à cet inconvénient avec une lentille convergente opportune, placée à quelque centimètre devant la terminaison du conducteur, une espèce de collecteur; mais à ce point tant vaut utiliser une microlampe normale.

Même ces illuminateurs à fibres optiques set répandent sans motif; une question de mode.

29.11.2 - L'éclairage diffus

À part les simples dispositifs à peine décrits, on peut avoir un éclairage plus ou moins diffus ou "multilatéral" par des dispositifs spéciaux, qui présentent une source annulaire à monter autour de l'objectif. Nous en signalons les types les plus fréquents:

 à fibres optiques; quand la sortie du conducteur n'est pas ponctuelle, ou de petites dimensions, mais disposée comme un anneau, on peut avoir un éclairage bien uniforme, "sans ombre"; celle-ci est la seule l'application utile des fibres optiques en microscopie;

 avec un "tube" au néon: la source est constituée par une lampe fluorescente annulaire, de diamètre environ 10 cm (attention à la température de couleur, qui n'est jamais bien définie).

 avec des LED "blancs" disposés en couronne, relativement économiques. Il sera ici aussi difficile de contrôler la température de couleur, étant donné que ces modernes diodes émissives possèdent un spectre "à bandes", qui dépend du courant d'alimentation. Ils ont l'avantage d'émettre peu dans l'infrarouge (et quelque fois dans l'UV).

Souvent ces sources annulaires sont montées, avec leur support et abat-jour, sur une colonnette qui permet d'en changer l'hauteur par rapport à l'objet. Cela aussi permet de gouverner mieux les ombres.

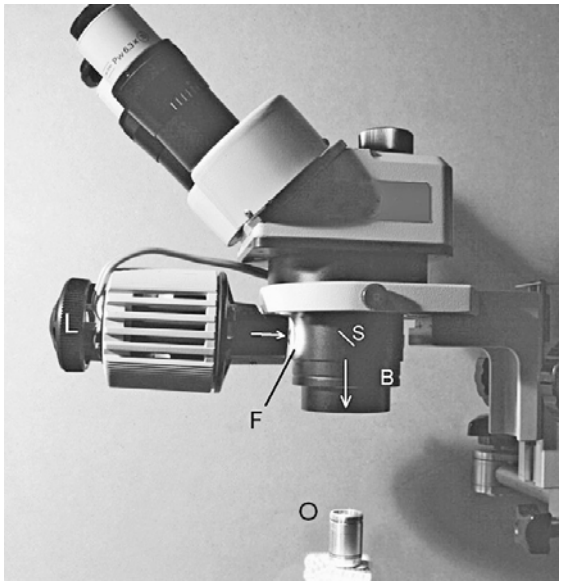
29.11.3 - L'éclairage vertical ou coaxial

On indique ainsi un éclairage qui arrive sur l'objet du haut, plus ou moins parallèlement à l'axe optique, de façon à éliminer ou réduire beaucoup les ombres, même si l'objet est creux: on l'éclaire du même côté duquel on l'observe.

Sont nombreuses les réalisations pratiques. En voilà les principales.

 Il peut y avoir un petit miroir ou prisme à réflexion totale (fig. 34A, § 11), disposé entre les deux objectifs (Greenough) ou entre les deux canaux d'un objectif CMO.

Il renvoie vers le bas, le long d'un axe qui est la bissectrice de l'angle de stéréo, le faisceau horizontal qui vient d'une microlampe normale (L dans la figure à côté), peut-être la même prévue pour l'éclairage épiscopique oblique décrit dans les pages qui précèdent, qui devra naturellement posséder un support qui lui permette de prendre la position correcte.



Dans la figure, la lampe L éclaire le miroir S lequel renvoie le faisceau éclairant vers le bas (B) sur l'objet (O).

Un trou (F) permet au faisceau éclairant de traverser le tube qui protège le deux objectifs.

 Il peut y avoir une lame semi-réfléchissante (S dans la figure 120 qui suit), disposée à 45° sur l'axe, sous l'objectif.

Encore ici, la lampe L est disposée avec l'axe horizontal et une partie du faisceau qu'elle produit est renvoyée par le haut sur l'objet O.

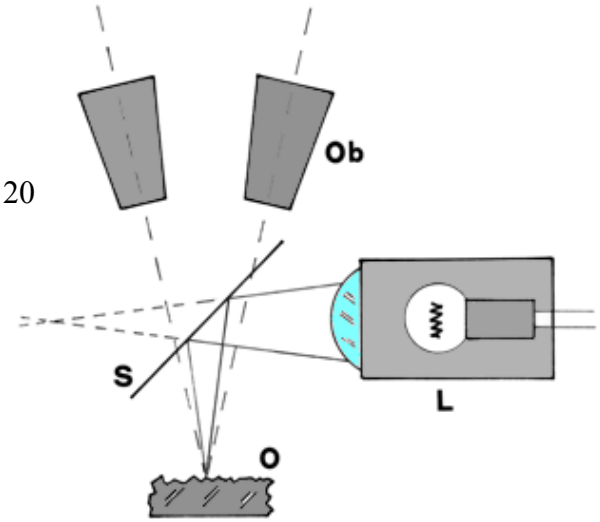
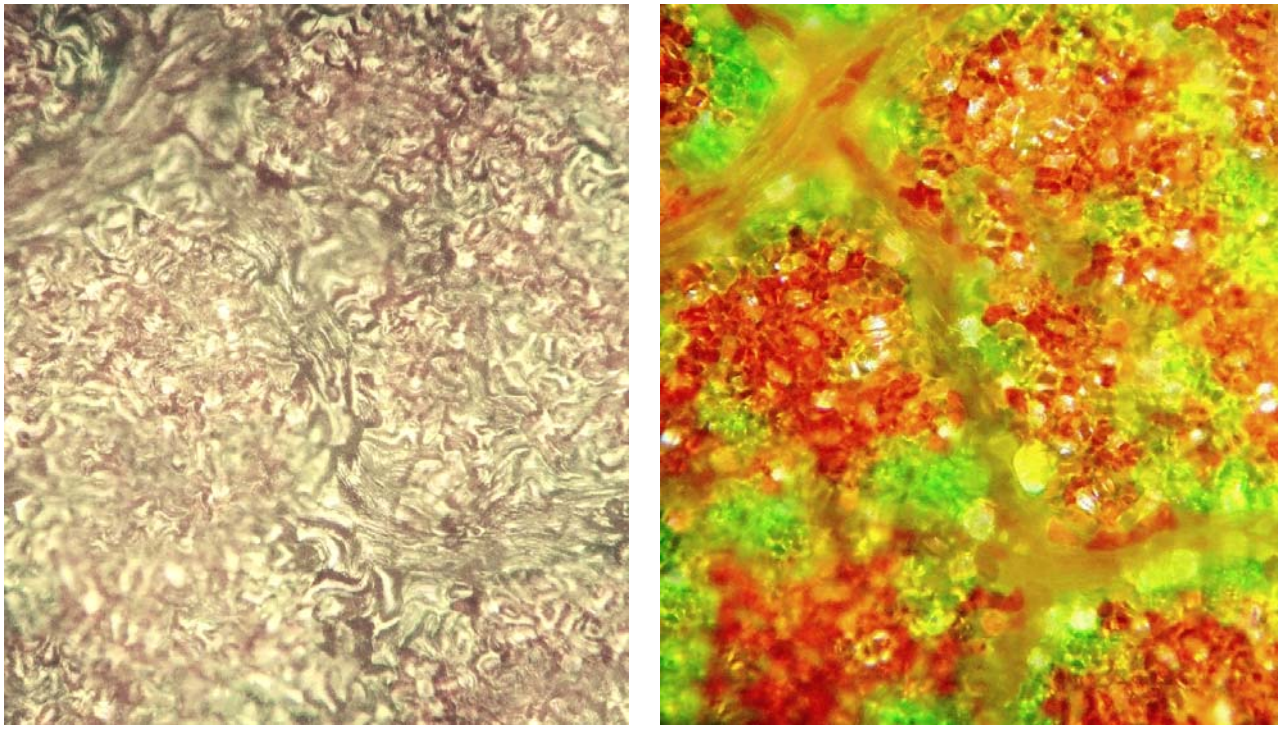


Fig. 120

Le semi-réfléchissant S produit évidemment une perte photométrique, mais il lui est permis d'avoir des grandes dimensions; le miroir du cas précédent est par contre petit et il limite le faisceau éclairant, étant donné qu'il doit se situer dans le petit espace entre les deux "canaux".

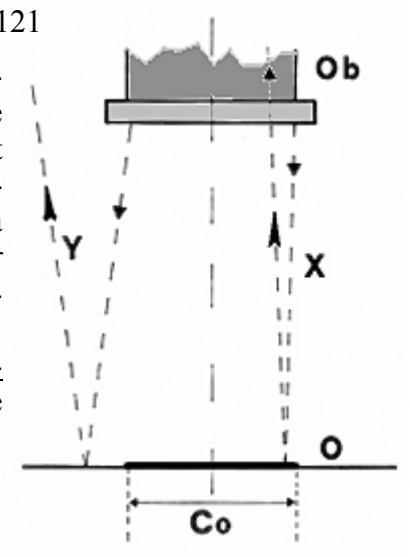
Le semi-réfléchissant S, en s'interposant entre l'objectif et l'objet, réduit la WD; pour ce motif, presque jamais il est utilisé dans les microscopes pas stéréoscopiques.

 Il peut y avoir deux semi-réfléchissants, un pour chaque canal, disposés au dessus de l'objectif. C'est le schéma d'un microscope épiscopique normal pour métallographie (voir la figue 122, § 30.1), avec la différence singulière que tout le système est double. Les deux semi-réfléchissants, peut-être avec les deux lampes relatives, sont logés dans un boîtier spécial qui s'interpose entre l'objectif et la boîte des prismes. Cette solution est chère et en plus elle présente un autre problème: si l'objet est réfléchissant, comme un objet métallique poli, et en outre s'il est plan et perpendiculaire à la bissectrice de l'angle de stéréo (comme dans la fig. 113 dans le § 29.3), la radiation provenante d'un objectif, par ex. Ob dans la fig. 113, est réfléchie par l'objet O vers l'autre objectif; sur l'image des structures de l'objet alors on superpose un reflet gênant. Pour éviter ceci, quelques constructeurs mettent de chacun des deux côtés, entre lampe et semi-réfléchissant, un filtre polarisateur; un autre filtre est mis entre semi-réfléchissant et oculaire. Les choses sont disposées en manière que la radiation qui vient d'un objectif et est réfléchie par l'objet vienne éteinte en trouvant le second polarisateur croisé avec le premier: le reflet est ainsi éliminé.



On voit ici la surface d'une feuille éclairée en lumière réflechie (à gauche): la cuticule est vue comme un reflet luisant. À droite, en voit le même objet avec le même instrument, mais avec les polaiseurs croisés: le reflet de la cuticule est eliminé et on peut voir le parenchyme qui se trouve au dessous.

Fig.121



Les illuminateurs coaxiaux ne servent pas aux très bas agrandissements: si le champ objet (**Co** dans la fig. 121) se compare avec le diamètre de l'objectif (Ob), un rayon du faisceau éclairant (X) peut rentrer dans l'objectif, et par suite éclairer l'objet utilement, seulement pour un champ objet **Co** plus petit ou égal à la surface utile d'Ob; un rayon plus incliné (Y), qui pourrait éclairer un champ **Co** plus grand, vient réfléchi au dehors d'Ob et va perdu.

Le plus grand champ éclairable ne dépasse donc pas les dimensions de l'objectif. Si l'objet est diffusant ou irrégulier, ce discours perd beaucoup de sa validité.

29.12 – L'ÉCLAIRAGE DIASCOPIQUE

On pourrait répéter ici tout ce qu'a été dit pour les microscopes normaux, mais le plus petit agrandissement et la plus petite ouverture du stéréomicroscope posent des exigences beaucoup moins urgentes. Il suffit de penser que normalement le condensateur n'est pas nécessaire et par suite non plus le diaphragme de champ ou la lentille à grand champ.

29.12.1 – Le fond clair

Dans beaucoup de stéréomicroscopes est présent comme une partie de la base, ou comme accessoire à appliquer sur elle, un simple dispositif éclairant diascopique constitué par une microlampe et un miroir.

Il peut s'agir de la même microlampe, avec l'axe horizontale, qui est utilisée pour l'épiscopie, et justement sont souvent prévus deux différentes branchements pour la même lampe. Il s'agit d'une lampe très simple, en général avec un porte-lampe pas centrable (si sont prévues des ampoules précentrées, elles sont superflues, et beaucoup plus chères de celle normales) et un collecteur simple, souvent avec une surface dépolie. Il peut y avoir un moyen pour changer la distance entre ampoule et collecteur, mais encore une fois cela ne sert pas pour avoir une image nette du filament, mais plutôt pour changer le diamètre du faisceau éclairant. Il peut y avoir un ou plus porte-filtres. Ne sert pas le diaphragme de champ: il donnerait seulement une perte photométrique.

Au dessous du plan de la platine, sur l'axe de l'objectif, et devant la lampe, il y a un miroir, souvent orientable autour d'un axe transversal; le miroir a souvent deux faces: une spéculaire et une diffusante, afin d'élargir le faisceau éclairant. En effet, pour éclairer les deux canaux de l'ensemble stéréo, il faut un faisceau ample, qu'une lampe simple a du mal à fournir; certains constructeurs (Zeiss) offrent des illuminateurs doubles pour microscopes stéréoscopiques en diascopie: deux lampes qui se dirigent vers le plan objet en formant entre elles un angle égal à l'angle de stéréo et qui éclairent de manière centrée les deux objectifs. Mais il s'agit de raffinements peu utilisés.

Sur le miroir, au centre de la platine ou de la base, est appuyée une plaque de verre, souvent dépolie sur un côté (la face polie en haut, vu qu'il est plus facile de la nettoyer) sur laquelle on pose l'objet transparent. L'ouverture du faisceau donnée par un verre dépoli est suffisante en général à "remplir" l'ouverture d'un objectif de stéréomicroscope.

29.12.2 – Le fond noir

Un simple illuminateur diascopique comme celui à peine décrit fournit un fond clair quand le faisceau éclairant pénètre au moins en partie dans les deux objectifs. Mais il peut fournir aussi le fond noir si le miroir est opportunément désaxé par rapport au champ objet et incliné; le faisceau éclairant peut alors se diriger obliquement sur l'objet, suffisamment à échapper au cône d'ouverture de l'objectif. La petite ouverture de ce cône dans les stéréomicroscopes rend simple ce problème.

Souvent, les mêmes dispositifs diascopiques qui donnent le fond clair, peuvent se convertir au champ noir avec un mouvement ou une substitution du miroir. Il faudra en général enlever le ou les verres dépolis, pour éviter que le faisceau diffus pénètre dans l'objectif et empêche l'"obscurité" du fond de l'image. On obtient ainsi un fond noir unilatéral.

Pour un fond noir multilatéral ou annulaire il faut un véritable condensateur, en général à miroirs (catoptrique) comme les condensateurs "cardioïdes" des microscopes normaux. Un tel condensateur s'installe dans ou sur la base de l'instrument.

29.13 – Le STATIF

Encore, on peut répéter ici tout ce qui a été dit sur les parties mécaniques des microscopes normaux. Mais les exigences de rigidité et de centrage du stéréomicroscope sont beaucoup plus petites, essentiellement à cause de la plus grande pénétration et de l'agrandissement plus petit. Par ex., la mise au point peut être faite avec le seul mouvement macrométrique; le micrométrique normalement manque. Manque de la même façon toute la mécanique relative au condensateur; celle relative à la microlampe est très simple.

Les tubes à coude ont déjà été décrits, et ils diffèrent des normaux tubes bioculaires parce qu'ils sont constitués par deux systèmes optiques appariés avec les axes optiques non parallèles.

Des différents types de revolver on a déjà parlé.

La plus grande focale des systèmes optiques du stéréomicroscope rend en général moins critiques les opérations de centrage, surtout celles intrinsèques de l'objectif. Par contre, étant donné qu'ils existent deux systèmes optiques centrés sur un même champ objet, s'ajoutent des problèmes de centrage qui n'existent pas dans les microscopes normaux. Nous faisons allusion en particulier au centrage réciproque de l'axe des deux objectifs ou des systèmes intermédiaires; quand il y a un système zoom, il est très critique d'obtenir le parcentrage et la parfocalité des deux canaux pour toute la course du zoom; quand il y a deux ou plus systèmes galiléens (§ 29.7.3); eux aussi doivent être tous parcentrés et parfocales. L'alignement d'un stéréomicroscope est donc très laborieux.

29.13.1 – Les accessoires spéciaux

Dans le § 27.7.1 (fig. 109) on a décrit un "**oculaire pour deux observateurs**", mais cet accessoire sert peu en stéréomicroscopie en étant monoculaire. L'observation stéréoscopique de la part de deux personnes peut se faire dans notre cas avec un tube intermédiaire spécial capable de transporter les deux canaux vers les deux couples de tubes porte-oculaires.

Ils existent ici aussi les "**tubes de comparaison**" (voir le § 27.7.2) qui s'appuient sur un seul des deux oculaires de deux instruments distincts, et donc font perdre la vision stéréoscopique.

Ils existent des **tubes intermédiaires**, à mettre entre corps et boîte des prismes, contenants deux diaphragmes à iris à mouvement synchrone; ils servent à réduire l'ouverture des objectifs et augmenter la profondeur de foyer, et ils sont précieux en photographie; cependant ils provoquent

tous les phénomènes conséquents à une perte d'ouverture et que nous connaissons déjà (perte de luminosité et résolution, essentiellement).

Pour l'observation sur des objets de grandes dimensions, parfois il est possible de "prolonger" le tube binoculaire avec un tube intermédiaire horizontal long jusqu'à 50 cm. Il y a aussi des tubes intermédiaires pour changer l'inclinaison du tube binoculaire ou des tubes à inclinaison variable avec continuité, qui vont sous le nom pompeux de "tubes ergonomiques".

Ils existent en stéréomicroscopie même les "**oculaires pour dessin**" (§ 27.7.1, fig. 110), comme aussi les "**tubes de dessin**" (§ 27.7.2) qui opèrent évidemment sur un seul des deux canaux stéréo.

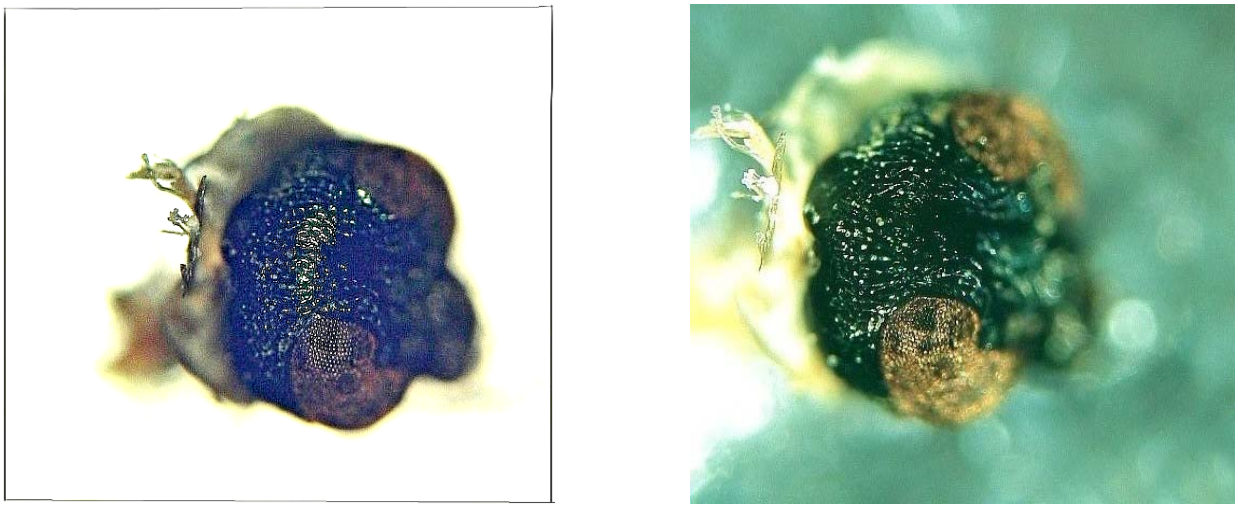
Il y a encore tous les dispositifs de mesure déjà mentionnés à son temps: **oculaires micrométriques** et semblables. Dans la mesure des "**équivalents micrométriques**" (§ 12.3), un système zoom permet d'obtenir des valeurs entières en éliminant les chiffres décimaux. Ça suffit ensuite de ne pas changer sa régulation …

Évidemment, ils existent tous les raccordements et adaptateurs possibles pour les reprises de télévision et de photographie, qui opèrent naturellement sur un seul des deux canaux[214]. Pendant la reprise, quelques modèles dévient complètement le canal pour la photo et ils empêchent la vision binoculaire. Dans d'autres cas, un jeu de semi-réfléchissants évite cette oblitération. Il y a aussi des raccordements qui permettent de choisir avec une simple manœuvre quel des deux canaux utiliser pour la reprise.

En outre, on trouve beaucoup d'accessoires pour quelques techniques spéciales:

 Radiation polarisée. Il s'agit d'accessoires simplifiés par rapport à ceux d'un microscope polarisateur, au moins parce que la petite ouverture rend impossible la conoscopie et par suite inutile la lentille d'Amici (§ 19.5.5) et le condensateur. Comme filtre polarisateur pour la diascopie, on fournit d'habitude un filtre Polaroid collé entre disques de verre à insérer dans la fenêtre spéciale de la base diascopique. Pour l'épiscopie, on peut mettre un polarisateur sur la microlampe, mais on rappelle que les polarisateurs du type "Polaroid" sont très sensibles à la chaleur et la radiation polarisée en épiscopie crée en outre des phénomènes complexes très difficiles à interpréter.

L'analyseur est contenu dans une bague qui doit être fixée dessous l'objectif. Rarement sont prévus des compensateurs. Quand la variation de la distance interpupillaire provoque une rotation azimutale de l'image (§ 29.4.3), même l'usage d'un réseau à croix devient inutile.

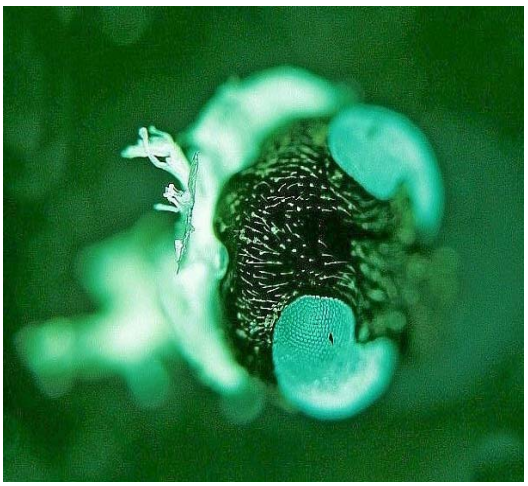


Figg. 121b/c/d – À titre d'exemple, voilà la tête d'un petit coléoptère (*Cryptocephalus* sp., fam. Chrysomélidés) éclairé par dessus, en champ clair (en haut, à gauche), en lumière polarisée (en haut, à droite) et en fluorescence (page suivante).

Chaque fois, l'image fait voir des différents détails. 50 grossissements.

[214] Ont été réalisés (WILD, par ex.) des systèmes photographiques pour stereomicroscopes capables de reprendre simultanément les deux images; tels couples de photographies, examinés ensuite avec un normal stéréoscope, peuvent rendre une vision avec la sensation du relief de l'objet.

 Fluorescence. Pour la diascopie, on peut utiliser les mêmes filtres prévus pour les microscopes normaux, mais la microlampe normale sera rarement suffisante. On peut utiliser plus aisément la microlampe prévue pour l'éclairage épiscopique oblique. Les filtres d'excitation seront placés devant la lampe; ceux d'arrêt sous l'objectif ou sur l'oculaire. Ils existent cependant des tubes intermédiaires contenants un miroir semi-réfléchissant dichromatique, comme on utilise dans les microscopes normaux pour la fluorescence en épiscopie. La seule différence est que tout le système doit être double. Dans ces cas on peut prévoir une lampe spéciale, à arc, aux vapeurs de mercure.



L'observation de la fluorescence au microscope stéréoscopique est utilisée, par ex., dans l'étude des pigments pendant la restauration de tableaux anciens, dans l'étude des contrefactions ou altérations de l'écriture de manuscrits, dans l'étude des minéraux et pierreries.

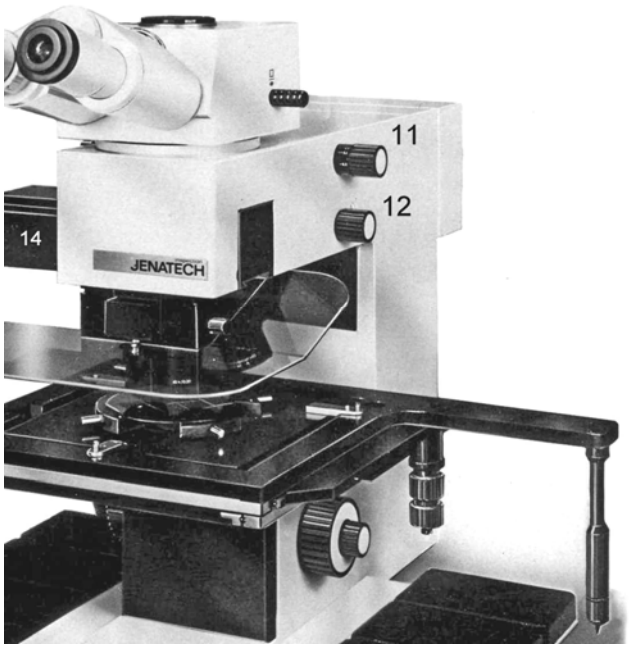
 Éclairage en infrarouge: avec des filtres opportuns et une normale microlampe (pas à LED) il n'est pas difficile d'éclairer un objet dans la bande IR; pour avoir une image visible il faudra ranger à la place de chacun des deux oculaires un "convertisseur d'image" (PZO, Wild, etc.). Ces observations servent encore pour révéler les altérations des manuscrits, etc.

29.13.2 – Les platines

Sur le microscope stéréoscopique il est possible d'appliquer, au moins avec les meilleurs constructeurs, toutes les platines prévues pour les microscopes normaux (§ 26): fixes, avec et sans guide-objets (§ 26.2), tournantes (§ 26.3) même centrables (surtout pour l'usage en radiation polarisée), translateurs (§ 26.4), à frottement gras ou à glissement (§ 26.6), etc.

Il y a cependant deux types qui sont plus ou moins exclusifs des microscopes stéréoscopiques:

 Translateurs de grandes dimensions: il s'agit de translateurs dans lesquels la course X et Y est très grande, jusqu'à 500 mm. Le centre de la platine doit porter une plaque d'appui, en verre pour la diascopie, avec les côtés au moins égaux aux deux déplacements X et Y. Le mouvement peut se faire à la main, à glissement ou avec crémaillère, ou motorisé; parfois le mouvement est "digitalisé", c'est-à-dire transformé par des "codeurs" spéciaux en impulsions électriques digitales qu'un circuit opportun peut élaborer de façon à programmer les mouvements de la platine même. Telles platines sont utilisées pour l'étude des grands circuits imprimés, plaques de silicium pour semi-conducteurs (wafer), etc.



Pour cette dernière application, les grands translateurs se trouvent aujourd'hui aussi dans beaucoup de microscopes mono-objectif, surtout épiscopiques (figure à côté).

Le statif Jenatech de Zeiss Jena, à grand translateur manuel. Les boutons 11 et 12 commandent les diaphragmes de champ et d'ouverture. 14 est le curseur pour le champ clair et noir. Ce modèle est actuellement démodé.

Pour permettre les mouvements du translateur, la distance entre l'axe optique et la colonne verticale de support du système optique doit être au moins égal au déplacement Y (sagittal) du translateur même. Le statif sera dimensionné par conséquence.

 À rotule: il s'agit de mécanismes sur lesquels il est possible d'appuyer ou fixer l'objet, et qui peuvent être inclinés dans toutes les directions. Dans le type le plus simple, il s'agit d'un hémisphère, en métal ou matière plastique, de quelque centimètre de diamètre, appuyée sur le bord d'un trou circulaire, présent dans la base ou dans un raccordement spécial. Si le trou est centré, le centre de rotation du hémisphère se trouve sur l'axe du système et, si l'objet est petit et appuyé sur le centre du hémisphère, il ne se déplace pas en tournant la rotule et "il ne va pas hors foyer": simplement il tourne autour de soi même. C'est une méthode simple et confortable pour observer de tous les côtés un petit objet.

Un tel dispositif peut être construit «chez soi».

Dans le modèle qu'on voit ici à côté, est présent un appui pour les boites de Petri.

Il faut admettre de toute façon que, normalement, dans un stéréomicroscope, on ne sent pas le besoin d'une platine à chariot: ça suffit une plaque d'appui sur laquelle déplacer l'objet à la main.

29.13.3 – Les modèles spéciaux

La simplicité d'usage du stéréomicroscope et l'ampleur de ses applications ont stimulé la création de modèles multiples destinés à résoudre des problèmes spéciaux.

Nous pouvons citer seulement quelques types, liés à deux groupes principaux d'applications.

  Travaux mécaniques, électroniques, etc. Ils existent des "modèles d'atelier", doués de supports spéciaux, qui permettent de porter l'instrument très loin du point d'appui et de le déplacer rapidement. Il y a aussi des supports de table avec une base lourde et un bras horizontal à long écart, plus que 500 mm (voir la fig. 116 dans le § 29.5); la distance entre l'axe d'observation et la colonne de support indique la dimension maximum de l'objet observable. Il y a des supports "à pince" dans lesquels la colonne de support vertical est fixée au bord de la table avec une pince robuste. Il y a des supports à colonne dans lesquels la colonne verticale appuie sur le plancher par trois pieds doués de roues; il y a même des modèles fixés à un chariot pour des déplacements rapides sur grandes distances.

Tous ces supports doivent permettre une orientation du microscope dans toutes les directions, de façon à permettre l'observation de surfaces différemment inclinées. Pour des surfaces voisines au vertical, peuvent être prévus des tubes binoculaires droits, qui mettent les oculaires en ligne avec les objectifs. Il y a aussi des tubes "ergonomiques", c'est-à-dire à inclinaison variable, déjà cité, qui permettent la position la plus confortable de la tête, indépendamment de l'inclinaison de l'objectif; ils contiennent un jeu complexe de prismes, qui en augmentent le prix.

Quand l'objet n'est pas accessible aisément, sont prévus des modèles à grande distance de travail (WD), même plus d'un mètre; alors on parle de "télé-microscopes", qui empétent, à part l'effet stéréoscopique, sur le cathétomètre[215]. L'augmentation de WD va évidemment au détriment

[215] Le cathétomètre est une petite longue-vue, qui peut être focalisée sur des distances plus ou moins modestes, et il est porté par un support spécial qui lui permet de se déplacer en horizontal et en vertical, toujours perpendiculairement à son axe optique. En le focalisant et en le déplaçant de façon à porter au centre de son champ visuel (indiqué par un réseau oculaire à croix) des points différents d'un objet éloigné, et en mesurant sur des échelles spéciales l'ampleur de ses mouvements, le cathétomètre permet de mesurer dans un système cartésien les distances entre des points quelconque de l'objet, naturellement en supposant l'objet projeté sur le plan dans lequel se déroulent les mouvements de l'instrument.

de l'angle de stéréo (réduction de l'effet stéréoscopique), mais aussi de l'ouverture (réduction de la résolution). En certains cas, la mise au point ne se fait pas en déplaçant l'instrument tout entier par rapport à l'objet (le support est très lourd), mais avec des moyens optiques internes à l'instrument, comme un système pancratique. La distance objet-objectif (objet-microscope) reste ainsi constante.

Pour les déplacements du microscope par rapport au bras de support, afin par ex. d'en changer l'orientation, et du bras par rapport à la colonne, il y a plusieurs articulations, qui doivent présenter la friction la plus petite possible; quand l'instrument est arrivé en position de travail, les articulations doivent cependant être bloquées pour éviter des déplacements involontaires. Le bloc peut être mécanique (vis, leviers, etc.), électromécanique (frictions électromagnétiques), etc. Le système électromagnétique est très confortable parce qu'il permet, avec un seul bouton, de bloquer simultanément toutes les articulations.

Dans les meilleurs instruments, le microscope contient ou porte beaucoup d'accessoires: lampes de type différent, souvent coaxiales, appareil photo, illuminateur flash, tube pour un second observateur, monoculaire ou binoculaire, caméra de télévision pour la vision à distance de la part d'élèves ou apprentis, etc.

□□ Applications médicales, cliniques, chirurgicales. Ceci vaut pour la neurochirurgie, l'otologie, l'ophtalmologie, (en jumelage avec la "lampe à fente"), la microchirurgie en général, la gynécologie ("**colposcopes**"), la dermatologie. On peut parler globalement de "microscopes opératoires".

Les performances spéciales ressemblent à celles déjà citées, avec un accent spécial sur le tube pour le second observateur (l'aide chirurgien), sur la lampe coaxiale, sur la fluidité des mouvements du support, sur la stabilité de la mise au point, etc. La colonne contient souvent les alimentateurs pour la lampe et le flash et elle doit être très lourde pour garantir la stabilité: en effet les instruments, déjà alourdis par le grand nombre d'accessoires, doivent souvent être déplacés sur un lit clinique ou une table opératoire, donc avec un bond considérable.

30 - LES TECHNIQUES SPÉCIALES

On a jusqu'à présent parlé de "microscopie générale", c'est-à-dire des principes physiques et des solutions techniques communes à tous les microscopes.

Maintenant nous parlons de "microscopie spéciale", c'est-à-dire des solutions techniques qui exploitent des phénomènes optiques particuliers, se prêtent à des catégories spéciales d'objets et sont utilisables dans la plus grande partie des microscopes. Nous nous bornerons à quelque ligne (voir différents articles dans ce site).

La première technique spéciale dont nous parlons s'adresse aux objets opaques; les suivantes peuvent s'appeler globalement "techniques de contraste" étant donné qu'elles tendent à donner des images plus contrastée d'un objet quand ceci résulte trop transparent; en grande partie, ces techniques "de contraste" s'appliquent soit aux objets transparents qu'opaques.

Donc les techniques spéciales sont visées aux objets transparents ou polis (si opaques), et elle fournissent des images douées de contrastes et couleurs qui n'existent pas dans l'objet; tels contrastes montrent détails et structures qui seraient autrement peu ou point visible. On peut dire que, avec ces techniques, les caractéristiques de l'image finale dépendent plus de l'instrument que de l'objet, et telles caractéristiques révèlent des propriétés et des structures physiques spéciales de l'objet, invisibles avec un instrument normal.

Quelques techniques spéciales offrent en outre la possibilité d'exécuter sur les objets des mesures de certaines caractéristiques physiques (micro-réfractométrie, comportement en radiation polarisée, micro-durométrie, etc.) et analyses chimiques sélectives (fluorescence, spectrophotométrie, par ex.). Le microscope se transforme donc d'instrument d'observation à instrument de mesure (voir, dans ce site, l'art. n° 24).

Nous examinerons aussi les problèmes liés à l'enregistrement des images avec des moyens photographiques ou de télévision et à leur projection sur écran.

La littérature technique sur le sujet est vaste et nous renvoyons au texte de Beyer et Riesenberg, cité en bibliographie. Nous pouvons ici donner seulement quelques lignes sommaires, utiles comme orientation pour le choix et l'usage de ces techniques.

30.1 - ÉPISCOPIE

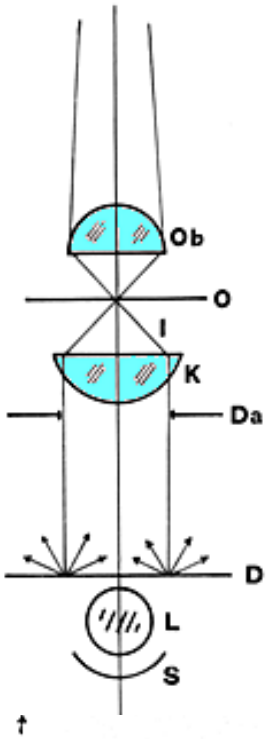
Elle est dite aussi "éclairage vertical" ou "éclairage incident" ou "lumière réfléchie".

Cette technique s'adresse en particulier aux objets opaques - sans exclure ceux transparents - dont on désire observer la seule surface (roches, alliages métalliques, charbon, matériels céramiques, microcircuits), ou aux objets qu'on ne désire pas ou ne peuvent pas être coupés en tranches suffisamment minces pour être observés par transparence: animaux et végétaux et leurs organes, etc.

Les observations normales (en "lumière transmise") sont effectuées en diascopie, en éclairant l'objet en transparence; cela suppose qu'il soit transparent, même diffusant, si possible mince. Si l'objet est par contre opaque ou pas assez mince, il faut l'éclairer "du haut", du même côté duquel on l'observe. On a déjà vu (§ 29.11.1) comme, dans le microscope stéréoscopique, étant donnée la forte distance de travail, il est facile d'éclairer l'objet du haut ou du côté avec n'importe quelle lampe; l'image est formée par la radiation diffusée par l'objet, comme il arrive dans l'expérience quotidienne pour la majorité des objets.

Mais maintenant nous devons faire une distinction.

L'objectif placé devant l'objet accueille, pour chaque point de ce dernier, un faisceau conique de radiation avec une certaine ouverture maximum, qui est justement l'ouverture utile de l'objectif. On regarde, par ex., la fig. 29, § 8.5, dans laquelle sont indiquées les limites du faisceau (I), tout d'abord convergent et puis divergent, qui vient du condensateur K et est accepté par l'objectif Ob. La fig. 29 schématise une observation normale en diascopie et fond clair: l'ouverture du faisceau éclairant est la même, ou de peu inférieure, à celle du faisceau qui peut entrer dans l'objectif et ensuite former l'image intermédiaire.



(Fig. 29)

Eh bien, en épiscopie on peut avoir la même situation, avec la différence que le faisceau éclairant peut arriver "du haut", c'est-à-dire à travers l'objectif même. En comparant la fig. 29 avec la 122, on peut voir que la moitié inférieure de la fig. 29 (condensateur K et faisceau convergent I), doit être réfléchie vers le haut par rapport au plan objet O. Donc, l'objectif de la fig. 122 déroule aussi les fonctions de condensateur et il fournit lui-même le faisceau éclairant.

Naturellement, si l'objet présente à l'objectif une surface plane, plus ou moins polie et perpendiculaire à l'axe optique, le faisceau éclairant vient réfléchi vers le haut par la surface même et il rentre dans l'objectif en fournissant un "fond clair" à l'image. Si la surface de l'objet n'est pas simplement spéculaire, mais présente des irrégularités, des "structures", telles irrégularités répandent ou diffusent une partie au moins du faisceau éclairant et elles apparaissent plus sombres par rapport au "fond clair" de l'image.

Celui-ci est le cas de l'observation d'échantillons de matériels durs desquels on ait tiré une surface plane et polie (roches, alliages métalliques, charbons, céramiques, semi-conducteurs, etc.).

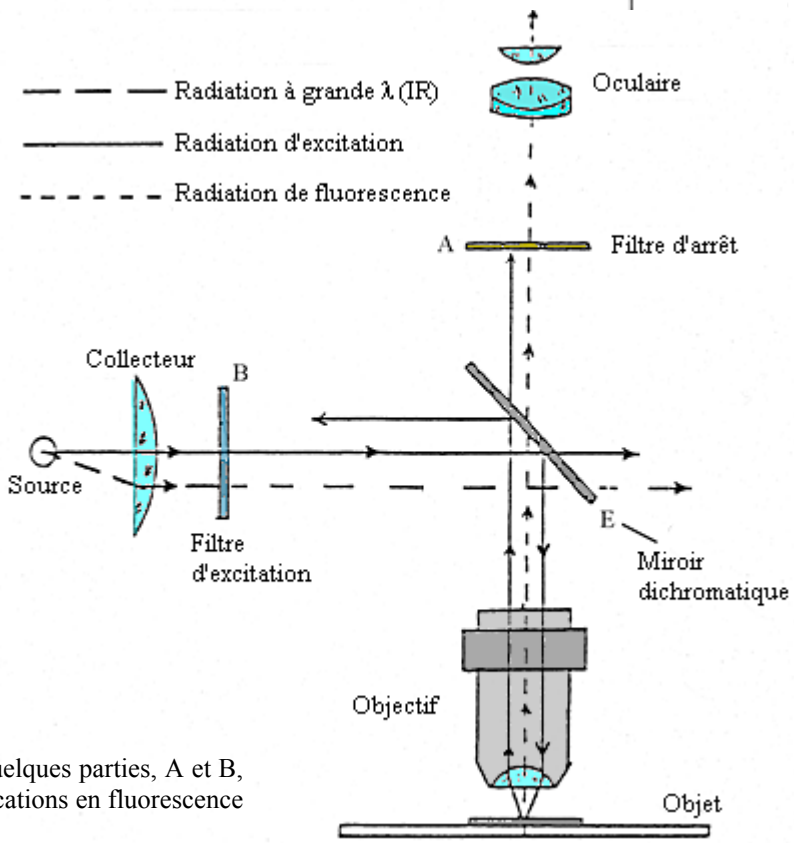


Fig. 122 - Schéma d'épiscopie. Quelques parties, A et B, sont essentielles seulement pour les applications en fluorescence (voir plus loin).

Cette épiscopie en fond clair peut s'effectuer, en principe, avec des objectifs normaux. Étant donné que l'objectif fonctionne aussi comme condensateur, chaque fois qu'on change d'objectif on est sûrs d'avoir un condensateur avec la même focale et la même ouverture, et en plus avec des excellentes corrections.

Se présente naturellement le problème de placer, devant ce condensateur = objectif, une microlampe avec des caractéristiques convenables; une telle microlampe devrait rester au dessus de l'objectif, justement où on doit former l'image intermédiaire. Alors il faut séparer les deux chemins, l'éclairant et le formateur d'image. On obtient ça avec une surface semi-réfléchissante ("splitter") disposée à 45° par rapport à l'axe optique: c'est la surface E de la fig. 122. À gauche d'elle, avec l'axe horizontale, la microlampe, avec une ampoule à incandescence ou à arc ("sour-

ce"), un collecteur, filtres éventuels (B). On peut démontrer que le rendement photométrique du dispositif ne peut pas dépasser le 25% et on obtient telle valeur seulement si le semi-réfléchissant E a un pouvoir réfléchissant égal au pouvoir transmettant, les deux égaux à 50%: la moitié du flux va perdue par transmission dans le trajet de la source à l'objectif; l'autre moitié vient de nouveau partagée en deux quand le faisceau réfléchi par l'objet traverse de nouveau E pour former l'image intermédiaire.

En général, on fait de manière que le collecteur projette une image du corps lumineux sur la pupille de sortie de l'objectif (qui pour le moment fonctionne de pupille d'entrée du condensateur). C'est ce qui arrive dans l'illuminateur de Köhler en diascopie. Dans notre cas cependant on ne peut pas régler l'ouverture du condensateur étant donné qu'il coïncide avec l'objectif et on diaphragmerait ce dernier. Et cela, tout le monde le sait, ne va pas bien.

Dans les systèmes épiscopiques de bonne qualité alors on fait de manière que le collecteur projette une image du filament sur un plan beaucoup au devant de l'objectif (et du splitter E); on pose ici le diaphragme d'ouverture; une lentille de transport suivante, une lentille relais, transfère dans la pupille d'objectif une seconde image du filament et une première image du diaphragme. On règle ainsi l'ouverture du faisceau éclairant sans réduire et sans interférer avec l'ouverture de l'objectif.

Étant donné que l'objectif sert aussi de condensateur, l'ouverture du condensateur est toujours correspondante à celle de l'objectif (comme on rappellera, en diascopie il y a toujours le problème de remplacer tout le condensateur ou au moins de modifier son ouverture maximum pour l'adapter à celle de l'objectif). Mais le fait reste que les différents objectifs d'un équipage ont une différente focale et un différent diamètre de la pupille de sortie (qui dans ce cas coïncide avec la pupille d'entrée du condensateur). En conséquence, vu que l'illuminateur est fixe et il produit une image du filament de dimensions constantes, en viendra que telle image sera trop grande pour les objectifs les plus forts, (à pupille plus petite)(donc, perte photométrique), et peut-être trop petite pour les objectifs les plus faibles. En diascopie, il est bien donc régler le diaphragme d'ouverture chaque fois qu'on change d'objectif, mais le critère valide en diascopie (en fermant ce diaphragme augmente le contraste et se réduit la résolution) devient plus complexe en épiscopie en relation au pouvoir réfléchissant et à la planéité de la surface de l'objet et en relation à la quantité de radiation réfléchie par les lentilles de l'objectif, à son tour dépendant de la structure de l'objectif même, des traitements antireflets, etc. Il faut procéder par tentatives.

D'ailleurs, vu que les objectifs les plus faibles ont la pupille plus grande, pour eux il convient en épiscopie ouvrir de plus le diaphragme d'ouverture: le contraire de tout ce que se fait en diascopie.

Chaque fois il faudra contrôler que l'image du diaphragme d'ouverture soit au point dans la pupille d'objectif (en général c'est le constructeur à prévoir ça), et soit centrée par rapport à elle; à cela doit pourvoir l'utilisateur, en général au moyen de clefs spéciales. Le contrôle est facile: on introduit un objectif d'agrandissement moyen; on appuie un bout de papier sur la platine et on la baisse d'au moins 2 cm; sur le papier on verra une image agrandie du filament qu'on pourra centrer par rapport au bord de la pupille d'objectif, qui est aussi projeté sur le papier; on verra aussi le bord du diaphragme d'ouverture (le varier pour voir les modifications de son image) et on en contrôlera le centrage. Parfois le filament est "précentré", à la condition qu'on utilise les ampoules spéciales; autrement, il y aura des commandes spéciales. Par contre, pour le diaphragme d'ouverture, ils existent toujours pour le centrage des petites vis de régulation avec ou sans clef.

Le contrôle à peine décrit permet de vérifier aussi que l'image du filament ne soit pas plus petite que la plus grande ouverture du diaphragme d'ouverture.

On peut mettre le diaphragme de champ, comme d'habitude, près du collecteur et alors le condensateur (c'est-à-dire l'objectif) en forme une image réelle rapetissée dans le plan de l'objet (supposé mis au point). Il est ainsi possible de régler aussi le champ éclairé. Mais il y a un avantage par rapport à la diascopie: en effet, dans cette dernière condition, le condensateur est fixe et forme une image du diaphragme de champ avec un agrandissement fixe; pour changer le champ éclairé il faut régler ce diaphragme ou modifier le condensateur. Quand on change d'objectif, et par suite le diamètre du champ objet, il faut effectuer une de ces régulations.

Par contre, en épiscopie, quand on change l'objectif, on change aussi le condensateur et les deux ont de force la même focale: le champ éclairé et le champ objet changent de la même quantité. En substance, quand on change l'objectif, on ne doit pas régler ni le diaphragme de champ ni le condensateur. L'objectif représente dans un microscope épiscopique un condensateur toujours parfaitement adapté à l'objectif même, toujours centré, avec des corrections excellentes.

Même pour le diaphragme de champ éclairé il y aura un problème de mise au point, en général préparée par le constructeur et valide d'une manière stable, et un problème de centrage (voir ci-après); celui-ci n'est normalement pas à modifier à chaque échange d'objectif. On exécute le contrôle en observant simplement un objet plan et en fermant tel diaphragme dont le bord apparaîtra dans le champ visuel. On centre le diaphragme de champ avec les commandes spéciales et puis on rouvre le diaphragme pour autant que ça suffit et pas plus; quand le contraste est insuffisant, une fermeture ultérieure de ce diaphragme porte à une réduction de la lumière diffuse. En général, toujours pour l'identité entre condensateur et objectif, le centrage exécuté pour un objectif restera valide pour tous les autres.

Le schéma de la fig. 122 s'applique aussi aux forts objectifs, même à immersion, c'est-à-dire quand la distance libre entre objectif et objet se réduit à quelque dixième de millimètre et un éclairage de côté ne serait pas possible. Mais ce schéma a un inconvénient: le faisceau éclairant que le miroir E renvoie vers l'objectif subit une réflexion partielle, soit à chaque surface des lentilles, soit à la surface éventuellement polie de l'objet. Tous ces reflets directs vers l'oculaire produisent beaucoup de lumière diffuse qui se superpose à l'image et en baisse gravement le contraste. C'est le principal problème de l'épiscopie.

Les remèdes à cet état de choses sont:

-- éliminer le couvre-objet (lamelle): c'est une surface en moins. Les objectifs épiscopiques sont calculés en effet pour travailler sans lamelle et ils portent l'indication "O" (ohne deckglas = sans couvre-objet) ou "0" ou "d = 0" dans laquelle **d** est l'épaisseur prévue pour la lamelle. Tels objectifs ne peuvent pas être utilisés avec des préparations couvertes par une lamelle, peine l'apparition d'aberration sphérique (perte de définition), qui grandit avec le cube de l'ouverture de l'objectif; cette limite est péremptoire pour des ouvertures plus grandes de 0,4;

-- utiliser l'immersion: le reflet sur la surface de l'objet et sur la surface extérieure de la lentille frontale est d'autant plus faible que l'index de réfraction de l'huile est plus semblable à celui de l'objet et de la lentille. Pour beaucoup de minéraux à index élevé, 1,6 - 1,8, sont prévus des objectif à immersion avec une huile à haut index (iodure de méthyle, monobromonaftalene, etc.);

-- soigner les traitements antireflets (§ 17.1.2); cela appartient naturellement au constructeur;

-- n'éclairer pas l'objet avec un splitter (E dans la fig. 122) qui occupe toute la pupille d'objectif, mais avec un prisme qui en occupe seulement une partie (P dans la fig. 123). Le reflet donné par cette partie marginale de la pupille peut concourir dans l'image intermédiaire, mais il est beaucoup plus réduit. Parfois il est possible de choisir avec une manœuvre rapide entre prisme et semi-réfléchissant;

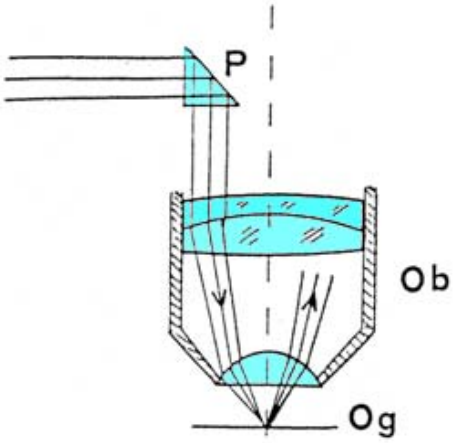


Fig. 123 - Éclairage épiscopique en fond clair avec prisme.

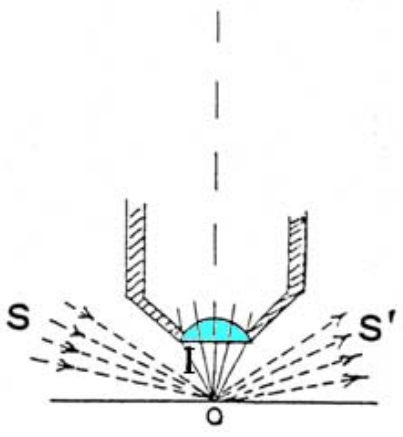


Fig. 124 (à droite) - Éclairage épiscopique en fond noir.

-- oblitérer partiellement le diaphragme d'ouverture; il existe souvent à ce but un diaphragme decentrable. On obtient un résultat semblable à celui de la fig. 123, c'est-à-dire un faisceau éclairant oblique, mais sans oblitérer la pupille d'objectif. L'éclairage du champ objet sera souvent peu uniforme, mais techniquement cette solution est simple et elle peut être efficace;

-- interposer deux filtres polarisants (voir les §§ 23.2 et 30.7), un devant le splitter (par ex. en B, fig. 122), l'autre au dessus du splitter (par ex. en A, même illustration). Le premier filtre ("polarisateur" en sens étroit) aura la direction de vibration perpendiculaire au plan d'incidence sur le splitter, de façon à s'accorder avec le pouvoir polarisant du miroir. L'objet et l'objectif sont ainsi frappés par une radiation polarisée: Les reflets produits par ceux-là, encore polarisés, joignent sur le second filtre ("analyseur", en A) qui sera en "extinction", c'est-à-dire avec le plan de vibration perpendiculaire à celui du polarisateur: le reflet sera éteint. Avec cette disposition, le reflet de la surface d'un objet poli disparaît et se verront seulement ces structures de l'objet, souvent celles situées sous sa surface brillante, qui diffusent la lumière et la dépolarisent. L'image résultera souvent un peu sombre, mais très différente de celle fournie par les dispositifs précédents (voire la figure à la page 343, § 29.11.3).

Dans le choix d'un instrument pour l'épiscopie il est alors bien s'assurer qu'au moins une partie de ces dispositions soit réalisable. Chaque constructeur offre des solutions différentes, et pour chaque type d'objet il faut choisir la technique la plus convenable.

Sur un microscope épiscopique il est possible d'appliquer en principe toutes les techniques spéciales ici dessous décrites (fluorescence, contraste de phase, contraste interférentiel, polarisation, etc.) avec des accessoires spéciaux, trop variés et complexes pour être illustrés ici.

Comme on a expliqué auparavant, le semi-réfléchissant est traversé deux fois: tout d'abord par le faisceau éclairant, avant d'entrer dans l'objectif, ensuite par le faisceau formateur d'image, réfléchi ou diffusé par l'objet et dirigé à l'oculaire. Chaque fois, une partie de la radiation va perdue. On a déjà expliqué comme le meilleur rendement photométrique possible global est de 25% et on l'a quand le rapport réflexion/transmission est de 50%, en supposant nulles les pertes par absorption, diffusion, etc. L'image en épiscopie est donc en général peu lumineuse. Si l'objet est diffusant, on observera encore une perte de luminosité même avec les objectifs les plus faibles: ceci est dû au fait qu'ils équivalent à un condensateur à petite ouverture et par suite à un flux faible sur l'objet et le flux diffusé par l'objet (sur un angle solide ample) ne vient pas en grande partie récupéré par l'objectif. Si l'objet est par contre parfaitement réfléchissant (plan et perpendiculaire à l'axe optique) la luminosité finale ne dépend pas de l'objectif utilisé étant donné que l'ouverture du condensateur et de l'objectif sont nécessairement identiques.

La surface semi-réfléchissante jusqu'à présent discutée, contenue dans l'illuminateur épiscopique, peut être représentée par une des faces (opportunément traitée) d'une lame en verre aux faces planes et parallèles; l'autre face en général portera un bon traitement anti-réfléchissant pour réduire les reflets non souhaités (lumière diffuse) et la formation d'une double image de la source, des diaphragmes, etc. Celle-ci est la solution la plus économique, mais elle a un inconvénient: la présence d'une lame aux faces planes dans le faisceau formateur d'image (lame pas perpendiculaire à l'axe) induit la formation de petits résidus d'astigmatisme pas symétrique, qui nuisent à la définition de l'image, même sur l'axe.

À sa place, la surface semi-réfléchissante peut être constituée par la face interne diagonale d'un prisme cubique composé par deux semi-prismes avec section à forme de triangle rectangle isocèle (voir la fig. 34 C, § 11). Cette solution introduit donc une lame de forte épaisseur au dessus de l'objectif et donc elle est utilisée en général avec des objectifs "à seconde conjuguée infinie" qui ne reçoivent pas de détriment par l'introduction d'une telle épaisseur de verre (§ 3.2.3); en outre elle élimine le problème des reflets sur la seconde face. Elle élimine aussi le problème de l'astigmatisme. En certains cas (Jena, etc.), cependant, le prisme montre les deux faces d'entrée et de sortie pas parfaitement perpendiculaires à l'axe: ceci a le but de faire sortir du faisceau utile le reflet de ces deux faces (lequel empire la lumière diffuse), mais il se représente le problème de l'astigmatisme, très réduit en vérité pour le fait que ces deux faces ne sont pas inclinés de 45° par rapport à l'axe, mais presque.

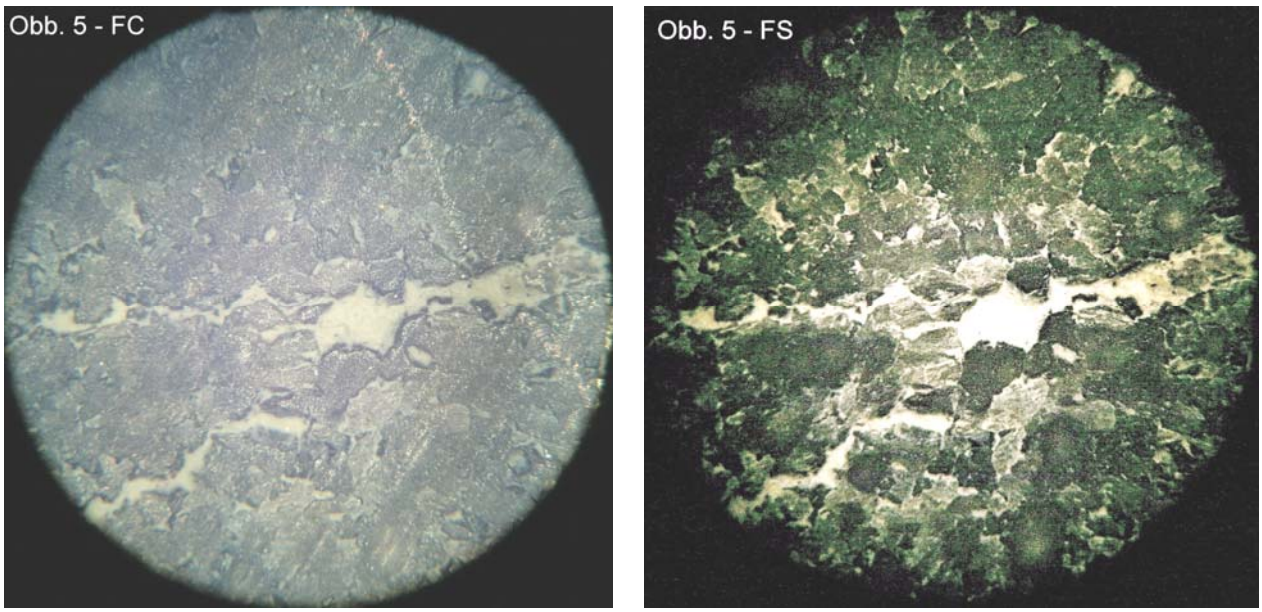
30.1.1 - L'épiscopie en fond noir

Si l'objet est plan, perpendiculaire à l'axe et plus ou moins poli, le faisceau éclairant qui frappe sur l'objet vient au moins en partie réfléchi vers l'objectif et forme l'image intermédiaire qui donc sera formée par un "fond clair"; sur celui-ci se verront, plus ou moins sombres, ces structures de l'objet, ces irrégularités de sa surface, qui diffusent ou absorbent le faisceau éclairant.

Le reflet de la surface brillante de l'objet ne produit donc pas pour soi même aucun contraste.

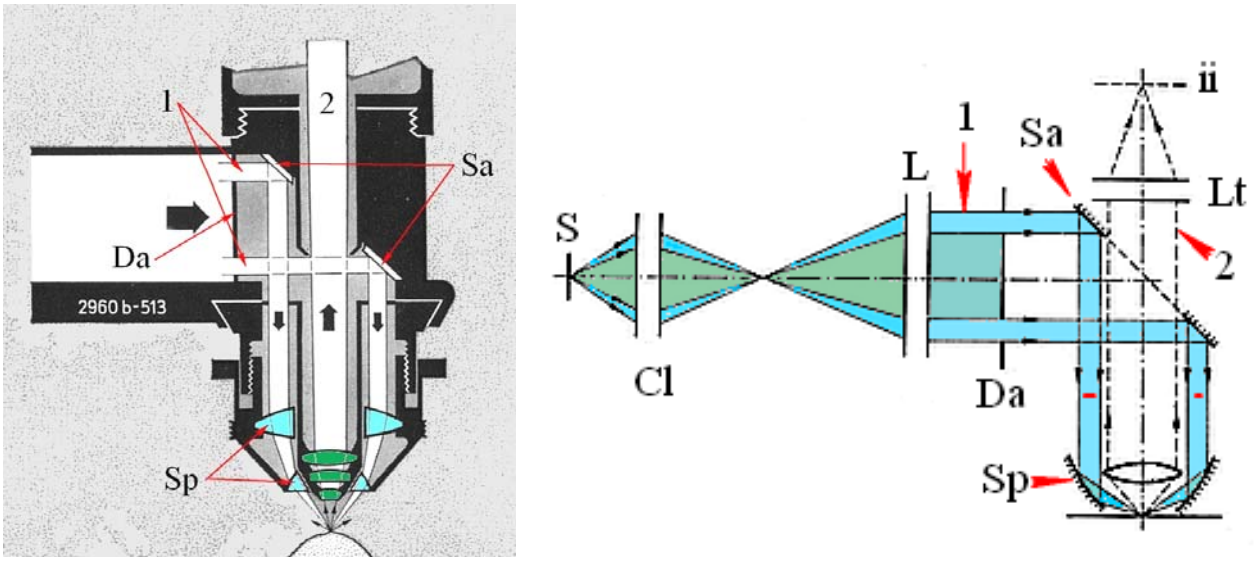
Mais nous observons la fig. 124 (pag. 353): **I** indique le faisceau de plus grande ouverture accepté par l'objectif, le faisceau qui ensuite forme l'image intermédiaire. À l'extérieur du même il y a un faisceau à forme de cône creux (**S**), qui comprend toutes les valeurs d'ouverture externes au faisceau **I**. Si nous éclairons l'objet (O), avec un faisceau, si possible convergent en O, on aura un faisceau réfléchi **S'** qui reste encore à l'extérieur du faisceau **I (**si la surface de l'objet est perpendiculaire à l'axe optique). Donc le faisceau éclairant, même après la réflexion sur l'objet, ne pénètre pas dans l'objectif et le fond de l'image apparaît noir ("fond noir"). Sur tel fond se verra plus ou moins claire chaque structure et irrégularité de l'objet capable de réfléchir ou diffuser un peu de lumière en direction de l'objectif, à l'intérieur du faisceau **I**. Étant donné que le faisceau éclairant ne traverse pas l'objectif, tombe le problème des reflets sur les lentilles et de la perte conséquente de contraste.

Quand l'objet est très irrégulier et diffusant, la distinction entre fond clair et noir vient en bonne partie à tomber: dans ce cas, de n'importe quelle côté vienne le faisceau éclairant, l'image sera formé seulement par la radiation diffuse. Le problème du reflet sur l'objet disparaît. Le problème du reflet reste sur les lentilles, dans le cas du champ clair, pour laquelle raison **le fond noir donnera en général un meilleur contraste** (voir la figure ici dessous).



Le même objet (surface polie d'un échantillon de bois silicifié) éclairé en fond clair (à gauche) ou en fond noir (à droite), naturellement en épiscopie.

Pour le fond noir il s'agit alors de créer un faisceau très incliné (S dans la fig. 124), si possible convergent sur le centre du champ (O), si possible provenant de toutes les directions: donc un faisceau annulaire. On obtient ceci en réalisant avec des miroirs, lentilles, ou les deux, un condensateur annulaire qui entoure l'objectif (Sp dans la figure suivante). Tel condensateur reçoit un faisceau éclairant annulaire, à forme de cylindre creux (1), qui est produit par une lampe spéciale située de côté, sur l'objectif (S-Cl-L), et qui est réfléchi vers le bas par un miroir annulaire (Sa), toujours incliné de 45° sur l'axe. À travers le trou central de tel miroir passe le faisceau émergent de l'objectif (2) qui ira former l'image intermédiaire (ii).



(à gauche): objectif épiscopique avec condenseur à deux lentilles annulaires (Sp)(cliché Leitz, modif.).
(à droite): système éclairant pour épiscopie en fond noir avec condenseur à miroir (Sp). **Lt** est la lentille du tube. **Da** est un diaphragme annulaire (cliché Zeiss Jena, modif.).

Le condensateur annulaire d'habitude fait corps unique avec l'objectif qui prend ainsi un diamètre très supérieure au normal. Aussi la fixation de l'objectif est plus grande que le normal: ou il s'agit d'un pas de vis augmenté (M 30, par ex.) ou d'une fixation à coulisse. S'il y a un revolver (les coulisses portent en général un seul objectif), il devra lui aussi porter des trous augmentés.

Ces objectifs pour épiscopie en fond noir peuvent être utilisés aussi pour le champ clair et ils existent des instruments avec un système éclairant complexe, capable de servir pour le champ clair comme celui de la fig. 122 (pag. 351), avec splitter et/ou prisme, et aussi pour le fond noir, avec le miroir-condenseur annulaire. Naturellement, comme pour tous les objectifs épiscopiques, au moins pour les forts, il est exclu l'examen des normales préparations avec couvre-objet. Sont possibles des observations en immersion avec les objectifs prévus pour cela.

L'illuminateur épiscopique, avec les objectifs spéciaux à utiliser sans lamelle, distingue alors le microscope épiscopique de celui diascopique. L'illuminateur existe essentiellement en deux versions:

1) accessoire spécial à insérer entre l'extrémité du bras et le tube porte-oculaires, donc au dessus du revolver. Le statif dans ce cas est souvent de type normal (§ 25);

2) système intégré, contenu dans la colonne ou dans le bras (§ 27.1.3). Il s'agit de statifs spécifiquement conçus, qui peuvent cependant, si le constructeur l'a prévu, être utilisés aussi en diascopie ou avec des autres techniques.

L'utilité de l'épiscopie est bien connue dans le champ de la métallographie, où c'est la seule technique applicable, de la pétrographie, des semi-conducteurs, des circuits intégrés, etc., mais elle est presque ignorée par les naturalistes qui en auraient par contre grand avantage dans l'observation des structures superficielles des organes: reliefs de l'épiderme, stomates, poils, parasites de surface, sculptures de la cuticule des insectes, soies, etc. Telle observation est normalement exécutée avec le microscope stéréoscopique (§ 29), mais avec la limite d'agrandissement qu'on a expliqué (50 - 100 × totale), pendant que l'épimicroscope permet aussi l'usage des objectifs à immersion (voir, dans ce site, l'article n° 8.)

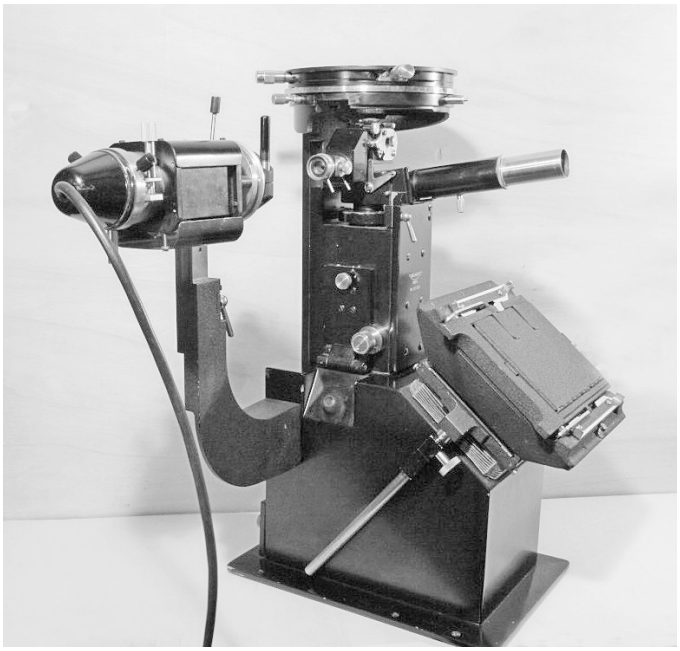
30.1.2 - Statifs renversés

Quand l'objet est grand et lourd, et de forme irrégulière (échantillon de roche par ex., avec une surface plane), ce n'est pas confortable de l'appuyer sur une platine normale et de l'observer du haut.

À part la nécessité de baisser la platine, il faut se servir de quelque soutien qui tienne bien orienté l'objet, avec la surface polie perpendiculaire à l'axe optique[216]. Mais c'est plus pratique un statif "renversé" dans lequel l'axe optique est replié par des prismes opportuns en manière que l'objectif (et sa lentille frontale) soient tournés vers le haut: objectif et revolver sont rangés au DESSOUS de la platine et ils regardent l'objet par-dessous. La surface polie de l'objet s'appuie sur la platine qui en assure directement l'orientation correcte, sans autres interventions. Ce schéma renversé, que porte le nom de Le Chatelier, normalement peut être utilisé seulement en épiscopie étant donné qu'il est dédié à l'observation de champions métallographiques de grandes dimensions. Mais on peut l'utiliser aussi en diascopie (cultures, microacquariums) s'il y a un système éclairant ad dessus de la platine: on peut observer donc, par-dessous, le fond du récipient, où se recueillent souvent les cellules et les micro-organismes. Voir le § 27.1.5 et la figure 108.

En épiscopie, la forme et les dimensions de l'objet peuvent changer dans des amples limites: il est suffisant que l'objet présente une surface plane, en général polie, à appuyer sur la platine.

La mise au point dans ces statifs est confiés souvent au mouvement du revolver, mais ne manquent pas des statif dans lesquels c'est la platine à se déplacer (figure suivante).



Statif renversé Reichert MeF 1, monoculaire, pour métallographie.

En haut, le platine ronde tournable. À droite, en bas, le châssis pour plaques photographiques. À gauche, la lampe.

Le faisceau qui émerge de l'objectif est dirigé vers le bas. Pour des raisons de commodité, les oculaires doivent encore être tournés de manière que l'observateur regarde vers le bas: avec des miroirs opportuns ou des prismes à réflexion interne, le faisceau formateur d'image est orienté vers le haut, c'est-à-dire vers les oculaires.

Sur les côtés de la base, il y aura souvent les fixations pour une microcaméra, une caméra de télévision, etc.

30.2 – Le FOND NOIR et l'éclairage OBLIQUE en DIASCOPIE
(art. n° 33 e 35)

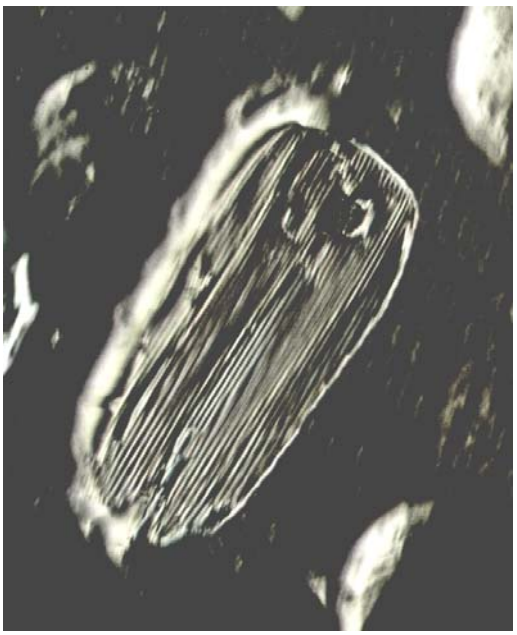
Maintenant nous commençons l'examen des "**techniques de contraste**". Elles sont nés depuis les origines de la microscopie pour permettre l'examen d'objets que pour soi-même sont peu contrastés: cellules isolées, micro-organismes, sections de tissus non colorés, etc.

Tels objets viennent normalement rendus contrastés au moyen de colorations sélectives, c'est-à-dire en traitant l'objet avec des colorants capables de s'établir sur certaines parties de l'objet et spécifiquement seulement sur celles-là. La coloration cependant tue en général les cellules et elle doit être précédée par une "fixation", c'est-à-dire un traitement chimique préalable qui tue rapidement et conserve la structure de l'objet. En chaque cas, la coloration est un procédé lent et parfois complexe. Pour une observation rapide, même sur des objets vivants, on doit modifier l'image avec des moyens optiques, sans intervenir sur l'objet même. Le moyen le plus simple est le "champ noir" ou "fond noir".

[216] Parfois ça suffit une plaque revêtue de pâte à modeler sur laquelle l'objet est positionné correctement au moyen d'une petite presse.

On a déjà parlé du fond noir en épiscopie, qui est dédié aux objets opaques; on peut appliquer ce type d'éclairage aussi aux objets transparents: c'est ce que s'appelait, quand il fut introduit, "ultramicroscopie" (Siedentopf et Zsigmondy, chez Zeiss). Son premier but était l'observation de menues particules en suspension dans un liquide. L'éclairage latéral était obtenu avec différentes solutions pratiques capables d'éclairer l'objet avec un faisceau rasant, d'un seul côté ("unilatéral") ou de tous les côtés ("omnilatéral").

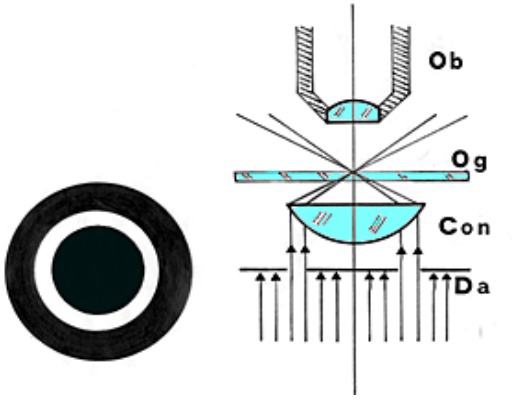
On peut donc obtenir le fond noir aussi en diascopie, c'est-à-dire avec des objets transparents éclairés avec un faisceau de forte inclinaison qui arrive toujours du côté, mais par-dessous le plan objet. L'objet apparaîtra lumineux étant donné qu'il diffuse en direction de l'objectif une partie de la radiation qui le frappe, mais le fond de l'image sera encore sombre étant donné que le faisceau éclairant aura une ouverture plus grande de celle maximale de l'objectif et il lui échappera. Le contraste est ainsi beaucoup plus fort. Pour un **fond noir unilatéral** en diascopie il faut seulement un système optique capable de fournir un faisceau concentré provenant d'un seul côté par rapport à l'axe optique (§ 18.10). L'objet apparaîtra vivement ombragé à cause de l'asymétrie de l'éclairage. On peut réaliser ce schéma aussi avec un condensateur normal, à la condition que son ouverture maximum soit plus grande de celle de l'objectif.



L'écaille de l'aile d'un papillon, en éclairage oblique (fond noir) unilatéral, diascopie. Obj. 50/0,85.

Maintenant il faut revenir à la fig. 90 (§ 21.8), ici à côté. (fig. 90)

On suppose que, sous le condensateur ("Con" dans la figure 90) il y a un écran opaque, **Da**, avec une zone annulaire transparente, concentrique à l'axe optique; cette "zone", dans la figure, correspond à l'ouverture maximum du condensateur, et ce dernier transforme le faisceau creux cylindrique qui traverse **Da** dans un faisceau conique, toujours creux, qui se dirige sur le centre de l'objet, **Og**. Le faisceau ensuite, au-dessus du plan d'**Og**, continue en devenant divergent; son inclinaison, sa moindre ouverture, est cependant supérieure à celle de l'objectif pour laquelle chose le faisceau échappe à l'objectif même et le fond de l'image reste sombre.



Le schéma de la fig. 90 prévoit donc un diaphragme annulaire, **Da**, sous le condensateur et par suite un éclairage de l'objet de tous les côtés: c'est le **fond noir omnidirectionnel**, qui ne produit pas des effets de grisé (voir l'image 131 à la fin de ce texte). Si par contre l'écran en **Da** présente un trou ou une fente d'un seul côté, on a le **fond noir unilatéral**. Le passage du schéma unilatéral à celui omnidirectionnel dépend seulement de la forme du diaphragme en **Da**.

Mais, si le condensateur a une ouverture non supérieure à celle de l'objectif, comme il arrive souvent avec un fort objectif et un normal "condensateur d'Abbe" utilisé à sec (§§ 21.6 et 16.5), il est évident que le faisceau conique produit par un diaphragme annulaire comme celui de la fig. 90 entrera au moins en partie dans l'objectif et le fond image ne sera plus sombre. Et se présentent ici deux cas.

Le pollen de *Pinus silvestris* L., en éclairage oblique, diascopie. Obj. 20/0,45.

1) Si le diaphragme n'est pas annulaire, mais excentrique, comme celui prévu pour le fond noir unilatéral, on n'aura pas le fond noir, mais simplement un **éclairage oblique**. Eh bien, ce type d'éclairage s'obtient d'un condensateur normal - pourvu qu'on tienne tout ouvert le diaphragme d'ouverture - simplement en mettant près du diaphragme même un écran avec un trou de quelque millimètre de diamètre et en tenant le trou en position le plus possible excentrique. Il peut suffire d'enfiler une pièce de carton sous le condensateur et de le pousser jusqu'à oblitérer une bonne partie de la relative pupille d'entrée.

La technique est donc simple et le résultat peut être surprenant étant donné que, au-delà à un effet de grisé qui fournit une vive **impression de relief** (figure à côté), on a une augmentation considérable du contraste. N'importe quel microscope normal achalandé d'un condensateur, même de qualité modeste, permet de bénéficier de cette possibilité, même avec les objectifs à immersion. Le plus grand inconvénient est évident: la luminosité de l'image diminue beaucoup, mais ce n'est pas le seul. Dans le chapitre suivant ("Modulation d'amplitude") on en illustre des autres.

2) Si on exige par contre un fond semi-sombre omnidirectionnel, alors on a deux cas:

••• Objectifs à sec forts: un condensateur normal n'a pas une ouverture suffisante, mais surtout il a des aberrations si fortes que le faisceau éclairant n'a pas des limites définies et le fond n'est jamais homogènement gris. Pour ce cas il est bien replier sur le fond noir complet et recourir aux condensateurs spéciaux, très corrigés des aberrations, basés au moins en partie sur des miroirs concaves ou convexes (libres de l'aberration chromatique): ce sont les condensateurs "cardioïdes", "paraboloïdes", etc., d'ouverture forte, qui doivent être utilisés à sec et ils possèdent un mécanisme interne de centrage. Dans la fig. 125a on voit le schéma d'un exemple typique. Sous le système des miroirs est indiqué le diaphragme annulaire habituel.

••• Objectifs à immersion. Étant donné que ces objectifs, comme il est dit dans le § 16, atteignent souvent les ouvertures maximales techniquement possibles, aucun condensateur, même pas à immersion, peut posséder une plus grande ouverture. Ces objectifs peuvent donc servir en champ noir à condition de limiter leur ouverture au moyen d'un diaphragme interne (à part le cas de l'éclairage oblique). Voir la figure 125b.

Fig. 125a (à droite) - Condensateur "cardioïde" pour diascopie en fond noir à sec. Avec des lignes esquissées est indiquée la lumière diffusée par l'objet.

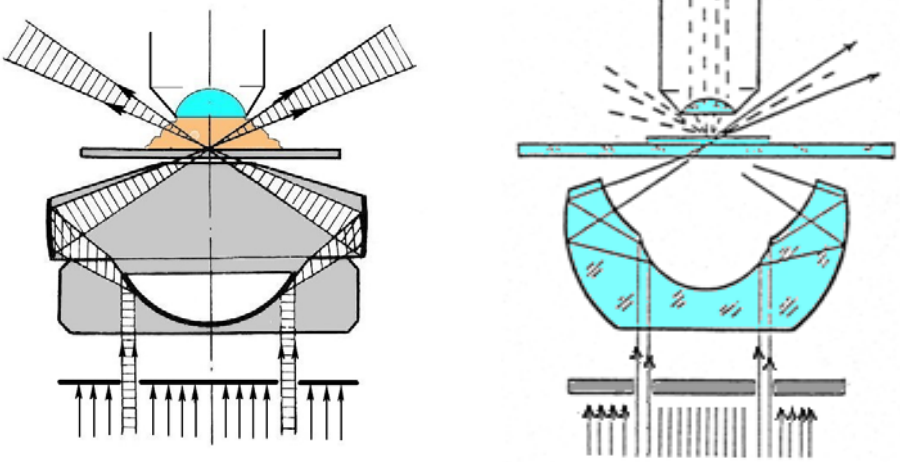


Fig. 125b (à gauche) - Condensateur pour fond noir à immersion. L'huile est colorée en jaune.

On peut obtenir cette réduction avec des spéciaux “petits cylindres limiteurs”, petits diaphragmes fixes qui s’introduisent du haut dans l’objectif, ou avec des objectifs spéciaux (“à iris”) contenants un diaphragme à iris manœuvrable de l’extérieur au moyen d’une bague.

Avec ces astuces, l’ouverture de l’objectif vient réduite à la valeur d’environ 1,0 et l’ouverture du faisceau éclairant venant du condensateur pourra espacer entre environ 1,1 et 1,45.

Naturellement, on peut obtenir ce résultat seulement si le condensateur est à immersion (§ 16). Il devra terminer supérieurement avec une surface très voisine du plan de la préparation, et entre les deux surfaces doit être mis un voile d’huile.

La structure de ces condensateurs pour fond noir à immersion est semblable à celle des condensateurs à sec décrite plus haut (fig. 125a), à part la nécessité de la fenêtre de sortie plane pour soutenir la couche d’huile et autres détails internes (fig. 125b).

Avec les condensateurs à immersion il est possible d’utiliser aussi les objectifs à sec: le faisceau éclairant, en ayant une ouverture supérieure à 1, sera réfléchie “totalement” à la surface supérieure du couvre-objet et sera renvoyé vers le bas.

On doit rappeler que les objectifs à immersion avec diaphragme, chaque fois qu’on réduit leur ouverture, perdent en luminosité et résolution; le diaphragme doit donc être rouvert dès qu’on revient à l’usage en champ clair. Un oubli dans ce sens est hautement probable; c’est pourquoi tels objectifs sont faits souvent travailler à ouverture réduite: même involontairement, la bague de commande du diaphragme peut être tourné quand on tourne le revolver et personne s’en aperçoit. Les objectifs à diaphragme doivent donc être continuellement contrôlés.

Par contre, l’éclairage oblique décrit auparavant ne demande pas une réduction d’ouverture de l’objectif et il ne provoque donc pas des pertes de résolution.

En résumant, le fond noir et l’éclairage oblique se réalisent sur n’importe quel microscope; pour les objectifs faibles à secs ça suffit un condensateur normal et un diaphragme annulaire, qu’on peut auto-construire avec un disque de verre et un disque encore plus petit, en carton noir, collé au centre du précédent. Le diamètre du disque en verre (on peut utiliser aussi une feuille transparente semi-rigide en plastique, coupée avec un emporte-pièce) se déduit du diamètre interne des porte-filtres; le diamètre du disque en carton doit être autant plus grand que plus haute est l’ouverture de l’objectif en usage; on procédera par tentatives, mais le système peut fonctionner normalement avec des disques de 20 - 25 mm de diamètre et avec des objectifs d’ouverture jusqu’à environ 0,65.

Pour les forts objectifs à sec il faut en plus un condensateur convenable, à sec, si possible bien corrigé (achromatique et/ou aplanatique); pour ceux à immersion il faut un objectif avec diaphragme et un condensateur (spécial, pour champ noir) à immersion.

30.3 – Le CONTRASTE à MODULATION d’AMPLITUDE

(voir l’article n° 33)

Nous avons à peine décrit la technique de l’éclairage oblique; maintenant nous examinons quelques variations sur ce sujet.

Nous considérons un faisceau éclairant étroit (d’ouverture modeste), et nous analysons quelques conditions possibles:

1) Si le faisceau est plus ou moins centré et il occupe donc la partie centrale de la pupille de sortie de l’objectif, on a un éclairage normal en diascopie avec le diaphragme d’ouverture partiellement fermé. On peut avoir une augmentation du contraste[217] et une perte de résolution, comme on a déjà dit à son temps;

2) Si le faisceau est plus ou moins oblique et il traverse donc une partie plus ou moins marginale de la pupille de sortie de l’objectif, on a l’éclairage oblique, décrit au chapitre précédent: le

[217] L'image de l’objet au niveau de l’image intermédiaire est formé en majorité par une radiation diffractée, qui donne une image claire de l’objet même, pendant que le fond est peu lumineux à cause de la fermeture du diaphragme d’ouverture.

fond du champ visuel est clair et l'objet apparaît en relief, ombragé, parce que son image est formée (au niveau de l'image intermédiaire) par la radiation diffractée en majorité d'un côté de l'objet, du côté dirigé vers l'axe optique. La radiation diffractée de l'autre côté, c'est-à-dire du côté contraire à l'axe, ne vient pas en bonne partie recueillie par l'objectif étant donné qu'elle sort de son ouverture utile. Étant donné que le faisceau éclairant est oblique, c'est-à-dire il souffre d'une dissymétrie en sens azimutal, aussi l'image finale montrera un contraste avec un effet directionnel: un objet générique apparaîtra plus sombre d'un côté et plus clair de l'autre, comme s'il était, et il est effectivement, éclairé par un côté et il créât des ombres unilatérales. Cet effet directionnel crée des difficultés dans l'observation de structures allongées en direction du plan dans lequel se trouvent le faisceau éclairant et l'axe du système: même dans l'observation normale, un bâton appuyé sur le plancher produit une ombre moins marquée par terre s'il est éclairé d'une direction parallèle à la sienne. Ceci peut créer de la confusion et il exige la rotation fréquente de l'objet autour de l'axe ou de toute façon une interprétation attentive de l'image.

3) Si le faisceau est incliné au point à sortir complètement de la pupille de sortie de l'objectif, on a le fond noir de l'image, mais l'objet apparaîtra clair étant donné que son image est formée (seulement) par la lumière diffractée. Ici aussi, pour les mêmes motifs, on a un contraste avec effet directionnel et l'objet apparaît "ombragé". C'est le normal "champ noir unidirectionnel", déjà décrit.

4) Si le faisceau est moins incliné par rapport au cas précédent et il tombe à cheval du bord de la pupille de sortie de l'objectif, le fond image apparaîtra plus ou moins clair et l'objet apparaîtra clair avec effet de grisé. C'est celle-ci une condition intermédiaire entre les cas 2 et 3, décrite auparavant: tout dépend de quelle partie du faisceau éclairant pénètre dans l'objectif et de combien d'elle va perdue; elle ne va pas perdue cependant aux buts de l'image de l'objet, en tant qu'elle coopère à former le faisceau diffracté par l'objet même, faisceau qui est assez ouvert à pénétrer toujours, au moins en partie, dans l'ouverture utile de l'objectif.

Voilà donc que sont nées des solutions spéciales qui réalisent le cas 4 de manière différente. En substance, il s'agit de régler l'ouverture moyenne et, génériquement, les dimensions du faisceau éclairant de façon à doser la fraction de lui qui pénètre dans l'objectif, et détermine la luminosité du fond image, et la fraction qui n'y pénètre pas, et contribue à former l'image de l'objet. On contrôle ainsi le contraste, c'est-à-dire la luminosité relative du fond de l'image et de l'objet.

On commence en général par un écran opaque placé dans le premier plan focal du condensateur, à la place du diaphragme d'ouverture, qui doit de toute façon être tout ouvert. L'écran porte un trou ou une fente excentrique. Étant donné qu'à chaque objectif correspond une différente ouverture, il faudra un différent écran pour chaque objectif prévu: dans le condensateur sera présent un disque-revolver qui porte différents écrans.

Ceci pourrait suffire mais, pour augmenter la souplesse du système, ils existent des solutions plus sophistiquées dans lesquelles la fente dans l'écran est occupée partiellement (du côté interne) par un filtre polarisateur; dessous le condensateur on trouve un autre polarisateur, qui est traversé par l'entier faisceau éclairant provenant de la microlampe, et il est tournant autour de l'axe optique. Pour ce qu'on déclarera ci-après, deux filtres polarisateurs en série peuvent montrer une transmission totale qui va de 40% environ à presque 0% selon l'orientation relative. Donc, en actionnant le polarisateur inférieur, la partie interne de la fente dans l'écran à peine décrit peut avoir une transparence variable jusqu'à zéro, pendant que la partie externe, sans polarisateur, a une transparence fixe. Étant donné que la partie interne de la fente fournit un faisceau moins oblique qui rentre dans la pupille de l'objectif et la partie externe fournit un faisceau qui va perdu au point de vue du fond de l'image, il est possible, en changeant la transparence de la partie interne avec le moyen à peine décrit, changer la luminosité du fond par rapport à celle de l'objet qui reste fixe. Donc, changer le contraste.

Cette solution est adoptée dans la technique du "contraste à modulation de Hoffman" (Robert Hoffman, 1975), ou "**contraste à modulation d'amplitude**" qui est en train de se répandre. Mais avec une autre sophistication: dans la pupille d'objectif vient placé un filtre "modulateur" constitué par une lame en verre sur la marge de laquelle se trouve une bande semi-transparente (T = 15%, par exemple) tangente à la circonférence de la lame; encore plus à l'extérieure, une seconde

bande presque opaque qui termine avec le bord du “modulateur” (T = 1% ou semblables). En changeant la largeur utile de la fente au moyen de la rotation du polarisateur, il est ainsi possible de faire tomber le faisceau éclairant plus ou moins sur la partie transparente ou sur la partie opaque du modulateur. On remarque que le modulateur n’altère pas la phase du faisceau qui le traverse mais seulement l’intensité (l’amplitude), pour laquelle chose s’explique le terme “modulation d’amplitude” ou “contraste d’amplitude”.

Étant donné que les deux polarisateurs se trouvent devant l’objet, on n’a pas des grandes difficultés dans la formation de l’image d’objets biréfringents. Les raisons de cette affirmation seront claires après la lecture du paragraphe sur le microscope polarisateur (§ 30.7). Difficultés de ce genre se trouvent par contre avec les techniques basées sur l’usage de la radiation polarisée comme le DIC (§ 30.5).

30.4 – Le CONTRASTE de PHASE

(artt. n° 25 (en français), 33 et 35)

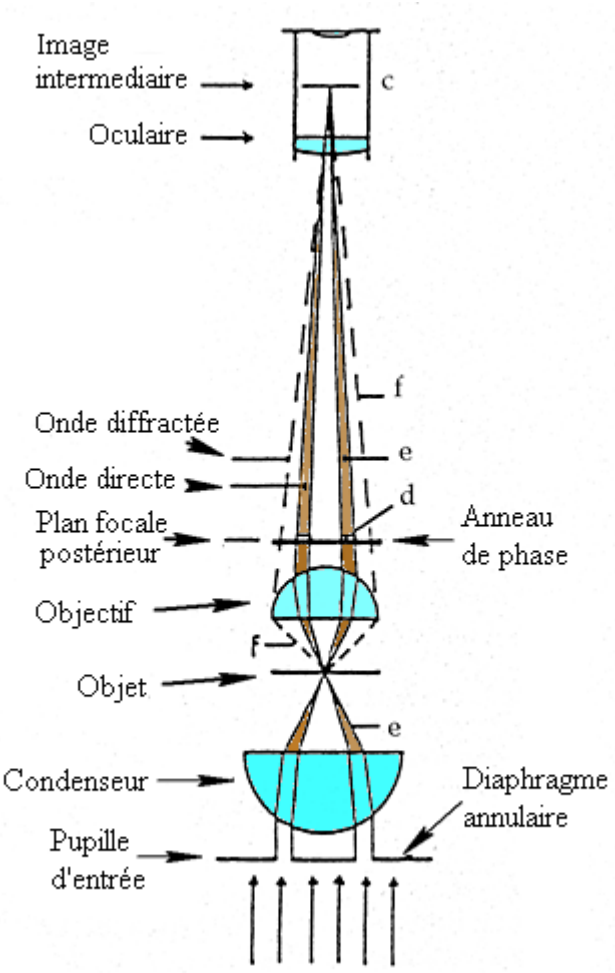


Fig. 126 - Schéma du contraste de phase. Avec des lignes esquissées est indiquée la lumière diffusée par l’objet.

Aussi cette technique de contraste s’adresse aux objets peu contrastés, ne pas colorés, comme cellules et micro-organismes vifs. Dans ces cas, d’un point à l’autre de l’objet, il y a seulement des différences d’index de réfraction et par suite de vitesse de propagation de la lumière: les rayons qui ont traversé des points différents de la préparation sont en avance ou en retard l’un par rapport à l’autre et ont entre eux, entre les ondes correspondantes, des différences de phase. Les objets à peine décrits son appelées donc “**objets de phase**”.

Dire “différence de phase” signifie que quand une onde est arrivée à un moment donné de son cycle ou “période”, par ex. au point de plus grande amplitude positive, une autre onde n’y est pas encore arrivée (retard) ou elle y est déjà passée (avance).

Pour comparaison, un objet plus ou moins coloré diffère d’un point à l’autre par la couleur ou le pouvoir de transmission: les rayons qui le traversent ne diffèrent pas entre eux par la phase, mais par l’intensité, c’est-à-dire par l’amplitude de l’onde, et on parle d’“**objets d’amplitude**”, comme pour une normale préparation colorée.

En parlant du fond noir, ont a faites des considérations analogues, et on a vu quel est l’avantage de cette technique dans l’observation d’une préparation de phase: on peut observer des objets transparents, même vivants, sans aucun traitement préventif, avec la certitude qu’ils n’y a pas les altérations souvent provoquées par la fixation et la coloration.

Le contraste de phase a donc des applications semblables à celles du fond noir, mais avec deux différences:

- Le “fond” est clair, soit-il moins lumineux qu’en champ clair, à égalité d’autres conditions.
- On ne voit pas seulement les contours des objets, ou plutôt les lignes le long desquelles il y a une variation d’index de réfraction, mais tout l’objet apparaît plus sombre (“contraste positif”)

ou plus clair du fond ("contraste négatif")[218], au moins s'il est de petites dimensions.

Le principe de fonctionnement est complexe; on regarde la fig. 126 (et l'article n° 25, en français). Dessous au condensateur il y a un diaphragme annulaire, mais avec une ouverture telle que le faisceau creux qui le traverse (**e** dans la figure) est entièrement accueilli par l'objectif. Ce faisceau éclairant, en principe, traverse l'espace "libre" de la préparation[219] sans être altéré et, au-delà de l'objectif, il se dirige vers l'image intermédiaire (**c**). Nous pouvons l'appeler "**faisceau direct**". Il fournit la luminosité du fond de l'image. Sa phase, dans la pupille d'objectif, peut se prendre comme référence et on dira donc que le faisceau direct n'est pas déphasé, même si en réalité il est ainsi.

Tout de même, en traversant l'objet, une petite fraction de ce faisceau direct vient diffuse (par réfraction, réflexion et diffraction) dans un espace très ample; dans la fig. 126 sont indiquées avec des lignes esquissées les limites de cette partie du faisceau diffracté qui est accueillie par l'objectif (**f**). Aussi cette dernière conflue dans l'image intermédiaire, en correspondance de l'image de l'objet et on peut montrer qu'elle est retardée de phase (pour environ 1/4 λ) par rapport à l'onde directe (**e**).

Dans la pupille de sortie de l'objectif il y a donc une zone annulaire, **d** , traversée par le faisceau direct, ne pas déphasé (**e**): on a déjà montré qu'en **d** se forme une image réelle du diaphragme du condensateur. À ce point, en **d** on pose un filtre annulaire spécial (bague ou **anneau de phase**) capable d'altérer (nous verrons comme) l'état du faisceau direct; le faisceau diffracté traverse par contre seulement en petite partie la bague de phase étant donné que il occupe la pupille entière de l'objectif et il est par suite substantiellement inchangé, au sens qu'il ne ressent pas de d'action de l'anneau de phase, mais il est retardé de toute façon de 1/4 λ à l'oeuvre de la diffraction.

Dans un microscope normal, le faisceau direct et celui diffracté se superposent dans l'image intermédiaires (c) sans produire aucun effet[220]; de ça vient le manque de contraste pour un objet transparent. Par contre, pour la présence de l'anneau de phase, le faisceau direct est atténué et anticipé de phase de 1/4 λ (contraste positif), ou retardé (contraste négatif) de manière que, dans l'image intermédiaire, il se trouve en opposition de phase avec celui diffracté et il peut produire une interférence destructive (objet plus sombre du fond) ou se trouve en concordance de phase et il produit une interférence constructive (objet plus clair). On rappelle que, en correspondance de l'image de l'objet, se superposent l'onde directe, inaltérée, et l'onde diffractée par l'objet même.

En pratique, le contraste de phase se réalise en mettant dessous au condensateur un diaphragme annulaire; l'objectif, sauf exceptions, est spécial en tant qu'il contient à son intérieur l'anneau de phase[221]. À chaque objectif doit correspondre un différent diaphragme annulaire pour lequel, d'habitude, au dessous du condensateur il y a un disque-revolver avec les trois-cinq diaphragmes nécessaires pour les correspondants objectifs de phase. Le statif peut être normal.

Le condensateur de phase comprend toujours une position du disque-revolver prive de diaphragme annulaire, à utiliser en fond clair. Rarement il est possible avec le même condensateur avoir aussi le fond noir.

L'anneau de phase est maintenant adopté universellement, mais des "plaques de phase" d'autre forme ont historiquement été essayées (à ruban, à croix, etc.) La forme annulaire assure que le contraste ne montre pas des directions préférentielles, comme il arrive par contre avec l'éclairage oblique (voir plus haut), avec le DIC (voir plus loin), etc.

---

[218] Celui-ci, comme d'autres discours qui suivent, suppose que l'objet soit plus réfringent du milieux dans lequel il est plongé, comme il arrive très souvent pour les cellules ou organismes suspendus dans l'eau. Si l'objet est moins réfringent, les contrastes s'inversent. Sur ce sujet, voir en particulier l'art. n° 33, dans ce site.

[219] C'est-à-dire l'espace au dehors des cellules ou des micro-organismes; telle espace doit être ample. Dans une préparation de phase on recommande toujours de mettre peu d'objets dilués dans beaucoup de liquide, justement pour permettre les corrects rapports de phase.

[220] On peut en effet montrer qu'ils sont déphasés l'un par respect à l'autre de 1/4λ et, en interférant entre eux, ils reproduisent une onde environ de la même ampleur de l'onde qui a traversé la zone libre de la préparation.

[221] L'anneau de phase se voit en observant un objectif du haut et en tournant la lentille frontale vers une surface éclairée étendue (une fenètre, un papier blanc, par ex,).

Ils existent aussi des objectifs de phase à immersion.

À côté de l'augmentation du contraste, la présence de l'anneau de phase produit un effet gênant: pour des raisons complexes (altération de la structure de la centrique pour laquelle le disque d'Airy est moins intense et les premiers anneaux ont une intensité plus grande du normal) les marges de n'importe quel structure de l'objet sont accompagnées d'un halo, clair sur les bords d'un objet qui apparaît sombre, qui empêche l'observation de détails fins en proximité du même halo (voir l'article n° 25, en français).

Le contraste de phase est réalisé en différentes versions: avec deux bagues de phase concentrique il est possible de changer la valeur du contraste; avec des bagues constituées par un filtre interférentiel il est possible d'avoir des images aux couleurs, etc. Versions existent pour l'épiscopie.

Qu'on remarque bien: les objectifs contenants l'anneau de phase peuvent s'utiliser aussi en fond clair et noir, même avec une légère augmentation de résolution, mais avec une perte sensible de contraste par rapport à un objectif normal[222]. Les objectifs mêmes ne peuvent pas être utilisés en épiscopie à cause de la forte réflexion de l'anneau de phase. Ils sont peu indiqués pour les autres techniques spéciales.

Pour améliorer les conditions d'interférence au niveau de l'image intermédiaire, il est opportun que l'onde diffractée et l'onde directe aient une amplitude assez semblable. L'onde directe est normalement beaucoup plus intense que celle diffractée pour lequel, au-delà au pouvoir "déphasant", à l'anneau de phase vient aussi attribué un pouvoir absorbant qui atténue l'onde directe qui le traverse. Étant donné que beaucoup dépend de la structure de l'objet et il n'y a pas des règles générales, les constructeurs donnent à l'anneau de phase cette fonction de "filtre neutre" avec une absorption qui va de 50 à 90%. On peut montrer que, plus fort c'est l'absorption de l'anneau de phase, plus fort sera le contraste dans l'image finale, et les objets petits et peu réfringents seront par suite plus visibles. Pour les objets grands et plus réfringents, il est suffisant un pouvoir absorbant plus petit. Il serait ainsi souhaitable de pouvoir changer le pouvoir absorbant de l'anneau de phase selon les propriétés de l'objet. Pour répondre à cette exigence, ils ont été construits des objectifs de phase avec une bague double, comme cité plus haut, ou des différentes séries d'objectifs avec anneaux de différente absorption; parfois ceux à grande absorption sont indiquée avec la lettre "**h**" (= "hart" = dur, en allemand) et ils montrent le halo sur cité plus lumineux pour lequel ils sont convenables pour observer des petits objets éparpillés dans un champ très libre: deux objets trop voisins se recouvriraient avec leurs halos.

Le pouvoir absorbant de l'anneau de phase atténue donc l'onde directe et il réduit la luminosité générale de l'image; cet effet s'ajoute au fait que l'onde directe est de toute façon en bonne partie oblitérée par le diaphragme annulaire. Tout cela signifie qui cette technique exige une bonne microlampe et on n'obtient pas toujours la luminosité souhaitée.

Les opérations concrètes pour mettre en marche le contraste de phase sont:

● on insère l'objectif, de phase, avec l'agrandissement voulu;

● on met au point, soit-il approximativement, la préparation qui doit être, comme déjà précisé, mince et transparente; dans le cas de suspension de micro-organismes ou cellules, diluer la suspension; une préparation trop diffusante empêche de voir le diaphragme annulaire;

● on dispose le système éclairant comme pour le champ clair: régulation du diaphragme de champ, son centrage, focalisation du condensateur. Cette dernière focalisation est critique étant donné que, en cas de faute, les dimensions du diaphragme annulaire ne correspondant plus à celles de l'anneau de phase (s'altère l'agrandissement du système condensateur + objectif);

● on renonce à certaines règles de l'éclairage selon Köhler: il faut ouvrir tout le diaphragme d'ouverture afin d'éviter d'oblitérer les diaphragmes annulaires; rarement (Zeiss) le diaphragme d'ouverture est monté sur le disque-revolver de manière qu'il est inséré seulement dans la position du disque réservée au champ clair et il y n'a pas besoin de l'ouvrir avant de passer au contraste de phase;

● la lentille frontale du condensateur éventuellement extractible sera inséré; dans les conden-

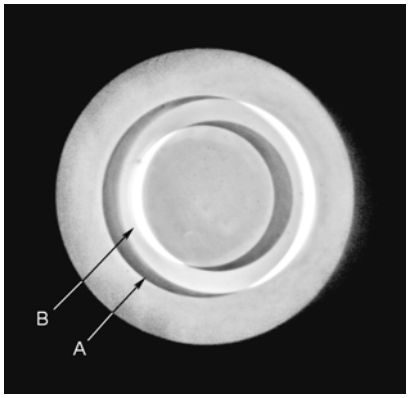
[222] La centrique résulte altérée par la présence de l'anneau de phase de manière que le disque d'Airy est plus petit (augmentation de résolution), mais les anneaux externes sont plus intenses (perte de contraste).

sateurs de phase cependant on évite en général cette possibilité étant donné que ceci altérerait l'image du diaphragme annulaire. En échange, on a le désavantage qu'il ne sera pas possible d'éclairer tout le champ des objectifs faibles (§ 21.1), mais cela est accepté par la majorité des constructeurs étant donné que les objectifs de phase d'agrandissement inférieur à 10:1 sont rares. En effet, au bas agrandissements on peut fermer beaucoup le diaphragme d'ouverture et l'augmentation de contraste qu'on obtient est suffisante; d'ailleurs, au bas agrandissements on observe des objets relativement grands et par suite visibles, même si ils sont transparents, sans recourir aux techniques spéciales;

● insérer le diaphragme annulaire correspondant à l'objectif en usage; il peut y avoir des diaphragmes uniques, insérables un à la fois ou, plus souvent, un disque-revolver qui porte différents diaphragmes; parfois (Wild), un même diaphragme peut servir pour deux différents objectifs d'agrandissement semblable;

● insérer un système pour l'observation de la pupille d'objectif (§19.5.5): qu'il soit un "microscope auxiliaire", en général vendu comme accessoire avec les objectifs et le condensateur pour contraste de phase, qu'il soit la "lentille d'Amici" intégrée dans les statifs les plus raffinés, qu'il soit une simple loupe de grossissement à longue focale, peu importe;

● mettre au point ce système pour visualiser l'image du diaphragme annulaire qui se trouve dans la pupille d'objectif; à ce point, si la préparation est raisonnablement diffusante, on verra telle image avec la bague de phase, qui apparaît grisâtre;



● avec les clefs spéciales, ou avec des petits boutons (Zeiss), en général mis près du bord du disque-revolver dans le condensateur, centrer l'image du diaphragme annulaire de manière qu'elle soit couverte complètement par l'anneau de phase; dans la figure à coté, A est l'anneau de phase; B est l'image du diaphragme annulaire; les deux ne se recouvrent encore pas;

● enlever le microscope auxiliaire ou la lentille d'Amici et commencer l'observation;

● étant donné que le déphasage opéré par l'anneau de phase est légèrement différent selon la longueur d'onde (dispersion de l'index), on obtient le meilleur contraste en interposant un filtre vert dans le système éclairant. Ceci peut être inacceptable dans la photographie aux couleurs, mais on rappelle que, sauf des cas très spéciaux, les images du contraste de phase sont en blanc et noir.

À chaque échange d'objectif, en général, il faut remplacer le diaphragme annulaire. Si la mécanique de l'instrument est bonne, le centrage des diaphragmes exécuté une fois reste stable même pour des années, pourvu qu'on ne procède pas au démontage du condensateur ou des objectifs.

30.5 – Le CONTRASTE INTERFÉRENTIEL

(voir l'article n° 17)

Il s'agit d'une autre technique de contraste qui peut fournir des images contrastées en blanc et noir ou aux couleurs, mais sans le fastidieux halo du contraste de phase. Elle s'adresse encore aux objets "de phase"; on peut l'appliquer à l'épiscopie, ou elle aide à révéler des petites différences de niveau entre un point et l'autre de la surface polie de l'objet (roches, alliages métalliques, etc.), différences de niveau qui provoquent naturellement des différences de phase dans l'onde réfléchie.

Le principe de fonctionnement peut être très différent, et il peut porter à un véritable instrument de mesure (micro-interféromètre) qui fournit non seulement des images contrastées, mais il permet la mesure du "chemin optique" de l'objet, c'est-à-dire du produit épaisseur × index (dans le cas de la diascopie) duquel on peut tirer ces deux valeurs et autres valeurs dérivées (concentration, résidu sec, etc.). Dans le cas d'objets opaques observé en épiscopie, les mesures au microscope interférentiel permettent de mesurer l'hauteur ou l'épaisseur des objets avec une résolution de petites fractions de micron.

La solution la plus diffuse sert seulement comme technique de contraste et c'est le soi-disant DIC (Differential Interference Contrast = Contraste interférentiel différentiel) basé sur les recher-

ches de Nomarski: l'image qu'il produit montre des forts contrastes et aussi des vives couleurs, mais avec un effet de relief apparent, semblable à celui de l'éclairage oblique.

Tout ceci est obtenu en dédoublant le faisceau éclairant de façon à avoir deux faisceaux latéralement déplacés l'un par rapport à l'autre d'une longueur égale au pouvoir résolutif de l'objectif. De cette manière on ne voit pas deux images de l'objet mais une image seule avec les bords ombragés. Après l'objectif, les deux faisceaux sont recombinés pour les faire interférer.

Certains modèles de microscope interférentiel supposent un instrument spécifiquement conçu, mais il est souvent possible d'utiliser cette technique, en particulier le DIC, avec des statifs normaux équipés d'objectifs normaux et avec l'addition de groupes d'accessoires, l'un dessous le condensateur (en diascopie), l'autre sur l'objectif. Chacun des deux groupes est constitué au moins par un filtre polarisateur et un prisme de Wollaston; ce dernier est donné par un couple de prismes biréfringents cunéiformes[223] avec le même angle dièdre, collés entre eux avec les axes optiques croisés. Deux prismes de Wollaston pour chaque objectif, qui s'insèrent l'un dessous le condensateur et l'autre sur l'objectif, en logements spéciaux.

Avec ce double système: polarisateur + prisme de Wollaston on a en général des images en blanc et noir; le fond de l'image peut être plus ou moins sombre selon les régulations (un des prismes peut être délacé en général en direction perpendiculaire à l'axe), mais il devrait être homogène; s'il ne l'est pas entièrement, il s'agit probablement d'un défaut dans les prismes.

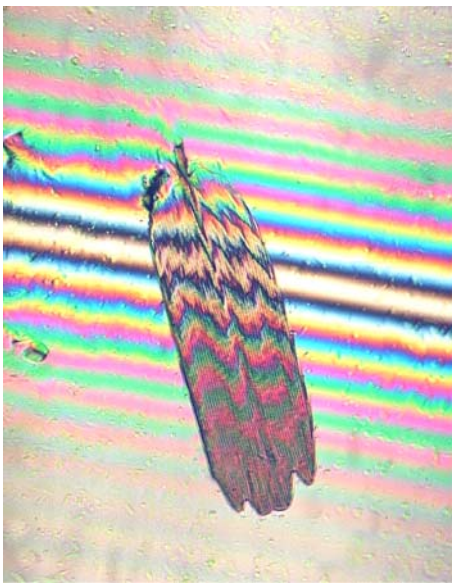
En ajoutant dans l'espace entre polarisateur inférieur et supérieur (souvent dans le condensateur) un compensateur biréfringent fixe (voir le § 30.7), avec un retard de $\lambda / 4$ ou de λ, et éventuellement avec la rotation de celui-ci autour de l'axe, il est possible d'obtenir des images colorées avec les éclatants "couleurs d'interférence" qu'on voit dans n'importe quel système en radiation polarisée.

Les accessoires pour le DIC sont assez faciles à utiliser, mais ils sont chers.

Les images fournies par le DIC sont très agréables, mais elles doivent être interprétées avec attention. Les plus probables causes de faute sont:

● Le grisé et l'apparent relief dans l'image ne sont pas dus à la forme de l'objet, mais plutôt à ses variations d'index de réfraction et/ou d'épaisseur.

● Étant donné que l'objet est traversé par une radiation polarisée, les objets biréfringents produisent des contrastes non pas dus à leur forme ni à leur index, et par suite difficiles à interpréter. Les objets biréfringents sont plus communs qu'on ne croie: matériels cristallins et microcristallins, poussières, produites chimiques solides, beaucoup de matériels plastiques, fibres de tout genre, bois et beaucoup de tissus végétaux et dérivés, certains tissus animaux, matériels cornés, poils, etc.



Intérferogramme de l'écaille de l'aile d'un papillon en lumière blanche.

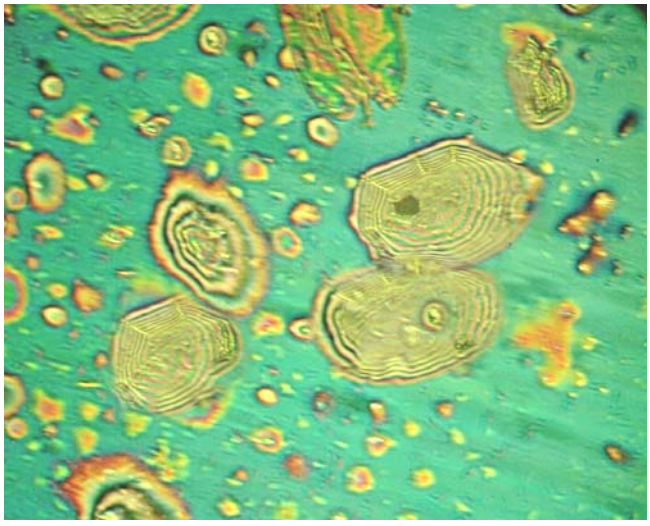
Des autres techniques interférentielles "pas-DIC" permettent d'obtenir un "interférogramme": à l'image de l'objet se superpose un système de franges (colorées si on opère en lumière blanche); si l'objet a un chemin optique homogène (par ex. une couche de liquide entre lame et lamelle) les franges apparaissent droites et parallèles; si l'objet n'est pas homogène, les franges subissent des déformations qui indiquent les variations d'index de réfraction et/ou d'épaisseur et par suite, d'habitude, aussi les contours de l'objet. L'image qui se présente rappelle celle d'une carte topographique traversé par des isohypses (courbes de niveau): les franges cependant n'indiquent pas tant la forme de l'objet,

[223] Souvent ils sont produits avec du quartz. L'exigence d'avoir un différent prisme pour chaque objectif naît de la différente hauteur de la pupille e/o du différent pouvoir de résolution: le dédoublement opéré par le prisme doit y correspondre.

mais plutôt les variations de son chemin optique (épaisseur × index).

L'interférogramme devient ainsi un instrument de mesure.

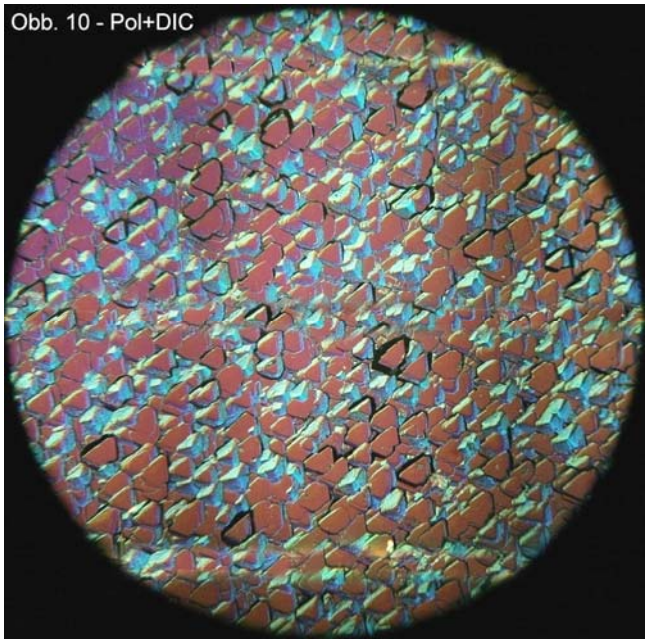
On peut avoir l'interférogramme aussi pendant l'examen d'objets opaques en épiscopie; dans ce cas, le sens des franges est vraiment comparable avec celui des isohypses, avec la différence que le plan de référence n'est pas l'horizontal, comme dans les cartes topographiques, mais un plan orientable à volonté par rapport à l'objet.



Gouttelettes de graisse sur la surface polie d'une tôle. Contraste interférentiel en lumière blanche.

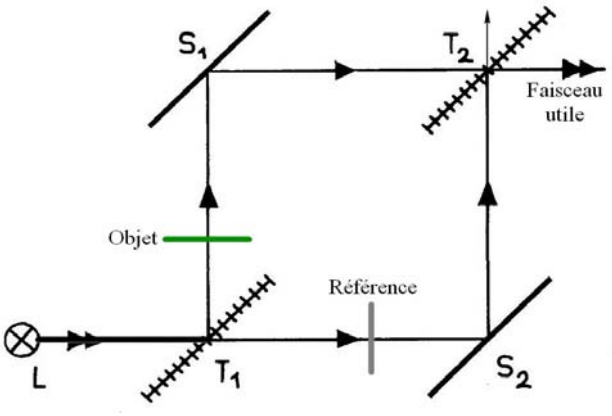
Dans d'autres instruments, encore pas du type DIC, on a toujours un fond image homogène mais sans le dédoublement et l'effet de grisé typiques du DIC.

On parle dans ces cas plus proprement de "contraste interférentiel" avec des images en blanc et noir ou colorées. Systèmes opportuns permettent de faire interférer le faisceau qui a traversé le champ-objet avec un "faisceau de référence" à onde plane qui n'est pas intéressé par l'objet; en changeant la phase d'un des deux faisceaux, avec des retardeurs réglables opportuns, il est possible de passer du blanc-noir aux images colorées, naturellement en utilisant toujours un éclairage en lumière blanche.



Une cellule photovoltaïque au silicium polycristallin. Les petits cristaux apparaissent en fond clair légèrement bleuâtres, mai le contraste interférentiel les fait apparaitre de différentes couleurs.

Le schéma de base de l'interféromètre de Mach-Zehnder



Ces instruments se basent souvent sur l'interféromètre de Mach-Zender dans lequel le faisceau éclairant (L), avant de traverser l'objet, est dédoublé par une surface semi-réfléchissante (T_1); un des faisceaux partiels sert de référence, l'autre traverse l'objet; ensuite les deux faisceaux viennent se superposer, toujours au moyen d'un second semi-réfléchissant (T_2), et de ce recouvrement naît l'interférence qui crée les contrastes et les couleurs dans l'image.

Dans la figure, S_1 et S_2 sont des miroirs.

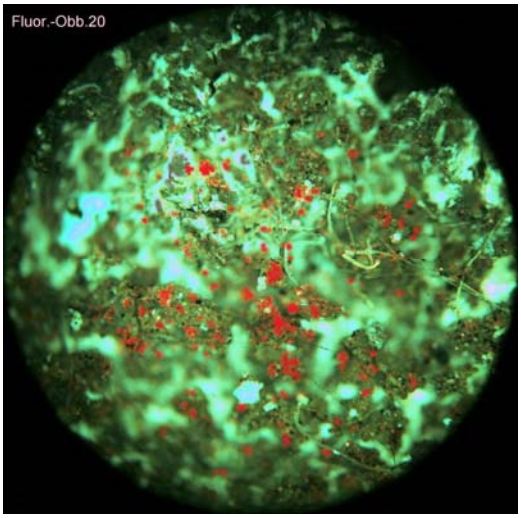
Sur la base de ces images, avec des opportunes astuces, il est possible d'exécuter des mesures de chemin optique, qui ne sont pas possibles avec le DIC. Les techniques interférentielles permettent donc des mesures indirectes de l'index de réfraction et/ou de l'épaisseur d'un objet et, encore plus indirectement, de la concentration et du "résidu sec" d'un matériel biologique.

Pour des autres détails, voir l'article n° 17 et la bibliographie à la fin de ce texte.

30.6 – La FLUORESCENCE[224]

S'ils sont frappés par un faisceau de radiation avec une opportune λ, les atomes de certaines substances "s'excitent" et réémettent une propre lumière de plus grande λ. Si ce phénomène, généralement définissable comme "luminescence", disparaît avec l'arrêt de la radiation excitante on parle de "fluorescence"; s'il persiste encore pour un certain temps, on parle de "phosphorescence". La radiation émise contient peu d'énergie: environ un millième de celle d'excitation, et même moins.

La fluorescence peut être classifiée comme "primaire" ou "secondaire." La primaire, ou auto-fluorescence, se présente spontanément dans certains minéraux (fluorine, uraninite, etc.), dans certains pétroles, dans certains organes végétaux (tissus contenant de la chlorophylle, parois cellulaires, spores de certains champignons, lichens), etc.



La fluorescence primaire des algues unicellulaires sur l'écorce d'un arbre, au milieu du mycélium d'une moisissure.

Mais, surtout en biologie, elle est souvent utile pour mettre en évidence la fluorescence d'un objet traité avec des substances fluorescentes opportunes ("fluochromes" ou "fluorochromes"): c'est la "**fluorescence secondaire**" ou "induite". L'avantage est que, pour des raisons d'affinité chimique ou physique, le fluochrome tend à se lier sélectivement avec certaines parties de l'objet plutôt qu'avec d'autres, par ex. sur certains organites cellulaires. De cette manière le fluochrome se conduit comme un colorant sélectif qui aide à révéler certains composants chimiques et structuraux de l'objet. La sensibilité de la méthode est grande: dans les meilleures conditions, il semble qu'elle puisse révéler des objets contenants le fluochrome en concentration de 50 molécules par micron cube.

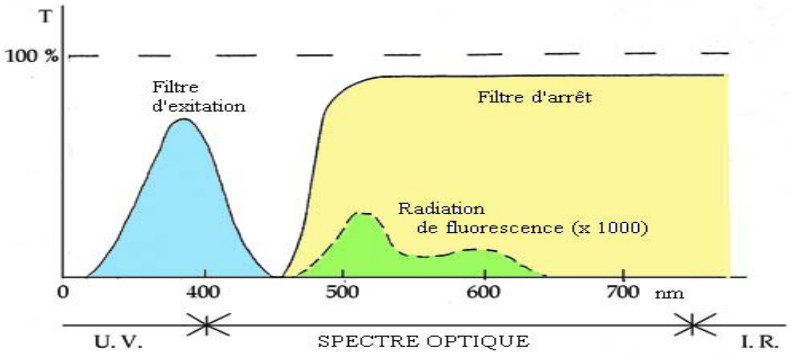


Fig. 127 – Exemple de bande passante d'un filtre d'excitation et du filtre d'arrêt correspondant pour l'observation en fluorescence.

En ordonnée, la transmission T; en abscisse, la longueur d'onde λ (exprimée en nm).

Le phénomène de la fluorescence ne peut pas améliorer le pouvoir résolutif de l'objectif; cependant, il est possible de mieux percevoir un objet lumineux qui apparaît clair sur un fond sombre (on rappelle la distinction entre "pouvoir de résolution" et "pouvoir de perception", § 15), objet beaucoup plus petit du pouvoir résolutif. Ce qui est important est seulement le flux total émis par l'objet.

L'usage des fluochromes se fait plus intéressant dans la recherche des antigènes[225]: on tâche

[224] La maison Zeiss de Jena présenta un microscope à fluorescence en 1913 sur la base des études d'August Köhler au sujet du microscope en ultraviolet.

[225] Un antigène est une substance ou une structure organique (micro-organisme, parasite, etc.) capable de susciter les réactions immunitaires d'autodéfense dans un organisme vivant, en provoquant la formation de "anticorps".

de lier chimiquement un anticorps avec un fluochrome; ensuite on traite avec l'anticorps fluorescent l'objet suspect; s'il y a un antigène, un antigène spécifique et seulement celui-là, par ex. une bactérie d'une espèce déterminée, sur lui se concentre l'anticorps et le rend visible à cause de la fluorescence. La réaction antigène-anticorps est très spécifique et permet des diagnostics rapides et sûrs. L'usage d'anticorps fluorescents est une technique de recherche devenue de routine dans beaucoup de branches de la médicine et de la biologie. L'avenir de la technique de la fluorescence en microscopie, plus qu'à une amélioration des performances optiques de l'instrument, il est lié à l'introduction de nouveaux fluochromes, de plus en plus spécifiques, avec un rendement toujours plus grand.

La radiation capable d'exciter les fluochromes peut posséder n'importe quel valeur de λ (ça dépend du fluochrome) mais, étant donné que la radiation de fluorescence a presque toujours une longueur d'onde plus grande de celle excitante (loi de Stokes), pour cette dernière on utilise la région bleu-violet du spectre optique ou l'ultraviolet (UV). En pratique, on travaille souvent en quatre régions spectrales limitées, correspondantes aux lignes de plus grande émission de la lampe à arc en vapeurs de mercure (§ 22.6.2), qui est la plus utilisée: 366 nm (UV), 406 nm (extrême violet), 435 nm (violet), 546 nm (vert).

Si les objets fluorescents sont plongés dans un milieu inerte, pas fluorescent[226], ils apparaissent colorés sur un fond noir, mais pas comme il arrive dans le champ noir, étant donné que ce qui apparaît n'pas le contour de l'objet, mais seulement ses parties fluorescentes.

On a expliqué que la radiation de fluorescence est plus faible que celle d'excitation; celle-ci est la raison pour laquelle les parties végétales vertes, à la lumière du jour, ne montrent pas la faible fluorescence rouge de la chlorophylle, étant donné que la lumière du soleil est beaucoup plus forte. En pratique, pour observer le phénomène, il faut en général éclairer l'objet avec un faisceau le plus possible intense, en éliminant les bandes spectrales inutiles, qui cacheraient la fluorescence; puis observer l'objet à travers un filtre capable de bloquer la radiation excitante et laisser passer seulement celle de fluorescence. Pour la première fonction on utilise un filtre passe-bande, à bande large ou étroite (§ 23), qui laisse passer le plus possible la radiation qu'on entend utiliser pour l'excitation (filtre d'excitation), en bloquant le plus possible les autres bandes du spectre. Pour la seconde fonction, on utilise un filtre qui bloque le plus possible la radiation excitante et laisse passer le plus possible la radiation de fluorescence (filtre d'arrêt ou de barrage ou de suppression)(fig. 127). Étant donné que la fluorescence se déroule presque toujours à des longueurs d'onde supérieures à celle d'excitation (comme on a déjà dit: loi de Stokes), le filtre d'arrêt est un passe-bas, qui laisse passer toutes les régions spectrales qui vont de la limite droite de la bande d'excitation jusqu'à l'extrémité "rouge" du spectre: voir la fig. 127. La bande passante du filtre d'excitation est indiquée à gauche, une courbe à forme de cloche, à cheval entre UV et violet (400 nm environ); à droite, en ligne continue, la courbe du filtre d'arrêt qui laisse passer tout, de la limite droite de la courbe du filtre précédent, environ 450 nm dans la figure, jusqu'à l'extrémité du "rouge" et au-delà. La radiation de fluorescence observable (ligne esquissée) vient ainsi se trouver toute à l'intérieur de la bande admise par le filtre d'arrêt. Le choix des filtres est donc important, et il doit s'adapter au mieux aux caractéristiques de l'objet: chaque objet et chaque fluochrome rendent au mieux s'ils sont excité dans une certaine bande et s'ils sont observés dans une autre bande. Et en outre, si le filtre d'arrêt n'est pas assez efficace, une partie de la radiation excitante joindra à l'œil, ou à l'émulsion photographique, et le fond de l'image ne sera plus noir.

Le schéma du système sera donc: source - collecteur – (éventuel filtre calorifuge pour protéger les filtres d'excitation du surchauffage) - filtres d'excitation - condensateur - objet - objectif - filtres d'arrêt - oculaire. Si tout est bien disposé, en absence d'objet, le fond de l'image doit apparaître sombre.

Les filtres d'excitation à bande étroite permettent d'exciter l'objet en bandes plus définies, de façon à isoler des phénomènes spéciaux, mais l'image sera en général moins lumineuse.

L'anticorps est une espèce d'antibiotique naturel, une défense biochimique qui se met à exécution en présence de certains corps étrangers, qui sont justement les antigènes.

[226] Éviter les liquides et les huiles fluorescentes, comme certaines huiles pour immersion, le baume du Canada "naturel", etc.

Certains filtres d'excitation en verre (les classiques verres à oxyde de nickel comme le série UG de Schott) pour la région UV et violets, au-delà de la bande passante principale, possèdent une faible bande de transmission dans la région du rouge ("**rouge résiduel**"). Avec ces filtres, le fond de l'image apparaît donc rouge; pour éliminer ceci on dispose, après le filtre d'excitation, un second filtre de "suppression du rouge résiduel", de couleur bleue, capable de supprimer justement le "rouge résiduel".

On a mentionné la loi de Stokes: la radiation de fluorescence a une longueur d'onde plus grande de celle d'excitation. Mais il y a des exceptions; dans des cas spéciaux, pour déplacements d'énergie à l'intérieur de l'atome, deux ou plus photons d'excitation additionnent leurs énergies et il peut arriver que le photon émis ait une plus grande énergie (et par suite une longueur d'onde plus petite) de celui d'excitation: on parle de "émission anti-Stokes".

La fluorescence dans le spectre optique se déroule en base à l'excitation d'électrons singuliers et elle dépend par suite de la nature des atomes impliqués. Mais une fluorescence existe aussi dans le spectre infrarouge (**fluorescence Raman**) qui implique les états énergétiques ("vibrationnels") de molécules entières, même organiques, pour lesquelles le spectre d'émission Raman permet l'identification de molécules de grandes dimensions et par suite des analyses chimiques très sélectives dans le domaine organique. La technique Raman est entré de peu de temps dans la routine étant donné que l'intensité de l'émission est très faible et demande des solutions techniques très sophistiquées; mais les résultats qu'elle fournit sont inégalables dans certaines applications.

30.6.1 – L'excitation en lumière transmise

Tout se déroule comme en diascopie à fond clair, à part la présence des filtres et la microlampe, qui sera en général de type spécial, de grande puissance[227], si possible à arc. Aussi le condensateur devra montrer la plus grande ouverture possible, mieux s'il est à immersion. À part le haut coût, seraient préférables dans tout le système éclairant les lentilles en silice, qui absorbent l'UV beaucoup moins du verre; même les lames devraient être en silice.

Pour accueillir le plus possible la faible lumière de fluorescence, il faut utiliser des objectifs de la plus grande ouverture possible comme les apochromatiques: le rendement photométrique est proportionnel au carré de cette ouverture. En fonction de l'inverse du carré, tout dépend aussi de l'agrandissement total; il faudra utiliser donc des oculaires et objectifs du moindre agrandissement possible, sans pour cela renoncer à une ouverture forte. Les objectifs à immersion sont à préférer étant donné qu'on évite le double reflet sur la surface frontale de l'objectif et sur la surface supérieure de la lamelle. Éviter les «plan» pour le plus grand nombre de lentilles.

Étant donné que le faisceau excitant pénètre plus ou moins tout dans l'objectif, il faut que le filtre d'arrêt soit très efficace. Pour atténuer cette exigence, quelques constructeurs utilisent l'éclairage en champ noir, toujours en diascopie; il faudra un condensateur spécial, si possible en immersion (§§ 21.8 et 30.2).

30.6.2 – L'excitation en épiscopie

Il s'agit d'un schéma semblable à celui décrit pour l'épiscopie (fig. 122, § 30.1), mais avec la différence que la surface semi-réfléchissante (E) n'est pas neutre mais "dichromatique"[228]: elle réfléchit une partie du spectre et elle transmet le reste; elle est projeté de façon à réfléchir vers

[227] Au-delà d'une certaine limite, environ 150 W, on peut montrer que l'éclairage sur le plan objet ne grandit pas au grandir de la puissance de la source, si elle est à incandescence, car à la fin tout dépend de la luminance du filament qui est limitée par la température de fusion du métal. Avec les lampes à arc, le plasma n'a pas des limites théoriques de température et la luminance peut donc être très supérieure.

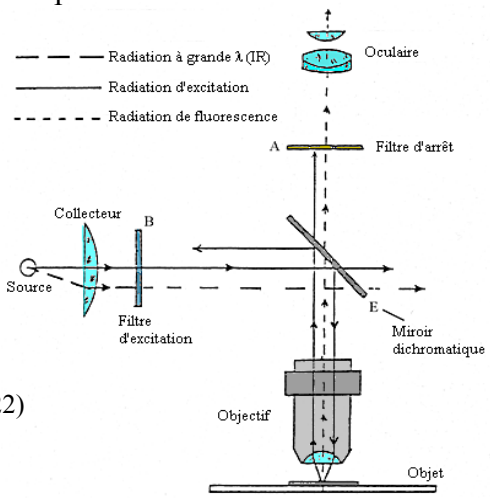
[228] On dit "dichroïque" improprement, mais le dichroïsme est une autre chose: c'est une propriété liée à la polarisation.

l'objectif le plus possible de la radiation d'excitation, et à transmettre vers l'oculaire le plus possible de la radiation de fluorescence de plus grande longueur d'onde. La radiation excitante qui est réfléchie par l'objet et revient dans l'objectif vient ensuite de nouveau réfléchie par le semi-réfléchissant, vers la source, pour lequel le filtre d'arrêt a un rôle moins lourd à dérouler.

Étant donné qu'en épiscopie l'objectif sert aussi de condensateur, il est encore plus important d'utiliser des objectifs à haute ouverture; ou mieux, vu que l'objet fluorescent répand la lumière de fluorescence dans un angle solide très ample, **la luminosité de l'image en fluorescence est proportionnelle** au carré de l'ouverture de l'objectif (pour la partie éclairante) et au même carré, pour la partie formation de l'image, et par suite, globalement, **à la quatrième puissance de l'ouverture**. Pour ce motif, **au petits agrandissements, l'épiscopie est moins efficace que la diascopie**: en effet, les faibles objectifs ont une basse ouverture, pendant que le condensateur utilisé en diascopie peut avoir toujours l'ouverture maximal indépendamment de l'objectif. D'autre côté, l'épiscopie est irremplaçable pour observer la surface d'objets épais ou opaques et la présence du miroir dichromatique augmente l'efficacité du système des filtres.

Étant donné que le plus grand problème de la fluorescence est le rendement photométrique, il sera soin du constructeur choisir les matériels les plus efficaces: verres (souvent silice), ciments transparents à l'UV, au moins entre la source et l'objet, traitements anti-réfléchissants optimisés pour l'UV dans le système éclairant et pour le visible dans le système formateur d'image, etc. Puis, en étant important aussi le contraste, afin de la reconnaissance d'objets luminescents, il faut aussi soigner toutes les sources de "lumière diffuse" capable d'éclaircir le fond de l'image: la préparation devra être très "libre" d'objets fluorescents pas intéressants (poussière de type différent, par ex.), le fluochrome devra se fixer seulement sur les objets intéressants et ne pas se répandre dans le liquide de culture et ailleurs. Du point de vue du constructeur, seront choisis soigneusement les matériels, verres et ciments, qui ne soient pas doués d'auto-fluorescence propre et par suite ne soient pas excités par le faisceau éclairant. Aussi les couvre-objets (ou porte-objets dans le cas de la diascopie) devront été choisi par rapport à leur transparence en UV.

Dans la fig. 122 est représenté un schéma pour l'épiscopie; le dichromatique E élimine les longueurs d'onde supérieures à la bande utile en les transmettant vers les parois du boitier; en ceci il collabore avec le filtre d'excitation B. En outre il élimine la radiation d'excitation réfléchie par l'objet, comme on a à peine dit, en la renvoyant vers la source; il collabore ainsi avec le filtre d'arrêt. Le miroir dichromatique est toujours du type des miroirs interférentiels (§ 23.1).



(Fig. 122)

En résumant, les qualités d'un microscope à fluorescence sont:

Pour la diascopie: forte source, peut-être à arc; objectif de la plus grande ouverture possible et, sans renoncement à l'ouverture, du moindre agrandissement possible; condensateur à forte ouverture (pour la diascopie); faible oculaire; filtres choisis opportunément en base au spectre d'émission de la lampe, aux longueurs d'onde les plus efficaces pour l'excitation, et à la composition de la radiation produite pour fluorescence de l'objet ou du fluochrome. Systèmes intermédiaires, changeurs d'agrandissement et semblables avec le facteur de tube moindre possible. Le statif peut être normal.

Pour l'épiscopie: tout comme dessus, avec de plus: illuminateur épiscopique avec semi-réfléchissant dichromatique; ceci demande souvent un statif conçu exprès. Il ne sert ni le condensateur, ni la lampe diascopique.

On remarque que, en épiscopie, ne sert pas le diaphragme d'ouverture: il convient exploiter toute l'ouverture disponible de l'objectif, pour motifs évidents. D'ailleurs, la radiation d'excitation de toute façon est bloquée par le filtre d'arrêt.

30.7 - MICROSCOPIE en RADIATION POLARISÉE

(voir, dans ce site, le petit manuel "Microscopie en polarisation" et les artt. n° 7, 16, 26, 35 et O10)

La radiation optique, celle qui s'appelle vulgairement "lumière", est composée par des ondes, c'est-à-dire par des variations périodiques d'un champ électrique et d'un magnétique. Chaque onde a une durée limitée, la radiation est donnée par un grand nombre de trains d'onde d'énergie constante, c'est-à-dire, les "photons" ou "quanta". (Fig. 1)

Chaque photon oscille dans un plan fixé ou "plan de vibration" (V): il est donc "polarisé"; mais la radiation dans son complexe est constituée par un grand nombre de photons qui oscillent dans des plans orientés au hasard, c'est-à-dire elle n'est pas globalement polarisée (fig. 1 et fig. 128, en bas).

Un **polarisateur** est un filtre optique spécial qui oblige les photons qui le traversent à osciller tous dans le même plan[229]; en réalité, un polarisateur élimine au moins la moitié de l'énergie incidente[230], mais cela ne change pas notre discours. La radiation émergente d'un polarisateur est donc "linéairement" polarisée.

Jadis, les polarisateurs s'appelaient "Nicol" étant donné qu'ils étaient constitués par des prismes de calcite coupés et collés selon les indications du physicien écossais William Nicol. Depuis beaucoup d'années les polarisateurs à cristal sont par contre presque toujours remplacés par des lames de matériel plastique traitées avec des procédés spéciaux (étirement à chaud), et puis avec des iodures de quinine; elles sont vivement dichroïques, au sens qu'elles montrent une absorption différente selon le plan de polarisation de l'onde qui les traverse; en particulier, les lames dont nous sommes en train de parler absorbent toutes les ondes qui ne vibrent pas dans un plan défini.

Ces polarisateurs synthétiques ou **Polaroid** s'appellent encore Nicol pour des raisons historiques; il y en a avec des caractéristiques très différentes.

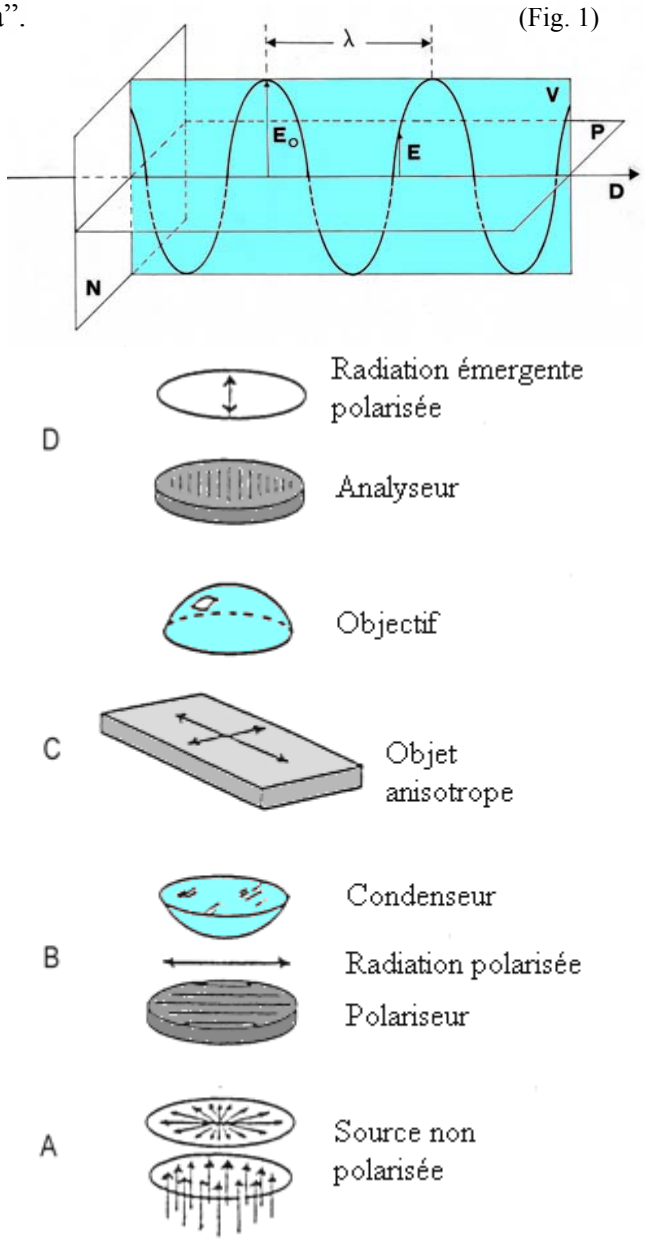


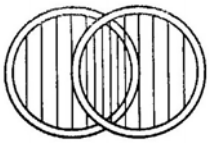
Fig. 128 - Schéma essentiel de microscope polarisateur

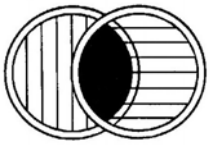
Par suite, sur le plan d'un Nicol on peut tracer idéalement une "direction privilégiée": celle d'oscillation des photons qui le traversent (voir la fig. 128 dans laquelle sont indiquées avec des flèches à deux pointes les directions privilégiées). Un photon qui grave sur lui en oscillant parallèlement à la direction privilégiée peut le traverser sans atténuation (sauf les pertes par réflexion sur les deux surfaces ou par absorption résiduelle); un photon qui grave par contre en oscillant obli-

[229] La plus grande partie des phénomènes liés à la polarisation de la lumière s'explique en tenant compte du seul vecteur électrique; donc avec "direction privilégiée" ou "plan de vibration" d'un polaroid on entend le plan dans lequel oscille le vecteur électrique. Le plan de polarisation (P dans la fig. 1) y est perpendiculaire.

[230] Il faut faire les comptes avec la décomposition des vecteurs selon la "règle du parallélogramme".

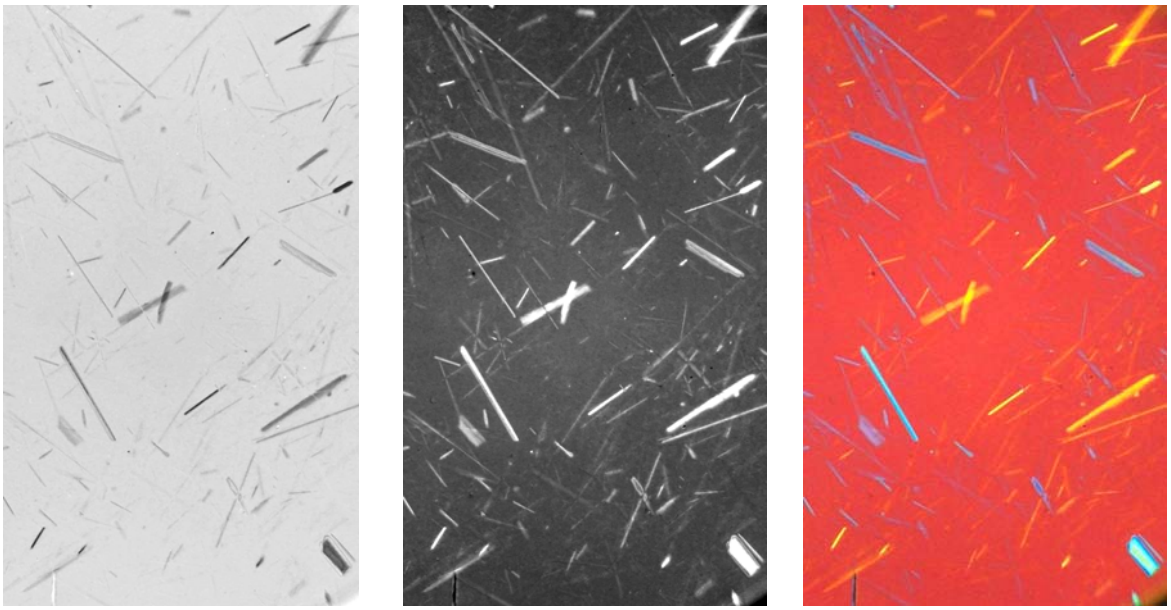
quement par rapport à la direction privilégiée vient transmis seulement en partie, selon le principe du parallélogramme; s'il grave en oscillant perpendiculairement à la direction même, il vient supprimé ou "éteint". Si donc, après le premier Nicol, un second Nicol se pose avec sa direction privilégiée perpendiculaire à celle du premier, les photons émergents du premier Nicol viennent éteints dans le second et le système total apparaît comme s'il fût opaque. On parle de fond noir par "Nicol croisés" ou "**position d'extinction**". Si les directions privilégiées des deux Nicol sont parallèles, le faisceau émergent du premier traverse le second avec des pertes modestes, essentiellement par réflexion à ses surfaces.





Dans le microscope polarisateur se pose toujours un Nicol ("polarisateur" en sens étroit) dessous au condensateur et un autre ("analyseur") au dessus de l'objectif, avant de l'éventuelle lentille de tube pour les raisons dites dans le § 3.2. Si les Nicol viennent "croisés", en absence d'objets interposés, on a un fond noir ou "extinction". Le polarisateur est disposé normalement avec sa direction privilégiée orientée transversalement par respect au plan médian de l'instrument (direction "Est-ouest"); jadis on utilisait la disposition perpendiculaire à celle-ci.

Mais … beaucoup d'objets naturels (la majorité des corps à l'état cristallin, qui est comme dire toutes les roches, la majorité des minéraux et leurs poussières, parties solides des tissus végétaux, quelques tissus animaux comme celui corné, osseux, connectif, musculaire, différents composants des cellules) et objets artificiels (fibres textiles, composés chimiques, poussières, etc.) sont "biréfringents". Ils admettent deux directions privilégiées perpendiculaires entre elles.



Des fibres d'amiante en fond clair (à gauche), en lumière polarisée (au centre), en lumière polarisée et avec compensateur rouge 1° ordre (à droite).

Cela signifie qu'une onde polarisée (ou un faisceau polarisé, composé de photons qui oscillent dans des plans parallèles), si elle traverse un tel objet, est décomposée en deux ondes qui oscillent en deux plans perpendiculaires entre eux, coïncidents avec les deux directions privilégiées de l'objet (voir encore la fig. 128).

Eh bien, si nous mettons un tel objet entre deux Nicol croisés, on n'a plus l'extinction; au moins, si les directions privilégiées de l'objet sont obliques par rapport à la direction d'oscillation des Nicol. Il arrive que chaque rayon polarisé qui grave sur l'objet vient divisé (toujours selon la règle du parallélogramme) en deux rayons oscillants en plans perpendiculaires entre eux; ces rayons gravent sur l'analyseur obliquement par rapport à sa direction privilégiée et par suite en partie ils le traversent. Après ça ils vibrent dans le même plan et ils peuvent interférer entre eux. De cette interférence l'image finale acquiert des clairs-obscurs et des couleurs desquelles il est possible de remonter à certaines propriétés optiques de l'objet: pouvoir de biréfringence, pleo-

chroïsme, etc. (figure plus haut).

De cette manière, le microscope polarisateur devient un instrument de mesure. Les résultats de l'interférence qui arrive dans l'analyseur dépendent de la phase relative entre les deux rayons biréfractés par l'objet; cette phase dépend du pouvoir biréfractif de l'objet et de son épaisseur pour lequel, si on connait l'un, on en tire l'autre.

La phase entre les deux rayons biréfractés dépend aussi de la longueur d'onde et, en opérant en lumière blanche, il arrive d'habitude qu'on a interférence négative, c'est-à-dire atténuation, pour certain valeurs de longueur d'onde, c'est-à-dire pour certain couleurs, et les autres couleurs restent; dans ces cas l'objet apparaît coloré par une "**couleur de soustraction**" même si, en radiation non polarisée, il est transparent. Étant donné que ces couleurs de soustraction naissent d'une interférence négative, on parle de "**couleurs d'interférence**".

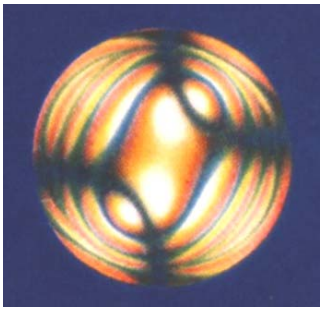
On a souvent intérêt à altérer et mesurer le déphasage entre les deux rayons biréfractés par l'objet; on obtient ceci avec des lames biréfringentes opportunes, nommés **compensateurs**, qui s'introduisent dans une place quelconque entre polarisateur et analyseur. Elles peuvent provoquer un déphasage fixe ou variable, qui s'ajoute ou se soustrait avec celui de l'objet, selon l'orientation réciproque.

Les compensateurs les plusieurs utilisés sont fixes; celui nommé "mica", "quart d'onde" ou "λ/4" introduit un déphasage de 1/4λ entre les deux rayons biréfractés qui en émergent et qui est constitué traditionnellement par une lame de clivage de mica muscovite. Entre Nicol croisés il apparaît gris. Celui nommé "gypse", "rouge de 1° ordre" (Rot I°) ou "teinte sensible" ou "onde entière" ou "λ", introduit un déphasage d'une longueur d'onde de 550 nm (zone spectrale du vert) et, s'il est observé entre Nicol croisés, il apparaît couleur cramoisie (pourpre). Cette couleur est dite "couleur sensible" étant donné que, même pour des petits déphasages de la part de l'objet, il vire rapidement vers l'orange ou le bleu (figure précédente). Le compensateur "onde entière" est fait traditionnellement par une lame de clivage de sélénite, variété transparente lamellaire de gypse.

Quand l'objet biréfringent est fait tourner autour de l'axe optique, pendant une rotation complète de 360° il arrive que quatre fois, une chaque 90°, ses directions privilégiées sont parallèles à celles des Nicol. Dans ces conditions, on peut montrer que l'objet ne produit plus de biréfringence; entre Nicol croisé tout donc se passe comme s'il n'y eût pas et on retrouve l'extinction (champ image tout obscur): quatre positions d'extinction pour chaque tour complet de l'objet. En outre, en tournant l'objet, changent les conditions d'interférence et les couleurs dans l'image changent aussi, au moins comme saturation. Pour ces motifs, un microscope polarisateur doit posséder une platine tournante autour de l'axe optique, peut-être avec une échelle graduée sur le bord.

Un réseau spécial à croix, pas tournant, mis dans l'oculaire ou de toute façon au niveau de l'image intermédiaire, indique les directions de vibration des Nicol et permet de mesurer l'angle entre elles et certaines structures de l'objet.

D'habitude, à la suite de différents phénomènes d'interférence, se forment dans le plan focal postérieur de l'objectif des figures particulières à bandes colorées, dites "**figures d'interférence**", qui n'ont rien à faire avec la forme de l'objet, mais permettent de reconnaître certaines de ses propriétés optiques comme les soi-disant "axe optiques" et l'angle entre eux. En conséquence, dans un microscope polarisateur il doit y avoir une lentille spéciale à l'intérieur du tube, dite "**lentille d'Amici-Bertrand**", qui permet d'observer le plan focal supérieur de l'objectif à travers l'oculaire. En insérant cette lentille, l'image de l'objet disparaît et on voit seulement la figure d'interférence avec ses lignes ou "franges" colorées.



Ces franges naissent du fait que l'objet reçoit un faisceau conique, c'est-à-dire des rayons de différente inclinaison, et il produit un différent déphasage entre les deux rayons biréfractés pour chaque direction de propagation.

Ce type d'observation s'appelle "**lumière convergente**" ou "**conoscopie**".

Étant donné que ses effets dépendent de l'inclinaison (ou ouverture) des rayons, on a intérêt à l'exécuter avec des objectifs de la plus grande ouverture possible; le condensateur devra avoir une ouverture pas plus petite et le diaphragme d'ouverture sera tout ouvert.

De tout ce qu'on a dit, il est clair que les systèmes optiques interposés entre les Nicol, au moins l'objectif et le condensateur, doivent être dénués de biréfraction propre pour ne pas altérer les phénomènes dus à l'objet. Le verre optique, en principe, est dénué de biréfraction, c'est-à-dire il est monoréfringent, mais il l'acquiert s'il est sujet à des tensions externes (monture mécanique trop serrée) ou internes (tensions de refroidissement pendant la fabrication du verre). En conséquence, les systèmes optiques utilisés en polarisation doivent être sélectionné pour qu'ils résultent "exemptes de tensions" ("strain-free").

En résumant, un microscope polarisateur doit posséder au moins ces qualités:

-- deux filtres polarisateurs dont au moins un tournant autour de l'axe;

-- possibilité d'insérer différents types de compensateurs;

-- platine tournante, si possible avec échelle graduée et vernier pour mesurer l'angle de rotation;

-- lentille d'Amici-Bertrand, si possible jumelée avec un diaphragme à iris (diaphragme de Wright) pour séparer les figures de diffraction dues aux différents grains, quand on observe des agrégats cristallins;

-- condensateur et objectif en verre "strain-free";

-- au moins un des objectifs et le condensateur doivent avoir une forte ouverture pour faciliter la conoscopie;

-- un oculaire avec réseau à croix, pas tournant autour de l'axe optique.

Toutes ces propriétés sont difficilement applicables sur un statif normal. Il faut dire cependant que beaucoup d'observations en lumière polarisée peuvent être exécutées en renonçant aux mesures quantitatives des grandeurs à peine citées (pouvoir biréfringent, angle entre les axes optiques, positions d'extinction, etc.); en effet, une observation simplement qualitative peut être précieuse surtout avec des préparations biologiques, pour révéler beaucoup de structures des tissus, surtout végétaux (parois cellulaires, amidon, fibres, spores de champignons, etc.). À ce moment là, il peut suffire n'importe quel instrument équipé avec deux filtres Polaroid, et on a ainsi une autre technique de contraste, qui diffère des autres parce qu'elle révèle seulement les objets biréfringents. Étant donné que la biréfringence est due à la disposition ordonnée ou à l'orientation des molécules dans l'objet, on a ainsi des renseignements sur la structure de la matière au niveau moléculaire, et il n'existe pas une autre technique optique capable de faire autant.

On note finalement qu'aussi un microscope stéréoscopique peut servir en radiation polarisée. Tant plus qu'en général il est utilisé seulement pour des observations qualitatives et par suite ils peuvent lui suffire deux Polaroid. La platine tournante et quelque compensateur sont nécessaires seulement pour quelques mesures. La lentille d'Amici ne sert pas, étant donné que l'ouverture d'un objectif stéréoscopique est petite; le condensateur n'existe pas, et la conoscopie n'est pas possible.

30.8 – LA PHOTO – MICROGRAPHIE

(voir les artt. n° 12 e 13)

La "macro-photographie", mieux: "photo-macrographie", indique la reprise photographique d'une image plus grande que l'objet, mais avec seulement un objectif, c'est-à-dire avec un système optique reconductible à une lentille simple.

Par contre, "photo-micrographie" indique le même procès de reprise d'une image plus grande de l'objet, mais obtenue avec un microscope composé, c'est-à-dire avec un système reconductible à au moins deux lentilles simples (objectif + oculaire) dans lequel l'agrandissement arrive en deux phases, au moyen de la formation d'une "image intermédiaire".

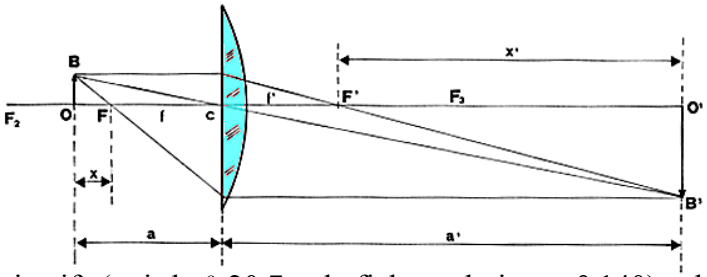
À la rigueur, le terme très utilisé de “micro-photographie” devrait être limité à indiquer une technique de reprise sur émulsion photosensible ou capteur électronique dans laquelle l’image est beaucoup plus petite que l’objet, exactement le contraire de ce que se fait au microscope; il s’agit de techniques comme le microfilm, la micro-lithographie, etc.

Dans un microscope correctement au point, l’image intermédiaire se forme dans le premier foyer de l’oculaire et donc (fig. 14, § 2.6.2) l’image finale se forme à l’infini; on ne peut pas recueillir telle image sur un écran, mais notre œil la perçoit comme si elle vînt d’un objet très éloigné. Et on remarque que, de cette manière, la vision arrive avec l’œil détendu, “ne pas accommodé”, sans forcer inutilement le muscle ciliaire.

Pour photographier il faut par contre une image réelle à une distance relativement petite. Pour ce but il y a trois possibilités:

-- altérer la mise au point (ça suffit peu avec les forts objectifs) et en particulier baisser l’objet par rapport à l’objectif. De cette manière, l’image intermédiaire se baisse aussi et se forme en OB (fig. 13), devant le foyer antérieur de l’oculaire. La lentille centrale dans la fig. 13 indique justement l’oculaire. L’image finale, O’B’, se forme ainsi à une distance finie, et elle est réelle: on peut la recueillir sur un écran comme une émulsion photographique.

Beaucoup de systèmes classiques, à soufflet, fonctionnent ainsi, et avec des bons résultats, mais ils ne sont pas pratiques, et le microscope travaille en outre avec une focalisation altérée.



(Fig. 13)

-- Utiliser des oculaires spéciaux ou projectifs (voir le § 20.7 et la fiche technique n° 140) calculés pour donner une image finale à la place correcte, sans altérer la mise au point et sans introduire des aberrations.

-- Mettre tout de suite au dessus de l’oculaire un raccordement spécial contenant une faible lentille convergente, appelée “**lentille de caméra**”, qui rend convergent le faisceau émergent de l’oculaire et consent la formation d’une image réelle à distance rapprochée, même quand la mise au point est correcte.

De tout ce qu’on a dit, il résulte que photographier au microscope est très simple: il suffit de projeter l’image fournie par l’instrument sur une émulsion photographique, en évitant que la lumière ambiante ne pas désirée se superpose à l’image même.

En pratique, nous verrons qu’il faut cadrer, mettre au point, mesurer le temps d’exposition, manœuvrer l’obturateur, etc., mais le fait reste que les accessoires photo-micrographiques constituent essentiellement une “chambre obscure” à tenue de lumière qui reçoit simplement le faisceau produit par l’oculaire ou par le projectif, qui tient l’émulsion à la distance correcte, centrée et perpendiculaire à l’axe optique, et qui contient les composantes nécessaires pour dérouler les fonctions accessoires citées. Enfin, le microscope crée l’image et le système photographique la recueille déjà faite. En effet, les caractéristiques de l’image photographiée dépendent de l’objet, du microscope et de son système optique; la partie photographique est seulement un boitier.

Dans la photographie usuelle, les aspects techniques peuvent devenir négligeables par rapport aux exigences esthétiques; mais au microscope c’est le système optique placé DEVANT l’apparat photographique, ainsi que l’objet et la manière avec laquelle il a été préparé, qui créent le résultat final. Connaître l’optique de l’instrument est essentiel pour un bon résultat. L’expérience acquise en champ photographique usuel est utile presque seulement pour le choix du matériel photographique ou des filtres.

Un système photo-micrographique moderne doit donc dérouler les fonctions suivantes:

30.8.1 - permettre de cadrer et observer l’image à photographier sans se lever debout (comme dans les vieux systèmes à soufflet), peut-être sans détacher les yeux des oculaires, peut-être au cours de l’exposition même;

30.8.2 - il est utile un réseau qui indique exactement la partie de l'image qui est utilisée pour la photo: une espèce de "guidon" ou "viseur";

30.8.3 - indiquer d'une façon ou d'une autre quand l'image est au point sur l'émulsion;

30.8.4 - mesurer le temps d'exposition, en indiquer la valeur et éventuellement commander directement l'obturateur. Tenir compte des facteurs de correction demandés par la sensibilité de la pellicule, les techniques spéciales, etc.

30.8.5 - disposer d'un obturateur qui ne provoque pas des vibrations;

30.8.6 - produire une image finale sans addition d'aberrations par rapport à ce qui est donné par le microscope;

30.8.7 - permettre l'usage de tous les formats et les matériels photographiques les plus utilisés; permettre le passage rapide d'un format à l'autre ou d'une pellicule à l'autre;

30.8.8 - permettre l'usage de filtres proportionnés aux différentes applications;

30.8.9 - permettre l'usage des sources nécessaires pour les différentes techniques spéciales, en tenant compte de leur émission spectrale, de leur luminance, etc.

30.8.1 – Le cadrage

Dans les systèmes à soufflet, ce cadrage peut être exécuté sur un verre dépoli mis à la place de la plaque sensible, ou mis de côté, avec un miroir rabattable derrière (type "reflex"). Dans ces cas cependant l'image est sombre et difficile à focaliser.

Le schéma le plus diffus est actuellement un reflex, avec une petite longue-vue comme viseur. Voir la fig. 129: le faisceau provenant de l'objectif, d'habitude avant que se forme l'image intermédiaire, est dédoublé en deux parties géométriquement identiques à l'œuvre d'un semi-réfléchissant ou "splitter", souvent un prisme cubique avec la surface réfléchissante en diagonale (fig. 34 C, § 11). La fraction du faisceau qui est transmise (F dans la figure) vient envoyée au système photographique (posemètre, obturateur, éventuel projectif, pellicule ou capteur); la partie réfléchie (V) vient envoyée au système de cadrage et/ou d'observation: un "télescope" spécial (viseur), un oculaire particulier ou un tube bioculaire.

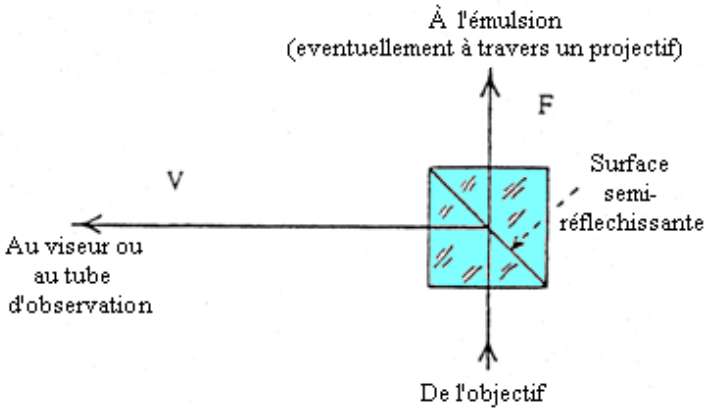


Fig. 129 - Schéma d'un système photomicrographique

Si le splitter est fixe, la partie F contient d'habitude le 80 % de l'énergie et la V le 20%. Dans les semi-réfléchissants modernes à couches minces interférentielles, la fraction d'énergie absorbée est négligeable; dans les vieux systèmes à couche métallique, elle pouvait atteindre le 40%.

Cette solution permet d'observer aussi pendant l'exposition.

Quand l'énergie disponible est par contre insuffisante (fluorescence, fond noir, etc.) il peut convenir d'envoyer tout le faisceau vers l'observation, en V, ou tout en F pour la photo. Il faudra un dispositif à miroir mobile, peut-être actionné par le même bouton qui décroche l'exposition: dans ce cas il y a le danger de vibrations. Quelque chose de semblable arrive dans les appareils photo "reflex mono-optique". Dans d'autres cas, il y a deux ou plus possibilités interchangeables, c'est-à-dire des miroirs avec différente répartition des faisceaux F et V; un cas fréquent est: «tout en F» / «50% - 50%» / «tout en V».

Il est évident que les canaux F et V doivent être "parcentrés", au sens que le centre de l'image

doit être le même dans le viseur et dans les oculaires. Cette condition n'est pas toujours vérifiée étant donné que les deux chemins F et V peuvent contenir beaucoup de composantes (il suffit de penser aux prismes du tube bioculaire), chacune susceptible de fautes de centrage.

Il est aussi évident que l'orientation de l'image photographiée et de celle observée doit être la même, surtout quand on opère en radiation polarisée, et il faut une référence aux directions privilégiées des Nicol. Cette orientation est assurée par une "clés" spéciale (goupilles, entailles, etc.) qui lie toutes les parties passibles de rotation.

Autant évident est que les deux images doivent être parfocales de façon à garantir que l'image vue au point dans le canal vision le soit aussi sur l'émulsion. Mais ceci n'est pas toujours garanti et il convient exécuter un contrôle comme dit dans le § 30.8.3.

30.8.2 - Délimiter l'image

D'habitude, dans l'oculaire ou dans un des oculaires qui servent au cadrage de la photo il y a un "réseau", c'est-à-dire un système de lignes opaques sur un support transparent qui délimitent un ou plus différents formats photographiques.

En quelque cas, le réseau apparaît lumineux et on peut "l'éteindre" à volonté.

Il est sous-entendu que le réseau doit avoir le même centre et la même orientation de l'image photographié, c'est-à-dire de la "fenêtre" qui délimite le format. Si telle orientation n'est pas obligée par la structure mécanique du système, l'utilisateur doit s'en assurer, mais en revanche il a la possibilité de tourner le format par rapport à l'image photographique sans tourner l'objet, la quelle chose serait difficile en absence de platine tournante. Ceci est précieux quand on photographie des structures allongées.

On note aussi que la régulation de certains tubes bioculaires, afin de changer la distance pupillaire, porte à la rotation de l'oculaire et par suite du réseau (§ 24.1); la rotation du tube dans sa propre queue d'aronde ou de l'oculaire à l'intérieur de la boucle qui le soutient porte naturellement au même résultat: une différente orientation de la photographie et du réseau du viseur. Si on n'exécute pas le cadrage dans un oculaire normal, mais dans un télescope spécial, la position du réseau sera en général fixe.

Si on exécute le cadrage dans un tube bioculaire, le réseau d'encadrement se trouve souvent dans un des deux oculaires; dans d'autres cas le réseau se trouve par contre à l'intérieur du tube, en correspondance d'une image intermédiaire additionnelle et il est ainsi visible dans les deux oculaires et la rotation du tube bioculaire ou des oculaires ne donne pas la rotation de son image.

Quand le système photographique prévoit différents formats qui correspondent à différentes parties de l'image finale, le réseau doit contenir différents rectangles capables d'indiquer les limites de chacun. En d'autres cas, la partie d'image couverte par les différents formats est toujours la même: elle est en effet agrandie en différente mesure par des lentilles intermédiaires opportunes, contenues dans les raccordements qui soutiennent les châssis des différents formats. Chaque format peut être ainsi totalement couvert par la même partie de l'image.

Mais nous allons plus à fond: l'idéal serait que, pour chaque format photographique et pour chaque combinaison optique utilisée, le rectangle correspondant à l'image enregistrée sur l'émulsion fût exactement inscrit dans le cercle qui délimite la maxime image intermédiaire que l'objectif est projeté pour fournir. À cette tâche devrait pourvoir le projectif, mais en voila la raison.

Chaque objectif a un champ image défini, donnée par le diamètre de l'image intermédiaire prévue par le projeteur ("index de champ" ou "field of view" = **s'**). Au-delà de ces limites, surgissent rapidement des vignetages et des aberrations mais, à l'intérieur d'elle est contenue l'information (les "lignes" totales, voir le § 30.9.4) que l'objectif est capable de donner. Si on ne veut pas perdre de l'information et par suite de résolution, quand on photographie il faut porter sur l'émulsion la plus grande partie possible de l'image intermédiaire, c'est-à-dire du rectangle inscrit en elle. Alors il faut que l'oculaire utilisé pour le viseur ait l'index de champ maximum permis par

le constructeur, d'habitude 18 mm pour les systèmes classiques, 25 pour Zeiss W., 26 pour Leitz, 26,5 pour Olympus, 20 - 32 pour Zeiss Jena, etc., et que le rectangle qui indique le format soit exactement inscrit dans son champ visuel (voir, dans ce même site, l'art. n° 13, pag. 2-5).

Si l'objectif a un champ supérieur à celui de l'oculaire ou du projectif, il faudrait insérer un système intermédiaire avec un facteur ft < 1 qui contraigne l'image intermédiaire dans le champ visuel de l'oculaire. De cette manière, on augmente la résolution en lignes/mm dans l'image photographique, même si l'œil ne s'en aperçoit pas à cause de la résolution limitée de la rétine.

Beaucoup de systèmes photographiques du commerce utilisent, malheureusement, seulement une partie de l'image intermédiaire et on n'exploite pas toute l'information contenue en elle: on a une perte de définition.

Dimensions et orientation de l'image photographique se contrôlent en observant dans les oculaires un objet à structure bien définie (par ex. un micromètre objet - § 12.1); puis on pose à la place de la pellicule un verre dépoli ou un bout de papier "calque", et on compare les deux images. Il faudra naturellement ouvrir le châssis et appuyer la face dépolie du verre sur la même structure sur laquelle s'appuie la surface de l'émulsion.

En certains cas, le système photographique contient différent projectifs, de différent agrandissement, rapidement interchangeables. Il est clair que seulement le plus faible d'eux pourra exploiter le plus grand index de champ et par suite donner la résolution maxime sur la photo. Sur le réseau du viseur, ils devront y être les rectangles correspondants aux formats couverts par les différents projectifs.

30.8.3 - Focaliser

Nous ne parlons pas ici des systèmes classiques dans lesquels la mise au point s'exécute sur le verre dépoli, étant donné que leur usage est intuitif. On rappelle qu'il est préférable d'avoir au centre du verre dépoli une zone transparente avec deux fils en croix, de façon à pouvoir exécuter la mise au point directement sur l'image réelle, l'"image aérienne", comme l'appellent les photographes. Dans ce cas il est utile une petite loupe à appuyer sur la zone transparente pour augmenter la sensibilité de la méthode; on doit mettre au point la loupe sur la zone transparente avec sa croix. Quand on substitue le verre dépoli avec la plaque sensible, la mise au point est garantie dans la mesure dans laquelle, pendant la substitution, on n'a pas eu aucune altération de la géométrie du système.

En nous référant par contre au schéma de la fig. 129, il est clair que dans les oculaires (V) se forme une image intermédiaire analogue à celle qui est dirigée dans le canal F. Après le semi-réfléchissant, les deux canaux F et V contiennent des éléments différents mais le faisceau qui entre en eux est le même, à part l'intensité. Donc, des caractéristiques et de la position de l'image finale dans le canal V on peut tirer la position de l'image dans le canal F. En autres mots, on peut mettre au point l'image en F en opérant dans le canal V, c'est-à-dire dans le viseur ou dans l'oculaire. Cela vaut si les deux systèmes optiques en F et V sont rigides entre eux, et leur structure ne vient jamais altérée, et on suppose en outre que le constructeur dispose le tout de manière qu'il y ait cette correspondance de mise au point (parfocalité) entre les deux canaux. Et on remarque que l'ouverture du faisceau qui atteint l'émulsion provenant de l'oculaire de projection est très petite: avec un diamètre de la pupille de sortie de l'oculaire qui est d'habitude au maximum de 3 mm et une distance oculaire-émulsion au moins 100 mm, on a une ouverture relative d'au moins $f\# = 100/3 = 33$. De ça dérive une profondeur de foyer sur l'émulsion (§ 14) d'au moins $P = f\#^2 \lambda = (33)^2 \lambda = 1.000 \times 0{,}5 = 500 \lambda$. Donc, les cotes dans le canal F ne sont pas critiques: la tolérance est au moins de l'ordre d'un demi-millimètre.

Si on veut contrôler la parfocalité entre canal vision et canal photographique, on substitue la pellicule avec un verre dépoli (surface dépolie du côté de l'émulsion) de dimensions telles à s'appuyer sur les mêmes surfaces sur lesquelles s'appuie normalement la pellicule. On exécute la mise au point dans le canal vision avec une des méthodes sous cité; on contrôle la focalisation sur le verre dépoli avec une bonne loupe, naturellement sans retoucher la mise au point. Pour mieux

contrôler cette dernière focalisation, il convient remplacer le verre dépoli avec une lame transparente; toujours du côté de l'émulsion, on trace sur cette lame quelques lignes minces avec n'importe quelle pointe d'acier ou avec un crayon feutre. Quand la préparation est en position correcte, on observe ces lignes avec un bonne loupe, par ex. un "compte-fils", et on soigne de les voir bien nettes. À ce point, aussi l'image microscopique doit être dans le meilleur foyer.

Les méthodes les plus communes pour mettre au point dans le canal d'observation V sont trois. La notion qui leur est commune est celle que le réseau de cadrage dans l'oculaire du viseur est parfocale avec l'émulsion: si l'image est au point avec le réseau, elle se trouve aussi dans le plan de l'émulsion. Il faut évaluer donc si l'image qu'on observe se trouve dans le plan du réseau, et ce problème est résolu de manière différente.

NB: si l'oculaire du viseur contenant le réseau se trouve dans un tube bi - ou trioculare il faut vérifier que la régulation de la distance interpupillaire n'altère pas la longueur du tube et par suite la mise au point (§ 24.1)[231]. Pour le même motif, l'oculaire du viseur ne doit pas se trouver dans un tube à longueur réglable: beaucoup de tubes bioculaires ont une ou les deux sièges des oculaires avec un embout tournant pour la compensation des anisometropies; si l'oculaire se trouve placé dans un tube réglable, qu'on mette la bague de la régulation dioptrique en position de zéro. Si par contre c'est l'oculaire à être réglable (lentille oculaire réglable en hauteur pour mettre au point le réseau), cela ne donne pas des fautes de focalisation dans le canal F étant donné que ce qui se déplace ce n'est pas le réseau, qui fait référence, mais seulement la lentille qui se trouve au dessus du réseau. L'important est que le réseau soit vu au point.

a) Mise au point sur le réseau

Si celui qui observe le réseau porte des lunettes de puissance sphérique (myopie ou hypermétropie) pas supérieure à 3 D, il peut les enlever; les lunettes pour astigmatisme doivent être tenues; les lunettes pour les presbytes doivent par contre être enlevées. L'important est que l'observateur règle la bague spéciale sur l'oculaire du viseur autant qu'il voit net le réseau; pour éviter de forcer inutilement l'accommodation, il faut commencer cette régulation avec la lentille toute dévissée, vers le haut, et arrêter le mouvement dès qu'on voit net. Obtenu cela, ça suffit que l'utilisateur règle le mouvement micrométrique jusqu'à quand il voit au point simultanément réseau et objet. Mais, chaque fois, il faut s'assurer de voir net le réseau, c'est-à-dire de ne pas avoir mis en marche inconsciemment l'accommodation.

Les ennuis naissent quand l'instrument est réglé pour un observateur donné et survient une autre personne avec quelque amétropie sphérique, qui enlève les lunettes sans régler avant la bague de mise au point du réseau: il peut ne pas s'apercevoir que le réseau lui apparaît défocalisé et la mise au point qu'il exécute sur la seule image de l'objet sera nécessairement erronée.

b) La longue-vue ("focussing aid")

Dans le cas précédent, la coplanarité entre réseau et image de l'objet dans le canal V est réalisé "à l'œil" sur la base de la netteté des deux images. Pour aider l'œil en évaluant telle netteté, quelques constructeurs avisés proposent un petit télescope (selon la recette de Kepler, avec un grossissement de 2 - 5× , mis au point "pour l'infini"), qui doit être appliqué sur l'oculaire du viseur et agrandit l'image fournie par l'oculaire même. Celui qui s'habitue à travailler avec ce simple accessoire, ne sait plus s'en priver. Son utilité est grande aux bas grossissements étant donné que les faibles objectifs ont une pupille de sortie plus grande et aussi le "disque de Ramsden" (§ 9) est plus grand; il en dérive que la pupille de l'œil peut être plus petite du "disque" et opère pour lui comme diaphragme, en augmentant la profondeur de foyer de l'instrument (le "disque" est l'image réelle de la pupille de sortie de l'objectif). Ceci rend moins critique la mise au point[232]. La longue-vue, dans la même mesure dans laquelle elle agrandit l'image du réseau et de l'objet, elle rapetisse la pupille de sortie de l'instrument et élimine le problème.

---

[231] Cela se vérifie dans les tubes selon Siedentopf (§ 24.1), dans les tubes à compensation Leitz et peu d'autres.

[232] Telle augmentation de la profondeur de focalisation ne se vérifie cependant pas dans le canal F dans lequel aucune composante agit comme diaphragme.

c) La parallaxe

Pour contrôler la coplanarité entre réseau et image de l'objet, au-delà de la recherche de la "netteté", on peut se baser sur l'annulation du "parallaxe" (fig. 130): si l'image se trouve dans le même plan du réseau (A), en déplaçant latéralement l'œil, ces deux parties n'apparaissent pas se déplacer entre elles; si par contre elles ne sont pas coplanaires (B), on a coïncidence entre le centre du réseau et le centre de l'image seulement si même l'œil se trouve sur l'axe (B). Si l'œil se déplace latéralement (C), il apparaît un déplacement relatif du réseau par rapport à l'image, dit "parallaxe".

En pratique, pour appliquer la méthode de la parallaxe, on déplace la tête à droite et à gauche alternativement et on règle le mouvement micrométrique jusqu'à quand le réseau apparaît immobile par rapport à l'image. C'est la situation de coïncidence schématisée en A.

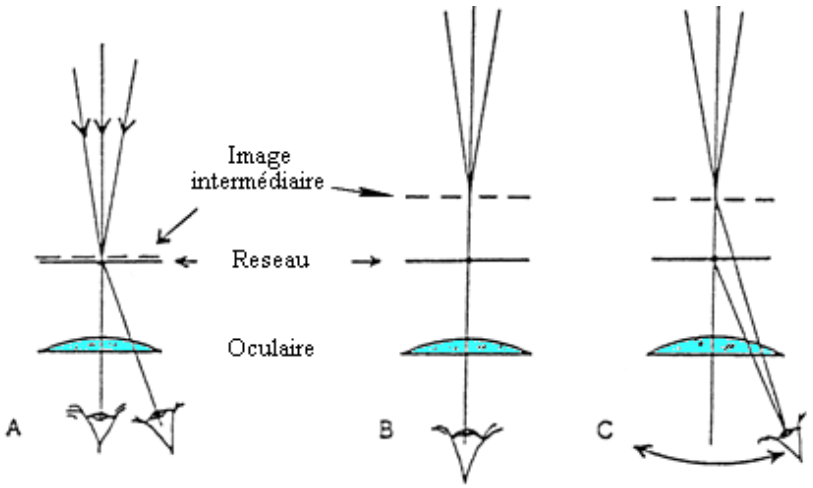


Fig. 130 - Le phénomène de la parallaxe dans la mise au point avec réseau

30.8.4 - Mesurer le temps d'exposition

On peut effectuer une telle mesure simplement en appuyant un photocellule sur l'oculaire du viseur ou de l'oculaire. Mais il y a normalement un mécanisme spécial à l'intérieur du système, en général dans le canal F. Il s'agit d'un élément sensible qui peut être inséré mécaniquement dans le chemin optique au moyen d'un poussoir externe ou qui reçoit d'une manière stable une partie du faisceau, obtenue par un semi-réfléchissant.

Par rapport au faisceau global qui produit l'image photographique, le capteur peut être sensible à toute ou presque l'étendue du faisceau ("**mesure intégrale**"). Cette méthode est valide si la luminance de l'image est assez homogène et les contrastes sont par suite petits.

Si par contre l'objet intéressant occupe une petite partie du champ et il est sombre sur fond clair (globules blancs, cellules isolées sur frottis, etc.), ou il est clair sur fond noir (champ noir, fluorescence, polarisation, etc.), alors il faut exécuter la mesure photométrique sur une très petite région du champ visuel, en correspondance de laquelle doit se trouver l'objet intéressant ("mesure ponctuelle" ou "**spot**").

Ces possibilités sont offertes par les meilleurs constructeurs. La région "ponctuelle" dans laquelle est effectuée la mesure "spot" vient indiquée sur le réseau du viseur par un petit cercle central. L'utilisateur doit déplacer la préparation jusqu'à quand le petit cercle vient occupé entièrement par l'objet qui plus l'intéresse. Le reste de l'image pourra résulter surexposé ou sous-exposé, mais cela est inévitable; et il est inutile de se faire des illusions sur la "latitude de pose" des émulsions photographiques[233].

Près de certains constructeurs on trouve un "spot" mobile qui ne rend plus nécessaire de porter

---

[233] À ce point de vue, les émulsions en blanc-noir sont beaucoup "plus douces"; parmi les émulsions pour diapositives aux couleurs est nettement meilleure la Kodachrome, mais le type pour lumière artificielle est hors production depuis des années.

On ne parle pas ici de photographie digitale, mais nous pouvons ajouter que les capteurs électroniques montrent très souvent une latitude de pose beaucoup plus petite des émulsions photographiques.

l'objet à coïncider avec le centre du champ. D'autres constructeurs offrent deux spots concentriques de différente étendue.

Étant donné que le spot utilise seulement une très petite partie du champ image (d'habitude 1%) et donc une petite partie de la radiation qui traverse le champ visuel, il doit par suite posséder un détecteur très sensible, souvent un photomultiplicateur à anodes multiples.

Quand on ne dispose pas d'un posemètre spot, il est possible dans quelque cas de résoudre les problèmes d'exposition pour les petits objets avec quelque simple calcul.

Supposons d'avoir, par exemple, un objet clair sur fond sombre, comme un cristal en radiation polarisée. On mesure, au moins à peu près, le côté de l'objet par rapport au rectangle qui délimite le format photographique. Si, par ex., le côté du cristal (moyenne entre côté long et côté court) est 1/10 du côté (moyen) du format, on peut dire que la surface de l'objet occupe, à peu près, 1/100 du format. Par suite le posemètre (intégral, naturellement) reçoit 1/100 de l'énergie qu'il recevrait si l'objet occupait tout le format. À ce point il y n'a pas que diviser pour 100 le temps de pose indiqué par l'instrument, qui ne doit pas naturellement commander l'obturateur automatiquement.

Il faudra si jamais tenir compte de l'"écart de la loi de réciprocité", dit "**effet Schwarzschild**", selon lequel, en diminuant l'éclairage de la pellicule, il ne suffit pas d'augmenter dans la même mesure le temps d'exposition (autrement, serait toujours valide la "loi de réciprocité" et on n'aurait pas l'"écart de la loi … "). Il faut par contre introduire un facteur de correction, qui dépend du type du matériel photographique. Par ex., pour les diapositives aux couleurs, quand le temps indiqué par le posemètre ou calculé est autour de 20 sec., il est bien le multiplier pour environ 2×; quand il arrive à quelque minute, il est bien le multiplier pour 3 - 4, et si ailleurs.

On rappelle aussi que, en champ noir, l'œil apprécie dans la photo une certaine surexposition.

Naturellement, le posemètre devrait avoir la même "courbe spectrale de sensibilité" de l'émulsion photographique, c'est-à-dire répondre de la même façon aux différentes couleurs. Mais ceci ne peut pas être toujours du tout vérifié, au moins parce que les différents types d'émulsion ont des courbes de sensibilité différentes, et telles courbes changent avec le changer du temps de pose, avec les conditions de magasinage, avec les techniques de développement, etc. Et aussi la provenance du matériel photographique a son poids: l'expérience enseigne que la telle pellicule "made in France" "tire sur le jaune", pendant que celle "made in USA", "tire sur le bleu", etc. Quand s'approche la date d'échéance, beaucoup de pellicules "tirent sur le bleu", au-delà à devenir moins sensibles.

Le temps mesuré par le posemètre peut être indiqué en forme analogique ou digitale par un display spécial, peut-être mémorisé, et aussi modifié selon la sensibilité nominale de la pellicule (que l'utilisateur doit introduire à la main sur une commande spéciale ou qui peut être perçue par un convenable capteur qui "regarde" la surface extérieure du chargeur où telle sensibilité est codifiée par des petits rectangles blancs et noirs). En quelques cas, le circuit de mesure est informé par des capteurs spéciaux à propos du format photographique utilisé et il corrige opportunément le temps de pose: si le format est grand, la radiation se distribue sur une surface plus grande et il faut allonger en proportion le temps. Parfois, le format peut être sélectionné par l'utilisateur simplement en pressant un bouton.

Dans les systèmes les plus simples, le temps indiqué sur le display doit être introduit manuellement sur l'obturateur; mais souvent l'obturateur est commandé directement par le posemètre.

Des signaux lumineux spéciaux peuvent informer sur l'état du système: exposition en cours, trop de lumière ou trop peu, chargeur non pas inséré, etc.

L'électronique moderne produit continuellement des nouvelles solutions techniques, mais on rappelle que les mécanismes les plus compliqués sont ceux qui tombent le plus souvent en panne et pour lesquels il est plus difficile de trouver les pièces de rechange. Après tout, il n'existe pas un mécanisme si perfectionné qui puisse être utilisé par un sot. La bonne photo naît plus de l'adresse et de la patience du technicien que des subtilités de la caméra.

30.8.5 - L'obturateur

C'est un organe, normalement de nature mécanique s'il est à commande manuelle, ou électromécanique s'il est à commande automatique, qui pourvoit à transmettre ou à bloquer le faisceau dans le canal F (voir toujours la fig. 129). Il est évident que le canal V est toujours ouvert, même quand un miroir mobile ou un prisme achemine l'entier faisceau dans le canal photo pendant la pose.

Les caractéristiques d'un obturateur de microscope sont:

-- Couper le faisceau dans un point dans lequel son diamètre est moindre par ex. près de la pupille de sortie de l'oculaire (disque de Ramsden). Si l'obturateur coupait un faisceau de grand diamètre, étant donné que son mouvement est relativement lent par rapport aux temps de pose courts, il arriverait que les parties les plus externes du faisceau viendraient admises après (pendant le déclanchement) et coupées avant les autres (pendant la fermeture), et par suite le temps de pose ne serait pas constant sur tout le photogramme.

-- Couper le faisceau APRÈS le posemètre. La raison est évidente.

-- Ne pas produire des vibrations nuisibles. Le microscope agrandit l'image de l'objet, mais aussi ses vibrations! On utilise d'habitude des obturateurs "centraux" avec des lamelles à mouvement radial, plutôt que les "rideaux" à mouvement latéral: dans un obturateur central, en théorie, le barycentre ne se déplace pas pendant l'ouverture et la fermeture.

En tout cas, il est bien réduire toujours l'influence des vibrations de l'obturateur qui durent une fraction de seconde, en utilisant des temps de pose de plusieurs secondes, à comparaison desquels la durée des vibrations est négligeable. Éviter les temps supérieurs à environ 10 sec. étant donné qu'alors deviennent importantes les vibrations du plancher, surtout en proximité des rues, des industries lourdes, etc.

Autre habilité est celle de ne jamais lubrifier les lamelles d'un obturateur: l'adhésion entre les lamelles en bloquerait le mouvement. Le même vaut pour les diaphragmes à iris, même si ceux-ci sont beaucoup moins sensibles à cause de la commande manuelle.

30.8.6 – Définition et résolution dans l'image photographique

Entre objet et émulsion on trouve un système optique constitué au moins par l'objectif et le projectif (ou oculaire), mais souvent aussi par des prismes, lentilles de tube, lentilles de chambre, etc. Le système doit être globalement corrigé de la meilleure manière de toutes les aberrations, surtout de celles qui plus influent sur le résultat photographique: sphérique, chromatique axiale et latérale, courbure de champ.

C'est un problème que seulement le constructeur peut résoudre en faisant correspondre le système optique dans le canal F aux caractéristiques du système global. Le praticien devra seulement suivre les indications à propos de l'usage de parties intermédiaires, projectives et autres.

Pour une vérification des caractéristiques de l'image à photographier, on peut utiliser les mêmes moyens qu'on utilise pour la vérification de l'image visuelle ou pour le contrôle du cadrage: réseaux, micromètres-objet ou semblables[234]. Il faut enlever la pellicule, appuyer un verre plan et poli (nous sommes sur le plan image et par suite il ne faut pas un verre optique avec une planéité contrôlée) sur les mêmes surfaces de référence sur lesquelles s'appuie l'émulsion, mises près des bords de la "fenêtre", et observer l'image réelle avec une bonne loupe, appuyée sur le verre.

De cette manière on révèle aussi l'existence d'éventuelles "**images catadioptriques**"[235], petits reflets clairs au centre du champ. Voilà leur origine: parmi toutes les surfaces air-verre existantes

[234] Le star test (§ 18.4) est précieux pour le contrôle des aberrations du point (§ 13.2).

[235] Voir, dans ce site, l'art. n° 31.

entre la pupille d'objectif et l'émulsion, on peut considérer tous les couples possibles; pour chacun de ces couples, le faisceau optique vient partiellement réfléchi à reculons par la surface plus haute du couple et puis encore partiellement réfléchi en avant par la surface inférieure. On crée ainsi un système optique réfléchissant (cata-) et réfringent (dioptrique) qui peut former une image apocryphe de la pupille d'objectif plus ou moins au point sur l'émulsion. Telle "cata-dioptrique" peut ne pas être visible dans le canal V étant donné que le système optique est différent. Ces taches claires sur la photo peuvent se former pour chacune des combinaisons possibles objectif – projectif - lentilles intermédiaires – filtres, etc. et telles combinaisons, dans un instrument normal, sont nombreuses et le constructeur ne peut pas prévoir tous les cas possibles.

Taches claires sur la photo peuvent se former, en général hors du centre, aussi pour réflexion sur les parois internes des tubes et des raccordements dans le canal F. Le constructeur ne pourvoit pas toujours avec des noircissements internes suffisants de ces parties. Un contrôle est possible avec la méthode du verre dépoli à la place de la pellicule. En chaque cas, pour réduire les reflets internes, il est bien fermer le plus possible le diaphragme de champ et celui d'ouverture: on évitera les rayons obliques inutiles.

30.8.7 – Les formats et les émulsions

Ils existent en commerce beaucoup de matériels photographiques sur pellicule flexible, sur pellicule rigide, sur plaque, etc. en différents formats. Les matériels prévus pour réaliser des images aux couleurs positives, en générale transparentes (c'est-à-dire des diapositives), sont indiqués commercialement avec des noms qui terminent pour "chrome" (Kodachrome Agfachrome etc.); ceux destinés à réaliser des négatifs destinés à la presse à couleurs ont des noms qui terminent avec "color" (Kodacolor, Agfacolor, etc.).

Un bon constructeur de microcaméras doit fournir les accessoires nécessaires pour utiliser tous les matériels et les formats, au moins du "format Leica" (24 × 36 mm) au grand format (9 × 12 cm, égal environ à 4" × 5" (pouces)).

Pour chaque format, le système optique doit être disposé à l'intérieur du "raccordement" de façon à exploiter pleinement le champ image fourni par le microscope (voir les §§ 25.2 et 30.8.2). S'il y a des projectifs interchangeables, le plus faible en principe donne la maxime résolution sur le plan de l'émulsion étant donné qu'il utilise la plus grande partie possible de l'image finale.

Pour le choix de l'émulsion, nous reportons quelque critère fondamental.

-- Les émulsions à grande résolution sont celles en blanc et noir, surtout les moins sensibles. Cet avantage est appréciable quand le microscope a une résolution, sur le plan image, supérieure à celle de l'émulsion. Cela peut arriver avec les objectifs les plus faibles et avec grande ouverture. Avec les forts objectifs, en général, l'émulsion a une résolution plus grande de celle du microscope et par suite tant vaut utiliser des émulsions aux couleurs, qui ont une résolution plus petite[236].

-- Surtout en vue de la reproduction typographique, on a la plus grande résolution avec les grands formats, mais encore une fois l'avantage se sent avec les agrandissements les plus petits. Les forts objectifs, pour des raisons optiques, donnent une grande résolution sur le plan objet (grande ouverture), mais une résolution inférieure sur l'image finale (l'agrandissement grandit en plus grande mesure que l'ouverture: voir la note précédente).

-- Les pellicules B - N peuvent aller bien avec n'importe quel type de source, pourvu qu'on n'utilise pas des filtres aux couleurs très saturées avec une bande passante aux extrêmes du spectre

[236] On fasse cette comparaison: obj. apochromatique 10/0,45; la résolution maximum dans le plan objet (formule 52) avec $\lambda = 0{,}5\ \mu$ est: $\mathbf{r} = 0{,}61\lambda/\text{NA}$ égale à environ $0{,}61\times0{,}5/0{,}45 = 0{,}3/0{,}45 = 0{,}68\ \mu$, égal à 1500 lignes/mm. Avec un obj. apochromatique 100/1,3, on a: $\mathbf{r} = 0{,}234\ \mu$, égal à 4250 lignes/mm. Passons à l'image finale; supposant un projectif 4 ×, l'agrandissement final sur l'émulsion pour les deux objectifs sur cité est $M = 10\times4 = 40$ ou $M = 100\times4 = 400$. Alors la résolution sur le plan de l'émulsion en lignes/mm est, respectivement, 1500 / 40 = 38 et 4250 / 400 = 11. Comme on voit, l'objectif fort est en défaut. Dans le premier cas, la résolution d'une pellicule aux couleurs est à peine suffisante (30 - 50 lignes/mm); dans le second cas, elle est amplement suffisante. Une pellicule en B - N peut arriver à plus que 100 lignes/mm.

optique.

-- Les pellicules à couleurs “pour lumière artificielle” (“tungsten”) du type B ou, encore mieux, du type A, vont bien avec une lampe au quartz-iode. Avec une lampe au xénon ou avec la lumière du ciel nuageux il faut un filtre de compensation couleur ambre de + 12 DM (§ 23.2), comme le Wratten Kodak 85 B.

-- Les pellicules aux couleurs “pour lumière du jour” (“daylight”) vont bien avec les lampes au xénon ou avec le ciel nuageux. Avec des lampes au quartz-iode, utiliser un filtre de compensation bleue d’au moins − 12 DM comme le Wratten Kodak 80 A.

-- Aucune émulsion ne rend bien les couleurs avec une source aux vapeurs de mercure, sauf qu’on les utilise en fluorescence. Aucun filtre n’est convenable, étant donné qu’il s’agit de sources “à raies”.

-- Le rendement des couleurs, comme on a expliqué auparavant, diffère, comme la sensibilité réelle, d’une émulsion à l’autre, aussi de même sensibilité nominale. Il diffère aussi en base à la durée de pose et aux conditions de vieillissement, à la provenance, aux conditions de développement, etc. Rien n’est prévisible.

-- Ils existent en commerce des pellicules “pour temps longs”, plus convenables aux temps de pose normalement utilisés en microscopie.

-- Toutes les pellicules, en B - N ou aux couleurs, sont beaucoup plus sensibles que l’œil au violet et à l’UV. Il en dérive qu’un système normal (obj. achromatique, par ex.), apte à l’observation visuelle, peut donner un effet de “flou” (halos passés) même dans les pellicules en B - N étant donné qu’à ces longueurs d’onde le système optique n’est plus corrigé. L’usage stable d’un filtre calorifuge ou d’un anti-UV est par suite prudent; en B - N il est possible d’habitude l’usage d’un filtre vert, si possible à bande étroite.

30.8.8 – Les filtres (voir aussi le § 23)

Les filtres et la source se trouvent normalement au début du chemin optique du microscope, et par suite bien loin du système photographique. Mais ils peuvent malgré cela influer sur le résultat final pour des raisons évidentes.

En ayant déjà traité ce sujet, limitons nous à rappeler quelques indications pratiques.

-- Les filtres en gélatine sont sensibles à la chaleur et ils doivent être protégés avec un calorifuge, surtout s’ils sont foncés, c’est-à-dire ils absorbent beaucoup. Le même vaut pour l’UV produit par les lampes au mercure: sauf le cas de la fluorescence, il faut toujours introduire un filtre anti-UV tout de suite après la lampe ou le collecteur.

-- Le même vaut pour les filtres mixtes (verre-gélatine), comme certains filtres d’arrêt pour fluorescence et pour les Polaroid.

-- Un filtre calorifuge en général absorbe aussi beaucoup l’UV et donc il est utile pour protéger objectif et préparation du chauffage et de la décoloration, pour allonger la durée des préparations contenants des êtres vivants, etc. Les plus efficaces sont ceux de type interférentiel.

-- En B - N, les filtres colorés permettent de changer le contraste en base à ce principe intuitif: un filtre de la même couleur de l’objet en atténue le contraste par rapport au fond; s’il est de couleur complémentaire, il en exalte le contraste. Pour les objets opaques à l’infrarouge comme le revêtement chitineux ou “exosquelette” des insectes, utiliser un filtre extrême rouge ou infrarouge.

-- Des filtres de compensation pour la photographie aux couleurs on a déjà parlé ici dessus et dans le § 23.

-- Un verre dépoli peut être précieux en photographie à fond clair pour rendre le “fond” homogène: l’émulsion est beaucoup plus sensible que l’œil aux différences de luminosité. Cependant, il porte souvent à une perte de contraste et de toute façon à une forte perte de luminosité, jusqu’à 100 fois, selon la place dans laquelle il est rangé (§ 22.2.4), et donc il doit être exclu en fluorescence, champ noir, etc.

30.8.9 – Les sources

On en a déjà parlé dans le § 22.6 et peu avant, à propos du choix des émulsions. Nous reportons, ici encore, quelques conseils pratiques.

Les sources le plus diffuses et plus confortables sont celles à incandescence, à filament de tungstène; leur spectre est continu, leur alimentation est simple, c'est facile de régler leur intensité. Leur rendement est cependant bas: au maximum 5% de l'énergie dissipée par elles vient transformée en radiation "optique". Leur température de couleur (TC) est de 2600 – 3400° K; donc elles ne posent pas des problèmes pour l'observation, la photographie en B - N et aux couleurs, pourvu qu'on utilise des pellicules pour lumière artificielle. À la limite, elles demandent un filtre de correction légère, de l'ordre de − 2 ou − 3 DM (bleu clair). Les filtres "lumière du jour", souvent conseillés pour l'observation, pour faciliter la reconnaissance des couleurs, sont trop forts dans ce contexte, étant donné qu'ils vont de − 3 à − 6 DM. Pour la photographie avec des pellicules pour lumière du jour il faut un bleu plus fort, avec une valeur de mired d'au moins − 12 DM.

La vie moyenne des sources au tungstène est très variable et elle décroît rapidement avec le grandir de leur TC.

Depuis décennies se sont imposées les sources à incandescence "au quartz-iode" (QI), ou "aux halogènes" (ce n'est pas toujours du iode) dans lesquelles la TC change de 3200 à 3400 °K. Pour la photographie avec des pellicules pour lumière artificielle, en principe, le filtre de compensation est inutile. En pratique, il faut vérifier par tentatives.

En microscopie on utilise des puissances à partir de 10 W (diascopie, fond clair) à 100 W (techniques interférentielles, polarisation et autres), et il n'y a pas de difficulté pour toutes les techniques, sauf la fluorescence en UV et la projection.

Pour la fluorescence, comme on a expliqué dans le § 22.6, il est préférable d'utiliser les lampes à arc en vapeurs de mercure, à cause de leur spectre à raies; mais ces lampes ne sont pas convenables pour la photographie aux couleurs, soit pour leur température de couleur élevée, soit pour l'impuissance de les "compenser" avec des filtres. Les lampes à arc en xénon, à cause de leur température de couleur (5.500° K), sont par contre convenables aux pellicules "pour lumière du jour": leur spectre est presque continu.

30.9 – La REPRISE de TÉLÉVISION au MICROSCOPE

Sur ce sujet, les développements techniques modernes rendent difficile une exposition suffisante. Nous pouvons seulement exposer les principaux problèmes.

Quand l'image réelle que le microscope peut fournir doit être projetée sur la surface photosensible d'une caméra de reprise du type de télévision, on retrouve beaucoup des problèmes caractéristiques des reprises avec des émulsions photographiques. En particulier, problèmes d'encadrement et délimitation de l'image, focalisation, résolution, définition, éclairage. Donc problèmes de filtres, sources, reproduction des couleurs …

Par contre, plusieurs problèmes ne se présentent pas dans la reprise de télévision. Par ex., la fonction du posemètre vient transférée en général à l'intérieur de la caméra qui peut pourvoir toute seule à la compensation des variations de luminosité de l'image; au maximum un indicateur signalera la condition de "trop" ou "trop peu de lumière", que l'appareil n'est plus capable de corriger tout seul. Dans beaucoup de caméras de télévision l'objectif est doué d'un diaphragme automatique, qui contribue à la compensation à peine décrite; mais, comme nous verrons, la caméra de télévision doit souvent être privée de son objectif avant d'être appliquée sur le microscope et le diaphragme automatique ne peut pas intervenir.

Même l'obturateur n'existe pas dans une caméra de télévision, vu que la reprise est continue.

Maintenant nous voyons le problème de l'évaluation de l'image du point de vue du cadrage, de l'orientation, de l'agrandissement, de la mise au point.

Le signal de la télévision devient visible comme image complète dans un "**display**" ou "écran" spécial, qu'extérieurement et comme fonction ressemble beaucoup à un post de télé. Il peut s'agir d'un écran très petit, qu'on observe souvent à travers une loupe, fixé sur la caméra de télévision; cette disposition n'est pas utile en microscopie si la caméra sera fixée sur le microscope tournée vers le bas et le display est fixe, en général tourné du côté opposé à l'objet; dans ce cas, le display devrait être observé en montant sur une chaise et en regardent vers le bas. Souvent cependant les caméras de télévision modernes possèdent un display orientable à volonté, et le problème tombe.

Un petit écran est par contre utile, même de 10 cm de largeur, appuyé sur la table près du microscope qu'on peut observer en restant assis, pendant qu'on manipule l'instrument. Plus en haut, pour éventuels étudiants ou spectateurs, il peut y avoir un second grand écran, même au dehors de la visibilité de l'opérateur.

La focalisation est évaluée sur la base de la définition de l'image sur l'écran ou display. On évalue l'encadrement par rapport aux marges de l'écran, qu'on compare avec l'image dans les oculaires. Se rappeler du problème du vignetage (§ 6.1 à la pag. 51 et l'art. n° 13).

On rappelle que l'image de la télévision dans les systèmes analogiques est toujours très pire de celle optique, au moins pour le fait d'être subdivisée en 625 lignes parallèles et d'être intermittente comme celle cinématographique. Il est donc toujours souhaitable que l'opérateur dispose d'un viseur optique ou d'un tube bioculaire, comme en photographie.

Naturellement, les systèmes digitaux modernes ont des caractéristiques bien meilleures.

30.9.1 – Le matériel sensible pour la télévision

1) Tubes de reprise à vide poussé, basés sur l'effet thermoïonique et sur la transformation de l'image optique en image électrostatique (Orticon, Vidicon, Newvicon, etc.).

Un faisceau d'électrons, engendré par une cathode chauffée électriquement, est focalisé sur une surface photosensible avec un système de lentilles électrostatiques et dévié en deux directions orthogonales au moyen de champs magnétiques ou électriques variables, de façon à explorer par lignes parallèles successives toute la surface sensible; l'ensemble des lignes est dit "**raster**"[237]. Sur la surface sensible est projetée l'image optique, qui est explorée donc ligne après ligne en 1/50 de seconde et engendre en même temps un signal électrique qui décrit point par point la luminosité, et éventuellement la couleur de l'image même. Ensuite, tel signal "vidéo" est amplifié et transmis à un écran avec les signaux de synchronisme, qui permettent d'avoir la phase correcte entre la déflexion dans la caméra de télévision et celle sur l'écran. Sur la couche luminescente de ce dernier, si du type à CRT (cathode ray tube), est également projeté un faisceau focalisé d'électrons, qui est dévié avec des mécanismes analogues et reproduit donc, ligne après ligne, l'image analysée dans la caméra. Le faisceau d'électrons dans l'écran suscite la phosphorescence dans une couche de matériels spéciaux et, en étant "modulé" par le signal vidéo, il peut reproduire les clair-obscur ou les couleurs de l'image de départ. Sont en train de se répandre aussi d'autres types de surfaces luminescentes pour lesquels on a des écrans "à **cristaux liquides**", "au plasma", à LED ou aux LED organiques (OLED), etc. avec d'autres caractéristiques.

Les tubes de reprise "à vide" se basent sur un tube de verre à vide très poussé (pour permettre le mouvement des électrons), long au moins 10 cm, complexe dans la structure et dans l'alimentation électrique. Il est donc encombrant et fragile; il peut être endommagé trop facilement et irrémédiablement par un éclairage excessif. La présence d'une cathode chaude demande un cer-

[237] Dans le standard européen il y a 625 lignes pour chaque "frame" et 25 frame par seconde; les 625 lignes sont divisées en deux groupes égaux de lignes qui se succèdent ("interlacement") pour un totale de 50 champs par seconde, synchrones avec la tension alternée du réseau électrique. Dans le standard américain , les lignes sont 525 et les champ 60/sec.

tain temps de préchauffage, de quelque seconde à quelque minute. La présence d'un faisceau d'électrons dans le vide rend ces "tubes" sensibles aux champs magnétiques.

2) Systèmes intégrés à l'état solide (CCD = Charge Coupled Device ou CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductor ou semblables).

Il s'agit de dispositifs très minces à semi-conducteurs. La surface sensible est constituée par une matrice à mailles carrées d'éléments photosensibles dits "**pixel**", disposé en rangs parallèles.

Les caméras de télévision à CCD ou CMOS sont plus petites et légères de celles à Vidicon et plus simples dans l'alimentation électrique. Elles subissent plus rarement des dégâts permanents à cause d'un sur-éclairage et elles peuvent parfois travailler à des niveaux d'éclairage plus bas. Le temps de démarrage est moindre, même une fraction de seconde.

La résolution d'un CCD peut être plus petite ou plus grande de celle d'un Orticon ou aussi d'un Vidicon; sa "dynamique" ou "latitude de pose", est en général plus petite, autant plus petite que plus petit est le détecteur. Étant donné qu'au microscope le niveau de luminosité change aisément (ça suffit la substitution de l'objectif, la manœuvre du diaphragme d'ouverture, etc.), une caméra de télévision à CCD oblige à une variation fréquente de l'alimentation de la lampe, à la substitution des filtres gris, etc. Cela peut devenir épuisant.

Les deux types de caméras de télévision sont construits pour le B – N (blanc-noir) ou pour la couleur; celles en B - N sont plus économiques du type à Vidicon mais le développement rapide des types à CCD en baisse les prix.

Les CCD sont insensibles aux champs magnétiques.

Les caméras de télévision professionnelles ou "broadcasting" ne peuvent pas être utilisés au microscope, et non seulement pour leur coût, mais aussi pour l'encombrement et le poids; il faudrait un support séparé très robuste.

Les caractéristiques d'un système de télévision qui intéressent à nos fins sont examinées dans les chapitres suivants.

30.9.2 - Sensibilité spectrale (variation de la sensibilité au changer de la longueur d'onde)

Les matériels disponibles sur le marché sont nombreux et les constructeurs ne fournissent pas toujours les données complètes. De toute façon, un résumé peut donner quelque indication:

-- Les Vidicon en B - N ne donnent pas des grands problèmes pour ce qui concerne la couleur; pour influer sur le contraste on peut utiliser les filtres colorés selon les critères déjà vu à propos de la photographie.

-- Les systèmes à CCD, en B - N ou aux couleurs, sont très sensibles à l'IR (infrarouge); pour éviter des discordances avec la vision, on pose souvent un filtre anti-IR devant le capteur; ceci évite aussi l'effet des aberrations qui peuvent empirer beaucoup dans la bande IR.

-- Les systèmes aux couleurs ont un rendement chromatique très variable, instable, et en général moins fidèle d'une pellicule photographique commune. Les systèmes à CCD de toute façon sont plus stables dans le temps. Heureusement, beaucoup d'applications de la microscopie ne demandent pas une fidélité élevée des couleurs. Font exception quelques cas dans lesquels les couleurs ont une valeur diagnostique: colorations spéciales (reconnaissance des espèces bactériennes avec la méthode Gram, etc.), mesures de biréfringence en base aux couleurs d'interférence en lumière polarisée, et si ailleurs.

-- Comme pour les émulsions photographiques, aussi une caméra de télévision est sensible à la **température de couleur** (TC) de la source (§ 22.6.4), et elle donne la meilleure reproduction des couleurs seulement avec des sources à caractéristiques définies. Les cas pratiques se réduisent à trois:

** lumière du jour ou "**daylight**" ou "**outdoor**", donnée par le ciel et le soleil, avec TC variable, selon la saison, l'heure, la latitude, l'état météorologique, etc., entre 5.000 et 20.000 °K. Les seules sources artificielles comparables à la "lumière du jour" sont les lampes à arc au xénon, TC = 6.000 °K environ;

** lumière artificielle ou "**indoor**" ou "**tungstène**" avec des lampes spéciales comme celles

au quartz-iode, avec TC = 3.000 - 3.400 °K;

** lumière artificielle d'autre type; les lampes à incandescence normale ont TC = 2.400 - 2.700 °K; celles "au néon" ou "fluorescentes" ont un spectre d'émission varié, souvent à bandes et lignes, imprévisible et variable dans le temps, surtout avec le vieillissement.

Récemment, sont de plus en plus répandues les sources à LED (Light emitting diode) avec spectre très varié et instable, à bandes.

Les caméras de télévision possèdent souvent un dispositif, manuel ou automatique, pour commuter la réponse du système et l'adapter aux valeurs de TC plus communes: 3.200 et 5.500 °K, par ex. (WB = white balance). On a la réponse la plus fidèle aux couleurs dans les caméras de télévision "à trois-tubes" dans lesquelles le faisceau qui forme l'image vient divisé en trois, avec un jeu de miroirs et filtres dichromatiques, et chaque faisceau correspond aux trois "couleurs fondamentales" normalement utilisées dans la reproduction des couleurs dans la graphique, dans la photographie, etc. Pour chaque faisceau il existe un convenable capteur distinct (tube à vide ou CCD). Les caméras de télévision "tritube" sont évidemment plus encombrants et plus chères que celles monotube.

De toute façon, pour un meilleur rendement des couleurs, il est prévu souvent quelques "trimmer" de balancement, qu'il faut régler chaque fois.

30.9.3 - Sensibilité totale

Les systèmes de télévision actuels ne mettent pas des problèmes pour les techniques normales de la microscopie, quand on peut utiliser des lampes normales à spires serrées à basse tension. Avec l'usage éventuel de filtres gris, il est normalement possible de trouver une condition de fonctionnement correcte quant à la luminosité de l'image.

Un éclairage excessif ou insuffisant se révèle en général avec une perte de contraste; l'excessif donne un fond blanc; l'insuffisant donne un fond gris sur toute l'image. Les CCD ont souvent une tolérance plus petite des Vidicon à cet égard, au sens qu'ils tolèrent des plus petites variations de luminosité, comme on a déjà dit. Naturellement, la luminosité de l'écran ne dépend pas seulement de la luminosité de l'image projetée sur le capteur de la caméra de télévision, mais aussi de commandes spéciales ("Luminosité", "Contraste") sur l'écran même.

Beaucoup de caméras de télévision possèdent en outre un "**viseur**" qui révèle un défaut ou un excès de luminosité de l'objet repris.

En plus, beaucoup de caméras de télévision possèdent un contrôle automatique du diaphragme de l'objectif, justement pour neutraliser des niveaux anormaux de luminosité de la scène; mais en microscopie cette fonction ne sert pas d'habitude. Comme on a déjà dit, l'objectif de la caméra de télévision souvent n'est pas utilisé et la fermeture de son diaphragme pourrait de toute façon porter des vignetages dans l'image (§§ 4.4 et 8.8, fig. 33 et article n° 13) quand la pupille d'entrée de l'objectif ne coïncide pas avec la pupille de sortie du projectif ou de l'oculaire.

En général, il y a en plus un contrôle automatique de l'amplification de toute la partie électronique (dit AGC = Automatic Gain Control) qui tend toujours à neutraliser les luminosités excessives ou insuffisantes. Mais ce dispositif agit seulement sur le signal électrique ("vidéo") et il ne peut pas changer par suite le flux optique sur la surface sensible: si le flux est excessif, comme on a déjà dit, on aura une perte de contraste étant donné que l'élément sensible "va en **saturation**": sa réponse s'aplanit étant donné qu'il travaille dans un trait horizontal de sa courbe de sensibilité. Si le flux est insuffisant, il augmente le "**bruit de fond**"[238] de l'image de télévision étant donné que le "bruit" électrique du circuit devient prépondérant par rapport au signal optique utile. En pratique, l'"**effet neige**" sur l'écran augmente jusqu'à cacher l'image utile. Cela arrive en tant que l'AGC du circuit amplifie en mesure excessive le signal utile faible mais, simultanément, aussi le bruit électrique produit à l'intérieur du circuit qui précède[239].

---

[238] Voir le § 30.9.7.

[239] Souvent, l'efficacité de l'AGC est plus grande dans les systèmes en blanc-noir et basés sur Vidicon ou Orticon.

La sensibilité d'une caméra de télévision est exprimée normalement comme le moindre niveau d'éclairage nécessaire pour avoir une image discernable sur le bruit de fond (voir plus loin). Dans ce contexte, on se réfère à l'éclairage de la scène qui se trouve devant la caméra, munie d'un objectif avec ouverture relative **f #** = 1,4. L'éclairage se mesure en lux (lx): 1 lx = 1 lumens / m^2 = 10^{-4} Phot = 0,0929 ft-c [240].

Sont normales des sensibilités de 2 à 30 lux pour les CCD; souvent pires pour les Vidicon.

30.9.4 – Résolution

La résolution a déjà été définie comme le contraire de **d**, c'est-à-dire de la moindre distance qu'on peut résoudre, qui est égal au rayon **r** de la centrique, ou du cercle de confusion globale, dans les meilleures conditions (§ 18). Il faut préciser.

La valeur de **d** tirée de la formule (52)(§ 18.3, pag. 130) représente la meilleure possible, c'est-à-dire la limite théorique, pour la résolution d'un système optique "parfait" corrigé des aberrations "du point" (§ 13.2), et de toute cause de perte de contraste (lumière diffuse, défocalisation, etc.) en mesure telle à rendre leur effet global négligeable rapport aux effets de la diffraction. Dans les microscopes de moyenne et bonne qualité ce niveau de correction est toujours atteint, au moins au centre du champ. NB: on en a déjà parlé, et on exhorte à distinguer toujours entre résolution dans le plan objet et dans l'image finale: le rapport entre les deux est, en principe, donné par l'agrandissement linéaire du système.

Eh bien, la valeur de **d** correspond environ au "moindre pas" du réseau les lignes duquel sont encore distinguables dans l'image du réseau donné par le système qu'on examine (§ 17.2). On parle ici d'un "réseau" constitué par des lignes transparentes et opaques alternées, lignes droites aux côtés parallèles, de même largeur. Le "**pas**" est la largeur d'un couple: ligne opaque + ligne transparente.

Pour mesurer le pouvoir résolutif dans une image on peut mesurer par suite le moindre pas (**d**) des lignes qui se reconnaissent encore en elle, ou compter le plus grand nombre de lignes qu'on peut voir pour chaque millimètre dans l'image. Dans ce dernier cas, la résolution R est donnée par R = 1/d. Si **d** est exprimé en mm, R s'exprime ainsi en "lignes par millimètre" (l/mm). Considérations analogues sont faites pour les émulsions photographiques.

Quand les dimensions de l'image sont définies, comme dans le cas d'une caméra de télévision, alors on peut exprimer la résolution comme **Rt** = nombre maximum total des lignes présentes dans l'image. Si **h** est la dimension considérée, exprimée toujours en millimètres, on aura $Rt = R \cdot h$.

Rt s'exprime en "lignes totales" ou "**lignes TV**".

Dans une caméra de télévision, on peut indiquer avec **h**, selon le cas, une des trois dimensions du format de la télévision, qui est toujours rectangulaire: hauteur, largeur, diagonal. Il n'y a pas d'uniformité des règles sur ce point et il faut faire beaucoup d'attention quand on lit la littérature technique. Nous nous référerons dorénavant à la largeur, étant donné qu'elle est plus simple à mesurer de la diagonale et étant donné que, dans la direction de l'hauteur, il y aurait le recouvrement des lignes de scansion du "raster" (dans les systèmes analogiques).

Nous ne nous occupons pas ici d'autres manières de définir la résolution ni des facteurs d'imprécision qui sont implicites dans la définition de **Rt**. De toute façon, nous distinguons bien entre:

a) nombre de lignes qui forment le raster (525 dans le système américain, 625 dans l'européen, France exclue, etc.) dans le cas des Vidicon et similaires et des écrans à CRT;

b) nombre des parties sensibles élémentaires ("pixel") présents en chaque rangée de la surface sensible, dans le cas des capteurs digitales, comme les CCD;

c) résolution optiquement entendue, comme définie plus haut (**Rt** ou "lignes totales").

---

[240] Remarquez que **ft-c** ("foot-candle") est l'unité de l'éclairement liée au standard anglais (une candela par pied carré). On indique l'éclairement avec le symbole E.

Pour mesurer Rt ou R on peut utiliser les méthodes normalement utilisées en optique, au moyen de réseaux avec pas variable (§ 17.2 et fig. 50). Mais les constructeurs de postes de télévision déclarent normalement dans la littérature technique la seule valeur Rt .

Eh bien, du point de vue de la résolution, on peut diviser les systèmes de télévision en deux grandes catégories:

-- systèmes normaux, avec une résolution optique de 200 - 800 lignes totales;

-- systèmes "à haute résolution" (HD), en train de se répandre pour les applications commerciales, avec une résolution moyenne meilleure de 1.000 lignes totales.

Faisons maintenant une comparaison.

Une pellicule commerciale aux couleurs pour format Leica possède une résolution (R) d'au moins 30 lignes / mm et par suite une Rt (par rapport à la largeur = 36 mm) d'au moins Rt = 30 × 36 = 1080 lignes totales, meilleure du meilleur système de télévision normale.

L'image microscopique a une résolution maximum dans le plan objet définie par la formule (52). Pour $\lambda = 0{,}5\ \mu$ (vert, au centre du spectre optique), supposant un objectif achromatique à immersion (NA = 1,25), on a:

$d = 0{,}6 \cdot 0{,}5 / 1{,}25 = 0{,}3 / 1{,}25 = 0{,}24\ \mu$ environ.

Étant donné qu'un tel objectif a souvent un agrandissement $M_{ob} = 100$, dans le plan de l'image intermédiaire on a une valeur de **d** (ou mieux, vu que nous sommes du côté image, **d'**), égal à: **d'** $= 0{,}24 \cdot 100 = 24\ \mu = 0{,}024$ mm. Alors, R = 1 / d' = 1 / 0,024 = 41 lignes/mm environ. En considérant la moindre valeur utilisée pour le diamètre de l'image intermédiaire, c'est-à-dire un index de champ **s'** = 18 mm, on obtient: Rt = 18 · 41 = 738 lignes totales. Avec un objectif à grand champ, par ex. avec s' = 25 mm, Rt devient = 1030 environ. On remarque que telle valeur représente un minimum; avec un objectif plus faible, pas achromatique, on aurait une valeur plus petite pour **d'** et par suite plus grande pour la résolution R.

En chaque cas l'image intermédiaire du microscope est donc plus riche en détails d'un système TV analogique normal.

Dans le cas de la photographie, on évite simplement cette perte de résolution en utilisant des projectifs d'agrandissement opportun et des formats photographiques assez grands; d'habitude, avec les composants commerciaux il est possible d'avoir un système photo-micrographique avec une résolution, dans l'image finale, supérieure à celle du microscope, qui donc ne va pas perdue du tout, au moins aux forts agrandissements (§ 30.8.7).

Dans le cas d'une caméra de télévision, par contre, le format ne peut pas changer; nous pouvons supposer pour tous les types normaux une résolution Rt = 400 lignes environ; étant donné que l'image intermédiaire du microscope contient, nous avons vu, au moins 738 lignes totales, c'est le système de télévision qui "étrangle", qui met en chaque cas une limite à la résolution finale; et ceci indépendamment de l'agrandissement du système optique éventuel présent entre image intermédiaire et capteur. La structure du système optique à ce point n'a plus beaucoup d'importance: par ex., l'ouverture et le champ de l'objectif, le type de correction, etc. N'importe quel microscope économique fournit sur l'écran la même résolution de l'instrument le plus sophistiqué. Avec les caméras de télévision à "haute définition", il y a quelque espoir.

Mais il faut ici comparer les dimensions de l'image microscopique avec celles de la surface sensible, comme nous avons fait en photographie.

30.9.5 – Dimensions utiles de la surface sensible

Soit pour les Vidicon que pour les CCD, les dimensions utiles sont presque unifiées en différents formats rectangulaires, souvent avec un rapport entre les côtés égal à 4: 3.

Format nominal (exprimé en pouces (”), sauf les deux premiers)	Dimensions utiles, en mm (hauteur × largeur)	Diagonale utile (en mm)
36 × 48 mm	36 × 48	60
35 mm (rapport 3: 2)	24 × 36	43,3
4 / 3”	13,4 × 17,8	22,3
1” (= 25,4 mm)	9,65 × 12,7	15,95
2 / 3”	6,6 × 8,8	11
1 / 2”	4,8 × 6,4	8
1 / 3”	3,6 × 4,8	6
1 / 4”	2,4 × 3,2	4

NB: les premiers trois formats sont utilisés seulement dans les caméras de télévision “professionnelles”.

Comme on voit, même le champ le plus petit des objectifs de microscope (s’ = 18 mm) est surabondant pour les formats de 1” et pour les plus petits, mais cela ne cause pas une perte de résolution étant donné que la résolution d’un système TV normale (environ 400 lignes sur la largeur, égale à 500 lignes sur la diagonale) est toujours inférieure à la moitié de celle de l’image intermédiaire qui, pour les calculs qu’on a vu, est d’au moins 738 lignes pour les forts objectifs et au moins 1.000 pour le faibles et à grand champ. Donc, pour avoir la certitude de ne pas perdre de résolution, ça suffit que l’image projeté sur la couche sensible de la caméra de télévision ne soit pas plus grande du double, au pis aller, de la diagonale du format de la couche photosensible, 11 mm dans le cas du format 2 / 3”.

Avec les objectifs normaux cela est à peu près vérifié (s’ = de 18 à 25 mm, pendant que 2 × 11 = 22 mm pour un capteur de 2 / 3”), à condition de projeter sur la caméra de télévision directement l’image intermédiaire, sans optique de projection. Un **projectif** quelconque, même faible, agrandirait trop l’image intermédiaire. Pour les formats les plus petits qui sont en train de se répandre (1 / 3”, par ex.), il peut être opportun de rapetisser l’image et quelque constructeur consciencieux prévoit justement ça[241].

À ce moment, on pourrait objecter que beaucoup d’objectifs classiques ne sont pas bien corrigés, surtout de chromatique latérale (voir le § 13.2.2) et ils demandent donc l’usage d’oculaires “compensateurs” pour une correction complète, mais la basse résolution du système TV permet d’habitude d’ignorer cette limitation.

Un “**raccord**”, un organe mécanique prédisposé pour réunir la caméra de télévision au statif du microscope, peut donc présenter un chemin optique libre, c’est-à-dire sans lentilles interposées. Il s’agira d’un dispositif mécanique rigide qui peut être remplacé par un support rigide placé simplement près du microscope, mais indépendant de lui. Ses fonctions sont de toute façon:

-- tenir rigidement la caméra de télévision en position correcte; la tolérance dans les déplacements réciproques (pendant la pose) entre caméra de télévision et microscope est égal à la résolution de la caméra (pour un modèle courant de 2/3”, avec largeur du format = 8,8 mm et une résolution totale de 400 lignes, on a: **d** = 22 μ); si les déplacements sont lents, on peut admettre beaucoup plus;

-- être “à étanchéité de lumière” pour empêcher l’entrée de la lumière extérieure;

-- tenir la surface sensible de la caméra de télévision centrée et perpendiculaire par rapport à l’axe optique;

-- la tenir à la distance nécessaire pour que l’image microscopique coïncide avec la couche sensible (c’est-à-dire qu’elle soit “au point”), et simultanément qu’elle soit au point dans les oculaires ou dans le viseur.

Si le “raccord” ne contient pas le semi-réfléchissant prévu par la fig. 129 (§ 30.8) et par suite

[241] Cette réduction de l’image intermédiaire peut être effectuée par un système optique "ad hoc", ou par un oculaire normal suivi d’une “lentille de caméra" convergente à courte focale, ou par un oculaire à longue focale suivi par la caméra de télévision équipée d’un objectif propre (voir la note 242 et, dans ce site, l’art. n° 13, pages 2 – 4).

il n'y a pas le dédoublement de l'image intermédiaire, en absence d'un oculaire-viseur on est obligé à réaliser la mise au point sur l'écran; mais de cette manière il y n'a pas de garantie que celle-là soit la position correcte pour l'image intermédiaire. Une faute dans ce sens peut porter à une perte de parfocalité entre les objectifs et à d'autres effets nuisibles.

Si le constructeur fournit un raccord TV contenant quelque lentille, il faut vérifier que dans l'écran on voie une partie de l'image optique pas inférieure à la moitié de celle visible dans les oculaires. Cette dernière devrait toujours, pour les motifs clarifiés à son temps, correspondre à l'index de champ (s') maximum des objectifs prévus pour un instrument donné. En absence de cette information, on fasse la comparaison entre l'image TV et celle vue en utilisant un faible oculaire. La comparaison entre les dimensions des deux champs réussit mieux quand on observe un objet à structures bien définies comme un micromètre-objet ou, en manque de mieux, un bout de papier millimétré observé avec l'objectif le plus faible possible.

Comme "raccord TV" on pourrait utiliser une microcaméra ou un tube trioculaire du type utilisé en photographie. Mais ces dispositifs prévoient presque toujours un oculaire et l'image finale résulterait par suite presque certainement trop agrandie et on perdrait résolution. Pour obvier à cela, on pourrait laisser sur la caméra de télévision l'objectif de reprise normal qui, s'il a une focale comprise entre 8 et 16 mm, représente un "lentille de caméra" à forte réduction. Mais naissent ici des autres problèmes de vignetage[242], corrections, centrage réciproque et "images catadioptriques" (§ 30.8.6). Quand il est inopportun utiliser l'objectif propre de la caméra de télévision, il faut que la caméra possède la soi-disant "optique interchangeable": l'objectif doit pouvoir se démonter et, pour des raisons d'interchangeabilité, il doit posséder une "fixation C" (voir plus loin).

Difficilement les raccords TV du commerce satisfont toutes les conditions demandées.

30.9.6 - Poids, encombrement, fixation mécanique

Nous faisons le cas d'une caméra de télévision fixée directement au microscope: son poids maximum tolérable est déterminé par la robustesse, rigidité et stabilité du microscope. Si le constructeur ne déclare pas cette limite, il est bien de ne pas dépasser 1 Kg, et cette limite est aisément respectée par beaucoup de caméras de télévision modernes, spécialement à CCD.

Si la caméra de télévision dispose d'un support séparé, tout dépend des caractéristiques de ce dernier.

Pour les dimensions, il n'y a pas des limitations de principe, mais une caméra de télévision longue offre un grand bras de levier pour chaque choc accidentel et pour les vibrations de n'importe quelle origine.

N'importe quel raccordement direct entre statif du microscope et caméra de télévision se rattache à la même fixation (côté caméra) à laquelle doit être fixé l'objectif de la caméra même; tel objectif doit être souvent démonté, étant donné ce qu'on a expliqué auparavant. La grande partie des caméras de télévision commerciales de petites dimensions utilise la soi-disant "**fixation C**", c'est-à-dire un pas de vis de 1" (un pouce, égal à 25,4 mm, avec un filet de 1/32" (0,8 mm)). Sur ce pas est réalisée la plus grande partie des raccordements TV: vérifier ça au moment de l'achat. Si la caméra de télévision a un support indépendant, même ce problème tombe.

Nous rappelons que la distance nominale entre la bride d'appui de l'objectif et le capteur est

---

[242] Pour éviter les vignetages, il faut souvent chercher des **oculaires spéciaux** "à haute pupille", qu'on peut construire soi-même en accouplant deux objectifs de jumelle (focale 120 – 140 mm), avec les surfaces les plus convexes révoltées en haut. Un tel système peut être mis sur le bout supérieur du tube porte-oculaires, après avoir enlevé l'oculaire. **À ce système on approche l'objectif de la caméra** de télévision. La distance entre oculaire spécial et objectif de caméra doit être tel à faire coïncider la pupille de sortie de l'oculaire avec la pupille d'entrée de l'objectif; il est bien donc que la caméra de télévision soit montée sur un support focalisable, tant plus que, dans le cas des objectifs zoom, la position de leur pupille d'entrée change pendant la manœuvre du zoom (voir, dans ce site, l'art. n° 13, pages 2 – 4).

La distance entre l'oculaire spécial sur décrit et l'objectif du microscope sera fixée de façon à avoir la parfocalité avec les oculaires normaux, c'est-à-dire de façon à conserver la parfocalité entre les différents objectifs.

d'environ 17,5 mm. Telle cote descend à 12,5 mm pour le soi-disant "pas CS".

30.9.7 - Rapport signal/bruit (ou "signal/noise ratio"- S/N)

Il s'agit d'une grandeur électrique qui influe sur la quantité de "bruit" superposé à l'image sur l'écran. Pour "bruit" (§ 30.9.3), dans tous les systèmes de communication, on appelle un signal casuel, qui se superpose au signal utile, issu d'une façon quelconque.

Ce signal chaotique naît de la même nature "discrète" (non continue) de la radiation et du courant électrique: la première est constituée par des "quanta", c'est-à-dire par de quantités définies, de grandeur déterminée (photons), qui se propagent suivant des lois statistiques. Le courant électrique est également constitué par des quantités discrètes de charge: les électrons.

Dans le comportement des photons et des électrons il y a toujours un composant probabiliste, chaotique, qui engendre justement un signal casuel, irrégulier. Tel signal est donc engendré par le bombardement des photons sur le photorécepteur, par le mouvement des électrons dans chaque partie du circuit, etc. et il se présente toujours comme un signal dépourvu de renseignement significatif: dans un circuit sonore il se présente comme un bruissement sombre, un souffle de fond, un bruit chaotique ("bruit blanc"); dans un circuit vidéo comme un "**effet neige**" ou granulation rapidement et chaotiquement variable, superposée à l'image.

Ainsi, le signal d'entrée d'un système de communication (son, image, données, etc.), en traversant la chaîne de transmission (récepteur, amplificateur, ligne, reproducteur) se superpose au "**bruit**" chaotique issue le long de la chaîne même, et son déchiffrement ou intelligibilité en résulte plus ou moins abaissé.

Même de l'extérieur peuvent venir des signaux de bruit, les soi-disant "brouillages". Alors on parle de "**interférences**". On peut faire une comparaison avec la photographie dans laquelle l'image utile est superposée au "**grain**" de la pellicule, à la lumière diffuse, etc.

Le facteur bruit vaut pour la caméra de télévision et naturellement pour tous les circuits existants entre la couche sensible de la caméra et la surface luminescente de l'écran.

La valeur absolue du bruit (ou "noise"), qui pour soi n'est pas indicative, doit être comparée avec celle du signal utile. On indique ainsi le rapport "**signal/bruit**" ou "signal/noise", comme rapport entre le signal maximum (S) que le système peut élaborer sans le déformer (par ex. sans saturation d'un quelconque des étages entre couche sensible de la caméra et surface de l'écran) et signal de bruit (N ou R), qui se présente en absence de signal utile (caméra de télévision tenue dans l'obscurité, par ex.).

Le rapport S / N vient exprimé normalement en "**décibel**" (dB); 1 dB = 20 log V_1 / V_2, en étant V_1 et V_2 les deux grandeurs à comparer, par ex. amplitude des signaux S et N[243].

Dans une caméra pas professionnelle, un rapport S / N égal à 45 dB est à se considérer acceptable. Cela signifie que le signal électrique maximum issu sans distorsion est 178 fois plus grand du bruit de fond issu dans l'obscurité.

Cette définition du rapport S/N devient moins précise quand la caméra de télévision, comme il arrive souvent, possède un contrôle automatique du gain (AGC, voir le § 30.9.3), c'est-à-dire une amplification variable. Souvent, en effet, les constructeurs indiquent une valeur du rapport S/N relative à une valeur donnée de gain, exprimé en dB, provoqué par un niveau correspondant d'éclairage dans l'image reprise.

---

[243] L'avantage de l'expression logarithmique du rapport S/N est que, en ayant une chaîne d'éléments, chacun avec son propre rapport S/N, on peut avoir le rapport S/N global simplement en additionnant, plutôt qu'en multipliant, les correspondants valeurs en dB. La table suivante donne quelque exemple.

0 dB	1 dB	3 db	10 db	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB
S/N = 1: 1	1: 1,122	1: 1,412	1: 3,162	1: 10	1: 31,62	1: 100	1: 316,2

Quand la valeur en dB porte le signe +, alors V1 est plus grand de V2: si V1 et V2 sont respectivement les signaux de sortie et d'entrée d'un stade quelconque d'une chaîne de transmission, dans ce cas il y a amplification ou "gain"; si le signe est –, le contraire arrive, et il y a atténuation.

30.9.8 – Le contraste

Le contraste dans l'image de la télévision est lié à une longue série de caractéristiques fixes et de régulations disponibles soit sur la caméra que sur l'écran. Il s'agit de phénomènes électroniques sur lesquels il n'est pas possible de s'étendre. On peut dire seulement que l'image TV est en général plus contrastée que celle optique, mais le rapport entre les deux contrastes dépend en bonne partie des caractéristiques électroniques et des régulations.

Aussi la linéarité de réponse du système TV (proportionnalité entre luminosité de l'image microscopique et luminosité sur l'écran pour chaque point de l'image) est très variable; la gradation du clair-sombre présent dans l'image optique vient toujours plus ou moins comprimée vers les valeurs maxima ou minima.

30.9.9 - Stabilité long terme, "impression" et "burning"

Le long des années, les conditions de travail d'une caméra de télévision subissent une dérive qui demande un entretien périodique. Cette exigence est beaucoup plus petite dans les systèmes à CCD.

Plus grave est la modification semi-permanente de la sensibilité de la surface photosensible. Au-delà à une variation globale de la sensibilité, qui serait peu nuisible, on vérifie souvent une "**impression**" localisée, au sens que une image donnée fixe, si elle est projetée sur la caméra de télévision pour un temps suffisamment long, en altère la réponse point par point de façon à rester "imprimée" d'une manière stable même si l'image change; alors on obtient le recouvrement de l'image fixe précédente avec la nouvelle image. Ce phénomène est plus probable si l'image fixe est très intense; il ne comporte pas de perte, mais seulement une altération localisée de la sensibilité.

Si en plus l'intensité de l'image dépasse une certaine limite, la couche photosensible peut résulter du tout ou localement "aveuglée", sans possibilité de récupération: il s'agit du "**burning**" ou "brûlure". Le burning n'a rien à voir avec la saturation (§ 30.9.3), qui est réversible, au moins pour autant qu'elle ne dure pas trop, et on la vérifie d'ailleurs à des niveaux d'intensités beaucoup plus bas de ceux demandé pour produire le burning. Les CCD sont beaucoup plus résistants au burning que les Vidicon.

30.9.10 – La persistance à bref terme («Lag»)

Chaque point de la surface sensible "se rappelle" pour une fraction de seconde l'état immédiatement précédent, avant de se stabiliser sur une nouvelle valeur d'éclairement. Les variations rapides d'éclairement d'un point particulier ne peuvent pas être enregistrées par suite au dessous d'une certaine valeur de durée. Si l'image est fixe, la persistance ne se remarque pas aisément, mais si l'image est en partie ou totalement en mouvement, derrière chaque point qui se déplace se forme une "queue" de longueur égale au produit de sa vitesse pour le temps de persistance.

Même en microscopie, cette persistance est très fastidieuse quand on observe des objets mobiles ou quand on déplace la platine.

Dans les tubes Orticon, utilisés dans les applications professionnelles, cet effet est peu sensible; dans les Vidicon il est par contre évident; négligeable dans les CCD. Certains modèles de caméras de télévision à CCD possèdent la fonction "**strobe**" ou "**shutter**", qui n'est pas réalisable avec les tubes à vide. Il s'agit de cela: la cadence de reprise des images est de 50 par seconde pour le standard européen (60 pour l'américain, en synchronisme avec la fréquence de réseau). Pendant

que dans les tubes à vide la transformation de l'image optique en signal électrique est continue, c'est-à-dire elle occupe presque tout le temps de 1 / 50 de seconde pour chaque photogramme, dans les systèmes à CCD elle arrive dans un temps beaucoup plus bref, typiquement 1/1.000 de seconde. Une reprise avec un CCD consiste donc dans une série d'instantanée, de photogrammes séparés, espacés de 20 ms l'un de l'autre[244], mais de la durée de 1 ms chacun. Le circuit électrique de la caméra peut mémoriser une de ces images et la relire pour un temps indéfini, en ignorant ce qui arrive après. Il est comme arrêter un projecteur cinématographique ou un magnétophone vidéo sur un photogramme particulier.

Cette fonction du CCD est précieuse, par ex., quand on observe des objets vivants, micro-organismes en mouvement, etc.

30.9.11 – La distorsion

À ressemblance avec tout ce qui se fait pour un système optique, on peut définir génériquement comme distorsion d'un système TV une différence entre la forme géométrique de l'image finale du microscope, plane et perpendiculaire à l'axe, et la forme de l'image sur l'écran. Il s'agit d'une variation de l'agrandissement en différentes zones du champ.

Dans le cas des tubes à vide, la distorsion électrique (à part celle optique des lentilles placées devant lui) est due essentiellement au système de déflexion électrique ou magnétique du faisceau d'électrons qui explore l'image, et elle peut être très forte et instable dans le temps. Dans le cas d'un CCD, la distorsion est liée à la structure géométrique du "chip" et elle peut être de toute façon très réduite et stable dans le temps.

30.9.12 - L'écran ou display ("monitor")

On veut indiquer avec ce terme un dispositif en mesure de rendre visible sous forme d'image optique le signal "vidéo" produit par une caméra de télévision ou une autre source analogue (VTR, ordinateur, etc.).

L'image présentée par l'écran devra être la plus identique possible, par rapport au signal vidéo provenant de la caméra, quant à contraste, résolution, dimensions, fidélité chromatique, etc.

Nous pouvons reprendre par suite les problèmes que nous avons à peine examinés au sujet des caméras de télévision.

Rendement chromatique

Il y a sur le commerce plusieurs types d'écran à couleurs, basés soit sur tubes à vide (Cathode Ray Tubes = CRT, comme les cinéscopes de la télévision), soit sur display aux cristaux liquides (Liquid Crystal Display = LCD), soit sur des systèmes plus modernes (à LED, au plasma, etc.)[245]. En chaque cas, le rendement des couleurs est toujours mauvais. Pour en donner une évaluation, ou on dispose d'une instrumentation de mesure spéciale, ou on se base sur une impression subjective, toujours fausse.

Les principaux facteurs qui influent sur le rendement final sont les suivant:

-- température de couleur de la source utilisée;

-- structure du capteur et des circuits de la caméra de télévision; régulations effectuées sur elle;

-- alimentation électrique et vieillissement de toutes les parties;

---

[244] La milliseconde (ms) est égale à 1 / 1.000 de seconde. La période entre un photogramme et un autre, égal à 1 / 50 s, dure donc 20 ms (1.000 / 50 = 20).

[245] Parfois, certains écrans ne sont pas luminescents par eux-mêmes, mais ils demandent un éclairage de l'extérieur.

-- nature de la liaison électrique entre caméra de télévision et écran (problèmes de bande passante, interférences, etc.);

-- structure et régulations effectuées sur l'écran; en général, il existe un "contrôle" de la couleur ("chrominance"), qui devrait régler la saturation des couleurs; en changeant tel commande, on s'aperçoit que le résultat est ou mauvais ou pire;

-- intensité et distribution spectrale de la lumière ambiante, qui arrive sur l'écran.

Sensibilité absolue

Étant donné que l'écran reçoit un signal électrique, il faut que celui-ci soit suffisamment grand pour dépasser le plus possible le bruit de fond intrinsèque de l'écran, mais pas aussi grand à porter à la saturation, et par suite à la distorsion électrique, en quelque partie de l'amplificateur ou dans la couche luminescente.

Ces conditions sont satisfaites dans les appareillages commerciaux ou normalement on peut les atteindre avec les régulations prévues.

On ne croie pas à ce point qu'une grande sensibilité de l'écran soit toujours un gain: ceci porterait à exalter les parasites et le bruit provenant de la caméra de télévision ou de la ligne de transmission; il faut un équilibre avisé entre les caractéristiques de toutes les parties de la chaîne.

En passant, l'amplitude des signaux électriques produits par la caméra ou demandée par l'écran est indiquée en général en utilisant comme unité de mesure le Volt pic à pic (V_{pp}); c'est-à-dire on n'indique pas la valeur moyenne ou celle "efficace" du signal électrique, mais son amplitude maximum, du plus grand pic positif à celui négatif. Ceci est rendu nécessaire étant donné le caractère pas complètement périodique du signal vidéo. Les valeurs normalement en usage rôdent sur 1 V_{pp}.

Résolution

Un écran de moyenne qualité a une résolution près de 500 lignes totales, définies comme dans le § 30.9.4, donc légèrement supérieure à celle d'une caméra de télévision pas professionnelle. Le problème résolution retombe dans ce cas sur la caméra de télévision.

On rappelle toujours la différence entre "lignes totales" ou "lignes TV" (c'est-à-dire résolution optique/électronique Rt) et lignes du raster qui sont en nombre fixe (525 ou 625).

Dimensions utiles

Nous parlons ici de la surface luminescente d'un écran analogique.

En général les circuits électriques élargissent l'image électronique "projetée" sur cette surface un peu plus que la surface même, pour lequel, de l'image captée par la caméra, une mince bande marginale n'apparait pas sur l'écran et elle va perdue. Ce fait est voulu pour neutraliser les éventuelles fautes de centrage entre image électronique et écran luminescent.

À part ça, il est clair que les dimensions de l'écran doivent grandir en proportion au nombre des spectateurs, et par suite en proportion à la distance moyenne d'observation. La distance optimale est très liée aux conditions subjectives, mais on prend comme référence une distance œil-écrans égal à sept fois la largeur de l'écran.

Alors on peut faire ce calcul: sur un écran de moyenne qualité sont visibles, comme on a déjà dit, environ 500 "lignes"; donc, à la distance de sept fois la largeur de l'écran, la largeur de chaque "ligne" représente la base d'un triangle, l'hauteur duquel est 7×500 fois plus grande. En autres mots, l'hauteur de ce triangle (distance d'observation) est 3.500 fois plus grande de la base (largeur de la ligne, c'est-à-dire du plus petit détail dans l'image). À ce rapport correspond un angle de presque une minute d'arc, mais l'œil humain moyen a un pouvoir résolutif angulaire (§ 18.12) de 1 - 2 minutes d'arc, donc insuffisant à révéler tous les détails présents. Cette "marge" est utile cependant pour cacher en partie le grand défaut de l'image TV (analogique ou digitale), c'est-à-dire sa structure à lignes (ou "pixel") parallèles.

Un écran de dimensions moyennes, par ex. un "21 pouce", avec une diagonale d'environ 54 cm = 0,54 m et une largeur d'environ 0,46 m, doit donc être observé d'une distance d'environ 0,46 × 7 = 3,2 m, ou même moins.

Rapport signal - bruit (S / N)

Même l'écran représente une source de bruit électrique qui, même en absence de signaux extérieurs, se présente comme une granulation rapidement variable de l'écran, semblable à l'"effet neige".

Mais ce bruit est plus petit de celui produit par la caméra de télévision, parce qu'il est introduit à la fin de la chaîne globale d'amplification, et donc il ne représente pas un facteur limitant.

Une forte source de bruit se présente par contre quand la liaison entre caméra de télévision et écran n'arrive pas sous forme de signal direct vidéo, à "basse fréquence" ou "vidéofréquence" ou "VF" (à travers un câble), mais comme signal à "haute fréquence" ou "radiofréquence" (RF) dans n'importe quelle bande ou "canal" des émissions commerciales (à travers des antennes).

En somme le signal utile, dans ce cas le signal vidéo engendré par l'exploration séquentielle des lignes du **raster** TV, est utilisé pour "moduler", c'est-à-dire changer avec une loi plus ou moins linéaire, un quelque caractère (l'amplitude dans les normaux systèmes analogiques TV ou radiophoniques à "**modulation d'amplitude**" ou "AM") d'une "**porteuse**".

La "porteuse" est une oscillation électromagnétique à une fréquence beaucoup plus grande de celle du signal utile, modulant; les caractéristiques de la porteuse (fréquence, amplitude et phase) sont constantes et par suite elles ne transmettent aucun renseignement utile; la porteuse sert seulement à l'émissions dans l'espace du signal modulant, laquelle émissions, à cause de la basse fréquence du signal même, arriverait avec un rendement trop bas.

Une porteuse "modulée", captée par le récepteur, est décomposée[246] dans les deux composants: le signal utile, modulant, et le membre à haute fréquence, porteuse non modulée, qui est inutile et vient supprimée.

Mais un signal à haute fréquence est plus sensible, par rapport aux signaux de basse fréquence, à l'interférence ou aux "parasites" (faux contacts électriques, phénomènes atmosphériques, etc.), qui produisent des signaux dans un ample spectre de fréquences.

Une liaison à haute fréquence est, par suite, toujours plus vulnérable aux parasites d'origine extérieure de la liaison à vidéofréquence.

Au moment de l'acquisition, il est bien donc soigner que tout le système TV puisse fonctionner à vidéofréquence. Il s'agit de "télévision à circuit fermé", au sens que la liaison caméra-écran arrive à travers un câble, pas à travers l'"éther", c'est-à-dire pas avec transmission par l'espace vide, avec des antennes émettrice et réceptrice. Cela produirait des plus grands dérangements.

Aussi l'installation (protections des câbles et connecteurs, prises de masse, etc.) doit être soignée pour ne pas polluer l'image avec des parasites et des bruits de tout type.

Les systèmes à couleurs en vidéofréquence peuvent utiliser un signal unique ("vidéo composite") ou trois signaux distincts, un pour chacun des trois couleurs fondamentales (signal "**RGB**" = Red-Green-Blue). Dans ce dernier cas, le câble de liaison devra posséder trois conducteurs séparés.

Contraste

En général, le plus grand contraste réalisable par un écran est supérieur, à celui pourvu par la caméra seule. Encore, l'écran ne représente pas ici le facteur limitant. La régulation du contraste prévue sur tous les écrans influe sur l'amplification du circuit et par suite sur le "bruit." On a toujours le bruit le plus petit avec le contraste le plus petit.

Quant à la linéarité du système, c'est-à-dire à la proportionnalité qui devrait exister toujours entre densité dans l'image optique et noircissement sur l'écran, elle dépend de tous les composants de la chaîne, et de toute façon il vaut mieux ne pas se faire trop d'illusions à ce propos.

[246] On dit en jargon "démodulée" ou "détectée".

Aussi avec soin aux phénomènes de stabilité long terme, impression et "**burning**" (§ 30.9.9), l'écran est moins critique et moins vulnérable que la caméra de télévision.

Pour ce qui concerne la persistance à bref terme ("**lag**", § 30.9.10), l'écran est encore une fois meilleur que les caméras économiques à Vidicon. Le discours serait différent pour les caméras de télévision "broadcasting" et celles à CCD.

Distorsion

La distorsion d'un écran économique, surtout si du type analogique à CRT (cinéscope), peut être par contre élevée, et elle est pire certainement de celle d'une caméra de télévision à CCD. Elle est largement dépendante en outre des mises à point effectuées par le constructeur (petits "aimants de correction", "circuit de linéarité" verticale et horizontale, etc.). En plus, telles mises au point sont souvent instables dans le temps. Même le champ magnétique terrestre, et par suite l'orientation de l'écran, peuvent influer sur sa distorsion.

Beaucoup plus stables sont les caractéristiques géométriques dans les displays digitaux, aux cristaux liquides, à LED ou semblable.

Comment conclusion, on peut dire que la reproduction par télévision de l'image microscopique est résolument mauvaise: en comparant l'image dans les oculaires avec tout ce qu'apparaît sur l'écran on reste toujours déçu. Si en plus on utilise un projecteur "vidéo", qui permet de projeter l'image sur un écran diffuseur, les choses vont en général moins bien encore.

De l'autre côté, un système de télévision à circuit fermé est la seule solution possible quand l'image doit être observée de plus de quatre ou cinq personnes. Dans le cours d'une leçon ou une conférence, il n'est pas possible de faire venir les spectateurs, un à la fois, à se baisser sur les oculaires. À part le temps nécessaire, chaque observateur doit régler la mise au point, la distance interpupillaire, etc. et il est difficile d'illustrer les détails de l'image à chacun, un après l'autre. La même image sur un seul écran permet de donner simultanément des explications à tout le monde, à tous les spectateurs, une fois pour toutes, et personne n'intervient avec des régulations erronées sur le microscope.

Et avant de l'avènement de la télévision comme on faisait ? Les solutions sont essentiellement deux:

•• La microprojection (voir ici dessous), avec tous les problèmes techniques conséquents, et avec une basse luminosité de l'image, insuffisante pour les grandes salles.

•• La projection de diapositives avec un projecteur normal; cela permet de choisir avec soin le cadrage, la mise au point, etc. en évitant les fautes de l'observateur particulier; et on a l'avantage que la fidélité des contrastes et des couleurs peut être très supérieure. Mais ne manquent pas les inconvénients:

-- le temps nécessaire pour la préparation des diapositives;

-- l'impuissance de présenter des images en mouvement (objets vivants, phénomènes physiques, etc.);

-- manque du rapport direct entre étudiant et instrument; inconvénient commun à un système de télévision ou de micro-projection.

30.10 – La MICRO - PROJECTION

En disant "micro-projection" on parle de la projection de l'image microscopique sur un écran diffusant; ceci afin d'en permettre la vision de la part de nombreuses personnes.

Ce type d'observation se réalise, du point de vue conceptuel, très aisément: il suffit d'altérer légèrement la mise au point (éloigner l'objet par rapport à l'objectif) de manière que l'image intermédiaire se forme un peu devant le premier foyer de l'oculaire; de cette manière l'oculaire, au lieu de fournir une image finale virtuelle à grande distance ou à l'infini, fournit une image réelle à

une distance relativement petite, qu'on peut recueillir sur un écran. Si on veut éviter cette altération de la mise au point (perte de parfocalité, etc.) on peut utiliser des oculaires réglables opportuns, semblables à un oculaire micrométrique.

En plus, étant donné que l'image en général doit être projetée selon un parcours plus ou moins horizontal, pendant que l'axe du microscope est vertical ou incliné, il faut rendre horizontal le faisceau qui forme l'image projetée. On peut obtenir ceci ou en portant le tube du microscope à l'horizontal (certains statif comme celui de la fig. 96 le permettent) ou en mettant tout de suite sur l'oculaire un miroir ou un prisme à réflexion totale qui portent le faisceau dans la direction voulue.

Le support du miroir ou du prisme peut être fixé au tube porte-oculaires ou directement à l'oculaire; il peut contenir une ou plus vis utiles à une régulation fine de l'orientation du miroir. Surtout avec les oculaires grand-angulaires, il est possible que le miroir ou le prisme provoquent un "vignetage" (§ 6.1) du faisceau utile et ils rétrécissent par suite le diamètre du champ, en général de manière pas symétrique; pour un contrôle de cette éventualité, on peut comparer l'image transmise par le miroir avec celle qu'on a (peut-être sur le plafond) en absence du miroir. Un vignetage est toujours possible en tant que différents types d'oculaire ont une pupille de sortie (disque de Ramsden) à hauteur variable (de 5 à 20 mm) et un prisme, s'il se trouve positionné à une hauteur ne pas correcte, peut couper le faisceau qui s'élargit rapidement sur et sous le disque de Ramsden; il sera bien donc que le support du prisme ou du miroir sois réglable en hauteur.

Mais les difficultés de la microprojection sont nombreuses, quelques-unes très graves, pour lequel cette technique est en désuétude, presque toujours supplantée par la méthode de la télévision.

Voilà les principales.

-- L'oculaire doit en général être plus faible que le normal pour éviter que l'image projeté apparie trop grande et trop peu lumineuse. Tout dépend de la distance oculaire-écran.

-- La source doit être le plus possible vive. Nous avons parlé de "luminance"[247], et ceci signifie que, au-delà d'une certaine limite, il est inutile d'augmenter la puissance dissipée dans la source. En pratique, pour les lampes normales à incandescence, ayant supposé que le filament soit chauffé à la plus grande température possible, la luminance ne peut pas dépasser une certaine limite: le filament fondrait[248]. À ce point, on peut montrer qu'une augmentation de la puissance dissipée comporte une augmentation de la surface du filament et, au-delà d'une certaine valeur, le système éclairant du microscope ne peut pas exploiter toute la surface et le flux du filament même. Pour augmenter la luminosité de l'image finale il n'y a pas qu'augmenter la luminance et par suite la température du corps lumineux. Étant donné que tôt ou tard tous les corps solides fondent ou subliment (ou se décomposent), on peut recourir seulement aux lampes au plasma, c'est-à-dire à arc (§ 22.6.2).

Les microlampes à utiliser en microprojection sont en effet presque toutes basées sur une lampe à arc; sont préférées celles en atmosphère de xénon pour le fait de posséder un spectre continu et une température de couleur semblable à celle du jour. Malheureusement, leur pression interne est élevée même quand elles sont éteintes et, pour des motifs de sûreté, elles sont remplacées souvent par celles à vapeurs de mercure qui ne sont pas en pression si elles sont éteintes, en ignorant l'inconvénient du spectre à lignes qui contrarie l'identification des couleurs.

Les lampes à arc cependant sont très chères, elles ont besoin d'un alimentateur encombrant et lourd, et leur allumage et coupure demandent des temps morts.

-- Le système éclairant doit être très soigné pour assurer le plus grand rendement photométrique et on obtient souvent ce résultat seulement en remplaçant le condensateur avec l'objectif; ceci signifie que souvent le statif ou au moins l'équipement des condensateurs doit être spécial.

-- Malgré toutes les précautions, filtres calorifuges, etc., l'objet est traversé toujours par un faisceau très intense et après quelques minutes il peut résulter endommagé de manière irréversible: les résines de montage fondent, les colorants se décolorent, etc. Les lampes au mercure, très riches en radiation UV, accélèrent ultérieurement la décoloration. C'est impossible naturellement

---

[247] La luminance mesure le flux émis par un corps lumineux pour un angle solide d'un stéradian et pour un centimètre carré de sa surface.

[248] La luminance est une fonction croissante de la température du corps lumineux.

d'observer des préparations fraîches ou du matériel vivant.

Par contre, la microprojection ne souffre pas de quelques-uns des désavantages de la reproduction par la télévision, comme naturellement la présence des lignes du raster, la présence de "bruit" électrique superposée à l'image utile, la mauvaise reproduction des contrastes et de la couleur, etc. Mais la luminosité toujours insuffisante et les dégâts à la préparation font préférer en général les systèmes de télévision.

30.11 - CONCLUSIONS

La microscopie est une des branches de l'optique qui offre certainement les applications les plus différentes et les plus nombreuses. Peu sont les branches de la recherche scientifique ou technologique, de la routine industrielle ou de la didactique qui ne doivent pas se servir, tôt ou tard, du microscope.

À ces applications est réservée une littérature imposante, au moins en langue allemande et anglaise.

En outre, la microscopie est une des techniques d'observation qui implique les problèmes les plus vastes et nombreux d'optique et de mécanique de précision: à partir des aberrations à la diffraction, de l'interférence à la photographie, des bases anti-vibrantes aux posemètres électroniques.

Mais peut-être, au-delà de chaque problème scientifique ou technologique, au-delà de chaque application pratique, la microscopie offre à l'homme un des horizons cognitifs les plus vastes; et ceci ont bien compris les groupes innombrables d'amateurs et de spécialistes des derniers siècles, surtout dans les pays de la nord-Europe.

De la vie des micro-organismes à l'accroissement des cristaux, de la structure élémentaire des êtres vivants à la constitution des corps anisotropes, des fibres textiles aux alliages métalliques, sont peu les phénomènes naturels et les produits industriels qui ne puissent pas être mieux compris au moyen du microscope optique.

Et d'ailleurs, on pourrait difficilement imaginer un scénario plus différent et plus inconnu de celui qui se présente en mettant l'œil sur un oculaire. Un monde plus nouveau dans lequel il n'y a pas les intrigues et les vices humains, mais seulement les lois immuables de la nature.

Vraiment, la contemplation de l'infiniment grand et de l'infiniment petit peut nous enseigner à faire "avec dignité, mais sans un vain orgueil, notre métier d'hommes" (Marcel Roland).

31 – Le RELÈVEMENT des CARACTÉRISTIQUES

(artt. 28, 29 e 30 et fiche tecnique n° 75)

Il peut arriver au spécialiste, au technicien, au collectionneur, à l'historien de la science, à l'amateur, de devoir décrire un ou plus instruments dans leurs caractéristiques techniques, c'est-à-dire en relever les propriétés optiques et mécaniques.

Ceci peut arriver aux fins de comparaison avec des autres instruments, de datation historique, de catalogage, d'étude de l'évolution technologique, etc. Quand il faut par contre donner une évaluation technique d'un instrument aux fins commerciales, on consulte le chapitre suivant (§ 32).

On peut alors procéder avec la compilation de fiches, une pour le statif, une pour les principaux accessoires, comme on voit dans les pages suivantes.

Dans les fiches sont prévues des espaces spéciaux pour noter les descriptions ou les valeurs numériques pour les caractéristiques retenues importantes.

Nous commençons avec l'analyse systématique des fiches citées comme exemple et avec l'indication des méthodes utiles à extraire les valeurs demandées. Telles méthodes sont conçues afin d'assurer une tolérance dans la valeur mesurée, par rapport à la valeur réelle, autour de ± 1 % et de façon à être réalisables aisément avec des matériels aisément trouvables, sauf quelque exception ("star test", différents réseaux, etc.).

Quelques mesures peuvent être exécutées avec grande précision et en temps plus brefs au moyen d'équipements spéciaux, qui n'ont pas été décrits parce qu'ils demandent un projet *ad hoc*, des composants optiques particuliers et un certain travail d'atelier.

MICROSCOPES MONO-OBJECTIF

31.1 - FICHE "MICROSCOPE"

31.1.1 – Longueur mécanique du tube (Lm) (voir le § 10)

 Tube télescopique (droit ou à coude)

Faire attention avant tout au fait que l'éventuelle graduation ne correspond pas toujours à la longueur effective **Lm**. Mesurer donc Lm avec soin, comme décrit plus loin, au moins aux deux extrêmes de la graduation.

En second lieu, si le microscope est pourvu de revolver, on peut changer Lm pour autant qu'on obtienne le meilleur parfocalité (§ 19.1.2): celle-là pourrait être la valeur nominale de Lm (quand la longueur optique des objectifs [Lo] n'était pas normalisée, cette démarche n'avait pas de sens). Les constructeurs jusqu'à la moitié du '900 n'était pas trop précis à ce propos, ils ne déclaraient pas la valeur de Lm et Lo, et telles valeurs pouvait changer d'un objectif à l'autre et d'un instrument à l'autre, aussi du même modèle.

 Tube fixe

Sauf le cas d'instruments anciens ou de simple construction qui présentent un tube droit simple sans systèmes intermédiaires, il n'est pas possible de mesurer cette longueur avec des moyens mécaniques, en tant que même un simple prisme porte à un avancement de l'image intermédiaire à cause de la réfraction (voir le § 3.2). Il faut chercher la valeur optiquement équivalente de Lm. On procède ainsi: on monte sur le tube en examen un faible objectif, par ex. un 10:1 et un oculaire micrométrique quelconque. On met au point un micromètre objet et on mesure avec soin l'agrandissement de l'objectif Mob (§ 12.2).

Puis on transporte l'objectif, l'oculaire et le micromètre sur un microscope doué de tube télescopique. On change la longueur de ce tube jusqu'à obtenir la même valeur pour Mob. À ce moment-là, la longueur du tube télescopique (qu'on suppose gradué et étalonné) donne la valeur demandée[249]. Cette méthode vaut si le tube inconnu a un "facteur de tube" égal à 1,0 ×, c'est-à-dire s'il ne contient pas des lentilles ou prismes. S'il contient des lentilles, on peut faire une comparaison valide seulement si le tube inconnu et le tube télescopique de comparaison peuvent se remplacer l'un avec l'autre sans altérer la mise au point et si ensuite on varie Lm sur le tube télescopique jusqu'à retrouver la meilleure focalisation. Dans ce cas, on peut mesurer Mob avec les deux tubes et le rapport entre les deux valeurs de Mob donne le "facteur de tube".

Tout ce qu'on a dit vaut pour les instruments doués d'objectifs "à conjuguée finie" (§ 3.1). Pour ceux "à conjuguée infinie", voir le paragraphe suivant.

En ce qui concerne la longueur mécanique des objectifs (Lo), voir le § 31.2.3.

31.1.2 - Lentille de tube

Quand les objectifs sont "à conjuguée infinie" (§ 3.2) il y a dans le tube une "lentille de tube" convergente, avec une focale de 250 mm ou moins.

La distance entre objectif et lentille de tube n'est pas très importante optiquement, étant donné que cet espace est télécentrique (pour chaque point objet se forme là un faisceau parallèle, conjugué à l'infini), et de toute façon elle est d'habitude mesurable avec des simples moyens mécaniques.

On peut mesurer la focale de la lentille de tube en la démontant et en mesurant la distance entre elle et l'image du soleil ou d'un objet à distance élevée (au moins 30 m) fournie par elle.

31.1.3 – Lentille de champ

Dans les instruments très anciens, il peut arriver que la lentille de champ (§ 7.2) ne fasse pas partie de l'oculaire (négatif) mais qu'elle soit insérée dans le tube d'une manière stable. Le tube sera dans ces cas normalement droit et simple pour lequel il est facile de mesurer la position de cette lentille.

On peut mesurer sa focale avec la technique à peine décrite à propos de la lentille de tube. La focale doit être mesurée par rapport au plan principal-image (§ 2.8) qui, dans le cas des lentilles simples et relativement minces comme se vérifie pour les lentilles de champ et de tube, peut être considéré à l'intérieur de la lentille. En alternative, il faut un banc optique doué de "plate-forme nodale".

31.1.4 - Pas de vis pour les objectifs (§ 19.1.1)

La plus simple manière de le relever est d'"essayer" avec une vis "mâle", par ex. avec un objectif de pas connu.

Très utile est un compte-fils, qui cependant est d'usage difficile à l'intérieur d'un trou. Avec un calibre, on peut mesurer le diamètre interne du trou taraudé (19,4 mm pour le pas RMS; 24 mm pour le pas M 25, etc., et d'en tirer le diamètre extérieur.

[249] On peut exécuter l'étalonnage avec un calibre si le tube est droit et simple.

MUSÉE DE EMPLACEMENT:

SECTEUR: OPTIQUE

MICROSCOPE Mono-objectif □ Stéréoscopique □ N° d'inventaire:
Producteur: Pays ou Ville: N° de catalogue:
Année: Notation N° de matricule:

CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES
Longueur mécanique du tube: Lm (mm): Longueur mécanique des objectifs: Lo (mm):
Lentille de tube □ avec focale f_t (mm): et avec distance du bord super. du tube (mm):
Lentille de champ □ avec focale f_c (mm): " " " " " (mm):

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES
Diamètre pour oculaires (mm): Pas de vis pour objectifs: RMS □ Autre □
Autres types de fixation: Type de revolver:
Nombre des positions: Extractible □
Type de tube: droit □ à coude □ monoculaire □ bioculaire □ symm. □ asymm. □ Fact. de tube:
Télescopique □ avec longueur Lm variable (mm) de: à Coulissant dans le bras □
Réglage interpupill. type Siedentopf □; à coulisse □; autre □. Réglage des tubes porte-ocul.: 1□ 2□
Changeur d'agrandiss. □ à n° de positions: Autres systèmes intermédiaires:
Type de platine: Fixe □; Translateur orthogonal □; Ronde □; Tournante □; Centrable □
Course X (mm): Y (mm): Rotation (°): Sur-platine (guide-objets) □
Boutons coaxiaux □; supérieurs □; inférieurs □; horizontaux □; bilatéraux □
Macrométrique □; elle agit sur: tube □; platine □. À pignon et crem. □; Autre □ Friction régl. □
Vitesse (mm/tour): Course (mm): Fin course inf. suffisante pour Lo = mm; réglable □
Micrométrique □; elle agit sur: tube □; platine □; objectif □; À vis simple □; Autre □
Démultiplication de la macrom. □. Coaxiale avec la macrom. □. Bouton unique □
Vitesse (mm/tour): Course (mm):
Fixation du condenseur: cylindrique □ (mm) à queue d'aronde. circul. □ à coulisse □.
Hauteur de battée **h** (mm):
Régulation en hauteur □; à crémaillère □; à vis □ avec course de mm: Extractible du côté □
Centrable □; Changeur de condens. à n° positions. Fond clair □ Fond noir □ Grand champ □
Diaphragme d'ouverture □ avec diamètre (mm) entre et Décentrable (sist. Abbe) □
Porte-filtres, n° Diamètre filtres (mm): Lentille à grand champ extractible □ Centrable □

Système éclairant; avec miroir externe □ plan □ plan-concave □ Types spéciaux:
Diasc. □ FC □ FN □ Episc. □ Coaxial □ Oblique □
Microlampe: fixée au pied □ incorporée □ Ampoule type: précentrée □
À voltage de réseau □. À bas voltage □: V W QI □
À arc □ Charbon □ Xe □ Hg □, type: puissance (W):
Porte-filtres n° diamètre (mm): sur disque revolver □
Diafr. de champ □ avec diamètre (mm) min/max: / Verre dépoli □; fixe □ extractible □

VERSION PARTICULIÈRE:
PARTIES ABSENTES: Obb. □ Ocul. □ Cond. □ Miroir □ Illuminateur □ Tube □ Platine □
DÉGÂTS SUBIS:

INTERVENTIONS EXÉCUTÉES:
Date: Opérateur:
Nettoyage et contrôle □ Substitution des lubrifiants □ Relief des caractéristiques □ Autres □

ÉTAT ACTUEL de CONSERVATION:

PROVENANCE: Date d'acquisition:
CONDITION JURIDIQUE:

FICHIER PHOTOGRAPHIQUE n°
BIBLIOGRAPHIE:
ANNOTATIONS:

31.1.5 - Type de tube

Dans le cas d'instruments bioculaires, la répartition de l'image intermédiaire en deux images partielles peut arriver, comme dans tous les instruments modernes, au moyen d'un semi-réfléchissant, qui produit deux images identiques, symétriquement disposées par rapport à l'axe optique de l'objectif. Il y a différents modèles (voir le § 24).

Dans les instruments anciens, spécialement anglais, une des deux images est obtenue par oblitération partielle de la pupille d'objectif au moyen d'un miroir et un des canaux est disposé latéralement par rapport à l'autre, qui se trouve par contre sur l'axe optique de l'objectif. On peut parler ainsi de système **asymétrique**. Ces instruments sont reconnaissables parce que le tube bioculaire a la forme d'un Y.

31.1.6 – Distance interpupillaire (§ 24.1.3)

La régulation de la distance interpupillaire peut se faire par le mouvement des deux tubes porte-oculaires dans un plan passant par l'axe optique; les deux tubes, en restant parallèles à soi mêmes, s'éloignent ou se rapprochent de l'axe optique toujours restant dans ce plan.

Le mouvement peut être en direction perpendiculaire à l'axe, "à coulisse", lequel est le cas le plus commun, utilisé dans les vieux modèles Zeiss, PZO, etc. ou à 45° sur l'axe, comme on fait pour compenser la variation de la longueur du tube (Leitz) etc.

En d'autres cas, les deux tubes porte-oculaires sont mobiles à charnière autour de l'axe optique de l'objectif comme les deux moitiés d'une jumelle (schéma de **Siedentopf**)(§ 24.1.3).

Dans des rares cas on a des autres solutions comme le tube à Telan breveté par Wild dans lequel un seul des deux tubes porte-oculaires est mobile, dans un plan passant pour l'axe de l'objectif (voir, dans ce site, la fiche [«Scheda Tecnica»] n° 48).

31.1.7 - Macrométrique - fin de course

Il nous intéresse ici la fin-course inférieure, quand est moindre la distance tube-objet. Telle fin-course peut être tellement longue que la distance entre la battée de fixation de l'objectif et la préparation devient plus petite de la longueur de l'objectif, (**Lo**, § 19.1.2). Il est bien donc de la mesurer pour être sûrs que l'objectif ne touche jamais la préparation.

On démonte l'objectif, on porte à fin-course le mouvement soit macro- que micro-métrique, on introduit un compas entre battée d'objectif et préparation (préparation d'épaisseur normalisée: 1 + 0,17 mm), et se font toucher les pointes du compas avec les deux surfaces citées. Puis le compas se reporte sur une règle millimétrée ou un calibre.

On peut aussi passer un mètre à ruban à travers le trou (supposé accessible) de l'objectif démonté et l'appuyer sur la préparation.

S'assurer que cette mesure ne soit pas inférieure à la longueur optique des objectifs prévus.

31.1.8 - Condensateur: hauteur de battée (h) (voir la voix analogue dans la fiche "Condensateur")

Pour "hauteur" du condensateur (§ 21.6) on entend la distance axiale entre la battée de référence du condensateur (bord proéminent vers le haut dans le cas de fixation cylindrique, surface d'appui dans le cas de fixation à queue d'aronde, etc.) et la surface supérieure du condensateur, de

sa lentille frontale ou de sa monture.

Le montage (fixe ou mobile) du condensateur sur le statif peut permettre une hauteur différente[250] du condensateur par rapport à la surface supérieure de la platine et ceci doit être mesuré et noté.

31.1.9 – Système éclairant

Au-delà des données indiquées sur la fiche, toutes les données décelables sont utiles:

-- Maximum et moindre diamètre du diaphragme de champ.

-- Présence de lentille à grand champ, rabattable ou pas.

-- Présence de mécanismes de focalisation pour l'ampoule ou le collecteur.

-- Présence de mécanismes de centrage pour l'ampoule ou le collecteur ou le diaphragme de champ.

-- Présence de surfaces dépolies sur les lentilles.

-- Présence d'un diaphragme de champ éclairé tout de suite sous la platine ("à coupole", à petits cylindres interchangeables, à disque-revolver avec des trous de différent diamètre, § 8.4).

-- Présence de lentilles condensatrices ou prismes pour l'épiscopie oblique unilatérale, leur diamètre, focale, position.

-- Présence de simples lentilles convergentes pour la diascopie avec ou sans bras décentrable, leur diamètre, focale et position.

-- Présence de miroirs concaves pour l'épiscopie (miroirs de **Lieberkühn**) autour des objectifs.

31.1.10 - Annotations

Dans la fiche il est bien de décrire des autres détails mécaniques: s'ils existent des frictions réglables dans les mouvements de la platine, du porte-condensateur, etc., s'ils existent des mécanismes pour la reprise des jeux et de toute façon lequel est l'état des jeux avant et après l'intervention, etc.

Il est très utile de décrire aussi l'état des finissages, peintures, chromages, oxydations, etc.

Il est utile de reporter toutes les inscriptions, les gravures ou les indications soit du constructeur que du vendeur, des possesseurs suivants, etc. en conservant avec soin les données techniques fournies par le constructeur, les tables de multiplication, les manuels d'instruction, les catalogues, les "trade card", etc.

[250] Pour "hauteur différente" nous entendons ici: "différente par respect à l'hauteur de battée (**h**) du condensateur".

MUSÉE DE EMPLACEMENT:

SECTEUR: OPTIQUE

OBJECTIF de MICROSCOPE N° d'inventaire:
Producteur: Pays ou Ville N° de catalogue:
Année: Notation: N° de matricule:

CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES
•• Grandissement linéaire transversal Mob (avec Lm = mm et A_i[251] = mm)
•• Longueur mécanique nominale du tube Lm (mm) =
•• Diamètre nominal du champ image **s'** (mm) =
Ouverture numérique: (NA = n sen α)
Épaisseur optimale de la lamelle **d** (mm) =
Longueur focale f_{ob} (mm) =
Longueur mécanique de l'obj. (Lo (mm)=)
Distance libre de travail WD (mm) =
Correction: Acrom. □ Semiapo. □ Apocr. □ CF □ Plan □

Résidus d'aberrations:
Sphérique souscorrigée □ surcorrigée □
Coma □ centripète □ centrifuge □ symétrique □
Astigmatisme (μ): symétrique □
Courbure de champ: (% au point du champ)
Distorsion (flèche)(μ): (y'=5 mm); à coussinet □ à barillet □
Chromatique long. Δa (μ):
Chromatique later. Δy (μ): (pour y' = 5 mm)
Seconde conjuguée Finie □ Infinie □
Oculaire conseillé: Acrom. □ Semicompens. □ Compens. □ Recette:
À sec □ À immersion □ HI □ À eau □ Autre □

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES
Fixation: à vis □ à coulisse □ autre □
RMS □ autre □ (M[252])
Diaphr. iris □
Monture télescopique □
Bague de parfocalité réglable □
Collier de correction □
Chemise ext. □
Trous de Centrage □

VERSION PARTICULIÈRE:
Épiscopie FC □ FN □ Radiat. polarisée □ Contraste de phase Pos. □ Neg □ .Var. □ Autre □ Densité de l'anneau de phase:
Catoptrique □ Catadioptrique □ LWD □ Autre:

DÉGÂTS SUBIS:

INTERVENTIONS EXÉCUTÉES:
Nettoyage et contrôle □ Substitution des lubrifiants □ Relief des caractéristiques □ Autres □
Date: Opérateur:

ÉTAT ACTUEL de CONSERVATION:

PROVENANCE: Date d'acquisition:
CONDITION JURIDIQUE:

FICHIER PHOTOGRAPHIQUE n°
BIBLIOGRAPHIE:

ANNOTATIONS:

COMME ÉQUIPEMENT DU MICROSCOPE: N° d'inventaire:

---

[251] A_i = distance entre image intermédiaire et battée de l'oculaire.

[252] Indiquer le diamètre du filet si de type métrique.

31.2 - FICHE "OBJECTIF"

31.2.1 - Agrandissement transversal linéaire (M_{ob}) (§ 12.2)

Telle caractéristique dépend de quelques facteurs, qui doivent être définis avant la mesure:

•• Longueur mécanique du tube (Lm) (§ 10): on doit utiliser la longueur prévue par le constructeur. Si l'objectif est monté encore sur l'instrument original et le tube est fixe, il n'y a pas de problèmes; seulement dans le cas des tube bioculaires à double coulisse, type Zeiss (vieux modèle), il faut régler la distance interpupillaire sur une valeur moyenne (65 mm par ex.). Si un seul des tubes porte-oculaires est réglable, la mesure va exécutée sur le tube fixe; si les deux tubes sont réglables, on règle le tube sur lequel on exécute la mesure sur la position de "0" ou sur la position "65 mm" s'il existe une graduation en mm.

Si le tube est télescopique, il faut connaître la longueur de tube prévue par le constructeur; en absence de ceci on aille par similitude avec des instruments analogues: la valeur la plus diffuse est 160 mm, mais certains constructeurs (comme Leitz et Meopta) qui ont de nos jours adoptée la valeur 160, anciennement ils utilisaient 170 mm ou autre. Les constructeurs anglais anciens et les modèles pour métallographie utilisaient souvent des valeurs "longues", jusqu'à 250 mm.

Si l'objectif n'est pas monté sur l'instrument original, sauf le cas (moderne) que Lm soit indiqué sur la monture (§ 19.1.5), il faut procéder par comparaison.

Normalement, si la mesure de M_{ob} fournit une valeur très différente de celle nominale, on peut refaire la mesure avec une autre valeur de Lm, qui soit jugé possible.

•• Hauteur de l'image intermédiaire (A_i) (§ 20.2)

On peut définir ainsi la distance le long de l'axe entre l'image intermédiaire nominal et le bord supérieur du tube. Telle hauteur influe sur la conjuguée-image de l'objectif (**a'**) et par suite sur M_{ob}. Pour connaître la valeur prévue par le constructeur (ne pas déclarée en général) on peut mesurer, avec la méthode indiquée dans le § 31.3.5, la valeur d'A_i dans l'oculaire dont le microscope est équipé, ou dans l'oculaire de valeur moyenne (10×, par ex.) si il y en a plus d'un[253].

Si on ne possède pas l'oculaire original prévu par le constructeur, il faut procéder par comparaison, ou adopter une des valeurs standards (10 mm pour les règles DIN, 13 mm pour les règles TGL), beaucoup plus, jusqu'à 60 mm, pour les faibles oculaires de vieille date.

La mesure de M_{ob} doit donc être exécutée avec la valeur correcte de Lm et d'A_i. Il faut donc, d'un côté, le statif original ou un autre statif avec la même Lm ou un tube télescopique. De l'autre côté, il faut un oculaire micrométrique positif avec la valeur correcte d'A_i. Si l'oculaire micrométrique qu'on a à disposition a une A_i plus petite du nécessaire, il est inutilisable, à moins de pouvoir raccourcir le Lm avec un tube télescopique ou avec un tube bioculaire réglable. Si l'oculaire micrométrique a une A_i excessive, on peut le soulever de combien suffit et le fixer avec un bout de ruban adhésif pendant la mesure de M_{ob}.

On exécute cette mesure avec la méthode indiquée dans les §§ 12.1 et 12.2. On pose l'oculaire micrométrique POSITIF avec la valeur à peine discuté d'A_i dans un tube avec la valeur correcte de Lm. On met au point sur un micromètre objet et on fait le rapport entre un certain trait du micromètre oculaire (les deux tiers centraux, par ex. de mm 2 à 8, dans le cas du réseau habituel 10 mm/100 parties), et le trait correspondant du micromètre objet. Les longueurs des traits correspondants sur les deux micromètres seront exprimées évidemment en utilisant la même unité de mesure.

---

[253] On rappelle que beaucoup de microscopes du passé, ou même modernes si de qualité modeste, sont équipés d'oculaires avec différente valeur de A_i.

31.2.2 – Ouverture numérique NA = n sen α (voir aussi, dans ce site, l'art. n° 46)

À cette fin, on peut utiliser un apertomètre, du type d'Abbe ou de Beck (§ 5.2.9).

Même cette mesure doit être exécutée avec la valeur correcte de Lm, mais cette fois les tolérances sont beaucoup plus larges.

Pour observer l'image de la graduation de l'apertomètre qui se forme dans la pupille de sortie de l'objectif, on peut utiliser un microscope auxiliaire (§ 19.5.5) en diaphragmant cependant le plus possible l'objectif de ce dernier (la lentille inférieure), ou bien une lentille d'Amici, si elle est présente dans le statif.

On peut construire soi-même un apertomètre de Beck de cette manière: on dispose sur la platine une règle millimétrée, il irait mieux une règle graduée avec un pas de 0,5 ou 0,1 mm, et on l'illumine intensément (si elle est transparente on peut l'éclairer à travers un verre dépoli par-dessous, après avoir enlevé le condensateur).

Sur la règle on pose deux blocs-entretoise identiques de l'hauteur d'environ 10 mm, qui laissent libres une région de la graduation d'au moins 5 cm, centrée sur l'axe optique de l'objectif. Si la règle est éclairée par-dessous, il faudra vérifier que le trou dans la platine soit assez grand pour éclairer toute la région utile de la règle. Autrement, on l'illumine par dessus.

Sur les entretoises, en correspondance de la graduation, on appuie une lamelle longue au moins 50 mm; sur la surface inférieure de la lamelle on dépose quelque trait mince d'encre de Chine ou quelque pépin de poussière. Sur ces traits ou pépins on met à point l'objectif en examen avec un oculaire quelconque. Puis on extrait l'oculaire et avec le microscope auxiliaire on observe la pupille d'objectif et l'image de la graduation qui s'y forme. Nous appelons $\mathbf{2\ell}$ la longueur de la graduation, exprimée en mm, qui est visible à l'intérieur des bords de la pupille.

Soit **d** l'hauteur des entretoises (on suppose le côté gradué de la règle tourné vers le haut). Alors **d** représente la distance entre graduation et plan-objet de l'objectif. On l'exprime en mm, comme aussi $\boldsymbol{\ell}$.

En connaissant $\boldsymbol{\ell}$ et **d**, on calcule $\mathrm{tg}\alpha = \boldsymbol{\ell}/\mathbf{d}$ et d'ici senα, c'est-à-dire la NA.

Si cependant l'objectif est à immersion, il faut que l'espace entre lamelle et graduation soit remplie avec un milieu d'index n = 1,51 environ. On peut prendre un bloc de verre aux faces polies, planes et parallèles, d'index **n** connu. Sur une face du bloc on colle la règle (graduation du côté du bloc) et sur l'autre face la lamelle, avec les traits d'encre toujours du côté du bloc. Comme adhésif on peut utiliser du baume du Canada.

Dans ce cas, la valeur de NA, tirée de $\boldsymbol{\ell}$ et de **d** avec le calcul trigonométrique, doit être multipliée pour la valeur de **n**. La valeur de **d** est celle de l'épaisseur du bloc de verre.

31.2.3 – Longueur mécanique de l'objectif, Lo (§ 19.1.2)

Aussi cette valeur est liée à la longueur du tube Lm et à la position de l'image intermédiaire (Ai). Valent donc les considérations faites dans le § 31.2.1.

Ceci vérifié, on met au point sur une préparation quelconque (sans lamelle si l'objectif est calculé pour d = 0, voir le § 19.2.5); sans toucher la mise au point, on démonte l'objectif, peut-être après avoir tourné le revolver, et avec un compas on prend la distance entre préparation et bord du trou de montage de l'objectif ("battée"). Puis on met le compas sur une règle, comme on a fait pour le relèvement de la fin-course (§ 31.1.7).

Pour la longueur du tube **Lm** vaut encore ce qu'on a dit dans les §§ 31.1.1 et 31.1.2.

31.2.4 – Épaisseur optimale de la lamelle (d)

Cette mesure sert à vérifier l'exactitude de la valeur nominale déclarée par le constructeur, d'habitude d = 0 ou 0,17 mm.

On exécute la mesure en cherchant l'épaisseur de lamelle qui fournit le moindre résidu possible pour l'aberration sphérique (§§ 13.2.3, 18.3, 18.4). On met devant l'objectif un star test DÉCOUVERT; on l'observe avec un fort oculaire et on met sur le star test des lamelles d'épaisseur croissante (et mesurée point par point avec un micromètre centésimal) jusqu'à minimiser la sphérique (altérations de la centrique le plus possible identiques sur et sous la position de la meilleure mise au point).

On peut utiliser aussi un star test couvert par une lamelle normale (d = 0,17) dont on connaisse l'épaisseur avec une tolérance d'au moins ± 0,01 mm. Puis on minimise la sphérique en changeant la longueur du tube Lm, en supposant de disposer d'un tube télescopique. En partant d'une valeur nominale pour Lm, on aura la minimisation de la sphérique pour une certaine variation Δ_L de la longueur du tube (Lm) et ceci correspond à une variation de l'épaisseur de la lamelle (Δ_d) du même sens: s'il faut allonger le tube, cela signifie que l'épaisseur nominale de la lamelle est insuffisante.

En exprimant Δ_L en mm et Δ_d en centièmes, on a la formule approchée (voir aussi la formule sans numéro dans la note 55 du § 13.2.3.3, pag. 98): $\Delta_t = \Delta_d \cdot M_{ob}^2 / 250$, dans laquelle Δ_t indique Δ_L):

$$\Delta_d = \Delta_L \cdot 250 / M_{ob}^2 \qquad (89)$$

31.2.5 – Distance libre de travail WD (§ 19.1.3)

Encore une fois, il faut travailler avec les valeurs nominales de **Lm** et $\mathbf{A_i}$.

On mette au point une préparation contenant un objet mince et bien contrasté, avec un oculaire moyen et un condensateur bien ouvert. La préparation soit couverte d'une lamelle de l'épaisseur nominale.

Puis on introduit entre objectif et préparation les lamelles d'une jauge d'épaisseur, d'épaisseur croissante, jusqu'à percevoir une augmentation brusque du frottement. Évitez de forcer les lamelles dans le cas d'objectifs à ressort, étant donné que ceux-ci se retirent et on commet une erreur en excès. On enveloppe les lamelles de la jauge avec du papier pour ne pas griffer l'objectif; à l'épaisseur des lamelles ensuite on ajoute l'épaisseur (double) du papier, mesurée au micromètre centésimal.

31.2.6 - Diamètre utile / nominal (s') du champ image

Si cela n'est pas déclaré par le constructeur, on observe un réseau (§§ 12.1 et 19.5.4) avec l'objectif en examen et un oculaire grand-angulaire moderne, de type achromatique positif, avec **s'** ≥ 18 mm. Il est bien toujours respecter la valeur nominale de la longueur du tube.

On observe avec soin les bords du champ visuel et on juge jusque où la définition est acceptable. S'il y a beaucoup de chromatique latérale ou CVD (§§ 13.2.2 et 19.3) il est bien de réessayer avec quelque oculaire compensateur de bonne qualité comme les Periplan de Leitz, les Kpl de Zeiss W., les K de Wild, etc.; on évite les oculaires doués de compensation pour l'astigmatisme comme les "photographiques" ou "complanétiques" de Wild, etc.

En faisant les proportions avec le diamètre connu du champ visuel de l'oculaire en usage, on peut évaluer quelle partie de ce champ a une définition acceptable ("diamètre utile").

31.2.7 - Longueur focale f_{ob}

On prenne un petit microscope avec tube à coude et on le dispose avec l'axe de l'objectif horizontal et le tube porte-oculaire tourné en haut. On va l'appeler «microscope micrométrique».

On y monte trois ou quatre objectifs d'agrandissement échelonné, entre 2:1 et 50:1, à sec. On y monte aussi un oculaire micrométrique et on mesure les équivalentes micrométriques des différents objectifs (§ 12.3).

On démonte le condensateur et, avec un embout spécial qu'il faut produire *ad hoc*, on monte à sa place l'objectif en examen avec la frontale tournée vers la frontale de l'autre objectif, de manière telle que la distance entre les deux lentilles frontales soit égale à la somme de leurs distances de travail.

Le long de l'axe de ce système à deux objectifs, et précisément du côté duquel le faisceau éclairant arrive normalement, on pose à la distance de 160 ± 1 cm un objet long 100 ± 0,5 mm (un bande de papier blanc sur fond noir, par ex.) et bien éclairé. Tel objet doit être placé dans un plan perpendiculaire à l'axe optique des objectifs; la chose est facile si le pied du microscope micrométrique est percé ou ouvert dessous le condensateur; autrement, il faut se servir d'un miroir sous le condensateur ou démonter le pied de l'instrument.

La distance de 160 cm doit être calculée entre l'objet de 100 mm et le foyer supérieur de l'objectif en examen. Si, dans la mesure de f_{ob}, on accepte une erreur de ± 1%, on peut accepter la position de tel foyer avec une faute supérieure à 1 cm. Peuvent suffire par suite les indications suivantes: dans les objectifs classiques, pas plan, d'agrandissement jusqu'à 16:1, le foyer supérieur est très près de la lentille émergente; dans les modèles moyen-forts (formule d'Amici, § 19.2.3.1) le foyer supérieur est quelques mm sous la lentille émergente. Dans les types plan les choses sont plus compliquées: la possibilité reste toujours de tourner le frontale de l'objectif vers le soleil et tâcher d'en déterminer l'image, qui se forme dans son plan focal supérieur.

À ce point, l'objectif en examen fournit en proximité de son foyer inférieur une image rapetissée de l'objet long 100 mm. En focalisant le microscope micrométrique on mette au point cette image et on en mesure la longueur en mm (**y'**). La mesure de **y'**, au moins si l'objectif de mesure est fort et il est corrigé pour une lamelle avec d = 0,17 mm, doit être exécutée en mettant une lamelle entre les deux objectifs, perpendiculaire à l'axe[254].

La focale de l'objectif en examen est donnée par: $f_{ob} = 16 \cdot y'$.

Si l'objectif en examen est à immersion, il faut déposer sur sa frontale une petite goutte d'huile d'immersion et un fragment de lamelle, ou peut-être deux ou trois fragments empilés[255]. L'adhérence de l'huile est suffisante à retenir les fragments de lamelle.

31.2.8 - Type de correction (§§ 13.2.1, 19.3 et 19.5)

Il s'agit ici d'évaluer essentiellement la correction de la chromatique longitudinale.

Avec un objet à contraste fort comme un réseau, on déplace la focalisation en haut et en bas; à travers un oculaire moyen-fort du type prévu par le constructeur; on observe alors les halos colorés AU CENTRE DU CHAMP.

Si les halos passent du bleu au rouge, la correction est très mauvaise; si ils passent du violet au vert, la correction est bonne, de type achromatique; s'ils sont imperceptible, elle est excellente, achromatique, apochromatique ou CF.

La distinction ultérieur entre les différentes catégories d'objectifs se base sur le contrôle de la

---

[254] Ces précautions servent à éviter l'apparition de fortes aberrations, mais leur omission ne produit pas des erreurs de mésure.

[255] Voir la note précédente.

chromatique latérale, et on fait ici référence aux §§ 19.3 et 19.5.

31.2.9 - Résidus d'aberrations (voir aussi, dans ce site, l'art. n° 11 [en français])

•• Sphérique: voir les §§ 13.2.3, 18.4, 19.3 et 19.5.3.

•• Coma: voir les §§ 13.2.4, 18.4, 19.3 et 19.5.3. La coma est "centripète" quand le point le plus lumineux de la figure de diffraction est dirigé vers la périphérie du champ. Il n'est pas facile avec l'observation du star test donner une évaluation quantitative de la coma, mais avec une certaine expérience on peut de toute façon l'apprécier en l'exprimant avec un certain nombre d'échelons, par ex. jusqu'à 5.

•• Astigmatisme: voir les §§ 13.2.5, etc. En observant le star test avec un oculaire micrométrique, il est possible de mesurer la longueur maximum des focalines quand la mise au point est optimisé sur une d'elles, c'est-à-dire quand elle a la moindre largeur, à la périphérie du champ.

•• Courbure de champ (§§ 13.1.1, 14, 19.2.3.2, 19.5.3 et 19.5.4). L'appréciation de la partie du champ "encore au point" ou "à peine hors l'acceptable focalisation" est évidemment subjective. Le pourcentage à indiquer se réfère au rayon, pas à la surface.

•• Distorsion (§§ 13.1.2, 19.5.3 et 19.5.4). On observe avec un oculaire positif quelconque un réseau-objet contenant au moins une ligne droite; on doit disposer dans l'oculaire un réseau constitué par un carré de côté égal à 10 mm et une graduation au centre, avec pas 50 ou 100μ. On porte la ligne droite dans l'objet à effleurer ce côté du carré qui est perpendiculaire à la graduation. On peut souligner ainsi la flèche de courbure de l'image, par comparaison avec le côté du carré présent dans l'oculaire. Ensuite, la graduation permet une mesure de la flèche. Telle flèche se réfère naturellement au plan de l'image intermédiaire.

•• Chromatique longitudinale (§§ 13.2.1 et 19.3). Avec l'objectif en examen et un oculaire achromatique, observer un objet au fort contraste. En utilisant la mise au point comme pour la mesure d'épaisseurs (§ 12.3), on mesure la distance axiale (Δa, relatée à l'espace objet) entre les deux positions de focalisation dans lesquelles AU CENTRE DU CHAMP apparaissent plus évidentes les halos colorés de couleur complémentaire: d'habitude rouge-bleu ou vert-violet.

Dans les objectifs modernes, les halos sont souvent tellement imperceptibles que la mesure est impossible. On notera sur la fiche: "résidu pas décelable".

•• Chromatique latérale ou CVD (§§ 13.2.2, 19.3, 19.5.3 et 19.5.4). On observe un réseau avec un oculaire micrométrique positif ACHROMATIQUE. On peut alors mesurer la largeur des halos colorés aux bords du champ ($\Delta y'$, relatée au plan de l'image intermédiaire). La focalisation doit être optimisée aux bords. On peut exécuter la mesure à 5 mm de l'axe, toujours dans le plan de l'image intermédiaire ($y' = 5$ mm).

31.2.10 – Oculaire conseillé (§ 19.3)

Pendant l'observation d'un réseau objet, on cherche le type d'oculaire qui minimise la CVD aux bords du champ. Focaliser aux bords.

Il faut évidemment disposer d'une série d'oculaires avec des caractéristiques différentes et bien connues, de l'achromatique pur au fort compensateur.

31.2.11 – Fautes d'assemblage (§§ 18.3, 18.4, 19.5.2)

On observe, avec l'objectif en examen, un star test dans les meilleures conditions d'éclairage et avec un fort oculaire, au moins 20×, si possible positif.

On étudie la structure de la centrique AU CENTRE DU CHAMP (§ 18.3). La présence de

coma sur l'axe dénote d'habitude une erreur de centrage, probablement de la lentille flottante, si présente (§§ 13.2.4 et 19.5.2). L'astigmatisme sur l'axe dénote souvent l'inclinaison non correcte, un désalignement ou "tilt", de quelque lentille.

On rappelle qu'une coma forte sur l'axe peut masquer aussi un fort résidu de sphérique et d'astigmatisme.

31.2.12 – Fixation à vis, etc.

Un compte-fils et un calibre permettent de déterminer avec sûreté le type de filet. Le compte-fils doit contenir tous les pas anglais en plus des métriques.

Quand sont présents la bague de parfocalité réglable (§ 19.1.2) et les trous de centrage (§ 13.2.4), ils sont cachés toujours à l'intérieur de la monture et souvent sous une "chemise" (§ 19.1) qui doit donc être démontée pour une vérification. On remarque que certains constructeurs fixent la chemise avec des adhésifs du type du "loch-tite" et pour les assouplir est souvent suffisant l'alcool, en moindre quantité pour ne pas altérer les peintures ou les ciments des lentilles composées, et en le laissant agir pour quelques heures.

31.2.13 - Versions spéciales

Beaucoup de renseignements se déduisent des notations, des catalogues, de la structure de l'objectif.

Les objectifs épiscopiques seront indiqués en général avec d = 0 ou xx/0; si pour fond noir, sera visible le condensateur annulaire. Les objectifs diascopiques pour champ noir, si avec ouverture supérieure à 1,0, à immersion, seront doués d'un diaphragme à iris interne, contrôlable par une bague externe, ou de "petits cylindres limiteurs" qui servent de diaphragmes fixes et s'introduisent dans l'objectif du haut. Les versions catoptriques seront reconnaissables par la présence de surfaces spéculaires, par l'obturation centrale, par les grandes dimensions, etc. Les versions "Pol", si non indiquées par les notations, seront contrôlées au moyen d'une lentille d'Amici et d'un condensateur Pol, entre Nicol croisés: on doit voir une "croix de Malte" sombre, régulière, sans couleurs. Noter les éventuelles taches claires ou colorées.

Les versions "de phase" seront reconnaissables par la présence d'un anneau de phase près de la lentille émergente. Le type de contraste se reconnaît en observant une préparation de phase avec un objet plus réfringent du liquide (fibres de verre en huile de paraffine, poils de coton dans l'eau, bactéries dans l'eau, etc.). L'objet doit apparaître plus sombre du champ dans le cas de contraste positif.

La densité de l'anneau de phase se mesure avec une méthode photométrique , ou bien en exploitant un posemètre photographique; il faut faire la comparaison avec un autre objectif pas de phase avec une structure identique (diaphragme annulaire inséré et centré), ou insérer entre objectif et condensateur une lentille sphérique suffisamment forte à modifier les dimensions de l'image du diaphragme annulaire de manière qu'elle n'interfère pas avec l'anneau de phase[256]. On mesure de cette dernière manière la transparence de l'objectif au dehors de l'anneau de phase; en conditions de travail, on a par contre la transparence AVEC l'anneau. Le rapport entre les deux transparences fournit la densité de l'anneau.

[256] Il peut suffire souvent de changer l'hauteur du condensateur; surveiller avec un microscope auxiliaire les variations de diamètre de l'image du diaphragme annulaire.

MUSÉE DE EMPLACEMENT:

SECTEUR: OPTIQUE

OCULAIRE de MICROSCOPE N° d'inventaire:
Producteur: Pays ou Ville N° de catalogue:
Année: Notation: N° de matricule:

CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES
Grossissement visuel: Index de champ: Champ angulaire:
V = × **s'** (mm) = 2α (°) =

Longueur focale Hauteur de l'image interm. Hauteur de la pupille
$\mathbf{f_{oc}}$ (mm) = par rapport à la battée (A_i), mm = Ap (mm) =
Recette: Correction de la CVD[257]:
□ Achromatique
□ Semi-compens.
□ Compensatrice
Résidus d'aberrations: Objectifs conseillés:
Performances spéciales: Positif □; Négatif □; Divergent □; Projectif □; Micrométrique □; Autre □

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES
Diamètre extérieur Ø (mm) = Longueur ℓ (mm) = Diamètre supérieur Øp (mm) =
Diamètre du diaphragme Siège pour réseaux □
de champ visuel (DV) (mm) = Ø (mm) =
Fils en croix □

Lentille oculaire réglable □ Œillère intégrée □

VERSIONS SPÉCIALES: Pol □; Indicateur □; Réglable □; Autre □

DÉGÂTS SUBIS:

INTERVENTIONS EXÉCUTÉES:
Nettoyage et contrôle □ Substitution des lubrifiants □ Relief des caractéristiques □ Autres □
Date: Opérateur:

ÉTAT ACTUEL de CONSERVATION:

PROVENANCE: Date d'acquisition:

CONDITION JURIDIQUE:

FICHIER PHOTOGRAPHIQUE n°
BIBLIOGRAPHIE:

ANNOTATIONS:

COMME ÉQUIPEMENT DU MICROSCOPE: N° d'inventaire:

[257] CVD = Chromatische Vergrosserung Differenz = Différence chromatique d'agrandissement = Aberration chromatique latérale.

31.3 - FICHE “OCULAIRE”

31.3.1 - Agrandissement visuel V_{ok} (§§ 12.5 et 12.6)

Les méthodes de mesure indiquées dans les chapitres cités ici sont indirectes et elles sont liées à des facteurs différents, en supposant entre autre la mesure de M_{ob}, liée à son tour à L_m, A_i, etc.

Il convient donc calculer la valeur de V_{ok} de celle de $\mathbf{F_{ok}}$ (voir la formule (21) dans le § 4.3), et cette dernière se mesure comme indiqué dessous (§ 31.3.4) avec une bonne précision.

Il est facile et précis de mesurer directement V_{ok} seulement dans le cas d’oculaires positifs: on mesure le diamètre du diaphragme de champ visuel avec un calibre, on projette une image de tel diaphragme (il faut une forte illumination) sur un écran à 250 mm au dessus du disque de Ramsden (§§ 4.4 et 5.2.7), et on mesure le diamètre de l’image. Le rapport entre les deux diamètres fournit V_{ok}.

31.3.2 - Index de champ s’ («field number») (§§ 7.2)

On observe un micromètre objet avec un objectif faible ou moyen, dont on connaisse exactement l’agrandissement; la mesure de ce dernier doit être faite avec un oculaire qui ait la même position de l’image intermédiaire de l’oculaire en examen (A_i, § 31.3.5) et avec un tube de la même longueur de celui sur lequel on fait la mesure.

On lit combien de parties du micromètre objet correspondent au diamètre du champ visuel (mesure en mm) et on multiplie pour M_{ob}. Ce résultat est **s’**.

Dans le cas des oculaires positifs, ça suffit un calibre étant donné que **s’** coïncide avec le diamètre du diaphragme de champ visuel de l’oculaire, qui est accessible par-dessous.

31.3.3 – Champ angulaire 2α (§§ 7.1 et 20.1)

On pose un écran perpendiculaire à l’axe, sur l’oculaire, à la distance **l** du disque de Ramsden.

Avec un éclairage fort, on verra une image du diaphragme de champ visuel. On en mesure le diamètre Ø. Vérifier qu’il n’y est rien qui "vignète", qui limite le diamètre du faisceau (diaphragme de champ éclairé, lentille frontale du condensateur, etc.). Utiliser un objectif moyen. Le rapport $Ø / 2\mathbf{l}$ donne la tangente de α.

31.3.4 - Longueur focale f_{oc}

On utilise la même méthode indiquée dans le § 31.2.7 pour $\mathbf{f_{ob}}$. Il faudra un autre raccord pour monter l’oculaire à la place du condensateur. Sa lentille oculaire doit être tournée vers l’objectif du microscope micrométrique.

Comme position du premier foyer de l’oculaire on peut supposer, avec précision suffisante, celle du diaphragme de champ visuel.

31.3.5 – Hauteur de l'image intermédiaire A_i

Si l'oculaire est positif, l'image intermédiaire, et dans ce cas le premier foyer de l'oculaire, coïncide avec le plan du diaphragme de champ visuel. Ça suffit un calibre.

Si l'oculaire est négatif, on procède par comparaison. On observe un réseau ou un micromètre-objet avec un objectif d'environ 10:1. On monte l'oculaire en examen et on met au point avec soin. Sans altérer l'état de l'instrument, on extrait l'oculaire en examen et on le substitue avec un oculaire dont on connaît l'A_i. On cherche de nouveau le meilleur foyer avec un des deux moyens:

•• altérer la longueur du tube Lm, si le tube est télescopique;

•• soulever l'oculaire; cela fonctionne si l'oculaire de comparaison a une A_i supérieure de celle de l'oculaire en examen: il convient s'adresser à un faible oculaire de vieille fabrication.

La longueur dont l'oculaire de comparaison a été déplacé doit être additionnée algébriquement à sa A_i (soustraire si l'oculaire a été soulevé).

31.3.6 – Hauteur de la pupille (A_p) (§ 9)

Monter un objectif moyen et fermer partiellement le diaphragme d'ouverture. L'éclairage doit être intense.

Sur l'oculaire en examen on pose un verre dépoli, perpendiculaire à l'axe, et on le déplace axialement jusqu'à minimiser la section du faisceau. À ce point, la distance entre la surface dépolie et la lentille oculaire (surface émergente) représente la valeur d'**Ap**.

Il faut rappeler qu'un oculaire est «pour porteur de lunettes» (👓) si A_p est égale ou supérieure à 15 mm (la distance moyenne de la lunette à la cornée est de 12 mm).

31.3.7 - État de correction de la chromatique latérale (CVD)

On observe un réseau à travers un objectif sûrement achromatique (achromatique classique pas supérieur à 10:1 ou de la catégorie CF - § 19.3.2).

Avec l'oculaire en examen on observe les marges des lignes du réseau à la périphérie du champ. S'il n'y a pas des halos colorés, l'oculaire est achromatique. Si le bord des lignes sombres tourné vers l'axe est rouge-jaune, l'oculaire est plus ou moins compensateur. Utile une comparaison avec des autres oculaires connus.

De ce relèvement il résulte clair aussi quel est le type d'objectif conseillé (voir les §§ 19.3 à 19.3.2).

31.3.8 - Caractéristiques mécaniques

•• Longueur mécanique (ℓ): on veut parler ici de la distance entre le bord d'appui (battée) et le bord inférieur. Cette caractéristique détermine la longueur de la partie interne libre nécessaire dans la partie supérieure du tube et, si elle est excessive, elle peut déterminer l'impuissance d'utiliser un certain oculaire sur un certain tube; elle peut en plus aider à reconnaître la différente provenance des deux parties.

•• Diamètre supérieur (Øp): d'habitude c'est le diamètre de la monture de la lentille oculaire, de toute façon c'est le diamètre sur lequel doivent être insérés les œillères et d'autres accessoires (prismes ou miroirs pour la projection, chambres claires, etc.).

MUSÉE DE EMPLACEMENT:

SECTEUR: OPTIQUE

CONDENSEUR de MICROSCOPE N° d'inventaire:
Producteur: Pays ou Ville N° de catalogue:
Année: Notation: N° de matricule:

CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES
Longueur focale (f_k), mm = Ouverture numérique NA = n sen α = Distance frontale en air[258] (mm) =
Recette: Correction □ Achromatique □ Aplanétique □ Autre Résidus d'aberrations:
Versions spéciales Á grand champ □ À longue focale □ Pour champ noir □
Pour contr. de phase □ Pour radiaz. polarisée □ Á deux diaphragmes (Berek) □
Pancratique □ Pour DIC □ Autre □

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES
Hauteur (battée-surf. frontale) **h** (mm) = Fixation: □ Cylindrique; Ø (mm) = □ Queue d'aronde circulaire; Øest (mm) = □ Queue d'aronde linéaire; larg. max (mm) =
Lentille frontale □ rabattable □ à greffe □ à vis □ fixe □
Revolver □ pour diaphragmes annulaires □ pour contraste de phase □ n° positions: pour champ noir □: n° positions:
pour prismes de Wollaston (DIC) □ n° positions:
revolver de condensateurs □ n° positions:

Dispositifs de centrage intrinsèque □: à vis □ à cames □ autre □

Porte-filtres n° Diamètre filtres (mm) = Fixations à ressort pour les filtres □

Diaphragme d'ouverture □ Maximum-moindre diamètre (mm) = / Graduation:
Commande: à levier □ à bague externe □ décentrable □ avec crémaillère (d'après Abbe) □

DÉGÂTS SUBIS:

INTERVENTIONS EXÉCUTÉES:
Nettoyage et contrôle □ Substitution des lubrifiants □ Relief des caractéristiques □ Autres □
Date: Opérateur:

ÉTAT ACTUEL de CONSERVATION:

PROVENANCE: Date d'acquisition:

CONDITION JURIDIQUE:

FICHIER PHOTOGRAPHIQUE n°
BIBLIOGRAPHIE:

ANNOTATIONS:

COMME ÉQUIPEMENT DU MICROSCOPE: N° d'inventaire:

[258] Au-delà d'un porte-objets d'épaisseur = 1 mm.

31.4 - FICHE "CONDENSEUR"

31.4.1 - Longueur focale (f_k)

La méthode de mesure peut être le même que celle indiquée pour $\mathbf{f_{ob}}$ (§ 31.2.7), mais avec un avantage: le microscope de mesure (micrométrique) peut être le même sur lequel est monté le condensateur en examen. Il faudra seulement y placer un oculaire micrométrique et mesurer la valeur micrométrique des objectifs faibles.

Le microscope peut être disposé avec l'axe vertical; un miroir (plan!) sous le condensateur peut renvoyer vers le condensateur même l'image de l'objet éclairée, long 100 mm. Dans le calcul de la distance de 160 cm entre objet et condensateur il faut tenir compte du repliement du chemin optique opéré par le miroir.

Le premier foyer du condensateur est en général très près du diaphragme d'ouverture, au moins avec ceux à forte ouverture. Autrement, on peut identifier ce foyer en tournant le frontale du condensateur vers une source éloignée au moins quelque mètre et en cherchant l'image créée par le condensateur même.

31.4.2 – Ouverture numérique NA_k

Une fois obtenue la valeur à sec, on calcule la valeur en immersion (où cela est prévu) en multipliant par 1,51.

Pour calculer **sen** α on mesure α avec une méthode semblable à celle utilisée pour le champ angulaire de l'oculaire (§ 31.3.3). On allume la microlampe incorporée (diaphragme de champ fermé à moitié) ou bien on adresse le miroir vers une forte lampe à filament concentré, éloignée une vingtaine de centimètres. On cherche avec un verre dépoli la position du point le plus étroit du faisceau émergent du condensateur. À une distance **l** de ce point (une paire de cm), on pose maintenant le verre dépoli, perpendiculaire à l'axe, et on mesure le diamètre Ø du faisceau; on peut appuyer le dépoli sur la platine et baisser le condensateur dans le cas qu'il existe pour lui une focalisation. Encore une fois, le rapport:

$$Ø / 2\mathbf{l} \qquad \text{est égal à} \quad \text{tg } \alpha.$$

Souvent, le bord du faisceau produit par le condensateur n'est pas net et la mesure est difficile; d'autre part, cette difficulté correspond à l'impuissance de définir l'ouverture d'un système convergent affecté de trop d'aberrations: cette condition est significative et elle doit être notée.

31.4.3 – Distance frontale en air (§ 21.3) et distance de travail

On adresse le condensateur (démonté) vers une petite source, lointaine au moins quelque mètre, même le soleil. Diaphragme d'ouverture tout ouvert. Si le statif possède un miroir sous le condenseur, on peut laisser le condenseur à sa place (en le focalisant jusqu'à toucher la surface inférieure du porte-objet, voir dessous) et se servir du miroir pour l'adresser vers la source.

On appuie sur la lentille frontale (ou sur la platine, si le condenseur peut être soulevé jusqu'à toucher la préparation) un porte-objet d'épaisseur 1 mm, éventuellement avec lamelle. On cherche avec un verre dépoli (perpendiculaire à l'axe) la position de l'image de la source.

La distance entre cette image et la surface supérieure du porte-objet est la valeur cherchée. Pour mesurer telle distance on peut procéder ainsi: appuyer sur la platine une préparation quel-

conque, d'épaisseur 1 mm; focaliser l'objectif sur sa surface supérieure; toujours en regardant dans l'oculaire, minimiser l'image de la source lointaine en focalisant le condensateur. À ce point, avec un calibre, mesurer la distance entre la surface supérieure de la préparation et celle du condensateur.

Les mesures décrites donnent la "distance frontale image" idéale, avec un objet à l'infini, compte tenu de la présence de la préparation.

La distance de travail (WD) effective, avec une microlampe "normale", se mesure de la même façon: il suffit de mettre n'importe quelle ampoule (allumée), si possible avec filament concentré, à la place où on suppose que la source soit prévue dans l'usage normal. Si la microlampe existe déjà et si elle est fixée à l'instrument d'une manière stable, ou incorporée dans son statif, tout est plus simple: il suffit de l'allumer et fermer en partie le diaphragme de champ. Focaliser le condenseur pour voir net l'image de ce diaphragme.

31.4.4 - Correction

Même quand un condensateur est déclaré "achromatique" et/ou "aplanétique", la correction est partielle. Il faut donc une certaine expérience et la comparaison avec d'autres condensateurs pour arriver à un jugement fondé.

Les "résidus d'aberrations" sont tous ceux ne pas corrigés par les versions achromatiques et/ou aplanétiques. Cette indication est complémentaire de la précédente.

On évalue ces résidus en observant une préparation avec un objectif faible, le diaphragme de champ bien fermé et le diaphragme d'ouverture tout ouvert. Focaliser le condenseur en haut et en bas et observer les halos colorés autour des bords du diaphragme de champ.

31.4.5 - Versions spéciales

Elles se reconnaissent en général par la notation, par la présence d'un revolver pour diaphragmes, etc.

Celles pour champ noir peuvent ressembler à celles pour contraste de phase avec diaphragme annulaire unique. Si cependant le champ noir est à immersion, le faisceau émergent du condensateur résulte complètement oblitéré, à cause de la réflexion totale, quand on utilise le condensateur "à sec", c'est-à-dire quand sa lentille frontale est au contact avec l'air.

Les versions "à grand champ" se reconnaissent justement par le fait de fournir, avec une microlampe normale, un champ éclairé de diamètre supérieur à environ 5 mm.

Les versions "à longue focale" doivent avoir une distance frontale, comme sur définie, supérieure à 5 mm. En général elles se reconnaissent par le fait de présenter une très grande lentille frontale de diamètre supérieur à 10/15 mm.

Les versions pour radiation polarisée doivent être contrôlées en observant leur image entre Nicol croisé à travers un fort objectif (à sec ou HI selon le type de condensateur) et un microscope auxiliaire ou une lentille d'Amici; diaphragme d'ouverture tout ouvert et diaphragme de champ presque fermé. On doit observer une croix de Malte régulière, avec les quatre secteurs clairs égaux et sans couleurs.

Si on remarque des taches claires ou colorées irrégulières il faut vérifier qu'elles ne soient pas dues à l'objectif: il suffit de desserrer la vis de fixation de ce dernier et de le tourner autour de son axe.

31.5 - MICROSCOPES STÉRÉOSCOPIQUES

Pour beaucoup d'aspects (oculaires, statifs, microlampes, etc.), tout ce qu'a été dit reste jusqu'à présent valide aussi pour les microscopes stéréoscopiques, et d'ailleurs quelque espace spécifique est prévue dans les fiches.

En ce qui concerne le statif (§ 29.13), la structure est plus variée et certaines particularités seront décrites chaque fois dans l'espace réservée aux notes. Par ex.: "Statif à bras mobile, avec colonne haute.... avec diamètre..... avec bras horizontale de longueur .... ", etc.

Ou: "Système éclairant pour épiscopie et/ou diascopie, pour fond clair (FC) ou fond noir (FS) avec faisceau épiscopique coaxial ou oblique", etc.

À la rubrique "Platine" on peut décrire, au-delà de la véritable platine, qui coïncide souvent avec le pied de l'instrument, la plaque d'appui, d'habitude carrée ou circulaire, amovible, opaque ou transparente, souvent utilisable sur les deux faces, ou bien: platine à rotule, etc. Parfois, sont prévues des véritables platines à chariot, ou tournantes et centrables, ou des simples guide-objets.

31.5.1 – Mesure de la focale de l'objectif (f_{ob})

La méthode à utiliser peut être le même décrite au § 31.2.7. Problèmes spéciaux peuvent se présenter:

- la fixation de l'objectif stéréoscopique, sauf exceptions très rares, sera différente de celle des objectifs normaux. En plus, dans les systèmes Greenough (§ 29.5), les objectifs sont fixés rigidement, à couples, sur un même support, parfois deux ou plus couples, encore sur un support commun, qui peut servir de revolver. Les deux objectifs de chaque couple sont en outre convergents. Il y aura donc le problème, simplement mécanique, de soutenir l'objectif en examen dans la position correcte, devant l'objectif du microscope micrométrique;
- la distance de 160 cm entre l'"objet long 100 mm" et l'objectif en examen sera évidemment mesurée à partir du foyer supérieur de l'objectif même. Cependant, étant donnée la focale élevée des objectifs stéréoscopiques, il faut définir bien la position de ce foyer: on adresse l'objectif en examen avec le côté objet vers un objet éloigné au moins quelque dizaine de mètres; on identifie l'image de tel objet et on en mesure la distance d'un point aisément accessible (bord de la monture, par ex.);
- étant donnée la focale élevée des objectifs stéréoscopiques, l'image de l'objet long 100 mm peut être trop grande pour un microscope micrométrique. On peut utiliser à sa place un oculaire micrométrique POSITIF ou une lentille de grossissement munie de graduation millimétrée, du type des "compte fils".

31.5.2 – Mesure de l'ouverture numérique (NA)

Étant donnée la longue focale des objectifs stéréoscopiques et les basses valeurs de leur NA, souvent inférieurs à 0,1, la méthode de l'apertomètre (§ 31.2.2) peut ne pas être applicable: difficulté valide aussi dans le cas des objectifs normaux d'agrandissement inférieur à 10.

La méthode suivante est très pratique.

Mettre au point correctement le microscope pour les différents agrandissements. Mesurer la distance libre de travail (WD) entre la surface extérieure de la lentille frontale de chaque objectif et l'objet. Enlever l'oculaire et à sa place mettre une ampoule électrique avec filament concentré (ou un LED), du type normalement utilisé dans les microlampes. Appuyer sur la lentille frontale de l'objectif un double décimètre ou, mieux, un micromètre oculaire, par ex. 10 mm/100 parties

recouvert de papier calque. Avec une lentille d'agrandissement on peut mesurer le diamètre Ø du faisceau émergent de l'objectif, c'est-à-dire du petit cercle éclairé sur le papier calque.

Le rapport Ø/2 WD nous donne **tg** α, duquel on peut calculer **sen** α= NA.

31.5.3 - Aberrations (§ 29.10)

Pour évaluer les aberrations d'un objectif stéréoscopique on tienne présents les faits suivants:

- les objectifs des systèmes Greenough (§ 29.5) travaillent avec l'axe pas perpendiculaire au plan de la platine. Pendant l'observation d'un réseau ou autres objets plans, il faut donc évaluer les aberrations seulement sur un diamètre sagittal, parallèle au plan médian de l'instrument. Aussi la mesure de l'agrandissement ou de l'index de champ, le parcentralité entre les deux objectifs (§ 29.4.1), etc. doivent être évaluées sur le diamètre sagittale, en mettant au point sur lui.
- Les objectifs partiels dans les systèmes CMO (§ 29.7) sont donnés par des régions excentriques d'un seul objectif. En conséquence, au centre du champ visuel, la présence de coma, astigmatisme et chromatique latérale (CVD) est normale. Il faut cependant, pour conclure que l'alignement est correct, que les figures allongées données par ces aberrations (queues de la coma, focalines astigmatiques, etc.) soient parallèles ou perpendiculaires par rapport au plan médian et symétriques par rapport au plan même; ceci se contrôle en comparant les images dans les deux oculaires.

31.5.4 – Objectifs "zoom" (§ 29.9)

Si les objectifs stéréoscopiques sont pancratiques (zoom), les valeurs de M_{ob}, NA, etc. peuvent être mesurées aux deux extrêmes de la course du zoom.

La mesure va répétée de toute façon pour chaque position du changeur d'agrandissement, si présent (§§ 29.5.3 et 29.7.3).

S'il y a des lentilles additionnelles (§ 29.8), toutes les mesures vont répétées avant et après l'introduction de la lentille. Normalement, les aberrations au centre du champ empirent beaucoup après l'addition de telles lentilles.

31.5.5 – Lentille de tube

Beaucoup de stéréo-microscopes, surtout du type CMO, possèdent une lentille de tube (§ 29.7).

Pour en mesurer la focale ($\mathbf{f_t}$), voir le § 31.1.2. La mesure est souvent possible en élevant un oculaire et dirigeant le coté haut du tube vers le soleil ou une lampe lointaine.

32 – VÉRIFICATIONS TECHNIQUES - COMMERCIALES

Dans le § 31 qui précède ("Le Relèvement des caractéristiques") on a décrit une méthode possible de mise en fiche des microscopes et de leurs accessoires, mise en fiche visant au relèvement des principales caractéristiques techniques de chaque pièce et à son catalogage en vue d'un inventaire, d'une récolte, d'un musée.

Des données introduites dans les fiches il devrait résulter clair en quel point de l'évolution technique de la microscopie un instrument donné doive être assigné, à quel constructeur (dans le cas qu'il soit anonyme) il soit à attribuer, lesquelles soient les compatibilités et les interchangeabilités d'une pièce particulière avec d'autres, quel soit la composition originaire probable d'un équipement d'accessoires plus ou moins disparus, etc.

L'approche du chapitre précédent est donc essentiellement technique-historique-muséale.

Dans le présent chapitre par contre on aborde le même sujet, mais du point de vue technique-commercial, c'est-à-dire on cherche de mesurer les caractéristiques techniques d'un instrument ou de ses parties, en vue d'une évaluation commerciale. En particulier on tâchera de relever la valeur technique de chaque pièce, et précisément:

1) ses défauts ou qualités **individuelles** (défauts ou qualités de fabrication de chaque pièce particulière, comme elle arrive du distributeur);

2) ses défauts ou qualités **générales** (données de projet d'une entière série de pièces nominalement égales).

De l'analyse de ces données il sera possible de définir la qualité technique du projet d'un instrument ou de chacune de ses parties, l'engagement du constructeur (qualité des matériels, tolérances de fabrication, etc.), et le pourcentage des pièces défectueuses, (et par suite la diligence des contrôles de qualité).

En principe, cet essai technique-commercial s'adresse aux instruments nouveaux, à peine sorti des stocks du producteur. En conséquence, ils ne seront pas examinés les défauts liés à l'usure (par ex., augmentation des jeux dans un mouvement, durcissement du même par solidification des lubrifiants, ternissures des lentilles par dépôt d'aérosol ou de poussière, etc.), mais plutôt ceux liés au transport (chocs, humidité et température de magasinage), etc.

Les fiches décrites dans le § 31 représentent une base de départ pour l'essai technique d'un microscope et à elles on fera souvent référence, justement pour les éléments techniques contenus en elles et pour les relatives méthodes de relèvement. En outre, pour tout le développement théorique sous-jacent, on fera référence aux chapitres précédents de ce manuel.

Encore une fois, on a eu soin d'indiquer pour le relèvement des différentes caractéristiques la technique la plus simple, exécutable avec des matériels aisément trouvables.

32.1 - TUBE PORTE-OCULAIRES (§§ 24 et 25)

ESSAIES MÉCANIQUES

32.1.1 - Distance inter-pupillaire (§ 24.1.3) - Mécanisme de régulation

Dans le cas des tubes bioculaires, il faut vérifier la présence de jeux, duretés, etc. (§ 32.2). La perte éventuelle du centrage réciproque entre les deux champs visuels quand on déplace un oculaire par rapport à l'autre rentre parmi les essais optiques; voir le § 32.1.11.

32.1.2 - Mécanisme de fixation

Quand le tube est interchangeable, contrôler que son mécanisme de fixation soit pratique, rigide et répétitif. La répétitivité se vérifie en portant au centre du champ visuel un point bien reconnaissable d'une préparation; on démonte et on remonte le tube plusieurs fois et on vérifie que le point désigné revient où il était avant. Le contrôle est plus facile avec un oculaire micrométrique, en portant le point désigné à coïncider avec un certain trait de la graduation.

La même répétitivité doit se vérifier entre les différents tubes éventuellement présents dans l'équipement de l'instrument.

32.1.3 - Jeu

Nous parlons du jeu entre l'oculaire et son logement, du à des différences de diamètre. Telles différences ne devraient pas dépasser 0,1 mm et de toute façon elles doivent être notées. Pour la mesure, il peut suffire un calibre normal.

C'est un avantage spécial à considérer (peu diffus, malheureusement) la présence de coupes ou d'autres astuces qui permettent à l'oculaire d'entrer dans le tube "à frottement doux", c'est-à-dire avec une friction suffisante à ne pas le faire sortir à cause de la gravité. Ceci évite une chute quand le tube est démonté et renversé.

32.1.4 - Logement

Contrôler que tous les oculaires de l'équipement pénètrent à fond dans la partie supérieure du tube, spécialement certains oculaires spéciaux, de dessin, spectroscopiques, etc.

32.1.5 - Centrage

Nous parlons du centrage par rapport à l'objectif. On monte dans un ou dans les deux logements des oculaires un télescope de centrage: il peut suffire un "microscope auxiliaire", de ceux-là utilisés pour le centrage des diaphragmes annulaires du contraste de phase, pourvu qu'il soit muni d'un réseau à fils en croix centré, et pourvu qu'on tienne compte des jeux éventuels entre lui et le tube, comme ils se révèlent en remuant à la main le microscope auxiliaire même en différentes directions perpendiculaires à l'axe optique.

On s'assure que la pupille de l'objectif, entièrement éclairée par un verre dépoli ou par un bout de papier mince posé à la place de la préparation, soit centrée par rapport aux fils en croix. Les déviations de ce centrage soient mesurées et notées. Il faut répéter à ce point la mesure au moins quatre fois, en tournant de 45° ou de 90° le tube dans son logement, chaque fois en desserrant et en serrant l'éventuelle vis qui le bloque. On répète le contrôle pour tous les objectifs montés sur le revolver, et on note les différences relevées entre les différents objectifs.

La tolérance admise dans ce centrage est de 0,1 mm. Il faudra calibrer le télescope utilisé pour le contrôle: s'il contient un réseau gradué, on observe avec lui une graduation fine, par ex. un micromètre oculaire posé à une distance égal à la longueur mécanique du tube et on fasse le rapport habituel afin de calculer l'"équivalent micrométrique" du microscope auxiliaire ou du télescope.

32.1.6 - Parallélisme

Il faut contrôler si la surface d'appui du tube (par ex. le bord de la queue d'aronde, taillé sur le bras) est parallèle à la platine.

On peut utiliser un bon calibre ou, encore mieux, un auto-collimateur appuyé sur la même surface d'appui. Le miroir du collimateur sera appuyé sur la platine. Si le miroir est "de surface", on suppose que la surface spéculaire soit parallèle à celle postérieure (vérifier avec un micromètre). Une faute éventuelle dans ce parallélisme se neutralise en exécutant quatre mesures avec quatre

positions différentes du miroir obtenues en le tournant dans son plan, perpendiculaire à l'axe, de 90° degrés chaque fois. On calculera la moyenne des quatre mesures.

Attention à l'adhérence du miroir à la platine: ça suffit un pépin de poussière pour simuler des fautes de construction inacceptables.

La tolérance reconnue dans ce contrôle est de 5'; celle-ci est dépassée avec un pépin de 0,03 mm sous le bord d'un miroir de 2 cm de diamètre (erreur double si le pépin est au centre).

32.1.7 - Rigidité

Le tube ou le bras qui le porte peuvent résulter trop flexibles, et par suite porter à une perte appréciable de mise au point ou à un déplacement de l'image à la suite de l'application d'une force parallèle ou perpendiculaire au tube même. On mesure la valeur de cette force capable de produire des effets sensibles si appliquée en points différents; le bout supérieur du tube sera plus sensible par respect à d'autres parties.

Telle force ne doit pas être inférieure à 100 g.

ESSAIES OPTIQUES

32.1.8 – Parcentrage et parfocalité

Parcentrage - Si l'instrument est équipé de deux ou plus tubes interchangeables, il faut contrôler que le centrage (32.1.5) soit le même pour tous. On observe à telle fin un point bien défini d'un objet à fort contraste comme un micromètre objet; le point observé soit au centre du champ et on l'observe avec un oculaire micrométrique. Noter les différences éventuelles qui se relèvent entre un tube et l'autre. La tolérance est encore de 0,1 mm dans le plan de l'image intermédiaire, c'est-à-dire du micromètre oculaire (d'habitude un trait de la graduation).

Parfocalité - en changeant le tube, en supposant de faire la preuve avec tous les oculaires de l'équipement[259], la mise au point ne doit pas changer d'un tube à l'autre. Mesurer les différences éventuelles en lisant la position du bouton micrométrique dans les positions de meilleur foyer correspondantes aux différents tubes. Utiliser un objectif d'agrandissement moyen (à noter). Comme pour les objectifs, on considère acceptable la parfocalité qui permet d'identifier encore l'image après l'échange du seul tube.

Il est bien répéter le contrôle de la parfocalité entre les tubes avec chacun des objectifs de équipement, sans cependant faire une comparaison entre les différents objectifs, étant donné que ceci retombe dans le cas du § 32.3.4, sous décrit. Il y a à dire cependant que la meilleure manière de juger si une erreur de parfocalité entre les tubes est acceptable, c'est justement de vérifier si quelqu'un des tubes fait perdre la parfocalité entre les objectifs.

32.1.9 - Aberrations

On observe un réseau[260] avec un faible objectif et un oculaire avec le plus grand index de champ possible. D'un tube à l'autre on peut observer des petites différences dans les aberrations extra-axiales, surtout chromatique latérale. Prendre note (voir le § 31.2.9).

---

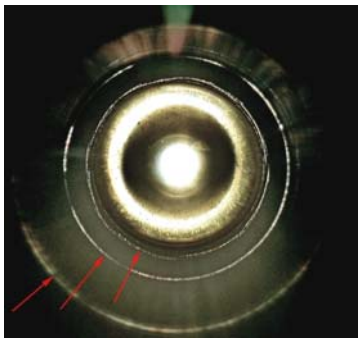
[259] La longueur optique du tube dépend aussi de la position de l'image intermédiaire, qui est liée à la structure de l'oculaire. Oculaires ne pas prévus par le constructeur donneront aisément une perte de mise au point et de parfocalité.

[260] Constitué par des lignes opaques et transparentes alternées, avec pas de 20 à 100μ (voir le § 19.5.4).

32.1.10 - Traitements (voir aussi les §§ 17.1.2 et 19.5.1)

Même sans un photomètre, il est possible d'apprécier la qualité des éventuels traitements anti-réfléchissants présents sur les surfaces des lentilles et des prismes par une comparaison avec des éléments avec des caractéristiques connues et avec des éléments dépourvus de traitement, par ex. un porte-objet. On rappelle que l'intensité des reflets est d'autant plus grande que plus fort est l'angle d'incidence[261] et autant plus grande qu'est élevé l'index du verre. En outre un bon traitement doit avoir une couleur tendancielle violet-pourpre, c'est-à-dire le moindre de réflexion dans la région "verte" du spectre optique (voir aussi le § 32.6.3). Traitements d'autre couleur, fréquents dans les produits orientaux, sont à contester.

32.1.11 – Réflexions internes



Même la lumière réfléchie par les surfaces internes du tube ou par les montures des lentilles ou prismes, ou par les surfaces latérales des mêmes composants optiques, peut contribuer à la perte de contraste.

On dispose le système éclairant comme pour une observation normale, mais avec la plus grande luminosité possible (éliminer tous les filtres, ouvrir tous les diaphragmes, voltage de la lampe à la limite, etc.). On regarde dans le tube, après avoir enlevé l'oculaire, en observant surtout les surfaces latérales.

On remarquera comme même une surface noire "opaque" ou "satinée" peut donner des reflets appréciables quand la lumière est rasante, comme il arrive souvent à l'intérieur d'un tube. On remarquera comme aussi beaucoup de reflets disparaissent en fermant les diaphragmes, mais celui-ci est justement l'index de peu de soin de la part du constructeur: les "reflets" doivent être considérés dans toutes les possibles conditions d'usage.

32.1.12 - Congruence

Dans les tubes bi- ou tri-oculaires il faut contrôler la congruence, c'est-à-dire le centrage réciproque des deux ou trois images: un point au centre du champ visuel d'un oculaire doit rester centré dans les autres. On contrôle mieux ce point avec un oculaire micrométrique.

On tolère en général une erreur maximale égale à 1/50 du diamètre du champ visuel. On contrôle la constance de la congruence pendant qu'on règle la distance pupillaire. En outre, il faut tourner chaque oculaire dans son logement, autour de son axe, pour révéler des éventuelles fautes de centrage intrinsèques à l'intérieur des différents oculaires. Répéter le contrôle pendant la rotation des éventuels embouts qui déplacent axialement les oculaires pour la compensation des anisometropies, etc.

32.1.13 – État des surfaces optiques

On observe, en visant le tube dépourvu d'oculaires vers une lampe, les traces éventuelles de poussière, saleté, décollements de surfaces collées, fêlures, corps étrangers, patines de dépôt d'aérosol, etc. Ces défauts peuvent se présenter pour toutes les surfaces des lentilles et des prismes contenu dans le tube, mais il est bien observer aussi les surfaces mécaniques (excès de graisse, détritus, etc. - §§ 17.1.4, 19.5.1 et 27.6). Dans certaines limites, on peut exécuter cet examen avec le tube monté sur le microscope: faible objectif, diaphragme d'ouverture plutôt fermé et bien éclairée, un microscope auxiliaire à la place de l'oculaire ou observation directe, sans oculaire.

---

[261] Par suite sur les bords des lentilles les plus recourbées, de grande puissance.

32.1.14 - Vignetage

On doit contrôler, avec toutes les combinaisons prévues «objectif - tube - oculaire - filtres», qu'il n'y ait pas des ombres quelque part au bord du champ visuel. Tel phénomène dépend d'un mauvais dimensionnement des prismes, lentilles ou diaphragmes, ou de graves fautes d'alignement. Il résulte plus perceptible avec les objectifs forts.

Ce défaut doit toujours être contesté.

32.2 – MOUVEMENTS MACRO - et MICROMÉTRIQUES (§ 27.2.2)

La majorité des contrôles suivants s'applique soit au mouvement macrométrique qu'à celui micrométrique, soit dans le cas que la partie mobile soit représenté par le tube ou par le bras (instruments de construction moins récente) ou, le plus souvent, par la platine ou par les deux.

Les mêmes contrôles s'appliquent, en outre, même aux autres mouvements: translations ou rotations de la platine, mise au point du condensateur, régulation de la distance inter-pupillaire, régulations dans la microlampe, etc.

32.2.1 - Résolution ou vitesse (voir le § 26.5.6)

On indique avec un de ces termes l'étendue du déplacement (exprimé en μ, mm, degrés, etc.), causée par une rotation du bouton de commande d'un tour complet.

Pour la vis micrométrique on demande une valeur pas supérieure à 200 μ / tour. Pour la macrométrique, il n'y a pas des règles, mais ce mouvement est souvent trop rapide: un démultiplicateur est souhaitable.

32.2.2 – Fins de course (voir le § 26.5.5)

La majorité des mouvements, surtout ceux linéaires, a une amplitude limitée et quelque chose doit empêcher que ces limites soient dépassées. Vérifier que ces dispositifs de fin de course soient:

-- positifs (qu'ils ne se déforment pas avec l'actionnement normal du bouton);

-- réglables, au moins dans certains cas, de façon à éviter des chocs entre les parties qui ne doivent pas se toucher (objectif-préparation / condensateur-préparation / guide objets-objectif, etc.). Si ils ne sont pas réglables, contrôler lesquels sont les chocs possibles, et par suite si la position de la fin de course est telle à éviter ces chocs (noter); souvent, est réglable la fin-course inférieure de la vis macrométrique (moindre distance préparation-objectif); le manque de cette régulation doit être considéré un défaut;

-- sensibles, c'est-à-dire si le praticien est immédiatement averti quand il parvient à la fin-course par une augmentation brusque de la résistance;

-- sûrs, c'est-à-dire si, une fois atteinte, une action normale du bouton n'est pas capable de provoquer des dégâts; éventuellement, vérifier la présence de frictions capables d'absorber le mouvement du bouton au-delà des limites utiles: dans ce cas, le mouvement "glisse" sans décharger l'effort sur la fin de course (§ 26.5.4).

32.2.3 - Hystérésis (voir le § 26.5.3)

Elle consiste dans un retard dans la réalisation d'un déplacement par rapport à l'application de la commande (rotation du bouton, levier, etc.) qui se présente spécialement au moment de l'inversion de la commande. On distingue l'hystérésis du simple retard (voir le § 32.2.6) pour la différente cause, qui réside dans les jeux (§ 26.5.2) dans le cas de l'hystérésis et dans la flexibilité, dans le cas du retard. En outre, un mouvement avec de l'hystérésis peut commencer en retard mais

cesse au cesser de l'actionnement; un mouvement avec "retard" commence ET CESSE avec un certain retard par rapport à l'actionnement.

On constate l'hystérésis en inversant plusieurs fois le mouvement du bouton et en observant si on inverse simultanément la mise au point, le mouvement de l'objet (dans une platine à chariot), la focalisation du diaphragme de champ (dans un condensateur), etc. L'hystérésis s'exprime comme mouvement de rotation qu'il faut appliquer à un bouton à la suite d'une inversion du sens de rotation, avant d'obtenir l'inversion du mouvement relatif.

On doit exiger que l'hystérésis ne soit pas sensible. Vérifier aussi que le constructeur n'ait pas prévu un quelque mécanisme de reprise des jeux à disposition de l'utilisateur pas expert; tels mécanismes sont souvent accessibles seulement en démontant l'instrument.

32.2.4 - Dureté (voir le § 26.5.4)

Ce terme indique l'effort demandé pour réaliser un mouvement. Il doit être très petit, surtout pour les mouvements les plus fins (micrométrique, platine), mais on ne croie pas qu'il doive être le plus petit possible. En effet, un mouvement trop coulissant ("desserré") se déplace au moindre choc involontaire ou pour œuvre des normales vibrations ou de la simple gravité: ceci est important dans le cas de la mise au point (tube, platine, condensateur, etc.), étant donné que ces mouvements sont en général verticaux et ils sont sollicités par la gravité d'une manière stable. Il est bien, une fois mis au point un objet, abandonner l'instrument pour une heure et puis vérifier que rien se soit déplacé.

D'autre part, un mouvement trop dur, au-delà à être inconfortable, sollicite trop quelques parties mécaniques et il accélère l'usure.

Avec un peu d'expérience, on apprend à évaluer le meilleur compromis; après avoir mis au point une préparation avec un objectif moyen, on tapote avec les doigts sur différentes parties du statif (tube, revolver, platine, condensateur, etc.) et on contrôle que rien ne se déplace (position ou mise au point de la préparation, du condenseur, etc.).

La dureté est souvent réglable au moyen de frictions variables ("frein progressif", § 26.5.4), parfois accessibles aisément de la part du praticien inexpérimenté, parfois accessible seulement après démontage. Il faut contrôler leur fonctionnalité, même sur la base des indications du constructeur.

32.2.5 - Rigidité (voir aussi le § 26.5.1)

Quand une pièce mobile du statif se déplace d'une façon permanente sous l'influence de facteurs extérieurs normaux (la pression d'un doigt par ex.) il peut se traiter de "dureté" insuffisante d'un mouvement (voir plus haut), de jeux dans les guides, etc.

Si le déplacement est par contre élastique, c'est-à-dire réversible au cesser de la pression exercée, il peut se traiter de flexibilité excessive ou rigidité insuffisante de certaines parties du statif.

Les déviations élastiques doivent être toujours modestes, mais elles sont inévitables. Celles permanentes, supposé qu'elles ne soient pas éliminables avec une régulation des frictions éventuelles, doivent par contre être considérée comme un défaut inacceptable.

On peut évaluer quantitativement les déviations élastiques en appliquant à la partie en examen (tube, platine, condensateur, etc.) une force croissante jusqu'à quand on perçoit, avec un objectif moyen, une variation de la mise au point, ou de la position de l'image, ou du condensateur, etc. Telle force ne devrait pas être inférieure à 50 g.

On peut accepter la même limite pour les déformations permanentes.

On peut appliquer aussi, en points différents et en directions différentes, une force de 100 g à la pièce en examen et mesurer de combien de degrés il faut tourner le bouton correspondant pour annuler l'effet de la déformation.

32.2.6 – Incohérence ou retard (§§ 26.5.3 et 32.2.3)

Il s'agit d'un prolongement ou un retard d'un mouvement au cesser de l'actionnement du bouton, et éventuellement aussi d'un retard au début du mouvement.

Il s'agit d'un phénomène rare dû à l'élasticité de quelque partie mécanique qui résulte peut-être freinée par la viscosité des lubrifiants.

S'il est aisément perceptible, ce défaut doit être considéré de toute façon inacceptable. On le vérifie comme d'habitude avec un objectif moyen (40:1 par ex.) et pour tous les mouvements existants.

32.2.7 – Répétitivité (§ 26.5.3)

Le mouvement doit suivre sans retards et sans déviations la commande: si on actionne un certain bouton en avant et en arrière de la même ampleur, tout doit revenir comme avant. Les déviations trop sensibles sont inacceptables.

On peut quantifier le défaut en mesurant l'angle dont il faut tourner un bouton pour revenir dans les conditions initiales après avoir exécuté deux actionnements identiques mais de signe opposé.

À remarquer que le défaut de répétitivité peut "se propager", c'est-à-dire s'accroître chaque fois que le bouton est tourné en avant et en arrière du même angle: ceci arrive souvent dans les mouvements à friction (roulement de sphères, etc.), qui opèrent sans engrenages.

Seulement l'expérience peut dire jusqu'à quand cette propagation est acceptable.

32.2.8 - Déviations latérales

On appelle ainsi les mouvements non souhaités en direction différente (en général perpendiculaire) par rapport à celui désiré. On les observe souvent quand on inverse le sens de rotation d'un bouton.

Par ex., pendant qu'on focalise, l'image peut se déplacer latéralement ou, pendant qu'on actionne une platine à chariot, on peut perdre la mise au point.

Ces défauts sont dus à des graves défauts d'usinage mécanique, mais ils peuvent être tolérés jusqu'à quand ils deviennent fastidieux.

On contrôle surtout la perte de mise au point pendant les mouvements de la platine: si pour un mouvement en direction X (transversal) ou Y (sagittale) d'environ 20 mm (qui est la largeur utile d'un porte-objet) devient nécessaire une retouche de la mise au point, on doit le considérer un défaut inacceptable. On répète le mouvement dans un sens ou dans l'autre plusieurs fois, en soignant cependant que la préparation adhère bien à la platine (ça suffit un pépin de poussière).

En plus, il peut arriver que le porte-objet n'ait pas des faces parallèles. Ceci se révèle en inversant l'orientation de la préparation et en vérifiant si aussi le défaut s'inverse.

32.2.9 – Friction de décollement (§ 26.5.4)

Il s'agit d'une dureté d'un mouvement qui se baisse brusquement après le début du mouvement même. La cause est une friction rasante de décollement, qui se présente en général seulement dans les mouvements à coulisse. Elle peut arriver à cause d'un lubrifiant trop fluide (éviter les huiles).

Tel défaut doit être toujours dénoncé, dès qu'il résulte sensible.

32.2.10 - Amplitude

L'amplitude de chaque mouvement doit être toujours ajustée au besoin. Pour la vis micrométrique: au moins 2 mm; pour le macrométrique, au moins 20 mm. Pour la platine, au moins 20 × 40 mm; pour le condensateur au moins 10 mm (il doit toujours être focalisable le diaphragme de champ de l'illuminateur, avec des porte-objets d'épaisseur jusqu'à 1,5 mm).

32.3 – Le REVOLVER

Pour le revolver on peut rappeler les notions de jeu, répétitivité, dureté, etc. déjà discutées (§ 32.2). Autres problèmes sont par contre spécifiques du revolver.

32.3.1 – Orientation (§ 27.2.3)

Le revolver peut être tourné du côté de la colonne ou du côté opposé. La première disposition est très préférable étant donné que la préparation devient plus accessible.

Il peut être aussi préférable un revolver interchangeable, pourvu que ceci ne crée pas des autres problèmes (jeux, parcentrage insuffisant - voir dessous, etc.).

32.3.2 - Alignement

Les objectifs doivent être orientés de manière que leur axe optique coïncide avec l'axe du tube et de l'oculaire.

Une faute dans ce sens se révèle par la présence, au centre du champ visuel, d'aberrations extra-axiales (§ 13.2) et en outre avec un défaut de parcentrage (§ 19.1.4): si, en passant de l'objectif le plus faible au plus fort, la région au point du champ se déplace graduellement, toujours du même côté, il est probable que ceci dépende d'une orientation erronée du revolver.

Dans les cas les plus graves, on verra aussi que, entre deux points opposés diamétralement sur le bord du champ, le foyer est différent.

Un tel défaut doit être toujours contesté.

Avec la méthode indiquée dans le § 32.1.6, on peut avoir une mesure de l'orientation du revolver par rapport à la surface d'appui du tube: le collimateur doit être appuyé sur cette dernière surface, le miroir, du type "de surface", doit être appuyé sur le bord des trous de fixation des objectifs. La tolérance est la même du cas dont on a parlé au § 32.1.6. On peut donner un jugement approché aussi avec la simple méthode décrite dans l'art. n° 27 (en italien, pour le moment), dans ce site.

32.3.3 – Parcentrage (§ 19.1.4)

On doit exiger que, en passant, d'un n'importe quel objectif à toute autre, le centre du champ ne sorte pas du champ du nouvel objectif. En pratique, il faut être même plus exigeant.

Cela peut dépendre aussi des objectifs: si un objectif particulièrement défectueux montre le même manque de parcentrage par rapport aux autres en le déplacent d'un trou à l'autre du revolver, la faute est la sienne; si le défaut change substantiellement d'entité, et il résulte lié à un trou particulier du revolver, la faute est de ce dernier.

Même un revolver (interchangeable) pas du tout poussé dans sa position de travail peut donner un défaut de parcentrage.

32.3.4 – Parfocalité (§ 19.1.2)

On doit exiger que, après n'importe quel échange d'objectif, on reconnaisse la structure de l'objet et une retouche de la vis micrométrique soit suffisante. Sera éliminé un instrument qui, après l'échange de l'objectif, donne une image sans structure et impose une nouvelle mise a point au hasard.

Même ce défaut peut dépendre de l'objectif et, avec la même méthode indiquée pour le parcentrage, on peut distinguer si la cause réside dans l'objectif ou dans le revolver.

32.4 – La PLATINE (§ 26)

Même pour les platines, ils se présentent les problèmes généraux de tous les mouvements (§ 32.3). Autres aspects spécifiques sont les suivants.

32.4.1 – Pince fixe-préparation

C'est un organe délicat, source de beaucoup de difficultés. Voilà les principales.

-- Elle ne devrait jamais heurter l'objectif[262] pour toute l'amplitude de sa course et pour n'importe quelle rotation du revolver. Cette condition est rarement satisfaite.

-- Elle doit faire adhérer la préparation au plan de la platine; une faute dans ce sens se révèle avec une perte de mise au point pendant les mouvements de la platine, mais tel défaut peut dépendre aussi de la platine, c'est-à-dire de l'orientation de ses guides par rapport au plan d'appui de la préparation. On contrôle que entre préparation et platine ne se trouve pas quelque pépin de poussière. Si la perte de foyer ne résulte pas éliminable et le défaut est appréciable, il doit être signalé.

-- Doit être explorable au moins une zone de 20 × 40 mm à l'intérieur d'une préparation normale, sans contacts avec l'objectif.

-- Le bras mobile de la pince fixe-préparation ("patte d'araignée") est souvent mince, moins d'un millimètre, de façon à éviter que les objectifs le heurtent pendant la rotation du revolver; il est cependant flexible et ils peuvent se présenter deux cas: 1) le bras saute le bord de la préparation et il glisse au dessus d'elle, en se soulevant: la préparation n'est pas bien serré et le bras peut toucher les objectifs; 2) le bras s'enfonce entre préparation et platine et il soulève la préparation contre l'objectif. Éventualités de ce genre sont à contester.

-- Les deux bras de la pince ne tiennent pas la préparation adhérente à la platine. Ceci se révèle avec une perte de foyer pendant les mouvements de la platine. Exécuter des preuves répétées, chaque fois en ouvrant et en refermant la pince. Décrire les résultats.

32.4.2 – La surface

Le plan d'appui est tant plus estimable qu'il est plus dur. En ordre croissant de dureté on peut énumérer: matières plastiques, peintures, surfaces métalliques nues (cas rare), surfaces anodisées, le plus diffuses, matériels céramiques. Prendre note de l'état existant.

32.4.3 - Les dimensions

Une platine est tant plus confortable qu'elle est plus grande, mais on contrôle que cela n'aille pas au détriment de l'accessibilité au condensateur ou aux accessoires relatifs. En outre, si augmentent les dimensions, augmentent le poids, les sollicitations aux organes de mouvement, l'usure.

32.4.4 – La position des boutons

On consacre la plus grande préférence aux commandes baissées, que ne demandent pas le soulèvement du bras, et à celles coaxiales, qui demandent le moindre déplacement de la main pour passer de l'une à l'autre.

---

[262] On fasse la preuve avec un objectif fort.

32.5 – Le CONDENSATEUR (§ 21)

Les problèmes déjà décrits à propos de la focalisation de l'objet (§ 32.3) s'appliquent à la focalisation du condensateur, au mouvement de la lentille frontale éventuellement escamotable, aux vis de centrage, aux mouvements du diaphragme, etc.

32.5.1 - Focalisation

Avant tout on baisse le condensateur; on monte une préparation normale bien appuyé sur la platine et on la focalise avec un objectif moyen; puis on déplace le condensateur pour toute sa course et on contrôle qu'une perte de foyer n'arrive pas tout près de la limite supérieure: ceci signifie que la préparation a été soulevée par la lentille frontale du condensateur (supposé qu'elle ait été insérée, dans le cas qu'elle soit escamotable).

Si ceci arrive, actionner la vis éventuelle qui règle la fin-course supérieure du condensateur et s'assurer que le contact avec la préparation ait été éliminé (avant tout, baisser le condensateur, pousser la préparation contre la platine, la refocaliser, remonter le condensateur).

Si le contact avec la préparation ne peut pas être éliminé, ou s'il manque la vis de régulation, on vérifie encore que la lentille frontale soit insérée correctement ou visée à fond. Si on ne trouve non plus ici un remède, l'instrument va refusé. Si le défaut a par contre été éliminé, passez au contrôle suivant.

Avec un porte-objets d'épaisseur entre 1 et 1,5 mm il doit être possible de focaliser le diaphragme de champ de l'illuminateur éventuel prévu par le constructeur ou d'un microlampe externe à la distance de 10 - 20 cm. Une carence dans ce sens est encore une fois motif pour éliminer l'instrument.

Quand on extrait ou on dévisse la lentille frontale, il est très probable qu'il ne soit plus possible de focaliser le diaphragme de champ. Cela va par contre accepté.

En ce qui concerne la fin-course inférieure du condensateur, en général pas réglable, on vérifie qu'il n'interfère pas avec le miroir, avec la base du microscope ou avec les accessoires éventuels (porte-filtres, etc.) qu'ils s'y trouvent.

Autre contrôle: on mette au point une préparation mince (frottis, réseau) avec un fort objectif; on déplace en haut et en bas le condensateur, plusieurs fois. Naturellement, on vérifie que la mise au point de l'objet n'aille pas perdue. Dans le même moment, il sera possible de vérifier les défauts mécaniques sur cité (dureté, hystérésis, jeux, etc.).

32.5.2 – Diaphragme d'ouverture (§ 21.1)

On vérifie: que les lamelles soient dépourvues de signes de déformations et d'oxydation;
que le mouvement soit coulissant;
que les résistances éventuelles ne soient pas dues aux traces de lubrifiant sur les lamelles qui tendront à se coller entre elles et à se courber, en formant un dôme;
qu'en position "toutes fermées" les lamelles ne se courbent pas en proximité du trou central (le mouvement se durcit tout à coup avant la fin de course).

32.5.3 – Aberrations (§ 21.7)

Dans un condensateur "achromatique-aplanétique" les aberrations, au moins celles axiales, devraient être assez corrigées afin que le halo qui entoure l'image du diaphragme de champ ait une largeur beaucoup plus petite du diamètre de l'image même. Si ceci n'arrive pas, les corrections de ce condensateur sont à juger insuffisantes.

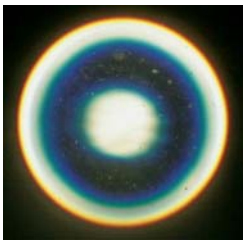
Le contrôle doit être fait avec un objectif moyen-fort et avec le diaphragme de champ tout

fermé.

Si le condensateur est du type “normal” ou “d’Abbe” il faudrait au moins exiger que, en focalisant le condensateur, le champ éclairé ne change pas appréciablement de couleur (variation de la température de couleur du fond de l’image).

Il est bien vérifier de toute façon l’aberration sphérique d’un condensateur, même si pas aplanétique: on tienne le diaphragme de champ tout à fait fermé, le diaphragme d’ouverture ouvert, la frontale du condensateur inséré, et le condensateur focalisé comme demandé par les principes de Köhler (image nette du diaphragme de champ); objectif avec NA plus grande de 0,8, focalisé sur une préparation plutôt transparente; microscope auxiliaire à la place de l’oculaire.

La pupille de l’objectif doit résulter éclairée uniformément, surtout si le condensateur est dénoncé comme aplanétique. Il est bien insérer l’immersion simple ou double, selon tout ce qui est prévu par l’objectif et par le condensateur.



Si, dans ces conditions, la pupille de sortie de l’objectif montre une ou deux zones sombres et/ou colorés, il faut dénoncer un résidu de chromatique et/ou de sphérique, acceptable seulement dans un condensateur d’Abbe de qualité modeste (fig. 89, § 21.7).

32.5.4 - Substitution

Quand le condensateur est remplaçable avec d’autres, on vérifie le répétabileté de la position[263] et de la focalisation, la sûreté des fixations, etc.

32.5.5 - Porte-filtres

On contrôle que l’insertion des filtres soit facile mais stable, de manière qu’ils ne puissent pas être jamais expulsés par les normaux mouvements des mains au dessous de la platine; On vérifie que les porte-filtres, quand ils sont extraits, n’interfèrent pas avec des autres organes, que ceux qui sont insérés ne s’heurtent pas à la fin-course inférieure avec les organes sous-jacents, que leur position soit bien définie par quelque mécanisme “d’arrêt”.

Si un porte-polarisateur tournant existe, contrôler les problèmes habituels: hystérésis, dureté, fin-course, jeux, etc. Il est important que, une fois atteinte l’extinction à Nicol croisé, telle condition ne vienne pas perdue par n’importe quel manœuvre qui n’intéresse pas directement le polarisateur même.

Si le condenseur est pour contraste de phase, contrôler avec le microscope auxiliaire qu’on puisse toujours centrer les diaphragmes annulaires.

32.5.6 - Centrage

On ferme le diaphragme de champ et on en observe l’image avec un faible objectif, sans préparation. Les halos dus aux aberrations du condenseur doivent posséder une symétrie circulaire autour du centre du champ. Si ceci n’arrive pas, il peut se traiter de:

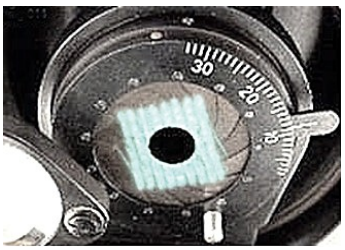
-- faute intrinsèque du condensateur; s’il est ainsi, en tournant le condensateur sur son propre axe, doit tourner l’asymétrie des halos; particulièrement sensible c’est l’asymétrie de la couleur: en focalisant le condensateur, les halos peuvent assumer une couleur différente en deux points diamétralement opposés; telles couleurs changent en changeant l’hauteur du condensateur;

-- faute d’alignement: si la microlampe (ou quelqu’un des miroirs intermédiaires) se trouve au dehors de l’axe du condensateur, l’image du diaphragme de champ apparaîtra déplacée en sens opposé et, pour la reporter en centre au champ, l’observateur sera emmené à décentraliser le condensateur; parfois cette faute, très fréquente, peut être mieux corrigée en déplaçant la microlampe ou quelqu’un des miroirs associés;

---

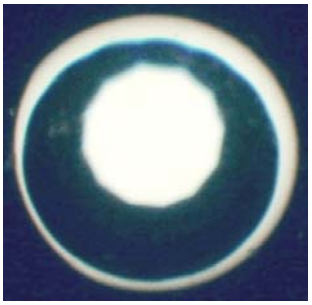
[263] Décelable par le centrage et la focalisation de l’image du diaphragme de champ.

-- faute de centrage de l'ampoule: l'image du filament sera décentralisée par rapport au diaphragme d'ouverture (le fermer, et l'observer par-dessous). Ceci peut arriver aussi avec des ampoules "précentrées"; essayer de remplacer l'ampoule; noter les résultats.



Ces fautes d'alignement devraient être inadmissibles, mais elles se vérifient malheureusement aussi dans des instruments de grande valeur.

Il peut arriver encore que le condensateur ne soit pas centré; dans ces cas devient plus critique le centrage du système éclairant - les contrôles relatifs (voient dessous) devront être plus urgents.



On peut exécuter un autre contrôle utile sur le centrage du diaphragme d'ouverture: on observe la pupille de l'objectif avec un microscope auxiliaire; on insère un fort objectif et la lentille frontale du condensateur; en manœuvrant le diaphragme d'ouverture, on contrôle le centrage de son image par rapport à la pupille même; en focalisant le condensateur, ce test peut devenir très sensible.

Il pourra arriver que, même à la suite d'un bon centrage du diaphragme de champ, c'est-à-dire de son image, il résulte décentralisé le diaphragme d'ouverture; il n'est pas donc possible centrer ce dernier en déplaçant le condensateur étant donné que cela signifierait décentraliser l'image du diaphragme de champ. Contester cette situation que l'utilisateur ne peut pas en général remédier.

32.6 – L'OBJECTIF (§§ 3, 13, 16, 18.4 et 19)

En premier lieu il faut vérifier le pas de la vis de fixation, qui est souvent le pas "anglais", "standard" ou "RMS" (§§ 19.1.1, 31.1.4 et 31.2.12), les duretés éventuelles ou les jeux qui se relèvent pendant qu'on vise l'objectif dans le revolver, les signes de chocs et chutes, etc.

Puis on vérifie la longueur mécanique de l'objectif - Lo - (§§ 19.1.2 et 31.2.3), qui est préférablement selon les règles DIN (45 mm).

Il est bien aussi vérifier (observation avec un microscope stéréoscopique) que la surface extérieure de la lentille frontale soit toujours légèrement rentrante par rapport au bord de la monture métallique, qu'elle soit exempte d'égratignures, saleté, etc. Contrôler l'absence d'égratignures aussi sur la pointe de la monture métallique, la quelle chose dénoncerait un usage impropre de l'objectif dans le passé.

32.6.1 – Reflets internes (§§ 17.1.2, 17.1.3, 19.5.5 et 32.1.10/11)

On observe l'intérieur de l'objectif au moyen d'un microscope auxiliaire; on suppose le microscope en examen correctement mis au point sur une préparation plutôt transparente. Avec le diaphragme d'ouverture tout ouvert (pupille toute éclairée) il est possible de révéler les reflets sur les surfaces internes et sur les montures des lentilles. Une évaluation quantitative de tels reflets n'est pas facile, étant donné qu'elle suppose une mesure photométrique sur différentes zones du champ visible dans le microscope auxiliaire. Globalement, les reflets au dehors de la pupille de l'objectif ne devraient pas contenir un flux total supérieur à 1% du flux qui traverse la pupille.

Un peu d'expérience et une comparaison avec des objectifs analogues d'autres constructeurs peuvent permettre une évaluation utile (voir la figure à la pag. 425).

Avec le même moyen on peut exécuter des autres contrôles. On ferme le diaphragme d'ouverture et/ou le diaphragme de champ de façon à éclairer seulement une petite partie de la pupille; s'il est possible, en déplaçant quelque miroir dans le système éclairant ou la microlampe, on porte la région éclairée sur les bords de la pupille.

On peut révéler ainsi quelques défauts constructifs (bulles d'air dans le verre, décollements, fêlures, corps étrangers, mauvaise propreté des lentilles, etc.).

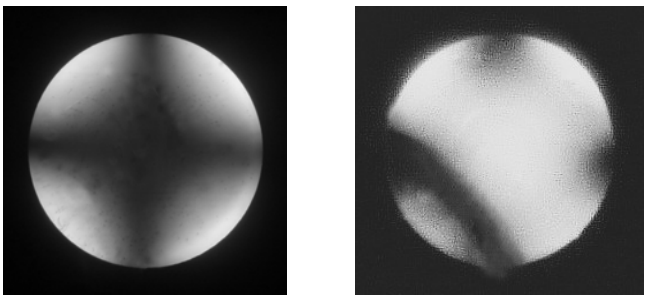
Dans ce même site, voir aussi les articles n° 18 (en français) et 41.

32.6.2 – Tensions internes (§ 19.5.5, art. n° 7 et "Introduzione alla microscopia in radiazione polarizzata")

On répète l'observation décrite dans le paragraphe précédent avec la pupille toute éclairée (avec un condensateur d'ouverture pas inférieure à celle de l'objectif en examen), mais en radiation polarisée. À cette fin, monter un filtre polarisateur sous le condensateur ou dans l'illuminateur et un autre sur l'objectif, si possible tout de suite au dessus de lui, en évitant les autres parties interposées. Aucune préparation sur la platine. En tournant un des filtres autour de l'axe optique, chercher la meilleure extinction (la moindre luminosité du champ).

Les tensions internes se révèlent comme des taches nuancées irrégulières, plus claires, à l'intérieur des lentilles; si elles sont colorées, l'objectif doit être éliminé. Si les taches sont grises, elles peuvent être tolérées, surtout dans les objectifs apochromatiques et plan; elles ne peuvent pas être tolérées par contre dans les objectifs destinés à l'usage en radiation polarisée, en contraste interférentiel différentiel (DIC) ou autres techniques de contraste qui font usage de filtres polarisants.

Naturellement, on tienne compte que la classique "croix de Malte" (une croix sombre centrée avec des bras qui s'élargissent vers le centre de la pupille) est normale et presque inéliminable; les meilleurs constructeurs la rendent la plus pâle possible en soignant les traitements anti-réfléchissants.



Croix de Malte régulière (à gauche) et en présence de tensions dans les verres (à droite: un exemple parmi tous les possibles).

32.6.3 - Traitements anti-réfléchissants (§§ 17.1.2, 19.5.1 et 32.1.9)

Avec un peu d'expérience, ou en comparant des lentilles de provenance différente, il est possible d'évaluer l'efficacité des traitements d'un objectif. On observe l'objectif, en général du côté de la lentille émergente, à travers un microscope stéréoscopique avec éclairage coaxial.

La lentille frontale en général n'est pas traitée en étant sujette à des nettoyages fréquents.

La couleur des traitements doit être bleu-violet. Autres couleurs sont à dénoncer, sauf en cas spéciaux (objectifs pour UV, pour fluorescence, etc.).

Une lentille non traitée se révèle avec un vif reflet du tout achromatique.

32.6.4 – Contrôles mécaniques (§ 19.5.1)

C'est facile de vérifier la régularité et la fluidité de certains mouvements internes de l'objectif qui peuvent être altérés par des chocs, graisse durcie, etc.:

-- mouvement souple ("à pompe" ou "télescopique") des objectifs moyen-forts (§ 19.1);

-- vis ou bagues de centrage dans les objectifs pour radiation polarisée (§ 19.1.4.1);

-- bagues de correction de l'aberration sphérique dans les objectifs forts à sec "à correction" (§ 13.2.3.2);

-- diaphragme à iris dans les objectifs à immersion pour champ noir (§ 19.2.6).

32.6.5 – Contrôles optiques (§§ 19 et 31.2, articles n° 11 et 18, les deux en français)

Pour donner une évaluation d'un objectif de microscope du point de vue optique, il faut connaître bien toute la théorie sur l'optique géométrique (§ 13 et 19) et sur l'optique ondulatoire

(§ 18). Il faut aussi, en certains cas, beaucoup d'expérience et la possibilité de faire des comparaisons avec des systèmes connus doués de caractéristiques connues.

En outre, l'objectif doit être jugé comme partie d'un système intégré: illuminateur, condensateur, objectif, tube, oculaire; et chaque contrôle doit être exécuté dans toutes les combinaisons possibles entre les parties présentes, au moins pour celles prévues par le constructeur. Quelques caractères de l'image finale sont liés en majorité aux performances de l'objectif, mais en général les contrôles doivent être globaux.

32.6.5.1 - Contraste (§ 17 et 18.10)

Une évaluation objective doit être exécutée avec un réseau (§ 19.5.4) et un micro-photomètre. En absence de ce dernier, on peut faire une comparaison avec des systèmes connus.

On rappelle qu'on a le meilleur contraste avec les systèmes les plus simples (achromatiques simples), et que sur lui, au moins sur le microcontraste (§ 17.2), influent les résidus d'aberrations du point (§ 13.2). L'examen avec le microscope auxiliaire (§§ 19.5.5 et 32.6.1) peut expliquer un mauvais contraste dû à la saleté sur les lentilles ou à l'altération des surfaces (certains verres optiques sont chimiquement instables), altération des ciments, ébrèchements, etc. ou à la lumière diffuse pour reflets internes (voir plus haut, §§ 32.1.11 et 32.6.1, et l'art. n° 41).

32.6.5.2 – Aberrations (§§ 13, 19.3, 19.5, 31.2.8 et 31.2.9; articles n° 11 et 18, les deux en français)

-- Défauts de projet (§ 19.5.3):

Compte tenu des résidus admis par les différents types de correction (§§ 19.2 et 19.3), on doit dénoncer:

• résidus de chromatique latérale, coma et astigmatisme (aberrations extra-axiales) symétriques, dans les objectifs apochromatiques ou semi-apochromatiques;

• résidus sensibles de chromatique longitudinale dans les objectifs achromatiques[264] (dans les autres classes d'objectifs tels résidus doivent être toujours imperceptibles);

• planéité de champ dans une zone de la surface du champ inférieure à 60% dans les objectifs normaux, 80% dans les objectifs demi-plans, inférieur à 95% dans les plan.

Tous les contrôles doivent être exécutés avec un réseau à pas 10 – 50μ ou avec le star test, pour la coma et l'astigmatisme, et avec tous les oculaires de l'équipement (art n°11 et 18, les deux en français).

-- Défauts d'assemblage (§§ 19.5.1 et 19.5.2) à dénoncer:

• coma sur l'axe et asymétrique (faute de centrage)

• astigmatisme sur l'axe et asymétrique (faute d'alignement)

• sphérique sur l'axe (§§ 13.2.3 et 18.4)(erreur dans la distance entre les lentilles)

Tous les contrôles à exécuter avec le star test.

32.6.5.3 – Distorsion (§§ 13.1.2 et 31.2.9)

Dans les systèmes modernes, la distorsion est en général très réduite. Il est bien de toute façon l'évaluer avec la méthode indiquée dans le § 31.2.9. La tolérance admissible dépendra de l'usage auquel le microscope est destiné: par ex., dans un analyseur d'image destiné aux mesures géométriques sur l'objet, il faudra tenir compte des résultats qu'on s'attend de l'analyse.

[264] Au moins on doit exiger que les éventuels halos présents sur l'axe, dûs à la chromatique longitudinale, résultent imperceptibles dans la condition de meilleure mise au point.

32.7 – L'OCULAIRE

À la suite de ce qu'on a dit dans le § 32.6.5, les contrôles optiques sur le microscope doivent être exécutés sur le complexe: condensateur - objectif - tube - oculaire, et les essais décrits dans le § 32.6.5 impliquent aussi l'oculaire.

On peut évaluer cependant quelque caractéristique spécifique.

32.7.1 – Hauteur de la pupille de sortie (Ap) (§§ 20.10 et 31.3.6)

Il faudrait exclure un oculaire avec **Ap** plus petite de 12 mm, à moins que l'équipement comprenne **aussi** des oculaires "pour porteurs de lunettes" (identifiés, par ex., avec le symbole d'une lunette - ∞ - ou avec "Br") avec Ap > 15 mm.

32.7.2 – Champ angulaire (§§ 20.1 et 31.3.3)

On ne croie pas que le champ angulaire de l'oculaire soit autant plus appréciable qu'il est plus grand. On ne devrait pas dépasser la valeur de 50 - 55° ni descendre au dessous 35°. On mesure de toute façon, et on note, les valeurs du champ pour tous les oculaires de l'équipement. Les oculaires vendus comme "grand-angulaires" doivent montrer un champ (2α) supérieur à 40°.

32.7.3 – Parfocalité (§ 20.2)

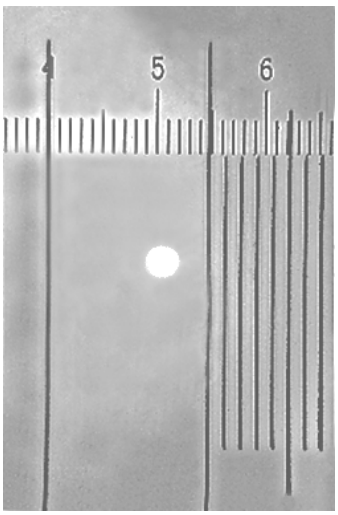
En remplaçant l'un avec l'autre tous les oculaires prévus par le constructeur et en remettant à point chaque fois, on peut admettre seulement une petite retouche de la vis micrométrique. Un déplacement plus fort de la mise au point cause une perte de parfocalité entre les objectifs. En cas de doutes, on contrôle la parfocalité entre les objectifs avec chacun des oculaires prévus et on note les résultats.

32.7.4 - Traitements antireflets (§ 17.1.2)

Il vaut ce qu'on a dit dans le § 32.6.3. Le soin dans l'exécution des traitements influe en général sur le contraste et sur le phénomène des catadioptriques, décrit ici dessous (voir la figure à la pag 122 - § 17.1.2).

Les bons traitements sont une indication des soins du constructeur.

32.7.5 - Images catadioptriques (§ 30.8.6 et art. n° 31)



On appelle ainsi ces taches lumineuses qui se forment dans une image comme résultat des réflexions non souhaitée sur les surfaces transparentes du système optique.

Il s'agit des images de la source qui se forment au point avec celle de l'objet; la source peut être le diaphragme d'ouverture ou la pupille de l'objectif.

Il faut vérifier l'absence de telles catadioptriques avec toutes les combinaisons possibles oculaire - tube - objectif. Le contrôle doit être étendu aux dispositifs pour la photographie; mieux de tout exécuter une photo de preuve avec un objet peu contrasté.

32.8 - MICROLAMPE et SYSTÈME ÉCLAIRANT (§§ 8 et 22)

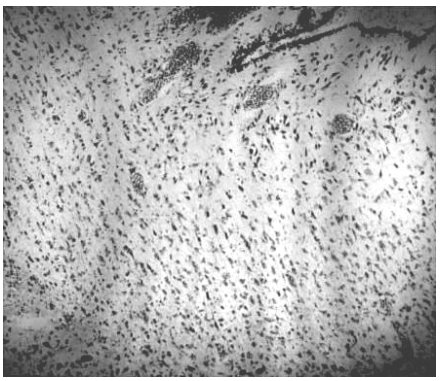
Pour le système éclairant, il est difficile de donner des indications générales, étant donné l'extrême diversité des solutions adoptée par les différents constructeurs et dans les différents modèles.

En ce qui concerne les différents mouvements (centrage et focalisation de l'ampoule, des lentilles, miroirs ou diaphragmes), on peut répéter tout ce qu'on a dit pour la mise au point (§ 32.2). Sont importantes la rigidité et la stabilité du système qu'on peut vérifier en centrant le tout, en tapotant avec les doigts sur chacune des parties, et puis en contrôlant si quelque chose s'est déplacé.

Puis on tienne compte que, dans ou près de la microlampe, on peut atteindre des températures élevées et certains matériels se déforment ou s'oxydent. Le résultat peut être le durcissement ou le bloc de vis de centrage, lamelles d'un diaphragme à iris, mise au point, etc. Malheureusement, ces défauts se présentent après des périodes d'utilisation moyen-longues, et ils peuvent échapper à l'examen sur un instrument nouveau. Il faudrait tenir allumé la microlampe au plus grand voltage pour environ un jour, en continuation. Puis, revérifier tout le système éclairant.

Du point de vue optique, on exécute les contrôles suivants:

32.8.1 - Uniformité de l'éclairage du plan objet



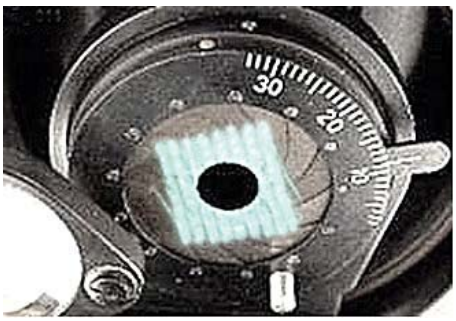
On ne se base pas sur une appréciation à l'œil: les émulsions photographiques sont beaucoup moins tolérantes que l'œil aux différences de cet éclairage; il faudrait un microphotomètre[265]; il est bien exécuter quelque photographie de preuve avec une préparation vide, spécialement avec les objectifs les plus faibles.

Pour les causes de ce défaut, tout de suite quelque exemple.

Un collecteur mal focalisé par respect au filament (ou vice versa) peut faire paraître une image mal focalisée du filament même dans le plan objet. L'éclairage selon Köhler, si bien compris et exécuté, devrait résoudre ces problèmes. La chose devient difficile si la microlampe est fixe dans le pied du microscope.

32.8.2 - Collecteur

-- Image du filament



On ferme le diaphragme d'ouverture; sur lui, en l'observant par-dessous, on doit projeter une image[266] du filament incandescent (voir la figure au § 8.9, pag. 68).

On peut aussi, au lieu du diaphragme d'ouverture, observer la pupille de l'objectif (avec un microscope auxiliaire ou une lentille d'Amici, si disponible); dans ce cas, utiliser l'objectif avec la plus grande ouverture numérique, le diaphragme d'ouverture tout ouvert et une préparation vide, éventuellement avec immersion, simple ou double (§§ 16 et 21.5).

Eh bien, toute la surface du diaphragme d'ouverture ou de la pupille de l'objectif doit résulter

---

[265] Comme tolérance, on peut accepter une variation d'éclairage pas supérieure à 3%.

[266] parfois très nuancée, étant donnée la présence de verres dépolis, aberrations, etc.

uniformément éclairée. Si ceci n'arrive pas, il n'est pas possible d'exploiter toute l'ouverture de l'objectif et en outre l'image peut être peu lumineuse en champ noir ou en contraste de phase, avec des forts objectifs. On peut constater un défaut de ce genre même dans des instruments de haut niveau et il doit être signalé sans retard.

On rappelle aussi tout ce qu'on a expliqué dans le § 32.5.3 à propos des résidus de sphérique dans le condensateur: un éclairage irrégulier de la pupille d'objectif peut dépendre aussi du condensateur.

-- Aberrations

Essentiellement, nous intéresse la sphérique qui peut provoquer un éclairage pas uniforme du diaphragme de champ et par suite du champ objet.

On ferme le diaphragme d'ouverture; on utilise un faible objectif (moins de 10: 1), on ouvre le diaphragme de champ, en réduisant le plus possible la tension de lampe et éventuellement en insérant un filtre neutre. On exclue les éventuels filtres dépolis.

L'image du diaphragme de champ observé dans les oculaires, doit apparaître éclairée uniformément. Comme on a expliqué, les émulsions photographiques sont beaucoup plus exigeantes que l'œil, et une photo de preuve peut montrer un fond pas uniforme où l'œil n'avait rien relevé d'anormale.

32.8.3 – Alignements (§§ 8, et de 22.7 à 22.9)

Une série d'organes doivent être centrables ou précentrés sur le même axe: filament (ou arc, dans les lampes à arc pour fluorescence et pour projection) - collecteur - diaphragme de champ - condensateur - objectif. Les vérifications à exécuter concernent le précentrage ou la possibilité de centrer manuellement les différentes parties.

-- Filament: son image doit tomber au centre du diaphragme d'ouverture. En cas affirmatif, il faut vérifier que collecteur et filament se trouvent sur l'axe du condensateur; ceci n'est pas facile pour ces dernières deux parties étant donné qu'une faute dans le centrage d'une partie peut être compensée par une faute dans l'autre. On peut se limiter à vérifier que l'image du filament (appuyer un bout de papier sur le diaphragme d'ouverture) ne résulte pas entourée par des halos asymétriques.

-- Collecteur: étant donné qu'il forme l'image du filament, son centrage erroné peut être compensé par une faute de position du filament, comme on a déjà dit. Une seule des deux parties est normalement centrable ou précentrée, ou on suppose qu'elle soit centrée "d'usine", pour lequel on doit se limiter à la vérification décrite plus haut, en notant les résultats.

-- Miroirs intermédiaires: ici il est plus facile de relever des fautes d'alignement; pour compenser ces dernières, le praticien d'habitude décentralise le condensateur avec le résultat décrit dans le § 32.5.6. Il est donc bien d'être très attentif pendant la vérification décrite dans le paragraphe cité.

En chaque cas, on contrôle que tout les éventuels centrages prévus permettent d'obtenir, vers le centre de leur course, une image centrée et sans halos asymétriques pour ces objets:

• le filament, projeté sur le diaphragme d'ouverture, voir plus haut;

• le diaphragme de champ, comme il est visible à travers un faible objectif dans le plan de l'objet;

• le diaphragme d'ouverture, comme il est visible dans la pupille d'objectif à travers un microscope auxiliaire.

32.8.4 – Miroir mobile

Dans les instruments dépourvus d'illuminateur incorporé, on trouve souvent fixé au pied un miroir articulé sur une fourche tournante, capable de tourner autour de deux différents axes; il s'agit d'une espèce d'articulation à cardan.

Le défaut principal de ces montures est l'instabilité, mais ce dispositif est si diffus que son refus généralisé est impossible.

On peut vérifier de toute façon que les deux axes de rotation ne soient pas trop "mous" et ils ne présentent pas des jeux appréciables.

On observe en outre l'état de la surface réfléchissante: quand il s'agit de miroirs argentés, son altération n'est pas rare.

S'il s'agit de miroirs de surface, du type "froid" ou autre, vérifier l'absence de dégâts, égratignures, etc. En outre, les miroirs "froids" doivent apparaître couleur pourpre si observé par transparence, avec incidence d'environ 45°.

Dans les illuminateurs incorporés dans le pied, il y a souvent au moins un miroir, mais leurs surfaces sont protégées de la poussière avec des opportunes «fenêtres» en verre et par suite, dans un nouvel instrument, elles ne devraient pas présenter des défauts sensibles.

On contrôle au moins, en regardant à travers les fenêtres pendant que la lampe est allumée et les diaphragmes tout ouverts, l'état des surfaces réfléchissantes.

BIBLIOGRAPHIE RAISONNÉE

La littérature en langue française à propos des aspects techniques de la microscopie optique générale est insuffisante, et encore plus rares sont les textes trouvables dans le commerce. Pour usage didactique sont utiles:

H. DIETLE - Il microscopio nella scuola - Ed. La Scuola, Brescia, 1977. 236 pages. 178 figg.

W. NACHTIGALL – Esplorare ed apprendere con il MICROSCOPIO – Il Castello, Milano, 1997.

M. ROLAND - Les merveilles du microscope - B.U.R, Milan, 1950. 188 pages.

E. SÉGUY - Initiation à la microscopie - Et. Boubée et Cie, PARIS, 1970. 240 pages, 100 figg.

Manuels techniques publiés par les producteurs les plus connus, à demander aux représentants.

Comme atlas du monde microscopique, riches de tables sur différents aspects du monde visible au microscope optique, sont à citer:

H. STREBLE et D. KRAUTER - Atlante dei micro-organismi aquatici - Ed. F. Muzzio & C., Padoue, 1984. 334 pages. 52 photos, 1700 dessins (excellent).

E. SÉGUY - Le microscope - Emploi et applications - Et. P. Lechevalier, PARIS, 1949. 816 pages, 202 tables, 311 figg.

G. DEFLANDRE - Microscopie pratique - Et. P. Lechevalier, PARIS, 1947 - 426 pages, 130 tables.

L. J. LAPORTE - Le monde microscopique - Et. P. Lechevalier, PARIS, 1946 - 301 pages, 300 figg.

Pour une première introduction aux aspects techniques, ils existent en italien seulement des testes incomplets:

P. CASTANO et S. ROSSI - La fotografia al microscopio - Ed. Il Castello, Milan, 1984. 163 pages, 104 figg.

G. MAZZOLANI - Il microscopio - Ed. de l'Université, ROME, 1966 - 422 pages.

Un texte exhaustif, peut-être unique dans son genre, est par contre, malheureusement en langue allemande:

H. BEYER et H. RIESENBERG - Handbuch der Mikroskopie - Veb Verlag Technik, Berlin, 1988. 455 pages.

Nous recommandons vivement ce texte pour sa rigueur et sa clarté. Il traite les techniques spéciales et aussi certaines applications. Étant donnée la bibliographie riche et ajournée qu'il contient, uniforme pour sujet et facile à consulter, puisque la plus grande partie de la littérature technique dans le champ de l'optique et de la microscopie est en allemand, nous renvoyons à ce texte le lecteur qui désirs approfondir notre sujet.

Pour une introduction à la microscopie interférentielle et en lumière polarisée:

G. P. SINI - Microscopia interferenziale - article n° 17 dans ce même site et, en plus:

Fondazione "Giorgio Ronchi", XI; Baccini & Chiappi, Florence, 1968 - 87 pages.

G. P. SINI - "Introduzione alla microscopia in radiazione polarizzata" – 45 pagg. dans ce même site.

LISTE des ACRONYMES UTILISÉS en MICROSCOPIE

A Allgemein (d'usage universel); OU BIEN: Apertur (ouverture numérique) OU BIEN: Auflicht (épiscopie)

ACE Analog Contrast Enhancement

Achro Objectif achromatique

ADF Annular Dark Field = Champ noir omnilaterale

ADL Apodized Dark-Light (objectifs apodisés {avec un filtre neutre à densité graduée dans la zone marginale} a densité moyenne)

AFM Atomic Force Microscope (microscope non optique)

ANSI = AMO American National Standard Institute

Apl Aplanétique (corrigé d'aberration sphérique)

Apo Objectif apochromatique

APS Active Pixel Sensor (capteur de télévision amplifié en technologie CMOS)

BD = B/D Bright and Dark field (pour champ clair et noir)

BF Back Focal Distance (distance frontale, côté image) OU BIEN: Bright Field = Champ clair

BFP Back Focal Plane = Plan focal postérieur

BP Band Pass (filtre passe–bande)

BPF Band Pass Filter (filtre passe–bande)

Br Brillen (oculaires convenables pour porteurs de lunettes, à pupille haute au moins 15 mm)

BSP Beamsplitter (miroir semiréfléchissant)

BW BandWidth (largeur de bande)

B&W Black and White = Blanc et noir

C Compensateur (oculaire); OU BIEN: objectif avec anneau de correction pour l'épaisseur de la lamelle; OU BIEN: raye spectrale C à 656 nm; OU BIEN: objectif pour oculaire compensateur; OU BIEN (Leitz): objectif avec traitements antireflets

CARS Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (observation de la fluorescence Raman avec effets optiques non linéaires à excitation à multiphotons)

CCD Charge Coupled Device (capteur de télévision digital à état solide)

CDF Centered Dark Field = Champ noir centré (omnilaterale)

C-DIC DIC avec radiation polarisée circulairement (Zeiss)

CET Contrast Enhancing Techniques (Techniques de contraste)

CF Color (Chrome) Free (libre d'aberration chromatique d'agrandissement ou chromatique latérale)

CFI Color Free Infinity (comme CF + deuxième conjuguée infinie)

CID Contrast Interférentiel Différentiel

CIR Contrast Improvement Ratio (Rapport d'augmentation du contraste)

CMO Common Main Objective = Objectif principal commun (stéréomicroscopes)

Corr Correction (Objectif avec bague de correction pour l'épaisseur de la lamelle)

CRT Cathode Ray Tube (écran avec tube aux rayons cathodiques)

CLSM ou CSLM Confocal Scanning Laser Microscope (microscope confocal à scansion)

CTF Contrast Transfer Function (Fonction de transfèrement du contraste dans une image par respect à un objet, en fonction de la fréquence spatiale de l'objet)

CVD Cromatische Vergrosserung Differenz (différence chromatique d'agrandissement. = aberration chromatique laterale)

D! Deckglas (d'objectifs qui demandent l'usage d'une lamelle d'épaisseur 0,17± 0,01 mm)

D Deckglas (d'objectifs qui demandent l'usage d'une lamelle d'épaisseur 0,17± 0,05 mm, OU BIEN: Dunkelfeld = Dark field (systèmes pour champ noir, en général en épiscopie); OU BIEN: Durchlicht (diascopie, pour transparence); OU BIEN: Ligne spectrale D à 589 nm (vapeurs de sodium)

d Dicke = Épaisseur de la lamelle, exprimée en mm

DF Dunkelfeld (champ noir, spécialement en épiscopie, en allemand) = Dark Field (anglais)

DI Differential Interférence

DIC Differential Interférence Contrast (contraste interférentiel différentiel selon Nomarsky)

DIK Differential Interferenz Kontrast (contraste interférentiel différentiel selon Nomarsky)

DIN Deutsches Institut für Normung = Système allemand des règles de standardisation des produits industriels

DL Contraste de phase

DM Contraste de phase

DO Deckglas und Ohne (à utiliser avec ou sans lamelle, dit d'objectifs)

DP Diffraction Pattern = figure de diffraction

DPC Differential Phase Contrast

EC Enhanced Contrast (traitements antireflets très soignés, pour réduire la radiation diffuse)

EF Extended Field (objectifs à grand champ); OU BIEN: Objectif plan (à réduite courbure de champ)

EFL Effective focal lenght (longueur focale effective)
ELWD Extra Long Working Distance (distance de travail très élevée)
F Ligne spectral F à 486 nm
FAA freier Arbeitsabstand = Distance libre de travail (= WD)
FF Front Focal Distance (Distance frontale, côté objet)
Fl Fluorine (objectifs semi-apochromatiques avec des lentilles en fluorine)
Fluor/Fluar Fluorine (objectifs semi-apochromatiques avec des lentilles en fluorine)
Fluotar Fluorine (objectifs semi-apochromatiques avec des lentilles en fluorine)
FN Field Number (s' = index de champ = champ objet de l'oculaire)
FRET Fluorescence Resonance Energy Transfer
FWHM Full Width Half Maximum (largeur à moitié hauteur, dite de la bande passante d'un filtre)
g gehärtet, trempé (dit de verres optiques et filtres); OU BIEN: Ligne spectrale **g** à 423 nm
G Grossissement (visuel, virtuel)
GC Grand Champ (pour oculaires avec s'> 18 mm
GF Grossfeld (à grand champ)(pour oculaires avec s'> 18 mm ou objectifs avec s'≥ 20 mm)
Glyz Glyzerin = Objectifs à immersion en glycérine
GW À grand champ, pour oculaires avec s'> 18 mm
H (DIC) (objectifs DIC à fort agrandissement qui demandent un prisme de Wollaston spécial)
H Haute pupille de sortie (oculaires aptes à l'usage avec des lunettes); OU BIEN: Heiz (= chaleur)(dit de platine chauffante ou objectif pour usage avec telle platine); OU BIEN: Hellfeld (systèmes pour champ clair, en général en épiscopie); OU BIEN: Huygens (oculaire)
HAADF High Angle Annular Dark Field = Champ noir à forte ouverture
HD Hellfeld und Dunkelfeld (systèmes pour champ clair et noir, en général pour épiscopie)
HE High Eyepoint (oculaires à haute pupille de sortie, aptes à l'usage de lunettes)
HF Hellfeld (champ clair, spécialement en épiscopie)
HI Homogeneous Immersion (immersion homogène des objectifs)
HMC Hoffmann Modulation Contrast = Contraste d'amplitude sec. Hoffmann
HW HalbWerts (= à moitié hauteur = largeur à moitié hauteur, dit de bande passante d'un filtre)
HWB HalbWerts Breite (= largeur à moitié hauteur, dit de bande passante d'un filtre)
ICCD Intensified CCD (capteur digitale intensifié pour la télévision)
ICS Infinity Color (Corrected) System (objectifs {corrigés de CVD} à seconde conjugué infinie)
Imm Immersion en huile
ISIT Intensified Silicon intensified Target (capteur spécial de télévision)
JE Multiples beams Interference, système interférentiel sec. Tolanski
K Kompensator (oculaire compensateur)
Kond Kondensor (condensateur)
Korr Objectif avec bague de correction pour l'épaisseur de la lamelle
KP Kurz Pass (filtre passe-haut)
KSR Katoden Strahl Rohr (tube à rayons cathodiques ou CRT)
L / LD / LL Long Working Distance (système à distance de travail ("frontale") élevée)
L Laser (système à utiliser avec un laser ou LSM); OU BIEN: Long = système à distance de travail ("frontale") élevée)
LM Light Microscopy (= Microscopie optique), OU BIEN: Low Magnification (= bas grossissement)
Lm Longueur mécanique du tube du microscope
Lo Longueur (mécanique) de parfocalité des objectifs
LP Lang Pass (filtre passe-bas avec la meilleure transparence pour longueurs d'onde élevées)
LRM Licht Raster Mikroskops (synonyme de confocal)
LSM Laser Scan Microscope (synonyme de confocal)
LWD Long Working Distance (système à distance de travail ("frontale") élevée)
LWP Long Wave Pass (filtre passe-bas avec la meilleure transparence pour longueurs d'onde élevées)
M Magnification (agrandissement linéaire transversale); OU BIEN: Métallographique, objectif à utiliser sans couvre-objet
MI Multiple beam Interference (système interférentiel de Tolanski)
mi mit iris = avec un diaphragme à iris interne (objectif à immersion pour fond noir)
Micr Micrométrique (dit d'oculaire)
Mired Micro reciprocal degree (degré millionième inverse, une expression de la température de couleur d'une source ou d'une radiation)
MM Macro/Micro (condensateur à champ grand et normal)
MP Magnification Power (grossissement visuel)
MPM Microscope PhotoMetry
MTF Modulation Transfer Function (fonction de transfèrement de la modulation dans une image par respect à un objet, en fonction de la fréquence spatiale de l'objet)
N Objectif à champ normal, pas à grand champ
NA Numerical Aperture = Ouverture numérique

NC No Coverglass (à utiliser sans lamelle)
NCG No Cover Glass (à utiliser sans lamelle)
NPL Système plan (à courbure de champ reduite, avec champ normal, pas à grand champ)
O Ortoscopique (oculaire), OU BIEN: "ohne", sans couvre-objet)
oD/OD Ohne Deckglas (à utiliser sans lamelle, dit d'objectifs), OU BIEN: Optical Density
Oel-Öl Huile, en allemand (= Immersion en huile)
Oil Huile, en anglais (= Immersion en huile)
Ol Oel (= huile = Immersion en huile)
ON = o.n. Ouverture Numerique
OPD Optical Path Difference (différence de chemin optique)
OPL Optical Pathlengh = Longueur du chemin optique
OTF Optical Transfer Function (composition de MTF et de PTF, q.v.)
P Plan (systèmes à champ aplani); OU BIEN: systèmes qu'il est possible d'utiliser en lumière polarisée
PALM Photoactivated Localization Microscopy (fluorescence activée sur molécules particulières)
Papo Objectif plan-apochromatique
PC Phase Contrast (pour contraste de phase)
Ph Contraste de phase
Phaco Contraste de phase
PhV Contraste de phase variable (Zeiss Jena)
Pl Système plan (à courbure de champ réduite)
Plan/Plano Système plan, à courbure de champ réduite
Pol Systèmes qu'il est possible d'utiliser en lumière polarisée
PSF Point Spread Function (diagramme qui montre la distribution photométrique dans l'image d'un point objet produite par un système optique donné)
PTF Phase Transfer Function (fonction de transfèrement de la phase dans une image par respect à un objet, en fonction de la fréquence spatiale de l'objet)
Q Quarz (système avec des éléments en silice fondue à utiliser en UV)
RMS Royal Microscopy Society (Société de Microscopie Londonienne qui a établi nombreux standards mécaniques et optiques des microscopes, encore en usage)
S Segments (objectif pour "segments" = hémisphères en verre entre lesquelles renfermer la préparation quand on utilise la platine universelle en radiation polarisée)
S Système "semiplan", à courbure de champ réduite
s Diamètre du champ objet
s' Diamètre du champ image de l'objectif (= Index de champ de l'oculaire = Field Number)
SF Strain Free (systèmes optiques exempts de tensions internes et de biréfringence intrinsèque, aptes pour Pol)
SI Silicon Immersion (pour fluorescence (Olympus); OU BIEN: System Integration (construction modulaire d'un instrument, pour faciliter la substitution des différentes parties et accessoires)
SIM Superresolution Microscopy
SIT Silicon Intensified Target (capteur digital de télévision)
S/N Signal to Noise = Signal - Bruit (électrique)
SOM Scanning Optical Microscope (microscope optique à scansion)
SPIM Méthode d'éclairage latéral d'un objet, immergé dans un liquide, au moyen d'un faisceau laminaire, perpendiculaire à l'axe optique
SPL Système "semiplan", à courbure de champ réduite
S-Pl Oculaires photographiques Zeiss
S Plan Système "semiplan", à courbure de champ réduite
SPM Scanning Probe Microscope (d'habitude, ça comprend le STM et l'AFM {voir})
SSB Single Side Band edge enhancement (objectif dans lequel la radiation diffractée par l'objet est supprimée d'un seul côté afin d'augmenter le contraste: il correspond à un éclairage oblique)
STED Stimulated Emission Depletion (fluorescence excitée et supprimée par deux stimulations laser suivantes)
STM Scanning Tunneling Microscope (microscope pas optique à scansion, qui exploite l'effet tunnel)
SWH Super Wide Field High eyepoint (oculaires à grand champ et haute pupille)
SWP Short Wave Pass (passe-haut, dit de filtre avec la plus grande transparence pour les longueurs d'onde les plus petites)
THETA La technique SPIM (q.v.) appliquée à la fluorescence
TI Tolanski Interferometry (pour interféromètres à faisceau multiple selon Fabry-Pérot)
TIC Total Interference Contrast (DIC sophistiqué, en épiscopie)
TIDF Tilted Illumination Dark Field = Éclairage oblique en champ noir
TIRF et TIRFM Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy = Observation par-dessous d'un objet adhérent à un substrat en conditions de réflexion totale, en exploitant la radiation qui pénètre au-delà de la surface réfléchissante pour la "profondeur de pénétration", avec un minimum de 50 nm, en fluorescence.
TL Transmitted Light, pour diascopie

TPI Threads per Inch (filets par pouce, dit de pas de vis)
TS Teil Spiegel (miroir semi-réfléchissant, en allemand)
TSM Tandem Scanning reflected light Microscope
U Objectif pour Pol à utiliser avec des segments (hémisphères en verre entre lesquelles renfermer la préparation en radiation polarisée) et la platine universelle
UIS Universal Infinity System (objectifs à seconde conjuguée infinie, correction totale de la chromatique latéral, Olympus)
UT Universal Tisch = Objectif pour Pol, à utiliser avec des segments (voir plus haut)
UW Ultra Wide viewfield (oculaires à grand champ)
V Vergrosserung (grossissement visuel, en allemand)
VEM Video Enhanced Microscope
VI Variable Immersion (faibles objectifs, à utiliser avec un liquide d'immersion quelconque)
VIM Video Intensification Microscope
W Wasser (= eau: objectifs à immersion dans l'eau); OU BIEN: Wide field (grand champ)
Wasser Wasser (= eau) (objectifs à immersion dans l'eau)
WF Wide Field (grand champ)
WH Wide Field High eyepoint (oculaires à grand champ et haute pupille)
WI Wasser Immersion (objectifs à immersion dans l'eau)
Δ Longueur optique du tube = distance entre le foyer image de l'objectif et le foyer objet de l'oculaire

ADRESSES UTILES

Il n'est pas difficile de trouver, dans les plus grandes villes, les représentants ou concessionnaires des principaux constructeurs de microscopes optiques et de leurs accessoires.

Il n'a pas beaucoup de sens de les énumérer, étant donné que les raisons commerciales portent à fréquents changements de leur raison sociale, nom et adresse. La liste du téléphone peut représenter un guide continuellement ajourné.

Le marché des occasions est limité, et il doit être cherché avec patience. Naturellement avec tous les risques du matériel utilisé (graisse durcie, ternissure spontanée des surfaces optiques, altération des adhésifs, pénétration d'huile dans les objectifs à immersion, formation de colonies de champignons inférieurs au moindre signe d'humidité, etc.).

Pour les réseaux de contrôle à lignes parallèles (le type le plus utile est celui avec pas 40μ), star-test (petites lames aluminées, pas protégées) ou des réseaux spéciaux, sont spécialisés les maisons:

GRATICULES Ltd, Sovereign Way, The Botany, TONBRIDGE, KENT, UK.

EDMUND Optics – europe (www.edmundoptics.eu) / EDMUND Optics Ltd, 1, Opus Avenue, York, Y026 6BL, UK

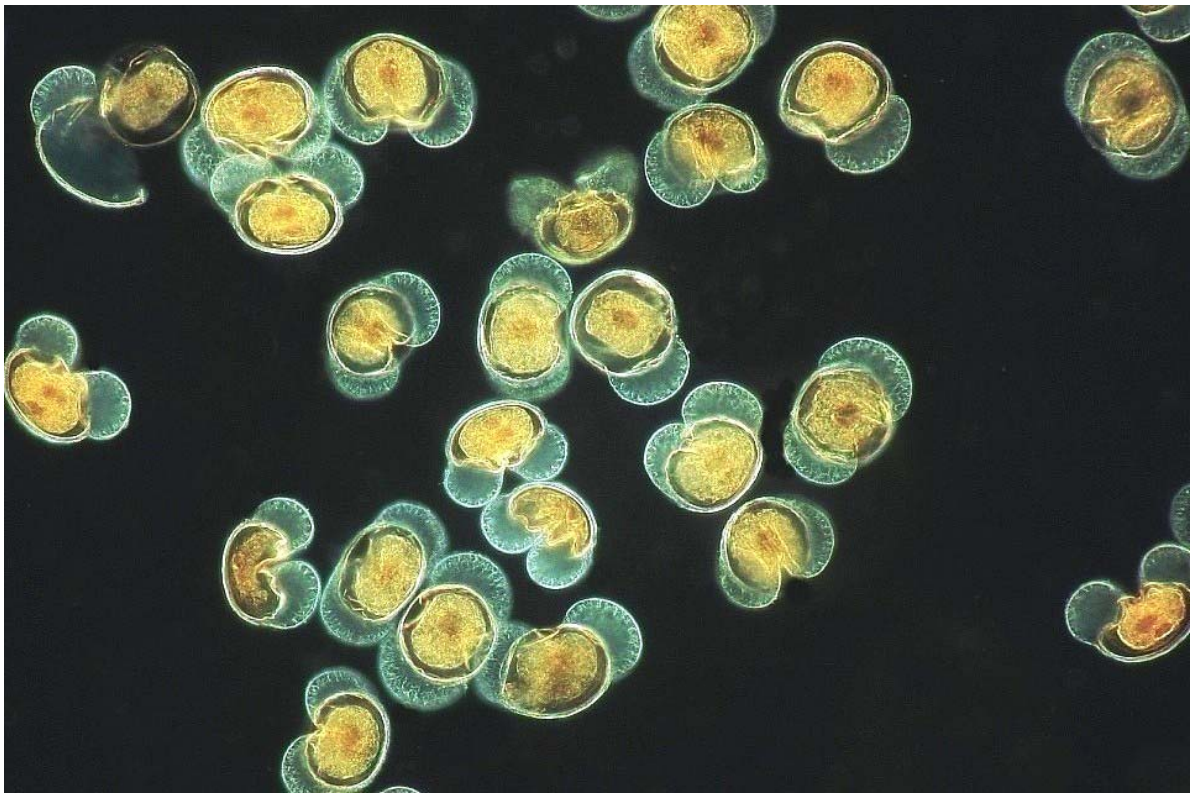


Fig. 131 – Pollen de *Pinus sylvestris*, champ noir. Obj. 20:1.