

**Le CONTRÔLE des RÉSIDUS d'ABERRATIONS
dans le SYSTÈME OPTIQUE du MICROSCOPE
grâce à des RÉSEAUX-OBJET**
(voir aussi l'art n ° 21)

Comme “réseau-objet” nous indiquons un normal porte-objet (ou “lame”, $25 \times 75 \times 1,1$ mm) sur lequel ont été déposées des couches minces suivant un dessin opaque de quelque type. Les couches minces peuvent être de type métallique ou photographique; ces derniers cependant ne donne pas des bords suffisamment nets. Dans d'autres cas, le support en verre est gravé au moyen de réactifs chimiques en grés d'entamer le verre. Ils en résultent des sillons microscopiques.

Des réseaux convenables à nos buts sont achetables près de fournisseurs différents¹.

Dans plusieurs cas, il peut suffire un normal “micromètre objet”, une de ces lames qui sont utilisés pour la calibration des mesures de longueur au microscope. Il s'agit d'un porte-objet sur lequel est gravée une graduation longue de 1 à 5 mm, avec des espacements normalement de 10 μ chacun.

Quelque chose peut être confectionné avec des simples moyens: on prend un porte-objets normal, on le nettoie bien avec de l'alcool et on l'enduit avec un mince couche d'encre de Chine; l'expérience indiquera lequel est l'épaisseur la plus opportune de la couche d'encre. Quand le tout est bien sec, on trace des sillons très étroits sur le porte-objet avec une lame de rasoir, sillons les plus parallèles et les plus rapprochés possible, sur une surface d'au moins quelques mm². Facilitez cette opération avec l'aide d'une règle qui puisse guider la lame.

Pour l'usage avec des objectifs normaux, pour diascopie, le réseau réalisé d'une façon quelconque, sera couvert d'une **lamelle** (couvre-objet) de l'épaisseur prévue normalement, c'est à dire 0,17 mm. On contrôle l'épaisseur de la lamelle avec un micromètre centésimal car l'épaisseur nominale souffre toujours d'une forte tolérance. Entre lamelle et réseau il convient de mettre une goutte de résine (Baume du Canada naturel ou artificiel), en mettant un petit poids sur la lamelle pour minimiser l'épaisseur de résine. Le temps de durcissement de la résine va depuis quelques heures (résines artificielles) à beaucoup de semaines (Baume naturel).

Les contrôles avec réseau sous décrits s'appliquent soit aux microscopes stéréoscopiques que mono-objectif. Sauf indication contraire, le réseau-objet doit être placé sur la platine et observé à travers le système optique complet du microscope. D'une façon générale, donc, on observe des résidus d'aberrations dues à l'objectif, à l'oculaire, aux prismes éventuels, filtres et “lentilles du tube”, aux changeurs d'agrandissement éventuels, etc. En certains cas, a aussi de l'influence la distance pupillaire du tube bioculaire, quand elle altère la longueur optique du tube (voir le texte “Problèmes techniques de la microscopie ...”, Chap. 24.1.3, dans le même site « www.funsci.it »).

Les ABERRATIONS “DU PLAN” qui intéressent les objets étendus

Ces aberrations provoquent une déformation générale de l'image par respect à l'objet (supposé plan), quand celui-ci occupe une part non négligeable du champ visuel: l'objet et l'image ne sont pas géométriquement “semblables”. Par contre, les aberrations du plan n'intéressent pas les objets ponctuels.

¹ Par ex., Graticules Ltd, Sovereign Way, Tonbridge, Kent (UK). – Edmund Inc. (www.EDMUNDOPTICS.EU), etc.

La DISTORSION

Puisque cette aberration consiste dans une variation de l'agrandissement le long du champ, c'est-à-dire en relation à la distance d'un point image de l'axe (**h**), il s'agit d'observer un réseau-objet contenant des lignes droites parallèles et mesurer la distance entre les lignes de l'image près de l'axe et près des bords du champ. Pour cette mesure, il faut naturellement que le réseau-objet possède des lignes équidistantes, comme un micromètre-objet, et qu'on mesure son image avec un micromètre oculaire (vois le manuel "Problèmes techniques de la microscopie ...", Chap. 12.1 et 20.8).

Dans le champ visuel, doivent être visibles au moins une dizaine de lignes; il faut donc disposer de réseau-objets à "pas" différent selon l'agrandissement de l'instrument; il faut un "pas" de réseau, c'est-à-dire une distance entre les lignes, à partir d'environ 10 μ (pour les objectifs à l'immersion) à environ 500 μ (microscopes stéréoscopiques). Pour les très petits agrandissements une règle décimètre peut être suffisante.

Une appréciation de la distorsion peut se faire à l'œil, spécialement si les lignes du réseau-objet sont suffisamment longues: la distorsion les rend courbes. Pour une mesure précise, on se sert d'un micromètre oculaire et, par comparaison entre les deux réseaux, on mesure le pas apparent, c'est-à-dire la distance entre les lignes dans l'image, près de l'axe (P1) et sur les bords (P2). La mesure de la distorsion est:

$$D = (P2 - P1) / P1$$

On peut l'exprimer en pour-cent en multipliant D par 100.

D peut être plus grand ou plus petit de 0 car P2 peut être plus grand ou plus petit de P1 (distorsion positive ou négative).

L'ouverture du condenseur n'a pas d'influence sur la distorsion. Cette aberration a importance seulement quand on doit mesurer ou photographier des objets de grandes dimensions et de forme régulière.

La COURBURE du CHAMP

Pour sa construction même, un réseau-objet est plan (avec des tolérances négligeables). Pour contrôler la courbure du champ de l'objectif, il faut que sur tout le champ visuel soient uniformément distribuées des points ou des lignes. Dans la pratique, il suffit un frottis de sang ou de bactéries, un objet très mince sur porte-objet.

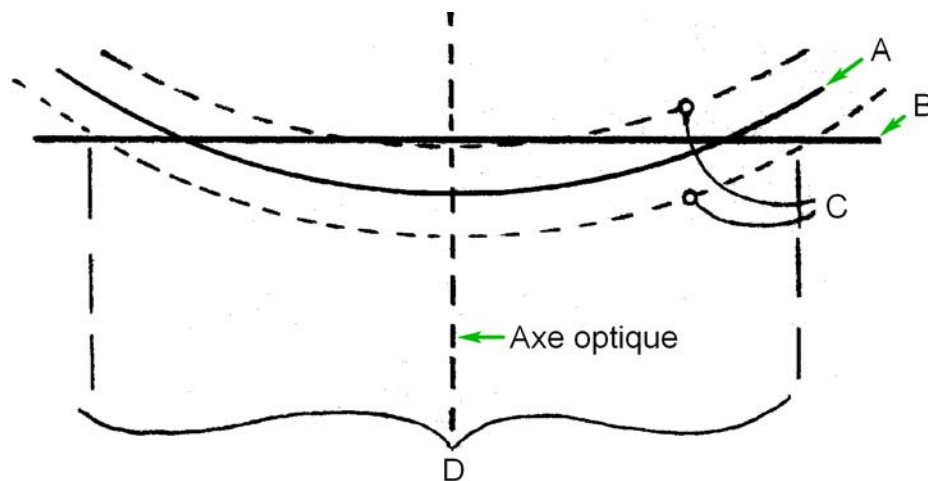


Fig 1 - Schéma d'un objet plat, par ex. un réseau-objet (B); (A) est la surface de meilleure focalisation de l'objectif (celle qui forme une image intermédiaire plate); (C) sont les limites supérieur et inférieur de la pénétration. (D) est la région "raisonnablement focalisée" du champ de l'objectif.

Un objectif « plan » idéal devrait fournir à l'oculaire une image intermédiaire plate pour un

objet plat, image qui apparaîtrait à l'œil toute simultanément bien focalisée. Autrement dit, un objectif plan devrait posséder, à l'intérieur de son espace-objet, une "surface de meilleure focalisation" complètement plane. On appelle « surface de meilleur focalisation » cette surface contenue dans l'objet, supposé à trois dimensions, capable de produire une image intermédiaire plane.

On a une appréciation grossière de la courbure du champ en tâchant de mettre au point la plus grande partie possible du champ, y compris le centre; il s'agit d'exploiter la "pénétration" de l'objectif (c'est-à-dire la profondeur de focalisation) qui permet de considérer "raisonnablement" au point même des parties de l'image externes à la région de meilleur focalisation (Fig. 1).

On pourra dire, par ex., que la région "raisonnablement" au point occupe les 2/3 ou les 3/4 du champ. La subjectivité est évidente, mais l'utilité pratique de cette évaluation l'est aussi.

Si la vis micrométrique a un tambour gradué, on peut donner une mesure objective de la courbure en cherchant la meilleure focalisation d'abord au centre, puis sur les bords, et en lisant sur le mouvement micrométrique de combien de micron s'est déplacé l'objectif par respect à l'objet. On peut exécuter cette mesure en observant un objet mince quelconque comme un frottis de sang ou de bactéries.

La valeur de la différence de focalisation ainsi mesurée doit être rapportée cependant aux dimensions du champ objet (s); en effet, les objectifs les plus faibles ont un champ plus grand et pourtant, si la surface de meilleur focalisation a la forme de calotte sphérique, en augmentant le diamètre de la calotte, supposant la même courbure, augmente la "flèche" qui correspond à la différence de focalisation citée auparavant.

La courbure ne dépend pas de l'ouverture de l'objectif ou du condenseur; elle doit être mesurée de toute façon avec le condenseur à pleine ouverture (environ 4/5 de la pupille d'objectif "remplie" par l'image du diaphragme d'ouverture – vérifier ça avec la lentille d'Amici-Bertrand) afin d'éviter une augmentation de la pénétration de l'objectif qui rendrait plus difficile d'évaluer si une certaine partie de l'image n'est plus "raisonnablement" au point, ou si on a atteint la meilleure focalisation.

L'importance de la courbure de champ se fait remarquer essentiellement en photographie: il faudrait en tout cas que l'entier format photographique résultât "raisonnablement au point" avec toute la subjectivité de cette évaluation.

Les ABERRATIONS "du POINT"

Elles n'intéressent pas les objets étendus, mais elles altèrent l'image d'un objet "ponctuel" image que, selon l'optique géométrique en absence d'aberrations, devrait rester ponctuel comme l'objet.

Les ABERRATIONS "CHROMATIQUES"

Par leur même définition, les aberrations chromatiques sont dues à une variation ("dispersion") de l'index de réfraction (n) et, par suite, de la longueur focale et de l'agrandissement, en fonction de la variation de la longueur d'onde (λ); donc elles ne se présentent pas en radiation monochromatique.

CHROMATIQUE LONGITUDINALE ou AXIALE

Elle consiste dans la dispersion de la longueur focale, et par conséquent de la position axiale de l'image, en fonction de λ . Pour éviter la superposition des effets analogues de la chromatique latérale, (voir plus loin) il faut observer la chromatique longitudinal « sur l'axe », au centre du champ.

Dans les objectifs apochromatiques ou semi-apochromatiques, elle est tellement correcte qu'elle n'est pas pratiquement observable.

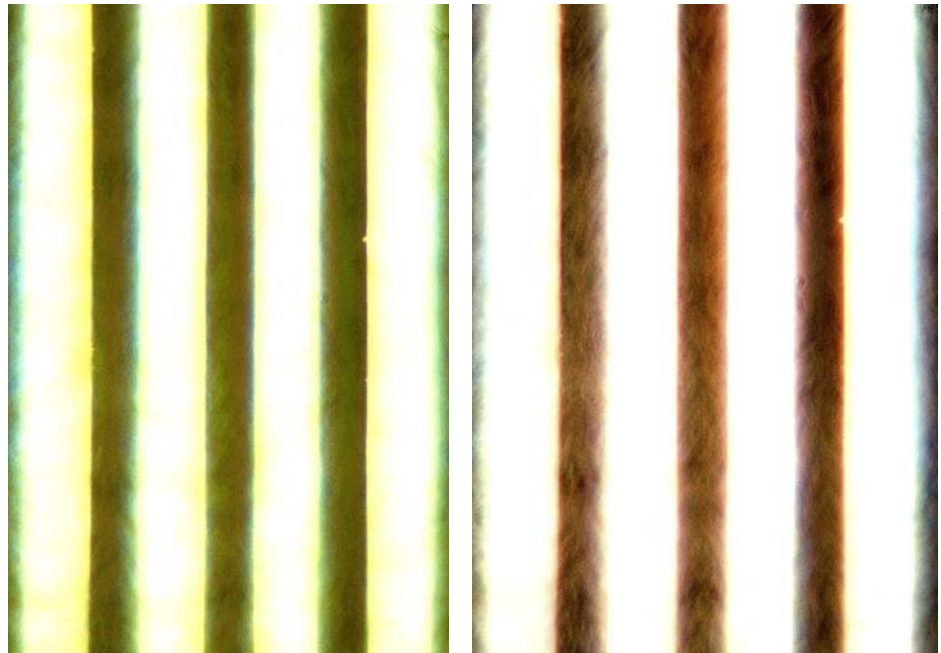
Avec les achromatiques non récents ou de mauvaise qualité, on peut observer un résidu de chromatique longitudinale de cette façon: utilisez un réseau avec des lignes opaques et transpa-

rentes alternées, avec des bords nets, même si pas rectilignes; excellents sont les réseaux « Ronchi » au dépôt de chrome. On peut se servir aussi d'un micromètre-objet mais, d'habitude, il vaudrait mieux disposer de réseaux avec différent pas (de 10 à 500 μ) pour avoir une dizaine de lignes dans le champ à n'importe quel agrandissement. Si on met au point avec soin au centre du champ, sur les bords des lignes opaques, où le contraste est maximum, on peut remarquer une ligne pourpre très mince. En abaissant l'objectif, on doit observer une variation de cette couleur vers le vert; en sens opposé, vers le violet. La raison de ce phénomène reste dans le fait que dans les objectifs achromatiques, par définition, se font coïncider les foyers pour la région du rouge et du bleu du spectre optique. Pour la région intermédiaire du vert, la longueur focale est plus petite et l'agrandissement plus grand (d'où une image défocalisée verte qui déborde de celle noire – Fig. 2A) et pour le violet c'est le contraire – Fig. 2B. La superposition des deux couleurs donne le pourpre. Pendant qu'on varie la focalisation, on peut voire le changement de couleur des bords des lignes.

Fig. 2A/2B

Pendant qu'on défocalise légèrement un réseau Ronchi d'un côté ou de l'autre, on peut voir les bords des lignes qui se colorent de vert ou de violet.

L'objectif en question est évidemment achromatique de mauvaise qualité: généralement l'aberration chromatique longitudinale est à peine perceptible, même dans les objectifs achromatiques de moyenne qualité.



La chromatique longitudinale, exprimée comme diamètre du “cercle de confusion”, image confuse d'un point objet, est proportionnelle à l'ouverture de l'objectif; donc le condenseur doit être utilisé à pleine ouverture pendant le contrôle. Comme oculaire, on utilise celui qui est conseillé par le constructeur car un oculaire peut donner une propre contribution à la chromatique longitudinal de l'instrument dans son complexe. Avant de conclure que l'objectif est mal corrigé, faire des tests avec différents oculaires.

CHROMATIQUE LATÉRALE ou DIFFÉRENCE CHROMATIQUE d'agrandissement (CVD)

Elle consiste encore dans une dispersion de la longueur focale, mais avec effet dans la position et les dimensions de l'image en fonction de λ .

Par définition, cette aberration se présente seulement loin de l'axe: pour un point objet loin du centre de l'image se forme une série de points-image différemment éloignés de l'axe, de différente couleur, donc un petit spectre. Les lignes d'un réseau Ronchi se présentent avec des bords colorés, en particulier, les lignes noires ont les bords rouges vers la périphérie et bleu vers le centre de la Fig. 3.

La chromatique latérale peut être considérable dans les objectifs achromatiques moyens et forts, semi-apochromatiques et apochromatiques, s'ils sont construits selon la formule classique. Avec les techniques traditionnelles, en effet, la correction complète de cette aberration n'était pas possible dans les objectifs moyens et forts. Pour ces objectifs donc on ne pouvait pas utiliser des oculaires achromatiques, comme les classiques Huygens à deux simple lentilles; il fallait des

oculaires “**compensateurs**”, pourvus d’une chromatique latéral de même degré et de signe opposé de celle de l’objectif. Dans les recettes modernes, les meilleurs constructeurs réduisent cette aberration dans les objectifs à des résidus négligeables (systèmes CF ou “chrome-free”), et ces systèmes doivent être utilisés avec des oculaires achromatiques, qui sont généralement plus complexes des Huygens classiques, car ces derniers ont en générale une pupille de sortie basse, champ limité et résidus d’autres aberrations.².

La chromatique latérale est lié plus des autres aberrations à tous les éléments du système formateur d’image du microscope: objectif, oculaire, et systèmes interposés (lentilles, prismes, filtres). Le changement d’un tube bioculaire à un monoculaire ou vice versa peut produire des résidus sensibles de chromatique latérale.



Fig. 3 – À la périphérie du champ les lignes du réseau ont les bords bleu d’un côté et rouge de l’autre côté.

Cette image vient d’un objectif achromatique fort avec un oculaire achromatique. Il n’ya pas de « compensation ».

Pour la mesure de cette aberration, on observe un réseau avec des lignes opaques et transparentes alternées (« Ronchi rulings », par ex.); utilisez un oculaire sûrement achromatique (il peut suffire un oculaire Huygens classique formé par deux simple lentilles plan-convexes avec la convexité en bas; diaphragme de champ visuel entre les deux lentilles). On observera ainsi la chromatique latérale du seul objectif. Par contre, avec l’oculaire conseillé par le constructeur, on mesurera l’aberration totale, qu’elle sera modeste ou nulle si l’oculaire possède le juste degré de “compensation”³.

Une mesure de la chromatique latérale peut être obtenue en mesurant la largeur des bordures colorées avec un oculaire micrométrique, et en l’exprimant comme pourcentage du rayon du champ visuel ou comme largeur absolue dans le plan de l’image intermédiaire.

NB: Les oculaires achromatiques négatifs comme le Huygens, avec le diaphragme de champ visuel entre les deux lentilles, montrent une bordure bleu aux bords de ce diaphragme; les oculaires achromatiques positifs (diaphragme de champ visuel par-dessous des lentilles) montrent une bordure sans couleurs; les compensateurs montrent en générale un bord rougeâtre.

Maintenant on porte une ligne opaque à la périphérie du champ, tangentiellement par respecte aux marges mêmes.

Eh bien, quand on utilise un objectif moyen/fort classique avec un oculaire achromatique, ou devrait paraître un passage blanc-noir net (comme il devrait se vérifier avec un réseau à dépôt métallique), on remarquera que la région noire est envahie par un bord coloré, qui représente une

² Voir dans www.funsci.it, le manuel “Problèmes techniques de la microscopie optique”, chap. 19.3.

³ La “compensation” n’est pas un “oui-non”, un “tout ou rien”, car le maximum de l’aberration, aux bords du champ, n’est pas toujours le même. En plus, la chromatique latérale de l’objectif n’a pas un cours linéaire dans le champ et celle de l’oculaire devrait suivre la même loi, mais il n’y réussit pas d’une façon générale. Voilà parce que les systèmes CF sont plus corrects sur tout le champ.

image de plus grandes dimensions par respect à l'image blanche (le bord coloré bleu des lignes blanches se pousse vers l'extérieur). À la couleur de ce bord correspond donc le plus fort agrandissement, donc une longueur focale plus petite.

Dans le cas normal, la couleur est bleue, la plus petite longueur focale se vérifie avec les longueurs d'onde plus petites du spectre (bleu-violet) et cela correspond à une aberration sous-correcte. Dans les formules classiques d'objectifs, selon le schéma d'Amici, ce résidu dépend de la présence, dans les objectifs moyens et forts, d'une lentille frontale simple: sa chromatique latérale ne peut pas être corrigée par les lentilles suivantes, qui se trouvent trop éloignées d'elle. Voilà parce que E. Abbe, à la fin du XIX siècle, dessina les oculaires « compensateurs ».

Seulement depuis environ 1975 il a été possible de calculer les systèmes complexes cités auparavant (CF) dans lequel la chromatique latérale sous-correcte est essentiellement éliminée. Ces objectifs sont vendus sous différents noms commerciaux et naturellement ils doivent être utilisés avec des oculaires achromatiques. Comme il a été mentionné auparavant, la chromatique latérale dépend, plus que d'autres aberrations, de l'accouplement objectif-oculaire.

La chromatique latérale ne dépend pas de l'ouverture, mais il ne faut pas fermer trop le diaphragme du condenseur pour ne pas susciter des phénomènes de diffraction qui rendraient les bords colorés moins visibles.

ABERRATIONS “DU POINT” ACHROMATIQUES: Sphérique, Coma, Astigmatisme

Ces aberrations sont dépendantes de la longueur d'onde λ , dans le sens que la valeur de λ influence les dimensions de l'image d'un objet ponctuel, mais elles se présentent aussi en radiation monochromatique. D'ici leur nom.

Plus que les autres aberrations du point (celles chromatiques), les aberrations achromatiques provoquent une forte altération de l'image de diffraction et donc les deux effets doivent être étudiés ensemble. C'est pourquoi nous croyons utile de tirer au clair quelque principe.

-- L'OBJET “PONCTUEL” et la DIFFRACTION (voir le manuel “Problèmes techniques de la microscopie...”, Chap. 18)

Soit donné un système optique idéal exempt de toute aberration; d'un objet géométriquement “ponctuel” il produit une image réelle, dépourvue de dimensions. Si on considère seulement les phénomènes de l'optique géométrique, l'image de l'objet cité doit être encore ponctuelle, avec n'importe quel valeur de l'agrandissement: on ne peut pas agrandir un point sans dimensions. Mais en réalité la diffraction altère les choses; si on tient compte de l'optique ondulatoire, c'est-à-dire de la nature ondulatoire de la lumière, on doit dire que l'onde sphérique engendré par l'objet s'agrandit jusqu'à rencontrer la lentille, puis, au-delà de la lentille, elle se réduit, toujours en restant sphérique, vers un point-image qui est le centre d'une deuxième onde sphérique. Mais le faisceau engendré par l'objet est délimité par la lentille, au moins par sa monture, par ses bords, un espèce de diaphragme; le long des bords de ce diaphragme la diffraction altère la forme du faisceau qui ne produit plus aucun point image, mais une figure caractéristique qui, dans le cas théorique cité (système idéal) présente un disque centrale entouré d'anneaux de diamètre croissant et d'intensité décroissante. Cette “figure de diffraction” ou “d'Airy” ou “**centrique**” est visible dans la fig. 4 et son profil photométrique, en section médiane, dans la fig. 5.

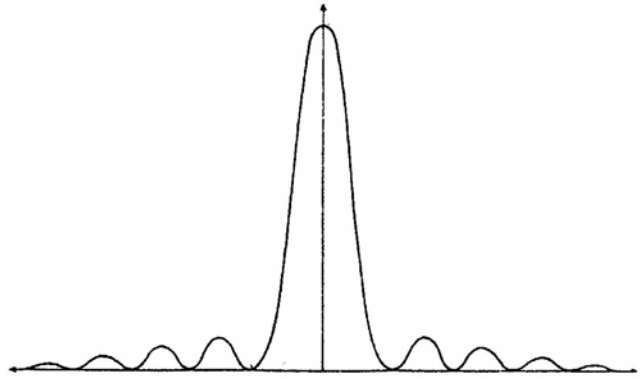
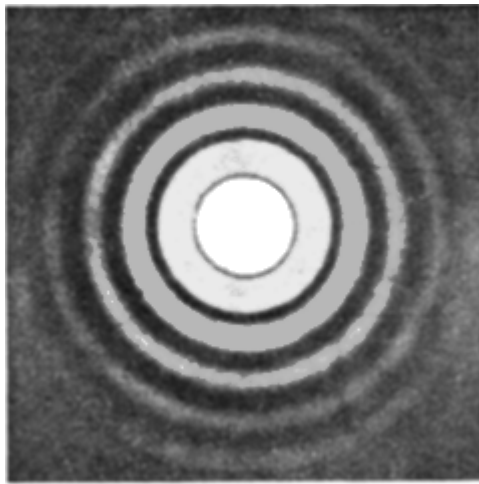


Fig. 4/5 - Figure de diffraction ("centrique") issue dans les conditions de meilleure focalisation d'un système optique convergent idéal ("diffraction limited") pour un objet géométriquement ponctuel. À gauche, dans le plan image. À droite, son profil photométrique observé le long de son diamètre.

Fig. 6 (à droite) - Profil photométrique d'une centrique dans les conditions de meilleur focalisation (courbe 1), et pour une onde défocalisée (courbe 2) pour la quelle la distance le long de l'axe par respect à l'onde idéal ne dépasse pas à pleine ouverture la valeur de $\lambda/4$ (critère de Lord Rayleigh)⁴. L'intensité au centre de la figure de la centrique défocalisée est environ le 80% de celle idéale.

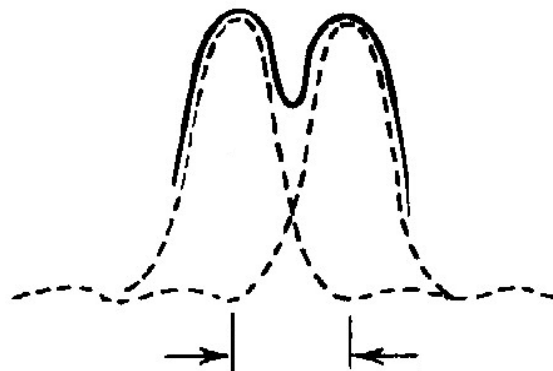
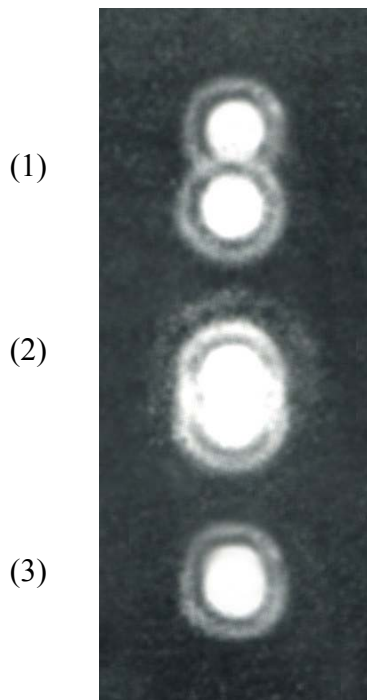
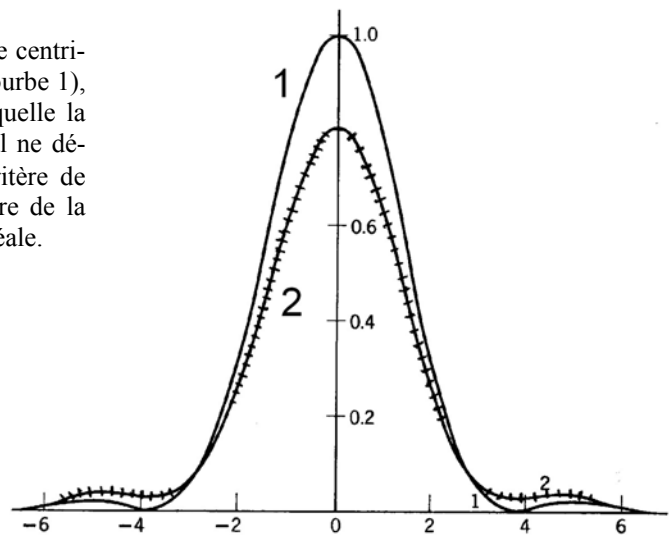
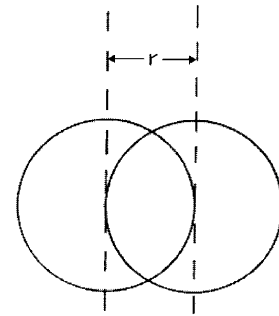


Fig. 7 et 8 – (1) Deux centriques (à gauche, en haut) complètement résolues – (2) les mêmes aux limites de la résolution (à gauche au centre) (dans la figure à droite on voit le profil photométrique correspondant: la courbe par trait entier représente le recouvrement des deux centriques) – (3) deux centriques pas résolues, avec l'apparence d'un centrique unique, parce qu'elles sont trop rapprochées (à gauche en bas).

Dans le cas (2), comme on peut déduire du profil photométrique à droite, les centres des deux centriques sont éloignés d'une longueur égale au rayon du premier anneau sombre.

⁴ On fait ici la comparaison entre l'onde idéale et l'onde défocalisée en supposant que les deux ondes se touchent à la base. Ensuite, on mesure la distance entre les deux courbes en direction parallèle à l'axe et pour les plus grandes valeurs d'ouverture du système.

Fig. 9 - Schéma de la limite de résolution pour les centres de confusion correspondants à deux points-image: leur distance réciproque est égal à leur rayon, r (critère de Lord Rayleigh).



Cette figure théorique vient en pratique altérée par:

- 1) lumière diffuse dans le système (réflexions aux surfaces des lentilles ou du tube, imperfections du verre, etc.)
- 2) fautes de fabrication (surfaces pas sphériques des lentilles, inhomogénéité (ou dishomogénéité) du verre, etc.)
- 3) fautes d'assemblage (de centrage ou d'orientation (« alignement ») des lentilles et d'autres parties optiques interposées)
- 4) fautes de mise au point (voir la Fig. 6, courbe 2) qui en élargissent de toute façon le diamètre
- 5) aberrations du point.

Dans un microscope, même de moyenne qualité, les aberrations du point sont normalement négligeables “sur l'axe” (région centrale du champ visuel, très près de l'axe optique); ici, en général, il est possible d'observer la centrique presque idéal. Aussi les causes décrites au paragraphe 1 et 2 sont normalement négligeables, au moins avec des objectifs pas trop forts.

Nous rappelons que la résolution, la possibilité de voir deux points-image séparés, est jugée comme satisfaisante quand les deux points sont éloignés l'un de l'autre au moins comme le rayon du disque d'Airy⁵. (Figg. 7, 8 et 9). Dans ces conditions, le centre du disque d'Airy de chacune des deux centriques tombes sur le premier anneau noire de l'autre centrique.

Étant donné que le rayon du disque, comme il résulte du calcul, est:

$$r' = 0,61 \lambda / n' \text{ sen } \alpha'$$

- dans laquelle $n' \text{ sen } \alpha'$ est l'ouverture numérique de la lentille du côté image - r' représente aussi la moindre distance résoluble, donc la limite théorique supérieure de la résolution, côté image.

Il est évident que la résolution est de tant plus grande que plus petit est r' . Nous disons aussi que⁶, si deux-points-image sont éloignés moins de r' ne se résolvent pas, donc ne sont pas vus séparés, c'est-à-dire résolus.

Ce critère s'applique au côté image ($n' \text{ sen } \alpha'$, nous avons dit, est référé au côté image). Mais on peut considérer au point de vue conceptuel un déplacement des centriques sur le plan objet, comme s'ils existassent des centriques sur le plan-objet géométriquement correspondantes à celles du coté image. Sur le plan objet on peut répéter tout ce que nous avons dit plus haut: le rayon r du disque d'Airy est encore: $r = 0,61 \lambda / n \text{ sen } \alpha$ (dans ce cas $n \text{ sen } \alpha$ se réfère au plan-objet) et r est la limite de résolution côté objet⁷. Évaluer la résolution côté objet nous indique quels sont les plus petites distances entre les structures que l'instrument permet de voir séparées.

Et encore: qu'est-ce qu'il arrive si deux ou plus points-objet sont éloignés entre eux moins de r ?

Globalement ils produiront une centrique indiscernable de celle d'un point unique qui soit aux milieux des deux points-objet cité (image 7, à gauche, en bas - 3). En autres mots, on peut « percevoir » la présence d'un objet, même quand il est beaucoup plus petit de la limite de résolution, c'est-à-dire on en perçoit l'existence, même si on ne peut pas résoudre sa structure, c'est-

⁵ Le “disque d'Airy” est le cercle central, le plus lumineux, de la centrique qui contient le 84% du flux total de l'entière figure.

⁶ Selon le classique “critère de Lord Airy”, généralement accepté.

⁷ Pour une mesure directe de la résolution, voir l'appendice 1).

à-dire observer sa forme.

Ainsi, si r est la limite de résolution ou de “séparation” de points distincts, nous aurons une limite de “perception” pour petits objets très inférieurs à r : pour un objet circulaire opaque sur fond clair, de diamètre P , la limite de perception est environ: $P = r/5$; pour une ligne obscure sur fond clair, de largeur L , la limite est encore plus petite: $L = r/60$ (voir le manuel “Problèmes techniques de la microscopie...”, chap. 15).

Si l’objet est par contre lumineux sur fond sombre, la limite de P est donné seulement par des considérations photométriques: chaque objet clair, même très petit, est visible sur fond noir pourvu qu’il émette une quantité de radiation suffisante à exciter la rétine de l’observateur ou une plaque photographique, et le fond soit assez sombre pour donner un contraste d’au moins le 3%.

Celui-ci est le principe de l’“ultra-microscopie”, qui n’est pas autre que l’observation sur fond obscur d’objets plus petits de la limite de résolution.

En tout cas, un système optique est “optiquement parfait” si, d’un point-objet, il fournit une centrique essentiellement égale à celle théorique; il n’est pas “parfait” si la centrique est déformé de manière appréciable à cause de la présence d’aberrations du point. Il y a différents critères mathématiques pour évaluer cette déformation⁸.

En ce qui concerne le “point-objet”, il est considéré “optiquement ponctuel” quand il est si petit que son image géométrique a un diamètre (donné par le diamètre de l’objet multiplié pour l’agrandissement du système) plus petit de $2r$. Dans ces conditions, ce point peut fournir une image assimilable à une centrique idéale, ses dimensions sont négligeables et par suite il est optiquement un vrai point.

-- Le “STAR TEST” (voir l’article n° 21)

En astronomie, pour contrôler la qualité optique du télescope, on observe une petite étoile (de ce fait vient le nom de “star test” ou “contrôle de l’étoile”) et on vérifie si le système en fournit une figure de diffraction idéale ou altérée. On utilise ainsi un objet ponctuel naturel.

En microscopie, on produit des objets ponctuels artificiels de différente manière.

Le plus simple est de déposer de la poussière sur un porte-objet (éventuellement couvert par un couvre-objet) et de l’éclairer vivement en champ noir ou au moins avec éclairage latéral, par ex. avec une lampe à faisceau concentré ou avec une micro-lampe, par ex. du type pour stéréomicroscopes. En cherchant avec patience entre les grains les plus petits, on en trouvera toujours de cette façon quelqu’un si petit qu’il montrera une centrique reconnaissable. Commencer la recherche au centre du champ visuel, avec un oculaire puissant.

Industriellement, on soumet une lame de verre plan-parallèle (un porte-objet normal) à une déposition de vapeurs d’aluminium sous vide (pas de chrome, pas de protection en silice – SiO_2). La présence de poussière ou autres irrégularités provoque toujours dans la couche d’aluminium un grand nombre de trous de chaque forme et dimension⁹. On recouvre le porte-objet, c’est-à-dire le star-test, avec un couvre-objet ou lamelle de l’épaisseur prévue par l’objectif en examen. On observe le test avec un objectif de bonne qualité; en cherchant un peu, on verra des images de différente intensité; les plus intenses montreront une forme irrégulière: les trous sont trop grands et leur image géométrique est plus grande que la centrique. En allant vers les images de moins en moins intenses, on verra des images de plus en plus petites jusqu’à que, depuis un certain moment, diminue seulement l’intensité, pendant que forme et dimensions restent constantes: cela signifie que l’image géométrique est plus petite que la centrique et par suite on observe seulement cette dernière. Près de l’axe, avec un bon objectif, on devra voir un disque d’Airy avec au moins deux anneaux¹⁰.

⁸. Pour tels systèmes “optiquement parfaits”, il existe en anglais une définition très synthétique: “diffraction limited”, que signifie “limité par la seule diffraction”.

⁹. Comme fournisseurs de star test valent les deux adresses déjà citées à propos des réseaux.

¹⁰. Imperfections inévitables rendront peu définie la centrique fourni par les forts objectifs, notamment à immersion.

Quand on observe avec le star test des centrées régulières, (et nous avons dit que ceci doit arriver avec chaque bon instrument au moins près de l'axe) cela signifie que cet instrument fournit le maximum théorique de la résolution; il est, comme déjà précisé, "optiquement parfait" c'est-à-dire qu'aucun talent du constructeur ou aucune ultérieure réduction des aberrations peut dépasser cette limite.

Dans ces conditions il est inutile de mesurer la résolution: elle est donnée simplement par r et elle est liée, en supposant d'opérer en lumière blanche, seulement à l'ouverture, comme il résulte par la formule citée auparavant.

De plus, en disposant d'objectifs avec diaphragme iris incorporé, comme ceux à immersion pour champ noir, il est facile de voir la centrée qui s'élargit et se serre pendant qu'on ferme et ré-ouvre le diaphragme.

Les trous les plus grands du star tests sont évidemment incapables de donner une centrée régulière. Ils peuvent servir cependant à d'autres buts:

- S'ils se trouvent aux bords du champ, ils peuvent servir à évaluer la chromatique latérale, pour les mêmes motifs dits autrefois pour les réseaux à lignes, bien que ces derniers soient bien plus pratiques.

- Au centre du champ, ils peuvent servir pour le contrôle de la chromatique longitudinale (variation de la couleur des bords pendant la focalisation).

- En chaque cas, en offrant un objet très lumineux sur fond noir, ils servent à évaluer les "images catadioptriques". Celles-ci sont des images apocryphes qui se forment à cause de réflexions imprévues aux surfaces des lentilles ("cata"), et de réfractions dans les lentilles mêmes ("dia"), images indépendantes de la formation de l'image principale. Elles peuvent former ainsi des images de n'importe quelle dimension et position, généralement défocalisées et alignées le long d'un diamètre du champ, qui se superposent à l'image de l'objet et réduisent le contraste. Le fond noir fourni par le star test aide à révéler la présence de ces images catadioptriques.

On rappelle encore que, dans les objectifs à contraste de phase, l'anneau de phase provoque une altération de la centrée par respect à celle d'un objectif identique non de phase: le disque d'Airy et plus petit, on peut avoir par conséquent une légère augmentation de la résolution, mais les anneaux sont beaucoup plus intenses: on en voit au moins 4 ou 5. Cela provoque une dispersion du flux contenu dans la centrée, donc un voile de lumière constitué par le recouvrement de tous les anneaux de tous les points-image, et ensuite une perte de contraste.

Même les objectifs « plan », à cause du grand nombre de lentilles, peuvent produire des centrées anormales avec des anneaux peu nets.

À ce moment là, on peut penser qu'un microscope est formé optiquement de surfaces sphériques ou planes centrées sur un axe géométrique commun ("axe optique"). Donc tout le système possède un axe de symétrie rotatoire qui est l'axe optique.

N'importe quel point-objet mis sur l'axe, donc, doit produire une image avec une forme circulaire et symétrique autour de l'axe, même si elle est défocalisée.

Si l'on voit une centrée qui n'est pas circulaire, bien que sur l'axe, elle peut être due seulement à quelque élément pas symétrique par respect à l'axe: une lentille mal centrée, une lentille ou un prisme avec des surfaces pas perpendiculaires à l'axe, inhomogénéité du verre des lentilles, une surface avec une composante cylindrique, etc.

Quand une centrée apparaît symétrique autour de l'axe, il faut faire un autre contrôle avant de conclure que tous les centrages du système sont parfaits. On porte le trou du star test en au moins quatre positions différentes, uniformément distribuées le long des marges du champ visuel; les figures qui s'observeront, et qui seront plus ou moins allongées (il y a toujours quelques résidus d'aberrations sur les bords du champ) doivent être toujours les mêmes et leur direction d'allongement doit être dirigée toujours parallèlement ou perpendiculairement à un rayon passant pour l'axe.

Dans la formule qui exprime le rayon de la centrée, considérée auparavant, apparaît la lon-

gueur d'onde λ . Cela signifie que r dépend de λ : c'est pourquoi, en observant la centrique en lumière blanche, elle est bordée de rouge (r est grand pour les plus grandes longueurs d'onde). Mais il s'agit d'un fait peu percevable. De toute façon il est évident que, en utilisant des radiations à courte λ , bleu-violet, UV, etc., il est possible en principe d'augmenter le pouvoir résolutif. En pratique cependant il y a trop de difficultés techniques pour choisir cette solution.

Quand on utilise le star test, l'onde émergente du trou dans la couche métallique est due essentiellement à la diffraction. Donc l'ouverture du condenseur n'a pas importance. Pour des raisons photométriques il est utile cependant d'augmenter telle ouverture à la limite en ouvrant le diaphragme, en diminuant la longueur focale (en insérant la lentille frontale escamotable, si présente), éventuellement avec l'immersion du condenseur, etc. Tout cela doit être rappelé pendant les contrôles de la sphérique, de la coma et de l'astigmatisme.

Quand on passe d'un objectif faible à un fort, la centrique normalement apparaît plus grande. Telle est la raison: dans le schéma d'objectif dessiné ci-dessous, on remarque que l'agrandissement de l'objectif, Mob , est égal au rapport entre les deux distances "conjuguées": $a = AO =$ conjugué coté objet = distance objet-objectif et: $a' = OA' =$ conjugué coté image = distance objectif-image; donc: $Mob = a'/a = OA'/AO$.

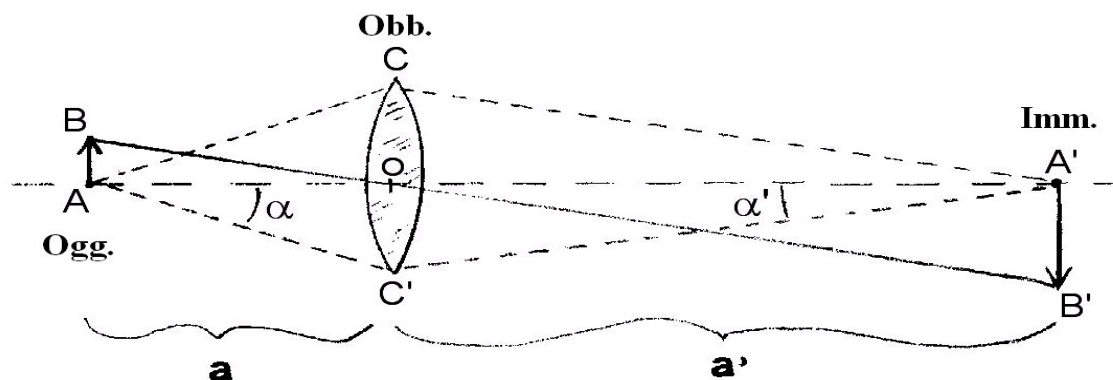


Fig. 10 - Schéma d'objectif.

Cette formule se prouve en recourant aux propriétés des deux triangles semblables AOB et A'OB', et en rappelant que $Mob = A'B'/AB$, par définition.

Étant donné que les deux cônes de rayons avec sommet en A et A' ont en commune la base, c'est-à-dire le diaphragme de la lentille, même le rapport des ouvertures côté objet et côté image ($n \sin \alpha$ et $n' \sin \alpha'$) est égal à peu près au rapport des distances OA' et AO, c'est-à-dire à Mob . Cela est rigoureux seulement avec un système aplanétique qui possède des plans principaux sphériques, dans lequel on peut supposer $AO \approx AC$ et $\sin \alpha = CO/AC \approx CO/AO$.

Puisque le diamètre de la centrique côté image, celle qui se voit dans l'oculaire, dépend de l'ouverture côté image, pour avoir le même diamètre avec tous les objectifs il faudrait qu'aussi l'ouverture côté image fût constante.¹¹ et donc que l'ouverture côté objet grandît en proportion à Mob , ce qui n'arrive pas.

Pensez par exemple à un objectif avec $Mob = 4:1$ et à un objectif avec $Mob = 40:1$. Dans l'objectif plus fort, à la suite de ce que nous avons déjà affirmé, le rapport entre les ouvertures côté objet et côté image est 40:1; dans l'autre objectif il est 4:1. Si la centrique côté image doit être la même pour les deux objectifs, aussi l'ouverture côté image doit être la même, donc les ouvertures côté objet devraient être dans le même rapport des agrandissements, c'est-à-dire $40:4 = 10:1$

Mais l'objectif 40 a une ouverture en moyenne de 0,7, pendant que l'objectif 4 a une ouverture d'environ 0,1. Donc le rapport des ouvertures (0,7:0,1 = 7:1) est à la défaveur de l'objectif

¹¹. C'est la même chose dire que devrait être toujours constant le diamètre la pupille de sortie de l'objectif.

fort qui, en proportion, a une ouverture plus petite, donc une centrique plus grande.

Mob	NA	NA/Mob × 1.000
4	0,12	30
10	0,25	25
20	0,45	22,5
40	0,65	16
60	0,85	14
100	1,30	13

On peut observer ce tableau, qui compare Mob et NA pour une série d'objectifs courants. Dans la troisième colonne on indique le rapport entre ouverture NA et agrandissement Mob, après l'avoir multiplié pour 1.000 afin d'éliminer la virgule.

On remarque que les objectifs les plus forts voient le propre NA grandir, mais en mesure plus petite de Mob: ils ont donc un défaut d'ouverture qui se répercute du côté image, et pourtant dans le diamètre de la centrique qui apparaîtra plus grande.

On peut utiliser le star test aussi avec un microscope stéréoscopique. La centrique apparaîtra plutôt grande avec les forts agrandissements à cause de la faible ouverture des objectifs stéréoscopiques et elle sera souvent déformée par la présence de sensibles aberrations, en particulier si le schéma suivi par le constructeur est celui d'Abbe, à objectif commun (CMO), car les deux "canaux" optiques traversent l'objectif en dehors de son axe.

Soit le star test que le réseau-objet conseillé pour le contrôle de la distorsion, courbure de champ et chromatique, ne sont pas trouvables dans le marché des microscopes, mais seulement près d'industries spécialisées: le constructeur n'aime pas que le client puisse exécuter des contrôles approfondis sur ses produits; d'ailleurs une certaine méfiance vers la compétence technique du client moyen n'est pas injustifiée. Ces réseaux-objet doivent donc être commandés exprès à une industrie capable de déposition de couches minces sous vide.

Mais revenons aux aberrations du point, achromatiques.

L'aberration SPHÉRIQUE

Cette aberration consiste dans une variation de la longueur focale, donc de la position de l'image, pendant que change l'ouverture, c'est-à-dire pour des rayons qui traversent la lentille à différente hauteur sur l'axe.

Elle se présente sur tout le champ, mais il convient de l'observer sur l'axe pour éviter d'y superposer les effets de la coma et de l'astigmatisme.

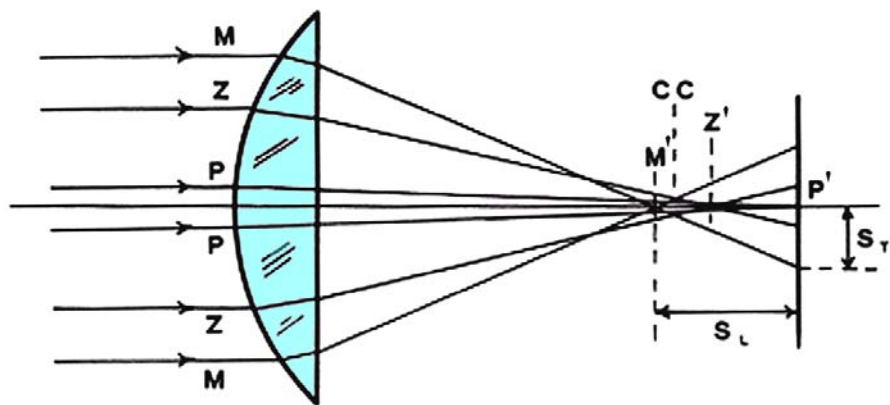
À la sphérique contribuent: l'objectif, la lamelle, la longueur du tube et, en petite mesure, les prismes du tube et l'oculaire. La lamelle est interposée entre objet et objectif et fait pourtant partie du système optique du microscope.

Souvent, un résidu de sphérique dans l'objectif peut être corrigé avec une différente épaisseur "**d**" de la lamelle ou une différente longueur du tube; un couvre-objet trop mince, avec un défaut d'épaisseur égal à Δd , peut être compensé en allongeant le tube d'une longueur Δt ; la formule est: $\Delta t = \Delta d \cdot \text{Mob}^2 / 250$, dans laquelle Δt s'exprime en mm et Δd en centième de mm. Mob est l'agrandissement de l'objectif (voir les manuels "Problèmes techniques de la microscopie ...", Chap. 13.2.3).

La sphérique est exprimable comme diamètre du "cercle de confusion" pour le fait que, de chaque point-objet, il y a d'autant d'images combien sont les valeur d'ouverture, donc il n'existe pas un faisceau qui se dirige vers un point défini, mais ce faisceau se rétrécit dans une zone de minime diamètre pour se rélargir plus loin.

Tel faisceau est appelé “caustique”. Le “cercle de confusion” dans ce cas est la section du faisceau dans le point le plus étroit.

Fig. 11 – Schéma d’aberration sphérique. L’enveloppe de rayons marginaux (M), centrales ou “paraxiaux” (P) et intermédiaires ou “zonales” (Z) constitue la « caustique ».



Il y a donc un foyer marginal (M'), un centrale (P') et un zonale (Z'). CC représente le point le plus étroit de la caustique (cercle de moindre confusion). La distance entre M' et P' donne une mesure de l’aberration sphérique de cette lentille. La source (ponctuelle) se trouve à gauche, à distance infinie, sur l’axe.

Eh bien, le diamètre du cercle de confusion est proportionnel au cube de l’ouverture de l’objectif. Donc la sphérique est de plus en plus forte en passant des faibles objectifs aux forts. Étant donné qu’à la sphérique donne une contribution aussi la lamelle, même cette contribution est proportionnelle au cube de l’ouverture de l’objectif; donc les forts objectifs sont très sensibles à l’épaisseur de la lamelle; un écart dans l’épaisseur d égal à $\pm 0,01$ mm produit déjà des effets sensibles. En conséquence les forts objectifs, parfois, avec une NA plus grande que 0,7, ont un embout ou collier tournant “de correction” qui permet de changer l’ hauteur d’une lentille (c’est souvent le premier ménisque au dessus de la frontale), et de cela la correction de la sphérique totale de l’objectif. Cette aberration est en effet très sensible à la distance entre les lentilles et beaucoup de constructeurs, pour ne pas serrer trop les tolérances de fabrication, interposent entre une lentille et l’autre de l’objectif, pendant l’assemblage, un numéro variable de minces anneaux-espace, souvent d’aluminium, d’épaisseur environ 0,01 mm, à fin d’obtenir le meilleur compromis (voir le manuel “Problèmes techniques de la microscopie...”, Chap. 13.2.3).

NB: On rappelle que la lamelle, toute seule, produit une sphérique surcorrigée, c’est-à-dire de signe opposé à celle d’un lentille simple non corrigée: les rayons marginaux correspondent à une longueur focale supérieure à celle des rayons paraxiaux (proches de l’axe), au lieu qu’à une longueur focale plus petite, comme il arrive dans une lentille souscorrigée ou ne pas corrigée. Donc un objectif normal calculé pour $d = 0,17$ mm est de soi même souscorrigé, quand il est utilisé sans lamelle.

L’absence de sphérique se contrôle avec le star test en observant un “point” comme défini au début, et en changeant légèrement la mise au point des mêmes quantités sur et sous la position de meilleur focalisation. Dans ces conditions, on verra la centrique s’élargir, le disque se rapetisser jusqu’à disparaître, peut-être les anneaux s’élargir et augmenter d’intensité et de nombre, mais **les deux figures sur et sous la meilleure mise au point, doivent être identiques**. N’importe quel défaut de symétrie entre ces deux figures (Fig. 12 en haut, à gauche) est preuve de l’existence de sphérique mais, avant d’inculper l’objectif, il faut être bien sûrs que la longueur du tube soit la même prévue par le constructeur (il existe des tubes de longueur réglable, spécialement monoculaires, et tubes bioculaires de longueur pas constante) et l’épaisseur de la lamelle soit correcte.

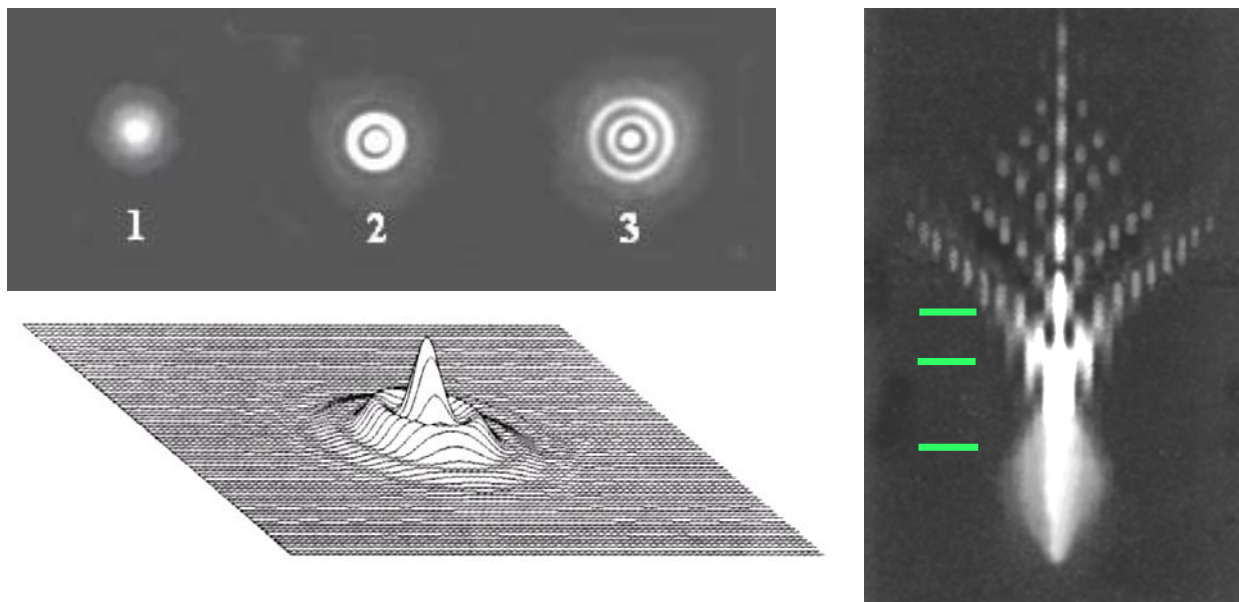


Fig. 12 – À gauche, en haut – Centriques dans un objective affectée d’aberration sphérique, reprises sous ou sur le plan de meilleur focalisation (à droite et à gauche – 1 ou 3) ou dans la meilleure focalisation (au centre - 2). L’image “nuancée” (1), en particulier le halo, est peu visible à cause du fort contraste que l’émulsion photographique ne réussit pas à enregistrer. Bien visible est par contre l’image “aux anneaux” (3). Dans l’image avec la meilleure focalisation (2), le premier anneau est beaucoup plus intense du normal.

À droite - section longitudinale axiale d’un faisceau convergent dans les alentours de la région de meilleure focalisation. En correspondance du rectangle vert en bas: image nuancée. Sur le rectangle au centre: meilleure focalisation est encore due à un résidu de sphérique.

On remarque, vers le haut, une succession de taches claires accompagnée, de deux cotés, de taches de plus en plus faibles: c’est ce qui apparaît avec une défocalisation croissante, c’est-à-dire alternativement disque central clair et sombre de plus en plus entouré par des anneaux plus larges et plus pâles.

Si on s’imagine par contre le même phénomène, centrique affectée de sphérique, dans une section perpendiculaire à l’axe, à l’hauteur de la meilleur focalisation, mais en représentation axonométrique, on aurait une structure comme celle à gauche en bas, dans laquelle les hauteurs indiquent les intensités, mieux de comme l’on puisse apprécier du détail au centre (2) de la figure, à gauche en haut.

Celui qui confectionne le star test, devra bien mesurer l’épaisseur de la lamelle avant de la lui coller et devra l’écraser avec un petit poids jusqu’à quand le Baume du Canada n’est pas durci, au moins une semaine. En plus, il ne doit pas se fier s’il durcit sur les bords de la lamelle: au centre il peut rester mou pour des années. Dans le cas de préparations déjà faites, on peut contrôler l’épaisseur de la lamelle en mesurant l’épaisseur de la préparation dans et hors de la lamelle (ça suffit un “Palmer” centésimal, Fig. 13A), et en faisant la différence entre les deux lectures (fig. 13B). Cependant, si l’objet est collé au contraire à la lamelle au lieu qu’au porte-objet, on peut commettre une erreur par excès à cause de la couche de baume restée entre objet et porte-objet.

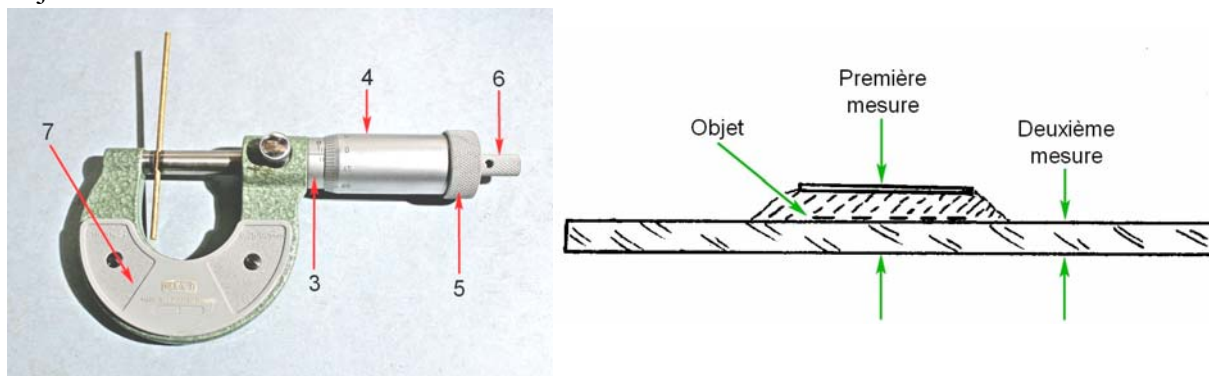


Fig. 13 A/B – Micromètre centésimal à mâchoire (« Palmer »).
Schéma des mesures à effectuer pour calculer l’épaisseur de la lamelle + résine sous-jacente.

Pour être certains qu'il n'existe pas de sphérique, on peut aussi observer simplement la centrique en condition de meilleure focalisation sur l'axe: les anneaux doivent être nets, mais beaucoup plus pâles du disque; on doit en voir seulement une paire. Un plus grand nombre ou une plus forte intensité des anneaux indiquent un résidu de sphérique, de n'importe quel origine, objectif, lamelle, tube, ou une faute de mise au point ou la présence d'un anneau de phase ou d'autres dérangements optiques (Fig. 12 à gauche – 2). À ce moment là, entrera en jeu l'expérience de l'opérateur pour une évaluation correcte.

Si un résidu de sphérique existe, la centrique dans la meilleure focalisation ressemble à celle normale, mais le disque d'Airy est plus grand et les anneaux sont plus intenses. En changeant dans un sens la mise au point, les anneaux disparaissent, le disque s'amointri jusqu'à disparaître lui aussi et il reste seulement une tache nuancée sans structure, simplement plus claire au centre; celle-ci est "l'**image nuancée**" (Fig. 12 en haut – 1). En altérant la mise au point en sens opposé, le disque centrale s'amointri, après il devient sombre, puis il devient encore clair et si ailleurs, pendant que les anneaux augmentent de nombre, de diamètre et, au début au moins, aussi d'intensité: celle-ci est l'"**image aux anneaux**" (Fig. 12 en haut, 3).

Pour débrouiller ses idées sur tout cela (centrique, effets de la défocalisation et de la sphérique, etc.) il y n'a qu'à observer un star test bien éclairé, porter au centre du champ visuel un trou assez petit (on a déjà dit comme on fait à le choisir), insérer un objectif a sec moyen (ça va bien un 40/0,65 non plan ni apochromatique) et un fort oculaire. Si l'objectif est normal, c'est-à-dire calculé pour une lamelle d'épaisseur $d = 0,17$ mm, on recouvre le test avec une lamelle calibrée avec $d = 0,17 \pm 0,01$ mm. On devrait voir une centrique presque idéal qui se modifie de la même façon sur et sous la position de meilleure focalisation. Si maintenant, avec cet objectif même, on observe le test en dehors de la lamelle, c'est-à-dire avec $d = 0$, on introduit une sphérique sous-correctée: la mise au point "courte", avec l'objectif qui se rapproche de l'objet, donne l'image "à anneaux" et la mise au point "longue" donne l'image "nuancée".

Si on utilise l'objectif même avec deux lamelles ou bien un objectif épiscopique (objectif calculé pour $d = 0$), avec une lamelle seule, on introduit une épaisseur de verre ($d = 0,17$ mm) en plus par respect à tout ce qui est prévue dans le calcul de l'objectif et on retrouve les mêmes figures, mais les effets de la défocalisation courte et longue sont inversés.

À la même manière, avec une lamelle normale et un tube trop long on a l'image aux anneaux, en soulevant l'objectif et celle nuancée en le baissant; avec le tube court, on a l'image aux anneaux en baissant l'objectif et celle nuancée en le soulevant.

Le tube trop court produit donc une sphérique sous correctée comme une lamelle trop mince.

Voir aussi l'appendice 2.

Tous les bavardages exposés jusqu'à présent sur le fonctionnement des objectifs se réfèrent tacitement aux objectifs "classiques", c'est-à-dire avec « la deuxième conjuguée finie ». Cependant il est facile de les appliquer aux objectifs "correctés pour l'infini" dans lesquels l'image produite par l'objectif se trouve à une distance infinie, et elle est reportée dans l'oculaire par la "lentille du tube": il suffit de considérer l'objectif comme un système convergent équivalent composé de deux parties: le véritable objectif + la lentille de tube.

Ce système équivalent, étant donnée la puissance additionnelle de la lentille du tube, aura une longueur focale totale plus courte que celle de l'objectif tout seul; donc l'objet, bien focalisé, est éloigné de l'objectif légèrement plus de la longueur focale totale. Le système équivalent objectif + lentille de tube se conduit donc comme un objectif classique à conjuguées finies.

La COMA

Cette aberration dérive d'un différent agrandissement pour différents valeurs de l'ouverture: d'un point objet loin de l'axe ils existent beaucoup d'images à différentes distances de l'axe qui donnent globalement une figure de "coma" ou comète. La longueur de cette queue est proportionnelle environ au carré de l'ouverture de l'objectif.



Si le résidu de coma est léger, on observe une partie des anneaux de la centrique en direction de l'axe et une queue nuancée vers l'extérieur, ou vice versa (voir la fig. 19).

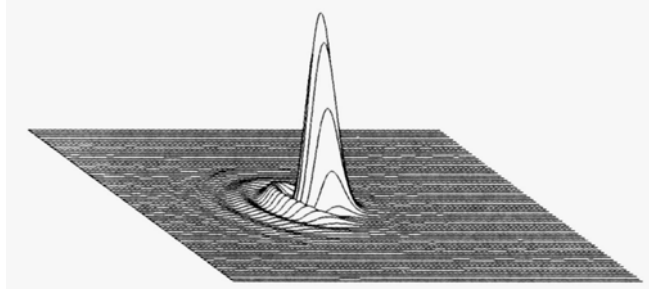
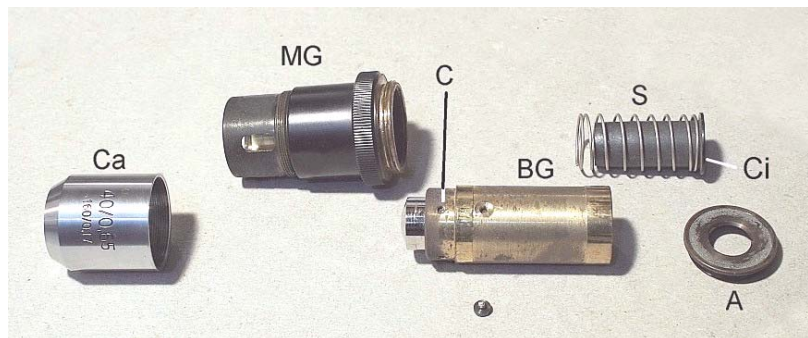


Fig. 14 A/B - Une typique figure de coma; à gauche, comme on la voit dans l'oculaire. À droite, la même en représentation axonométrique (l'hauteur est proportionnelle à l'intensité).

La coma est une aberration extra-axiale comme l'astigmatisme, c'est-à-dire qu'elle existe seulement "hors axe" dans un système idéal. Une figure de coma sur l'axe indique avec certitude un quelque élément de dissymétrie du système: en général il s'agira d'une erreur de centrage de quelque lentille, mais il peut s'agir d'une erreur de courbure de quelque surface, d'in-homogénéité dans les verres, etc.

L'utilisateur, souvent, peut corriger ces erreurs de centrage pourvu que le constructeur l'ait prévu: si les barillets des différentes lentilles sont vissés l'un sur l'autre, ou si ils sont tous serrés dans leur siège, seulement une intervention mécanique robuste peut remédier au décentrage. Si par contre une des lentilles d'un objectif de formule classique est montée dans un barillet plus petit de son siège, même sans desserrer l'embout à vis qui serre tout le paquet des lentilles (A, fig. 15), on peut déplacer le barillet avec le diamètre réduit ("flottant"), tout en le tenant perpendiculaire à l'axe. Pour ce déplacement, sont prévus dans le barillet général 3 ou 4 trous latéraux, parfois filetés pour permettre l'usage de petites vis (C, fig. 15). Avec une pointe ou une vis on pousse par petits coups le barillet flottant à travers l'un ou l'autre des trous, par tentatives, jusqu'à ce qu'au centre du champ on obtient une centrique de forme circulaire. Puis on serre l'embout A et on répète le test. En général les trous de centrage sont cachés par la chemise extérieure de l'objectif (Ca).

Fig. 15 – Un objectif achromatique classique: après avoir dévissée la « chemise » (Ca), généralement sans devoir extraire le barillet général (BG), on voit 3-4 trous de centrage (C), à travers lesquels on peut pousser avec une fine pointe sur la lentille « flottante » et réduire ou éliminer la coma sur l'axe.



Il faut remarquer que ce centrage, où possible, est un des peu interventions permises à l'utilisateur.

Dans le cas de la sphérique on peut modifier seulement les éventuels anneaux d'espacement ou la longueur du tube; dans le cas de la chromatique latérale on peut changer seulement le type d'oculaire et éventuellement le type de tube.

S'il y a un résidu de coma seulement loin du centre de l'image, la queue de la figure dans tous les points du bord du champ visuel doit être toujours "sagittale", c'est-à-dire directe comme un rayon (« radiale »), vers le centre du champ ou en sens opposé, mais toujours en étoile. Si on observe une queue ne pas dirigée en étoile il y a aussi ou seulement un décentrage.

Si on déplace légèrement la mise au point, d'un côté ou de l'autre, la figure de coma change

comme celle de la sphérique (Fig. 16).

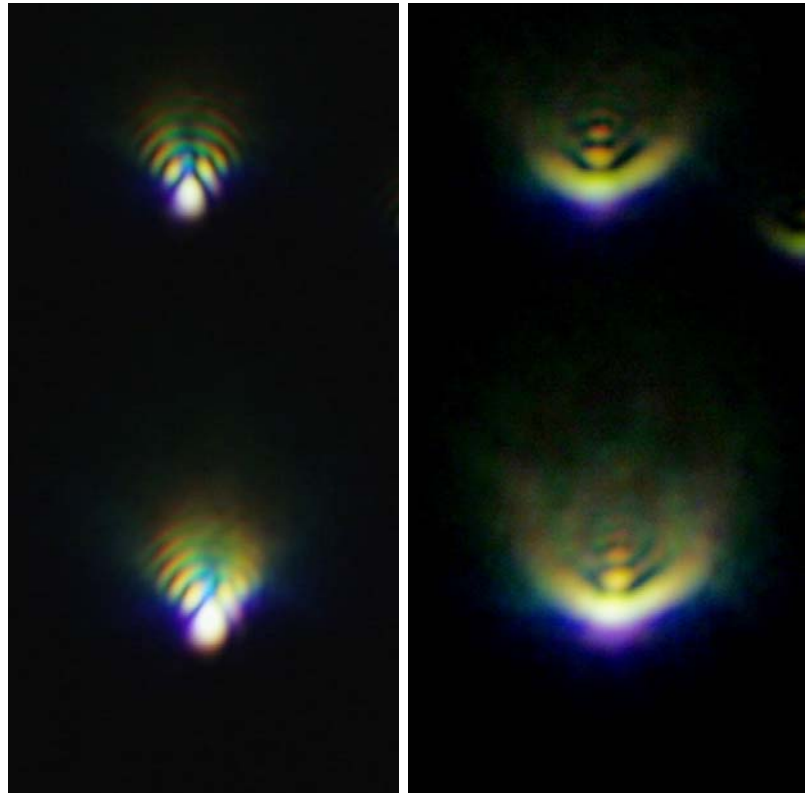
Fig. 16 A/B – On peut rapprocher ces figures à celle de la fig. 12: à différentes positions de focalisation correspondent des images « à anneaux » (à gauche) ou « nuancées » (à droite).

Le décentrage de ses figures rend naturellement la situation plus compliquée.

Dans ces deux figures ici à côté, on voit une très petite partie du champ visuel, reprise près des bords du champ même.

La figure de droite est allongée en direction parallèle au bords du champ (« tangentielle »); cela peut simuler une « focaline » d'astigmatisme: il faut être prudent!

En absence de coma, si on observe une figure allongée « tangentielle », c'est-à-dire tangente au bord du champ, il s'agit en général d'astigmatisme, voir ici dessous.



NB: Dans tous les cas d'aberrations extra-axiales il est bien d'utiliser un oculaire avec le plus grand index de champ prévu par le constructeur afin d'explorer tout le champ image nominale de l'objectif.

L'ASTIGMATISME

C'est une autre aberration achromatique « extra-axiale ». Dans un système centré, il ne doit pas exister sur l'axe, toujours pour les motifs de symétrie.

Il consiste dans le fait que l'image d'un point objet n'est pas « stigmatique », c'est-à-dire ponctuelle, mais allongée (« astigmatique », du grec « a » = négation et « stigmaté » = point).

En particulier, l'astigmatisme produit de chaque point-objet, sur les bords du champ visuel, deux images allongées, les « focales » ou « focalines » astigmatiques: l'une plus proche de la lentille, directe tangentiellement, l'autre, plus loin, radiale, en étoile. La distance entre les deux focalines et leur longueur grandissent à partir de l'axe vers les bords, en proportion au carré du champ, c'est-à-dire de la distance de l'axe; la longueur est directement proportionnelle à l'ouverture. Entre les deux focalines, le faisceau prend une section subcirculaire et cette section du faisceau représente le « cercle de moindre confusion ».

Les deux surfaces contenant les focalines radiales et tangentielles sont courbes avec la concavité vers l'objet; cela est une autre manière de se présenter de la courbure de champ qui consiste de la courbure non d'une image plane idéale mais de deux surfaces astigmatiques différentes. Naturellement, les deux surfaces se touchent sur l'axe, et pourtant sur l'axe la distance mutuelle et les dimensions des deux focalines astigmatiques s'annulent. Il est comme dire que sur l'axe il y n'a pas d'astigmatisme.

En utilisant la vis micrométrique, on peut même mesurer la distance, en direction parallèle à l'axe, entre les deux focalines, mais ça n'est pas très intéressant.

Quand l'astigmatisme se présente selon la théorie, comme on a cité ci-dessus, il se vérifie seulement loin de l'axe et les deux focalines, qui se rendent visibles en changeant la mise au point, doivent être orientées en direction rigoureusement radiale (sagittale) ou tangentielle. En cas contraire il y a aussi un décentrage.



Figg. 17/18/19 - Dans un objectif exempt d'autres aberration du point, l'astigmatisme peut produire des centrques en forme de croix dans la position de la meilleure mise au point (au centre), au lieu d'une figure ronde.



En déplaçant la mise au point d'un coté ou de l'autre on met en évidence les focalines radiales (en haut) ou celles tangentielles (en bas).



Dans ces trois images, on voit une petite région du champ visuel, dont l'axe se trouve en dehors de l'image même, en bas, très loin.

Si l'astigmatisme se vérifie sur l'axe, on ne peut pas se contenter de voir une centrique allongée: ça pourrait être de la coma. Pour être sûr, il faut changer la mise au point et observer deux focalines à 90° l'une de l'autre. Dans ce cas là, il s'agit probablement de "tilt", c'est-à-dire d'une faute de perpendicularité par respect à l'axe de quelque surface: un certain astigmatisme est introduit, par ex., dans ces illuminateurs épiscopiques ou dans ces tubex à dessin qui contiennent une lame semi-réfléchissante à deux faces parallèles, à 45° sur l'axe.

Il peut s'agir aussi d'une surface mal travaillée ou d'inhomogénéité du verre.

Si on considère probable le "tilt" de quelque lentille, on peut démonter l'objectif et vérifier que le tilt ne dépende pas d'un grain de poussière ou d'une "bavure" métallique qui s'interpose entre deux barillets.

Si l'orientation des focalines sur l'axe reste constante quand on tourne l'objectif sur son filetage, le tilt ne se trouve pas dans l'objectif.

En résumant, pour révéler soit la coma que l'astigmatisme il faut observer une forme de la centrique ou simplement du cercle de confusion qui ne sois pas circulaire, mais allongé.

Parfois, cet allongement résulte plus évident non pas dans la position de meilleure focalisation mais légèrement en dehors, en particulier si l'on observe une image "aux anneaux" (voir plus haut); naturellement, tout ce qui a été exposé sur l'orientation de la "queue" de la figure de coma et des "focalines" allongées de l'astigmatisme reste valide.

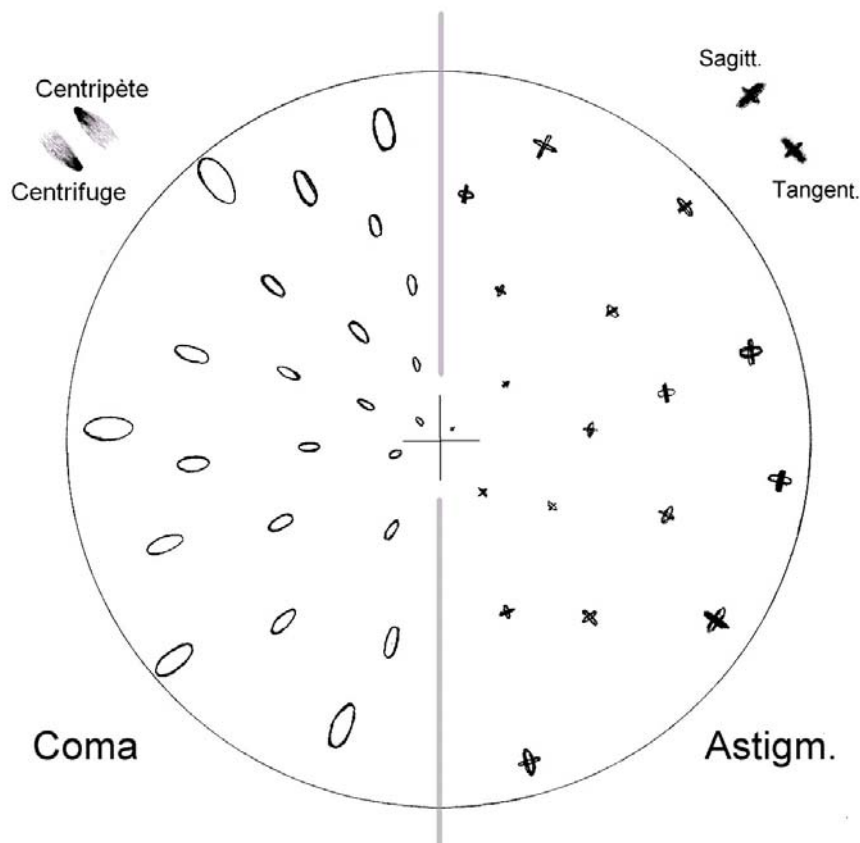


Fig. 20 – Ce schéma indique les figures de coma (à gauche) et d’astigmatisme (à droite) et leur orientation, comme elles paraissent dans le champ de l’oculaire d’un microscope bien centré.

Les focalines astigmatiques sont indiquées en forme de croix: pour chaque point du champ; il y a en réalité deux focalines qui se trouvent sur des surfaces séparées, mais elles ont été dessinées superposées.

Dans la fig. 20 soit les figures de coma que celles d’astigmatisme sont indiquées supposant l’absence d’autres aberrations. Si elles sont absentes au centre du champ et elles sont toujours symétriques par respect au centre du champ, on dit que ces deux aberrations sont « **symétriques** ». Si il y a une figure allongée au centre du champ (résidus de coma ou d’astigmatisme dans un système mal centré), ces mêmes aberrations sont appelées « **asymétriques** ».

Au point de vue de l’image microscopique et de la résolution, ce qui est important est la dimension de la centrique comme elle apparaît déformée par les différentes aberrations du point. C’est pourquoi il faut mesurer objectivement le poids global des aberrations (ou d’une seule dans le cas qu’on puisse admettre que les autres sont négligeables, mais loin de l’axe cela est bien difficile) en mesurant le diamètre du cercle de confusion compréhensif de la centrique idéale et de toutes les aberrations du point qui y sont superposées.

Mesurer ce diamètre avec le star test et un micromètre oculaire est impossible en générale étant donné que le fond est sombre et le cercle est généralement très petit. Il vaut mieux prendre comme unité de mesure le diamètre du disque d’Airy d’une bonne centrique observé sur l’axe. Ceci donne une idée de l’éventuelle déformation de la centrique causée par les aberrations dans d’autres zones du champ. On peut appeler cette unité de mesure “unité de diffraction” - u.d.).

Pour finir, on peut examiner le rapport entre le diamètre du cercle de confusion globale, dû à la somme des seules aberrations, et la longueur focale de l’objectif. Ignorons pour maintenant la centrique.

Supposés deux objectifs de même ouverture mais de différente longueur focale, on peut penser que celui à longueur focale plus courte représente une réduction en échelle de celui à plus longue focale, avec toutes ses dimensions linéaires réduites dans la même mesure (à part la deuxième conjuguée, qui dépend de la longueur du tube). Eh bien, étant donné que le cercle de

confusion dépend des aberrations (nous avons exclu l'effet de la diffraction, c'est-à-dire la centrique), et par conséquent il dépend de phénomènes géométriques, même le cercle de confusion (coté objet) sera réduit suivant la même échelle. Cela signifie que les objectifs les plus puissants ont un cercle de confusion plus petit et ils peuvent pourtant donner une plus grande résolution (encore dans le plan objet!). Ceci est une remarque simplement géométrique.

Pour la centrique (coté image), la question est différente: selon la formule

$$r' = 0,61 \lambda / n' \sin \alpha'$$

il est clair que, en opérant en lumière blanche, r' dépend seulement de l'ouverture ($n' \sin \alpha'$). La longueur focale n'entre pas dans la formule, même si les focales plus petites (objectifs plus forts) comportent en générale des grandes ouvertures (coté objet!).

On peut facilement démontrer que la pupille de sortie d'un objectif est proportionnelle à sa focale et donc elle est plus petite dans les objectifs les plus forts: l'ouverture coté image sera pour cela plus petite et la centrique plus grande: l'image intermédiaire est moins nette, comme savent bien tous le praticiens. Cela vaut à dire que même la résolution dans l'image intermédiaire est plus petite.

La réduction du cercle de confusion (toujours coté objet!) avec la diminution de la longueur focale est une des raisons pour lesquelles les objectifs de microscope atteignent aisément la résolution théorique, liée à la seule diffraction, pendant que ceci est difficile pour d'autres types d'objectifs.

Par respect, par ex., à un objectif photographique, l'objectif de microscope jouit d'autres avantages:

- il opère à un agrandissement fixe, et ceci permet à l'auteur du projet d'optimiser les calculs;
- il opère à ouverture fixe, avec le même avantage;
- ses petites dimensions permettent l'usage de matériaux rares et chers comme le fluorite;
- ses petites dimensions rendent moins probables les inhomogénéités dans les pièces du verre optique;
- étant donné qu'il s'agit de produits professionnels, la réduction du prix a moins d'influence pour imposer des solutions de compromis dans le projet et dans la fabrication;
- en nombreux cas il est possible de tolérer la courbure de champ;
- presque jamais se présente le problème de réduire le poids et l'encombrement du système optique, et par conséquent l'épaisseur des lentilles;
- le champ angulaire est petit; les champs des objectifs de microscope « à grand champ » ne dépassent pas la valeur de 8° . Dans les objectif photographiques, par ex., on arrive à 180° .

APPENDICE 1

Pour mesurer directement la résolution, en principe, il serait suffisant d'observer un réseau contenant des lignes parallèles opaques et transparentes, de plus en plus fines et rapprochées. On observe, avec une certaine combinaison optique, quel est le réseau le plus fin qui est encore résolu; le pas de ce réseau donne le pouvoir résolutif cherché. Cependant ...

Par des moyens optiques et photographiques, le pas le plus petit qu'on peut obtenir pour les réseaux est lié à la meilleure résolution théorique, qui est d'environ $\lambda/2$, c'est-à-dire pas meilleur de $0,22 \mu$ (en lumière blanche); mais cela ne suffit pas en microscopie, parce que celle-là est justement la limite de résolution du plus fort objectif de microscope. Réseaux de ce type sont utiles pour les objectifs photographiques ou d'autre genre.

Pour avoir des lignes plus fines on peut recourir à des moyens mécaniques, c'est-à-dire à une machine à tracer qui produit des sillons parallèles sur une lame en verre en y passant une pointe de diamant et en déplaçant latéralement la pointe après chaque sillon au moyen d'une vis de précision. Avec ce moyen étaient produites les "plaques de Nobert", aujourd'hui introuvables, avec un pas inférieur à $0,11 \mu$. Elles furent produites entre le 1845 et le 1873 en Allemagne.

Actuellement, comme on sait bien dans l'industrie des circuits intégrés, on arrive plus loin.

En absence d'autres solutions, on recourt à des "réseaux" naturels, c'est-à-dire aux parties d'organismes contenant des structures périodiques (lignes ou points) très fines. Les plus communes sont les écailles des ailes des papillons et les "**frustules**", c'est-à-dire les deux parties de la coque siliceuse des diatomées (algues unicellulaires).

Soit parmi les papillons que parmi les diatomées existent beaucoup d'espèces utilisables comme test de résolution, avec un "pas du réseau" même très fin (voir le Tableau I).

Les principaux inconvénients de ces réseaux naturels sont:

- Le pas du réseau n'est pas du tout constant, non plus dans le même individu.
- L'objet n'est pas plan ni mince et il pose des problèmes de mise au point avec les forts objectifs.
- En particulier les frustules des diatomées sont très transparents: il s'agit de "objets de phase", dépourvus d'absorption propre, capables seulement de mettre hors phase le faisceau qui les traverse. Le contraste est souvent très faible et il reste toujours le doute si le manque de résolution dépend de la structure trop fine ou du contraste insuffisant: en quelque cas, un frustule n'est pas résolu en champ clair mais il est résolu en contraste de phase. Pour augmenter le contraste, il convient monter ces objets avec des milieux d'inclusion de très bas index, eau, glycérine, etc., ou très haut (substances de montage spéciales). Pour les objectifs à contraste de phase ou contraste interférentiel, naturellement, le problème du contraste se pose en mesure beaucoup plus légère.
- Il est presque impossible de construire une série continue de réseaux naturels, dans le sens d'une succession de réseaux avec des valeurs du pas équidistants entre une valeur la plus grande et une minimale. Les préparations de diatomées du commerce contiennent souvent seulement 5 ou 6 frustules: une série trop incomplète.

TABLEAU I

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 $\lambda = 500$ nm et conditions d'observation optimisées. Beaucoup de valeurs sont arrondies.

NOM	Pas équivalent (en μ)	Lignes par mm (l/mm)	Ouverture minime demandée pour la ré- solution (NA)
<i>Triceratium favus</i> Ehrbg.	5 – 6	180	0,06
<i>Navicula dactylus</i> (stries transversales)	2,2	450	0,15
<i>Pinnularia nobilis</i>	1,90	520	0,20
<i>Pinnularia opulenta</i> Hust	1,5	660	0,23
<i>Pinnularia viridis</i>	1,33	750	0,25
<i>Navicula lyra</i> Ehrbg. (stries)	1	1000	0,35
<i>Nitzschia brebissoni</i>	1	1000	0,35
<i>Synedra pulchella</i>	0,83	1200	0,4
<i>Stauroneis phoenicenteron</i>	0,7	1400	0,45
<i>Navicula lyra</i> Ehrbg. (perles)	0,7	1400	0,45
<i>Gyrosigma (Pleurosigma) balticum</i> Ehrbg	0,7	1400	0,45
<i>Nitzschia ungarica</i>	0,62	1600	0,55
<i>Pleurosigma attenuatum</i>	0,62	1600	0,55
<i>Grammatophora marina</i>	0,62	1600	0,55
<i>Nitzschia amphioxys</i>	0,55	1800	0,6
<i>Grammatophora serpentina</i>	0,55	1800	0,6
<i>Pleurosigma angulatum</i> W.Sm.	0,51-0,6	1960-1660	0,65-0,6
<i>Nitzschia sigma</i>	0,50	2000	0,65
<i>Grammatophora oceanica</i>	0,46	2200	0,70
<i>Nitzschia paradoxa</i>	0,46	2200	0,70
<i>Surirella gemma</i> Ehrbg.	0,41-0,44	2350	0,9
<i>Grammatophora macilenta</i>	0,38	2600	0,95
<i>Nitzschia sigmoidea</i>	0,38	2600	0,95
<i>Nitzschia obtusa</i> Sm.	0,36	2800	1,0
<i>Nitzschia linearis</i>	0,33	3000	1,1
<i>Navicula rhomboides</i>	0,33	3000	1,1
<i>Nitzschia vermicularis</i>	0,31	3200	1,2
<i>Nitzschia tenuis</i>	0,31	3200	1,2
<i>Nitzschia palea</i>	0,29	3450	1,25
<i>Nitzschia curvula</i>	0,28	3570	1,3
<i>Grammatophora subtilissima</i>	0,26	3800	1,35
<i>Amphipleura pellucida</i>	0,24-0,25	4000	1,4

APPENDICE 2

Pour le contrôle de l'aberration sphérique, E. Abbe avait inventé une "plaque d'Abbe" constituée par un porte-objet sur lequel est déposé un réseau aux lignes opaques parallèles. Le tout couvert par une lamelle cunéiforme, d'épaisseur variable de 0,1 à 0,25 mm environ.

La plaque doit être mise au point avec l'objectif en examen. Avec un diaphragme d'ouverture décentrable (ça suffit un carton percé d'un trou qu'on remue à la main sous le condenseur) on fait de façon que la plaque soit éclairée avec un faisceau alternativement paraxiale, c'est-à-dire avec le diaphragme centré, et avec un faisceau marginal, c'est-à-dire avec le diaphragme mis à la périphérie de la pupille d'entrée du condenseur. En passant de l'éclairage centré à celui oblique, on ne doit pas observer aucun changement de la mise au point; si par contre les rayons paraxiales, (ouverture minimale) et les marginaux (ouverture la plus élevée) demandent un changement de la mise au point, cela signifie que la longueur focale est différente, et celle-ci est l'essence de l'aberration sphérique.

En déplaçant le porte-objet, et ensuite en travaillant sur différents points de la lamelle, avec différentes épaisseurs, on peut chercher la valeur de l'épaisseur pour laquelle la sphérique est minimale.

Ce test n'est pas très sensible ni pratique. Il est difficilement trouvable, mais on peut le construire soi-même avec un réseau normal, même un micromètre-objet usuel, recouvert par une ou plus lamelles d'épaisseur connue: si le micromètre est du type à dépôt métallique, on peut détacher la lamelle qui le couvre avec un chauffage modéré; dans l'usage, on peut y appuyer une après l'autre une série de lamelles de différente épaisseur, préalablement calibrées, pour trouver celle-là pour laquelle la sphérique est minimale.

Le diaphragme décentrable, comme nous avons déjà dit, se réalise avec un carton noir d'environ 5×10 cm, avec un trou central de 4 - 6 mm de diamètre, qu'on appuie sur le bord inférieur du condenseur. Naturellement, le diaphragme d'ouverture sera tout ouvert.