

## **Le STAR TEST – conseils pratiques** pour l'usage en microscopie optique

Nous parlons ici seulement de quelques aspects théoriques et pratiques du “star test”. Ce n'est pas le cas de répéter tout ce qui a déjà été écrit dans d'autres textes présents dans ce même site:

- pour une description générale des aberrations,
  - pour une description théorique sommaire de la fig. de diffraction ou “figure d'Airy”, que nous appellerons brièvement **“centrique”**, à la façon des auteurs italiens,
  - pour le principe de fonctionnement du star test,
- allez voire le manuel: “Problèmes Techniques de la Microscopie Optique”, chapitres, respectivement, 13, 18.3 et 18.4;
- pour une description des altérations que la centrique subit dans les objectifs de phase, voire l'article n° 25 (“La formation du halo... ”), à la page 4 et 5;
  - pour l'usage pratique du star test, voire les articles n° 11 (“Contrôle des résidus... ”), pages 5-16 et l'art. n° 18 (“Comme contrôler et intervenir... ”), pages 28-35.

Nous rappelons seulement que le star test est l'instrument principal pour vérifier et évaluer:

- dans un objectif bien centré:
  - les aberrations du point, soit “axiales”, qui se vérifient sur tout le champ de l'objectif et par suite aussi “sur l'axe” (sphérique et chromatique longitudinale), soit “hors de l'axe”, qui se vérifient seulement loin du centre de la fig. (coma, astigmatisme et, en partie, chromatique latérale ou CVD),
  - défauts contingents graves (sauté sur la lentille frontale ou sur la lentille émergente) décollements, opacifications, etc.
- dans un objectif mal centré:
  - coma “sur l'axe”, au centre du champ: (mauvais centrage de quelque lentille),
  - astigmatisme “sur l'axe”, (mauvaise inclinaison de quelque lentille ou d'autre composant dans l'objectif (prismes, etc.)).

Les aberrations “du plan” (courbure de champ et distorsion) s'apprécient et se mesurent presque exclusivement par contre avec le “réseau” aux lignes parallèles, opaques et transparentes («Ronchi test»). Tel réseau est presque indispensable en outre pour une bonne évaluation des aberrations chromatiques, soit longitudinal, soit latéral (CVD), avec les problèmes relatifs de “compensation” entre objectif et oculaire. Tel réseau permet d'apprécier en outre et mesurer le contraste de la fig. (voir l'article n° 11).

### ASSEMBLAGE (MONTAGE)<sup>1</sup>.

La star test n'est pas autre qu'un porte-objets normal sur lequel, par évaporation sous vide, a été déposée une couche mince d'aluminium. Sur celle-ci, pour différentes raisons, se forment toujours des petits trous de dimensions très variées. Les plus petits sont ceux qui servent à la vérification des objectifs de microscope, (voir l'art. n° 11 [“Contrôle des résidus... ”], page 9).

En générale, tout le porte-objet est aluminé d'une même façon, et donc il est possible d'en

---

<sup>1</sup> Le terme “montage” vient du fait que “l'objet” d'un star test est la couche métallisée et, dans chaque préparation microscopique, “l'objet” est monté en le plongeant dans un liquide spécial et en le protégeant avec un couvre-objet. C'est ce qui doit être fait aussi pour le star test. Le liquide utilisé pour l'assemblage est le “montant.”

exploiter différentes parties pour différents buts.

Les voilà:

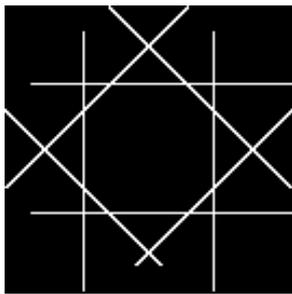
-- Pour l'usage avec des objectifs épiscopiques, calculés pour travailler sans couvre-objet (ou "lamelle") ( $d = 0$ ), il faut laisser découverte une partie du porte-objet. Malheureusement, en étant l'aluminium très tendre et en étant mal à propos la protection qu'on utilise pour les miroirs aluminés normales ("quarzatura", pour les auteurs italiens, c'est-à-dire le dépôt d'une couche mince de silice, qui provoquerait des phénomènes interférentiels dans les petit trous), la partie découverte sera traitée avec beaucoup de soin et nettoyée avec extrême délicatesse (un pinceau très doux et, le cas échéant, un liquide solvant).

-- Pour le contrôle des aberrations chromatiques, c'est-à-dire pour avoir un objet avec contraste de 100% et bords nets il est utile de sillonner la couche d'aluminium avec une ou plusieurs lignes tracées avec une lame mince (une lame de rasoir, guidée par n'importe quelle règle).

Pendant l'observation, si les bords des lignes montrent des bordages colorés, on peut observer leur couleur et comme celle-ci change pendant la focalisation et dans des points différents du champ; avec un micromètre oculaire il est possible de mesurer la largeur des bordages.

-- Pour l'observation de la pupille de sortie de l'objectif avec la méthode de la "fente décentrée", (voir la Fiche technique ("Scheda tecnica") n°22 [Obj. Zeiss Planapo, 63/1,4], page 154 et la Fiche n° 25 [Obj. Turi, 40/0,65], page 171, et encore l'article n° 41, le tout dans le site «www.funsci.it»), il est utile de tracer huit lignes inclinées entre eux de 45°, de façon à former un petit octogone, comme on voit dans la fig. 1.

Fig. 1



(Pour bien faire, il faudrait tracer deux systèmes de lignes, l'un découvert pour les objectifs EPI, l'autre couvert par une lamelle [voir un peu plus loin], pour les objectifs normaux. Naturellement, cela vaut si on trouve la place suffisante sur le porte-objet).

En portant une des lignes transparentes obtenue de cette façon aux marges du champ visuel et en la focalisant, on obtient une espèce d'éclairage oblique de la pupille de sortie, ce qui aide à révéler les décollements même au stade initial et aussi plusieurs irrégularités dans le système objectif.

L'utilité d'avoir plusieurs fentes différemment inclinées vient du fait que beaucoup de décollements produisent dans l'adhésif qui unit les lentilles une série de rides subparallèles qui présentent le meilleur contraste quand le faisceau éclairant se trouve dans un plan perpendiculaire aux rides elles-mêmes. Plutôt que tourner le porte-objet ou la platine ...

-- Pour faciliter la focalisation du star test (au début on voit tout noir, comme si l'œil fût déplacé par respect à l'oculaire), les lignes transparentes à peine citées sont précieuses: en déplaçant au hasard le système des fentes sous l'objectif, tôt ou tard une d'elles traverse le champ visuel qui devient brusquement éclairé et ceci consent la focalisation précise.

-- Pour évaluer la correction de l'aberration sphérique dans l'objectif en examen (sauf le cas des objectifs EPI pour lesquels on se sert de la partie découverte citée plus haut), il faut couvrir une partie du star test avec une lamelle de l'épaisseur précise de 0,17 mm (ou une autre valeur demandée par le constructeur de l'objectif). On peut obtenir une lamelle de telle épaisseur en mesurant avec soin l'épaisseur de différentes lamelles contenues dans une boîte du n° 1 ou 1,5 (une fois telle indication était normale; aujourd'hui elle est devenue une rareté). On se sert d'un micromètre centésimal à mâchoire ("Palmer"), fixé d'une manière stable avec un étau ou un autre support. On doit avoir le soin d'exécuter la mesure dans les quatre angles de chaque lamelle car leur épaisseur n'est jamais uniforme, même pas à l'intérieur de la même lamelle. La tolérance dans l'épaisseur doit être la plus étroite possible car, dans les forts objectifs à sec, telle tolérance

peut arriver à  $\pm 5 \mu$  (0,005 mm), et ce serait injuste d'accuser un tel objectif de correction insuffisante si la faute vient de la lamelle.

En exécutant le contrôle de la sphérique, on doit se rappeler qu'elle dépend encore de la longueur du tube et aussi de la longueur équivalente des tubes intermédiaires éventuels, de l' hauteur du premier foyer de l'oculaire, etc. Ces quantités devront être contrôlées donc à l'avance.

-- Pour établir quel est l'épaisseur optimale de la lamelle, celle qui minimise le résidu de sphérique dans un objectif, il peut être utile de coller sur le star test trois ou quatre lamelles de différente épaisseur.

En mesurant plusieurs lamelles, si possible obtenues de différentes petites boîtes ou de différents producteurs, on peut réussir à trouver des lamelles d'épaisseur = 0,14 - 0,17 - 0,20. Si on choisit des petites lamelles carrées (18 × 18 mm, par exemple), la place occupée par trois lamelles approchées couvre une bande de 3 × 18 = 54 mm du star test. On rappelle qu'une lamelle peut être coupée aisément avec une pointe de diamant comme celles utilisées par les vitriers; éviter les taille-verres communs, ceux avec la roulette en métal dur, car ceux-ci demandent une pression trop forte sur la lamelle.

-- Pour ne pas ajouter à l'épaisseur de la lamelle une épaisseur non souhaitable de montant et pour réduire le danger de détachement de la lamelle, cette dernière doit être collée en laissant une couche de "montant" entre les deux verres le plus mince possible. Pour obtenir ceci, après avoir déposé une goutte de montant sur le star test et la lamelle sur la goutte, on applique sur la lamelle un petit pois, comme un boulon MA 8 × 30. De temps en temps, surveiller-le pour qu'une inclinaison éventuelle, même petite, du plan d'appui ne fasse pas glisser lentement la lamelle en dehors de sa position centrale.

Si le montant déborde de la lamelle, on le laisse sécher et après on enlève ce qui est de trop avec un chiffon ou un bout de papier pour serviettes humidifiés avec un n'importe quel solvant de peintures. On dit qu'aussi l'acétone peut être utilisée.

Comme montant il est recommandé le baume du Canada NATUREL, car le plus souvent celui qu'on trouve sur le commerce est artificiel: avec le temps il se retire ou se détache de la lamelle et le star test devient inutilisable. Malheureusement, le baume naturel est de plus en plus difficile à trouver et il coûte beaucoup. Son durcissement peut demander semaines ou mois, spécialement s'il est du type sirupeux; heureusement, il vient d'habitude vendu en solution en xylol, et alors le séchage arrive dans une ou deux semaines.

## L'OCULAIRE CONSEILLÉ

Pour le contrôle de l'aberration sphérique et de la "coma sur l'axe"<sup>2</sup> éventuel ou de l'"astigmatisme sur l'axe" il convient d'utiliser un oculaire si fort que possible, même avec index de champ («field number») très petit, car on s'intéresse seulement au centre du champ.

Puisque il est difficile de trouver des oculaires de grossissement supérieur à 15 ×, il peut être utile d'utiliser un oculaire astronomique (il en existe avec longueur focale inférieur à 8 mm, ce qui équivaut à un grossissement visuel au-delà de 30 ×, ou aussi un oculaire extrait d'une petite jumelle compacte 8 × ou 10 ×. Dans ces dernier cas, il faudra réaliser un raccordement capable de tenir centré cet oculaire postiche sur le tube porte-oculaire et de le tenir à l' hauteur correcte, celle pour laquelle le premier foyer de l'oculaire se trouve à 10 mm (valeur très diffuse) sous le bord du tube porte-oculaire.

Autre possibilité c'est de superposer à l'oculaire normal du microscope une longue-vue faible, (3× ou 4×), mise au point sur l'infini; on doit construire soi-même un tel instrument car certains constructeurs offrent seulement cet accessoire avec le nom de "focussing aid", en le conseillant pour faciliter la focalisation en photomicrographie, spécialement pour les faibles objectifs (voire le manuel: "Problèmes Techniques de la Microscopie Optique", Cap. 30.8.3, par. b).

---

<sup>2</sup>. Quand on dit "sur l'axe" on indique "au centre du champ visuel" = "près de l'axe optique du système".

Si l'on veut le construire soi-même, il suffit d'avoir un rapport d'environ 1:3 ou 1:4 entre la longueur focale de son oculaire (un oculaire de microscope 10 ×, longueur focale = 25 mm, est suffisant) et celle de son objectif, qui pourrait être tiré par une petite jumelle compacte (en mettant à point la fig. du soleil, vérifier que sa longueur focale ne soit pas supérieure à 100 mm).

Évidemment cette petite longue-vue doit être focalisée "à l'infini": la distance entre les deux systèmes dont elle est composée sera modifiée jusqu'à quand on voit bien à point un objet lointain (un panorama, un bâtiment à au moins 50 m de distance, etc.).

Quoiqu'il en soit, pour cette application il y n'a pas à se préoccuper de la correction chromatique de l'oculaire ou du "focussing aid"; compensateur ou achromatique, n'importe quel oculaire va bien car la compensation de la CVD dans les oculaires concerne seulement les bords de la fig..

Par contre, pour le contrôle des aberrations extra-axiales, puisqu'elles sont plus fortes quand le champ de l'objectif (le diamètre de la fig. intermédiaire utile) est plus grand, il faut se servir d'un oculaire faible (d'habitude un 10 ×), avec un index de champ (s'), au moins égal au champ nominal de l'objectif, (d'habitude entre 18 et 22 mm).

Dans ce cas, il est important d'utiliser un oculaire avec le juste degré de compensation, qui sera différent d'un objectif à l'autre, même de la même série (voir l'art. n° 18: "Comment contrôler et intervenir... ", page 3-7). En absence de compensation correcte, l'objectif présentera un résidu de CVD (aberration chromatique latérale), mais ce ne sera pas toute sa faute.

Pour le contrôle de la coma et de l'astigmatisme aux marges du champ on se servira des plus petits trous du star test; pour le contrôle de la CVD sont plus utiles les fentes décrites auparavant.

## L'ÉCLAIRAGE

Puisque la centrique est d'autant plus parfaite que le trou observé est plus petit, sa luminance sera toujours modeste. En conséquence, son éclairage devra avoir le maximum d'intensité possible.

Les indications pratiques à suivre sont très simples: - donner au condenseur la meilleure ouverture possible, soit en ouvrant tout le diaphragme d'ouverture, soit en choisissant un modèle bien correct de sphérique (modèle "aplanétique") de façon que le faisceau qu'il produit se dirige dans un plan plus ou moins défini (la présence inévitable de sphérique dans le condenseur fait que les rayons se dirigent à différentes hauteurs) - focaliser et centrer le condenseur empiriquement de façon à voir la meilleure luminance de la centrique - enlever tout ce qu'absorbe ou réfléchit le faisceau éclairant ou celui qui forme la fig.: filtres, prismes, changeurs de grossissement, verres dépolis, diaphragmes annulaires, etc. - alimenter la micro-lampe au maximum permis.

Il pourrait être utile de disposer d'un miroir orientable dessous la platine et de l'éclairer avec une micro-lampe extérieure forte.

## L'INTERPRÉTATION

### La centrique idéale

La centrique vient d'une façon générale illustrée avec une figure du type de la fig. 2.

Elle montre comme se manifeste l'éclairage dans l'image d'un objet ponctuel (lumineux sur un fond sombre), vue dans le plan "de la meilleure focalisation", un plan perpendiculaire à l'axe optique où la centrique assume les moindres dimensions. Telle image représente la centrique produite par un système "optiquement parfait" dans lequel la somme des **«aberrations du point»** produit un "cercle de confusion" géométrique plus petit du "disque d'Airy" et dans lequel n'existent pas d'autres causes d'altération.

Comme il est bien connu (voir le manuel: «Problèmes Techniques de la Microscopie Opti-

que», Cap. 18.3, Tab. III et les articles n° 11 et 18), dans cette centrique théorique le 84% de l'énergie est concentrée dans le pic central ("disque d'Airy"); aucun système photographique ou typographique ne peut donc rendre le contraste existant entre le disque central et les anneaux. Les faux couleurs de la fig. 2 donnent seul une pâle idée de ce contraste. Dans l'observation visuelle, étant donnée la réponse logarithmique de notre rétine, les choses vont très mieux, mais toujours avec de la difficulté.

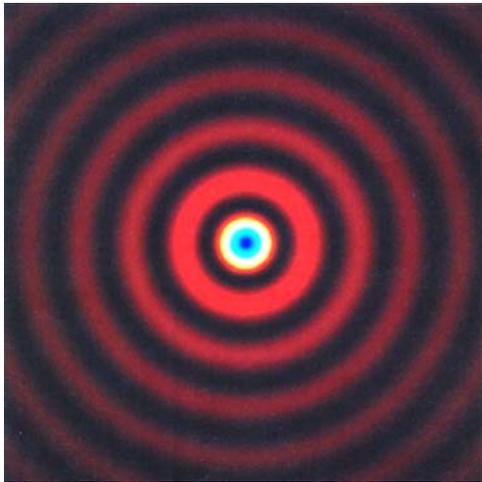


Fig. 2

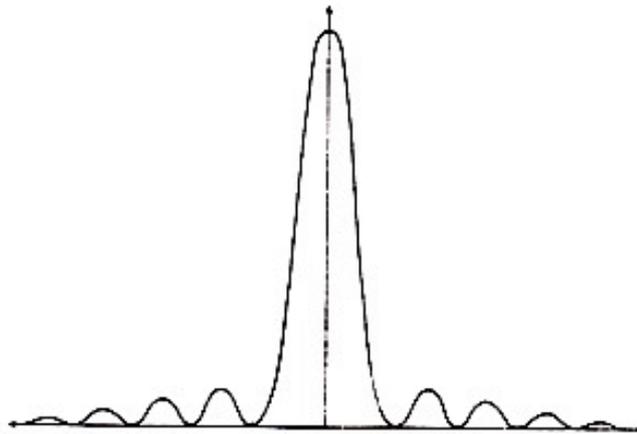


Fig. 3

La fig. 3 représente le profil photométrique, c'est-à-dire la valeur de l'intensité, le long d'une ligne diamétrale de la fig. 2.

Mais, dans un microscope, qu'est-ce qu'on voit?

Supposé un bon objectif de microscope et un système correctement mis au point, on doit s'attendre de voir le disque central entouré par une paire d'anneaux ou peu plus, souvent avec quelques irrégularités (saleté, poussière, différents défauts); les photos plus loin montreront quelques images réalistes.

Mais, pour bien interpréter les images du star test, il faut tirer au clair comme la centrique se présente en réalité. Il s'agit d'un faisceau que d'abord ce dirige vers une petite tache de moindre diamètre et puis diverge, une structure à trois dimensions, avec des points clairs et obscurs distribués selon des formules précises (à part les défauts casuels). Globalement, une figure avec la forme de double cône: deux cônes avec l'axe et le sommet en commune.

À l'intérieur de ce « **bi-cône** », doué de contours nuancés, se forme une distribution spéciale de clairs et obscurités, symétrique autour de l'axe du bi-cône, et cette distribution théorique va toujours tenue présente pendant la mise au point.

Dans la fig. 4 est montré une section longitudinale de la centrique, passant pour l'axe du bi-cône. La fig. 2 pourrait être une section transversale du bi-cône, passant pour le point de moindre diamètre (flèche à droite).

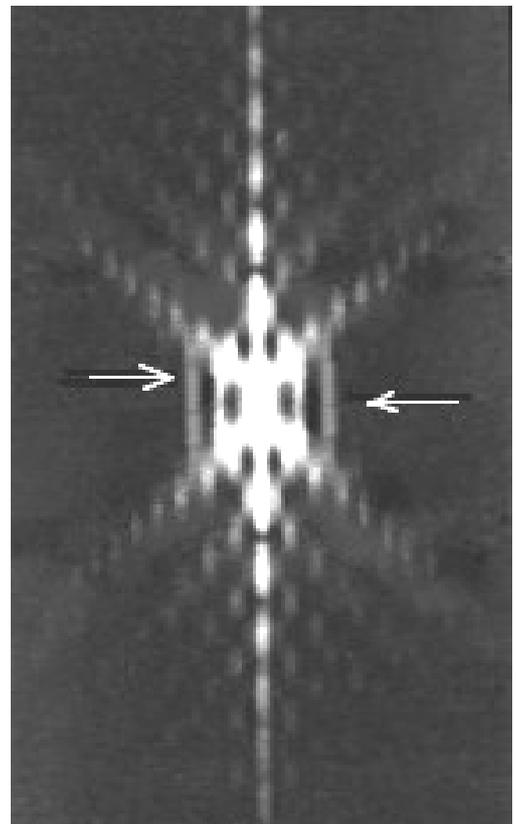


Fig. 4

En effet, si nous imaginons de mettre un écran perpendiculaire à l'axe, à l'hauteur de la flèche de droite, nous verrons une tache très éclairée au centre, un premier anneau concentrique assez clair, un second anneau plus pâle, etc., de plus en plus nuancé. La fig. 4, à l'hauteur de la flèche de droite, ne montre rien au-delà du deuxième anneau, mais les autres existent aussi.

Cette image, qu'on pourrait appeler l'"état de meilleure focalisation", montre le disque d'Airy dans les conditions du diamètre le plus petit, avec le plus petit nombre d'anneaux visibles, donc capable de donner à l'objectif la meilleure résolution.

Si cependant nous déplaçons l'écran un peu plus haut ou plus bas, nous effectuons une autre section transversale de la fig. 4; c'est-à-dire par ex. à l'hauteur de la flèche de gauche, nous verrons le disque qui se fond avec le premier anneau, et devient parallèlement moins intense, même si la fig. 4 ne réussit pas à le montrer pour les limites de contraste dont nous parlions auparavant. Le "cercle de confusion" s'est élargi; la résolution est diminuée.

Si on continue avec des sections transversales éloignées de plus en plus du plan de meilleure focalisation, nous verrons que le disque devient plus petit et plus pâle, pendant que les anneaux augmentent d'intensité et le plus grand nombre d'eux devient visible.

En continuant, on observe le faisceau central en correspondance de l'axe du bi-cône qui alterne zones claires et zones sombres; autour de lui, les anneaux s'élargissent de plus en plus. En section transversale, en déplaçant le foyer, on verrait le disque d'Airy qui devient alternativement clair et obscur et les anneaux qui s'élargissent et deviennent graduellement moins clair.

Dans la fig. 5 qui suit est montrée une série de photos réelles d'une centrique, à partir de la condition de meilleure focalisation et puis dans une série de plan à défocalisation croissante vers le haut. Une série de photos qui furent exécutées en correspondance de plans déplacés graduellement vers le bas montreraient la même situation, simplement renversé en bas. Les photos ont été disposées de façon à donner une vision pseudo-perspective du phénomène.

On remarque que, dans la réalité, les sections les plus basses sont plus lumineuses que les plus hautes; ces dernières ont été rendues plus éclairées, en exploitant les moyens informatiques, afin de les rendre plus lisibles. En conditions normales, les images plus en haut résulteraient pratiquement invisibles.

On observe aussi que les images les plus voisines à la meilleure focalisation, celles-là en bas dans la fig. 5, semblent des petites taches simples, sans structure. Ceci est dû au fait qu'elles sont trop petites.

Si on veut regarder la plus petite, mais agrandie en la visant par le haut, pas en perspective comme indiqué dans la fig. 5, on verrait quelque chose de semblable à la fig. 6, avec la réserve habituelle du mauvais rendement du contraste dans la photographie: dans l'observation visuelle se distinguerait mieux l'anneau noire qui sépare entre eux les différents anneaux, et le disque d'Airy apparaîtrait beaucoup plus vif.

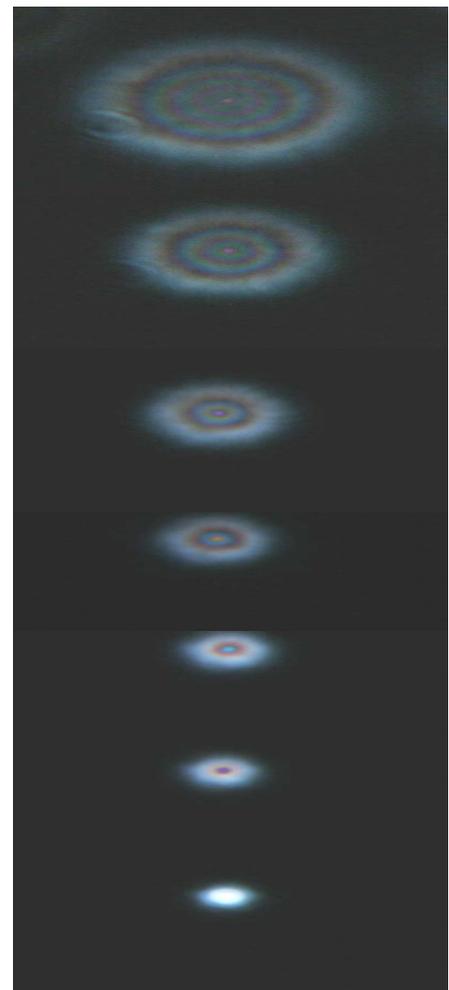


Fig. 5

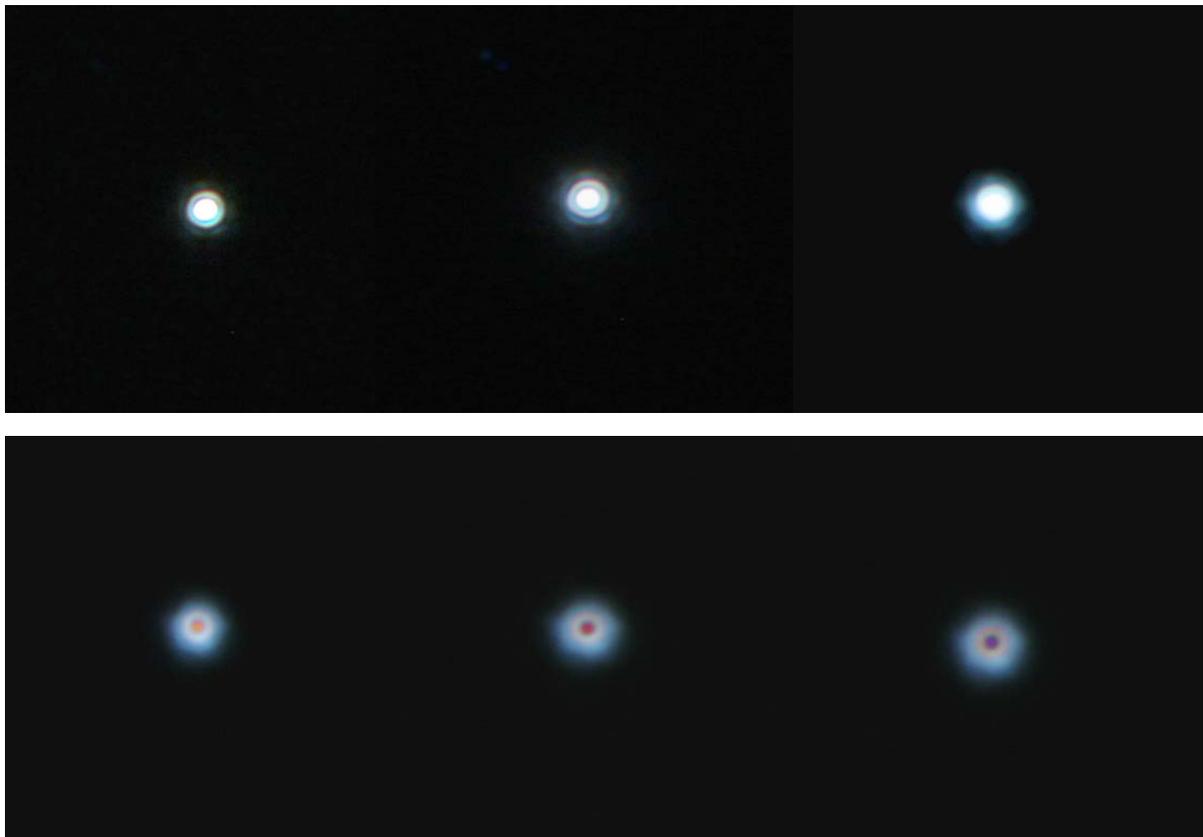
Fig. 6



Dans les deux pages qui suivent, on voit une série beaucoup plus nombreuse de photos exécutées à partir du plan de la meilleure focalisation, mais pas en perspective; c'est ce qu'on voit dans l'oculaire. Elles doivent être vues comme des sections transversales de la centrique (conçue comme un bi-cône), parallèles entre elles, toujours d'un seul côté de la condition de meilleure focalisation, toutes perpendiculaires à l'axe du bi-cône, plus riches en détails que l'on puisse voir dans la fig. 5.

Encore une fois, la photo correspondante à la meilleure focalisation, (la première à gauche dans le première série en bas), ne montre pas bien la structure de la centrique, qui apparaît trop petite. On revient pourtant à la fig. 6 qui fait voir, à plus fort grandissement, la photo "à la meilleure focalisation" et alors on peut apprécier sa complexité.

En examinant la série des photos dans cette page (page 7) et dans la suivante (page 8, fig. 7) on verra comme le disque d'Airy s'inverse en devenant alternativement clair et sombre et comme les anneaux s'élargissent et s'estompent graduellement. Ceci correspond à des sections exécutées dans la centrique à hauteur croissante.



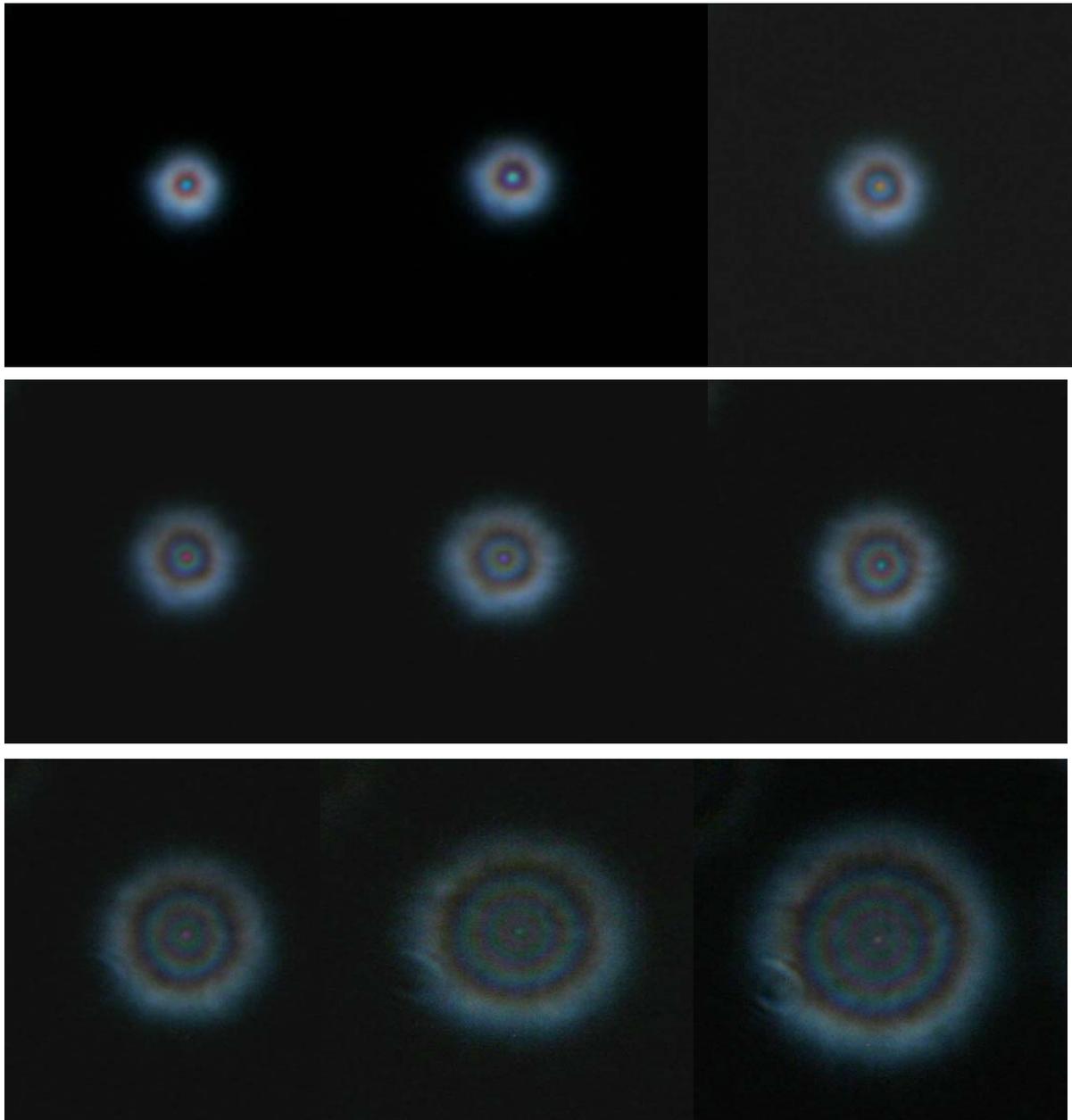


Fig. 7

Il faut remarquer que toutes ces photos ont été reproduites avec un grandissement successif par voie électronique; si elles avaient été reproduites comme elles apparaissent dans un oculaire normal, il serait difficile de les interpréter. Le grandissement est rigoureusement le même dans toutes les photos et il correspond à ce que montrerait un oculaire d'environ  $50\times$ .

Toutes les considérations et les photos exposées jusqu'à présent se réfèrent à un objectif réel mais presque idéal, de toute façon bien corrigé de l'aberration sphérique et bien centré.

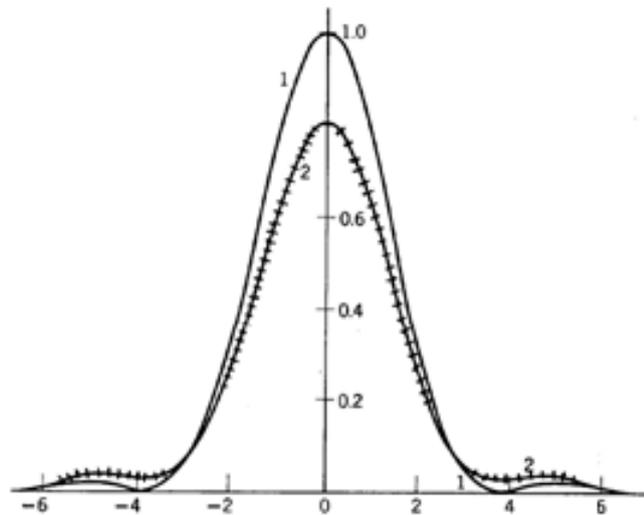
Si encore on se demande quelle est la cause de cette structure complexe à trois dimensions de la centrique, il faut s'adresser à une analyse mathématique qui calcule le résultat de l'interférence entre les innombrables faisceaux élémentaires de diffraction qui se forment, pour le principe d'Huygens, à partir de chaque point de la pupille de l'objectif.

#### Les variations de la focalisation

Dans les photos de la centrique très voisines à la meilleure focalisation il n'est pas facile de

distinguer certains détails, toujours pour l'incapacité de n'importe quel système photographique de rendre les nuances du contraste. Par ex., dans les deux premières photos de la page précédente on distingue seulement une légère différence de diamètre mais, suivant des mesures photométriques précises, il est possible de tracer une courbe (fig. 8) qui montre comme une défocalisation de  $\lambda/4$  en direction axiale provoque une diminution de l'intensité du disque d'Airy de 20% et une augmentation d'intensité du premier anneau noire de 0% à environ 5%. Le diamètre du disque à la moitié hauteur augmente de 20% environ. Voilà pourquoi la moindre défocalisation provoque une chute de la résolution et du micro-contraste.

Fig. 8 - Profil photométrique d'une centrique dans le plan de la meilleure focalisation (courbe 1, par trait entier) et pour un plan déplacé de  $\lambda/4$  (critère de Lord Rayleigh) (courbe 2, esquissée).



Les couleurs de la centrique

On aura remarqué dans les photos précédentes que la centrique apparaît toujours plus ou moins colorisée. Il revient à penser que ceci dépend d'un résidu de chromatisme longitudinale dans l'objectif. Peut être, mais dans un objectif de microscope de moyenne qualité ces effets sont difficilement appréciables.

Plus sûrement c'est un effet de principe inéliminable. Dans le manuel: «Problèmes Techniques de la Microscopie Optique», Cap. 18.3, Tab. II, sont indiquées les dimensions du disque d'Airy et des premiers anneaux de la centrique; eh bien, toutes ces dimensions sont exprimées comme fonction de  $\lambda$  (longueur d'onde). Cela signifie que, si on éclaire le star test avec de la lumière blanche, les dimensions de chaque élément de la centrique changeront en dépendance de la couleur. En autres mots, le disque et les anneaux seront bordés par des halos colorés.

Rien de grave; il suffit d'en connaître la cause qui est, de toute façon, inéliminable.

## LE CHOIX DU TROU

Nous avons jusqu'à présent supposé tacitement que la fig. géométrique du trou présent dans le star test, image formée par l'objectif qu'on examine, soit plus petite que le disque d'Airy. De cette manière, la forme théorique de la centrique ne vient pas déformée.

Mais comme on peut être sûrs que le trou que nous sommes en train d'observer soit vraiment si petit?

Dans les photos qui suivent, (fig. 9), toutes agrandies dans la même mesure, il n'est pas difficile de comprendre que les centriques en bas, même si douées de différente luminosité, sont toutes avec la même structure et correspondent par conséquent au modèle idéal. Celles en haut, déjà suspectes pour avoir une plus grande luminosité, ont aussi une forme différente et donc elles sont à éliminer (fig. 9). Avant de tirer des conclusions à propos de l'état de correction d'un objectif il est donc utile d'examiner beaucoup de petits trous, de façon à se construire une image mentale moyenne de la centrique idéale, qui correspond à ces conditions particulières.



Fig. 9- Combinaison de trois photographies, au même grandissement, de différents trous du star test. Il suffit peu d'expérience pour comprendre lesquelles sont les centrées réglementaires et lesquelles sont dérangées par une image géométrique excédante. Obj. 20 Epi;  $d = 1$ .

### LE CONTRASTE DE PHASE

On sait que les objectifs à contraste de phase ont une pupille de sortie modifiée par la présence de l'anneau de phase et telle présence ne peut qu'altérer aussi la structure de la centrique (cfr. l'art. n° 25: "La formation du halo...", page 4 - 5).

Pour résumer la question: dans la position "de meilleure focalisation" le disque d'Airy est un peu plus petit que dans la centrique normale (légère augmentation de résolution), mais les anneaux sont plus fins, plus nombreux et plus intenses (perte de contraste, même sur parties de l'image relativement étendues). Au dehors de la meilleure focalisation, le disque d'Airy peut résulter encore plus petit que le normal, mais entouré par des anneaux tellement claires et nombreux que le cercle de confusion globale devient énorme. Résultat: ne jamais utiliser un objectif de phase pour une observation en fond clair.

Dans les photos suivantes on voit des exemples de comme l'aspect de la centrique change quand on change la focalisation d'un objectif de phase: une série de photo reprises à partir de "la meilleure focalisation" vers les positions de plus en plus défocalisées (fig. 10 A).



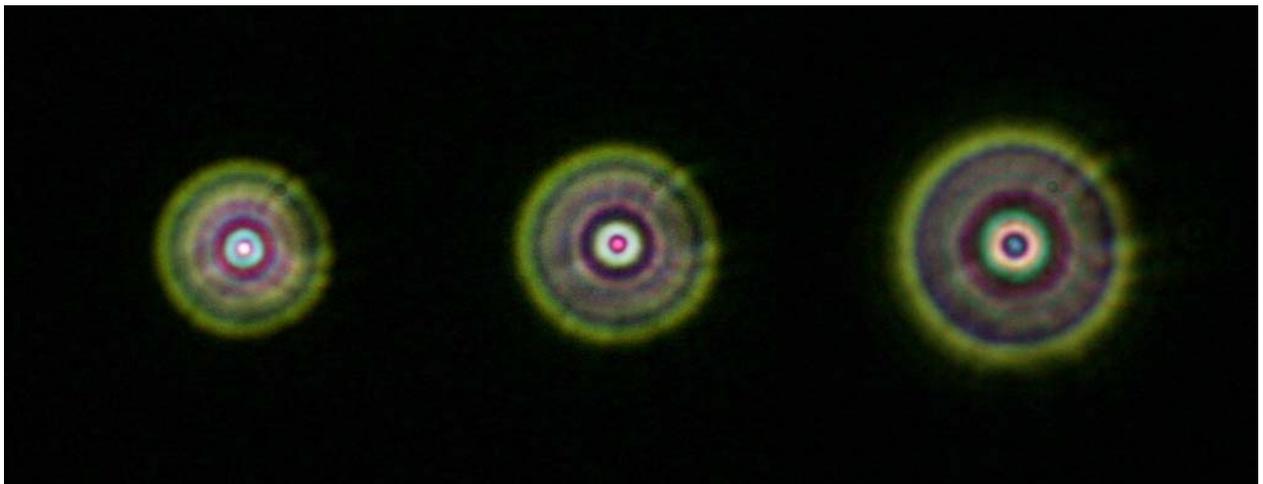
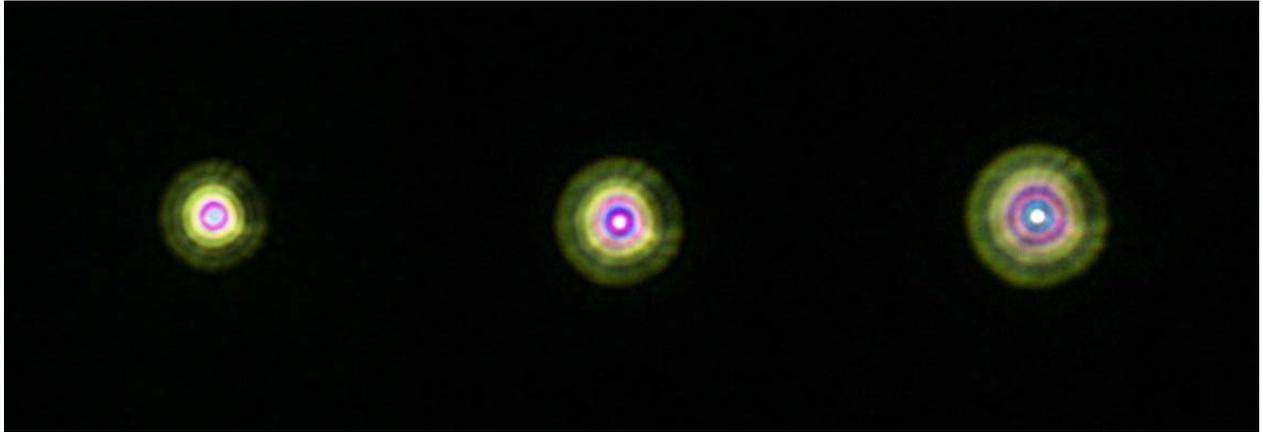


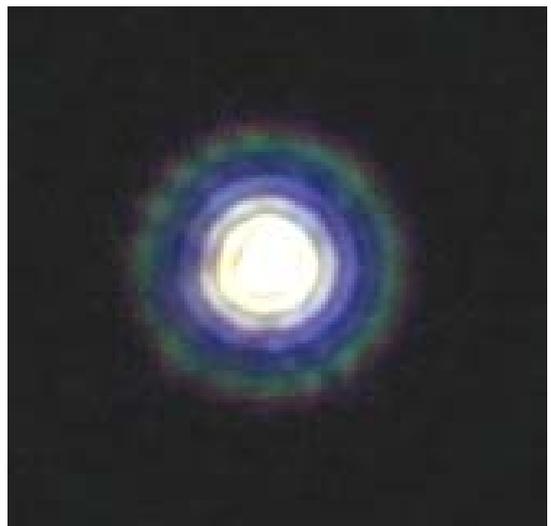
Fig. 10 A - Série de centriques reprises à différentes distances à partie de la position "de meilleure focalisation". Comme d'habitude, les photos les plus pâles (les centriques les plus défocalisées), ont été éclaircies par des moyens électronique pour en permettre une meilleure analyse.

Les couleurs de la centrique sont plus vifs que dans le fond clair car le pouvoir retardateur de l'anneau de phase est une fonction de  $\lambda$ .

Le grandissement des différentes photos est toujours le même, et correspond à un oculaire d'environ  $60\times$ .  
Obj. Jena Phv 40/0,65.

Fig. 10 B - La centrique produite par un objectif achromatique de phase à double anneau (Phv Zeiss Jena, 40 / 0,65), dans les conditions "de meilleure focalisation". Cette image a été ultérieurement agrandie de façon à correspondre à ce qu'on verrait avec un oculaire de  $150\times$ .

On remarque qu'on voit plus d'anneaux que dans une centrique normale (comparer avec la fig. 6).



## L'ABERRATION SPHÉRIQUE

Jusqu'à présent on a déclaré que la centrique idéale représente une distribution d'intensité résumable dans une forme géométrique solide, à trois dimensions (celle que nous avons appelé "bi-cône", fig. 4, pag. 5). On a aussi déclaré que telle structure peut être schématisée comme une figure symétrique, deux cônes avec le sommet en commune, symétrique par respect à un plan

médian perpendiculaire à l'axe, correspondant au plan dans lequel le bi-cône montre le moindre diamètre, qui est d'ailleurs le plan "de la meilleure focalisation."

Nous avons aussi déclaré, cependant, que cette centrique idéal peut être observé seulement dans un système centré, corrigé des "aberrations axiales du point" (sphérique, chromatique longitudinal), au moins au centre du champ image.

Ainsi, nous avons déjà mentionné le fait qu'un résidu de chromatique longitudinale provoquerait une centrique avec différentes couleurs, différentes pour égales écartements, vers le haut ou vers le bas, du plan de la meilleure focalisation, même si en pratique cet effet est difficilement perceptible. Naturellement, en travaillant en lumière blanche.

Au contraire, en radiation monochromatique cet effet disparaîtrait: il s'agit d'une aberration "chromatique".

Par contre, un effet beaucoup plus visible et fréquent dépend d'un résidu d'aberration sphérique. Même s'il s'agit d'une aberration "pas chromatique" (qui existe même en travaillant en radiation monochromatique), ses effets changent légèrement en fonction de  $\lambda$ . C'est pourquoi on parle de "sphéro-chromatique."

Les manifestations de l'aberration sphérique sont décrites déjà dans les textes cités, mais nous les résumons ici:

- Le disque d'Airy dans la position "de meilleure focalisation" est plus grand que le normal et les anneaux sont plus intenses (perte de résolution et de contraste)(fig. 11 au centre).

- D'un côté de la «meilleure focalisation», la centrique apparaît avec le disque plus petit (augmentation légère de résolution), mais les anneaux sont plus intenses (perte de micro-contraste)(fig. 11 en haut). C'est ça "l'image **aux anneaux**."

- De l'autre côté de la meilleure focalisation la centrique apparaît avec un point plus lumineux au centre (peu visible dans la fig. 11 en bas, à cause du mauvais rendement photographique des contrastes), mais entouré par un ample halo nuancé, sans anneaux («**image nuancée**»).

À la fin, la forme de la centrique n'est plus symétrique par respect à la position "de meilleure focalisation". Des égaux écartements, au dessus et au-dessous de la meilleure focalisation, produisent des figures différentes.

On rappelle ici la règle pratique citée dans le manuel: «Problèmes Techniques de la Microscopie Optique», Cap. 18.4: «... si la figure "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 trop petite distance entre les deux premières lentilles de l'objectif.

*La figure aux anneaux avec une "focalisation longue", quand l'objectif s'éloigne de l'objet, signifie qu'il y a un résidu de surcorrection sphérique qui dépend de causes opposées à celles que nous avons à peine citées.*

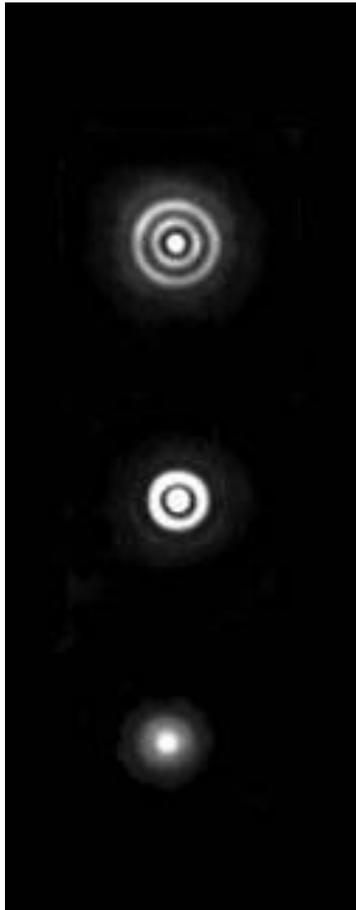
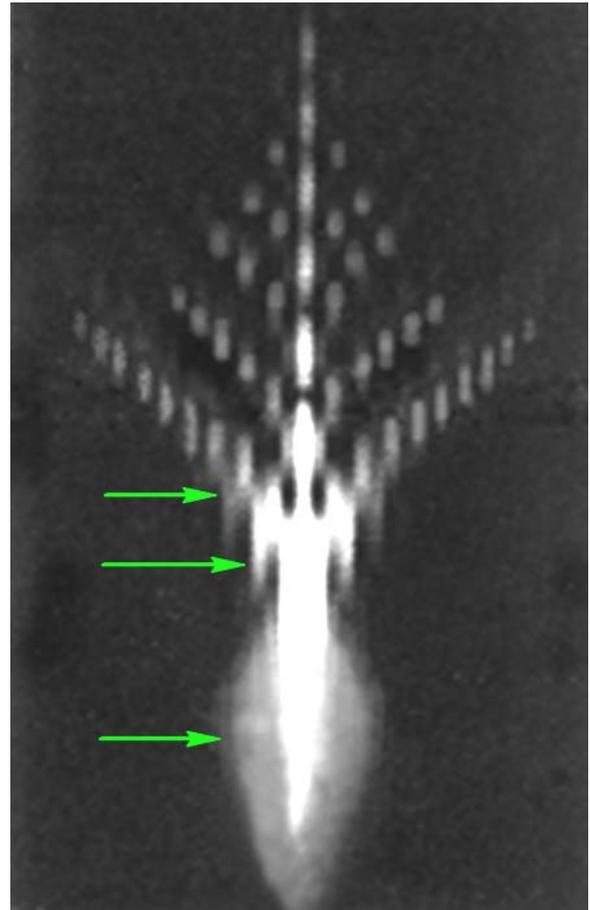


Fig. 11 (à gauche) - Aspect de la centrique en différentes positions du foyer, dans un système atteint de forte sphérique: figure «aux anneaux» (en haut) et figure «nuancée» (en bas). La figure centrale apparaît normale, mais les anneaux sont trop clairs.

Fig. 12 (à droite)

La présence d'aberration sphérique est représentée dans une section longitudinale du "bîcône", comme on voit dans la fig. 12, en présence d'une forte aberration sphérique.



Remarquez que les anneaux (séries de points clair en diagonale) sont très intenses.

Si l'on s'imagine d'exécuter des sections transversales à différente hauteur de cette structure, on voit au centre un disque d'Airy intense avec un fort premier anneau, comme cela correspond à la fig. 11 au centre. Vers le haut, un petit disque avec beaucoup d'anneaux ("figure aux anneaux", fig. 11 en haut). Vers le bas, un disque central de moins en moins intense, avec un halo nuancé fort, sans anneaux (fig. 11 en bas).

Ces figures de la fig. 11 sont donc des sections transversales de la fig. 12 (flèches vertes), à une plus petite échelle.

De suite nous voyons un cas réel de sphérique, comme il est décrit dans l'art. n° 18: "Comme contrôler et intervenir ...". Nous reportons de cet article la page entière 29, avec la fig. 22 et la légende relative.

Après tout ce que nous avons expliqué, cette image devrait réussir tout à fait claire.

(Fig. 22) - Un groupe de centriques correspondantes à d'autant petits trous du star test (de diamètre différent, mais tous plus petits que la centrique idéal)<sup>3</sup>.

La position du foyer est différente pour chacune des photos, en passant graduellement d'une "image nuancée" typique, en haut, à une "image aux anneaux", en bas. Ces différences dans l'aspect de la centrique au changement de la focalisation sont l'index sûr d'un fort résidu de sphérique dans l'objectif en examen.

Ici ne sont pas présents d'appréciables résidus d'autres aberrations.

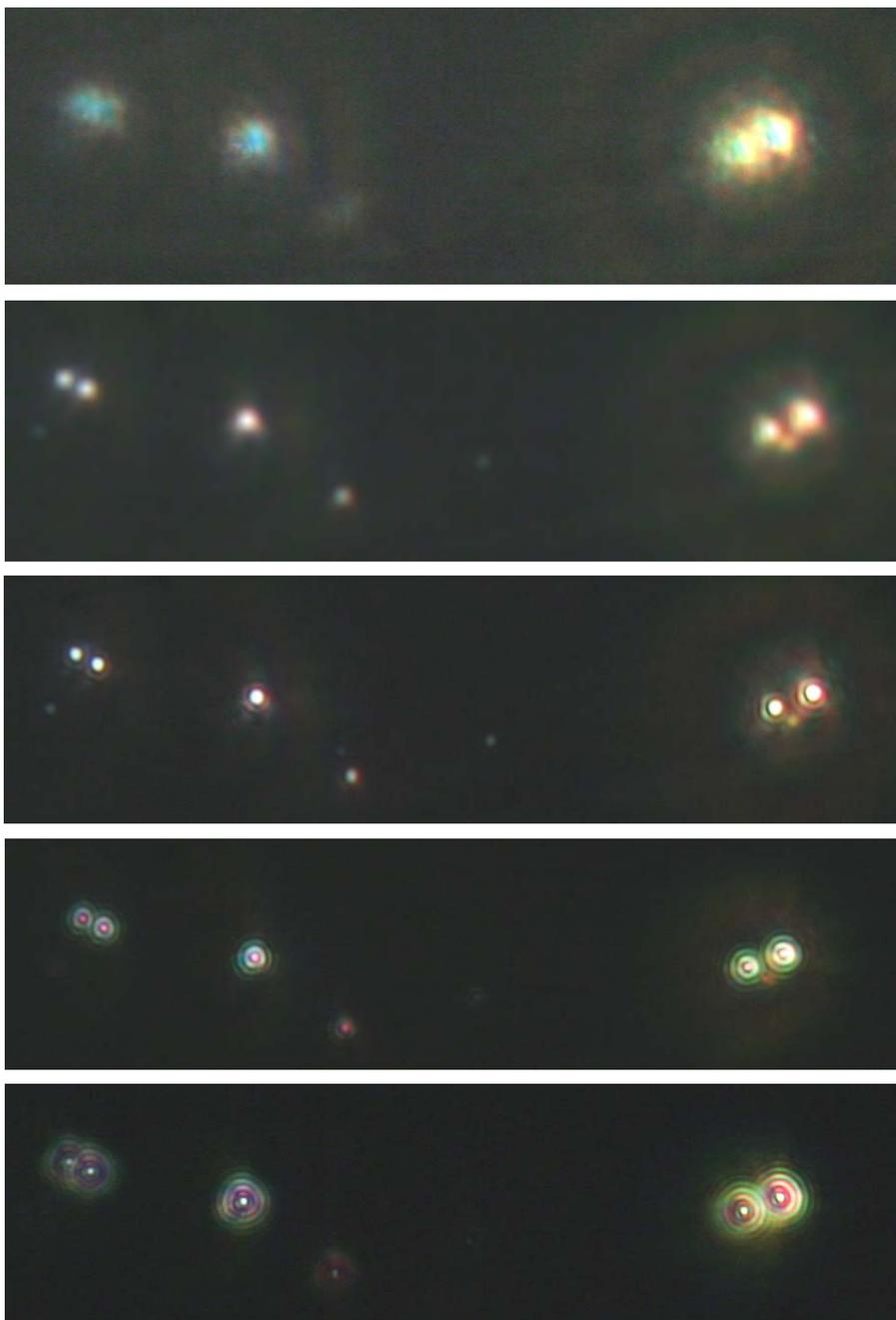
La photo centrale, qui correspond à la position de meilleure focalisation, montre une centrique qui semble normale, mais en réalité elle est plus grande que l'on aurait eu en absence de sphérique et les anneaux sont plus intenses.

La figure aux anneaux (en bas), en certaines positions de focalisation, montre un disque d'Airy plus petit du normal, qui peut «s'inverser», c'est à dire devenir sombre.

Remarquer les couleurs dans les centriques: nous en connaissons la cause.

Photos prises au centre du champ; objectif bien centré.

(Objectif Koristka 8\* [64×] demi-apochrom. + oculaire Leitz 8).



On tient présent que la centrique, observé avec un oculaire normal, apparaît très petite et donc les photos ont été découpées d'une région plutôt petite du champ visuel. Une photo à tout champ montrerait seulement des petits points clairs peu significatifs.

## LA COMA

On se réfère ici à tout ce qu'a été exposé dans l'art. n° 18, plusieurs fois cité, en particulier dans les pages 33- 36 et les images 26 et 27.

-- La coma peut se vérifier «sur l'axe» (au centre du champ), ou "coma asymétrique". Il faut se rappeler de ce qu'il a déjà été dit dans ce texte: la présence de coma "sur l'axe" dépend presque toujours d'un centrage erroné d'une ou de plusieurs lentilles. Si l'objectif prévoit une "len-

<sup>3</sup>. Cette affirmation se base sur le fait que, dans notre exemple, la structure des différentes centriques est la même, indépendamment de leur luminosité. Mais l'œil se trompe aisément sur ce point !

tille flottante” (voir le manuel: «Problèmes Techniques de la Microscopie Optique», chap. 13.2.4 et 19.5.2), avec les «trous de centrage», la correction peut être facile. Si les lentilles mal centrées sont plus qu’une, on a la combinaison de deux aberrations et la correction est impossible d’une façon générale. La figure qui en résulte sera complexe et l’interprétation pas facile (image 27 de l’article n° 18).

Fig. 13 (à gauche) – Coma « sur l’axe » ou « asymétrique ».

Figure normale de «coma sur l’axe» provenant du centrage erroné d’une lentille.

Noter la petite centrique à droite dans la figure de gauche: elle est très pâle parce que le trou dont elle vient est également petit, mais ses dimensions sont les mêmes des autres; le procédé photographique fait apparaître plus petites les images plus sombres.

(à droite: fig. 27 de l’art. n° 18)

Figure de «coma sur l’axe» provenant du centrage erroné de deux lentilles dans le même objectif (à droite).



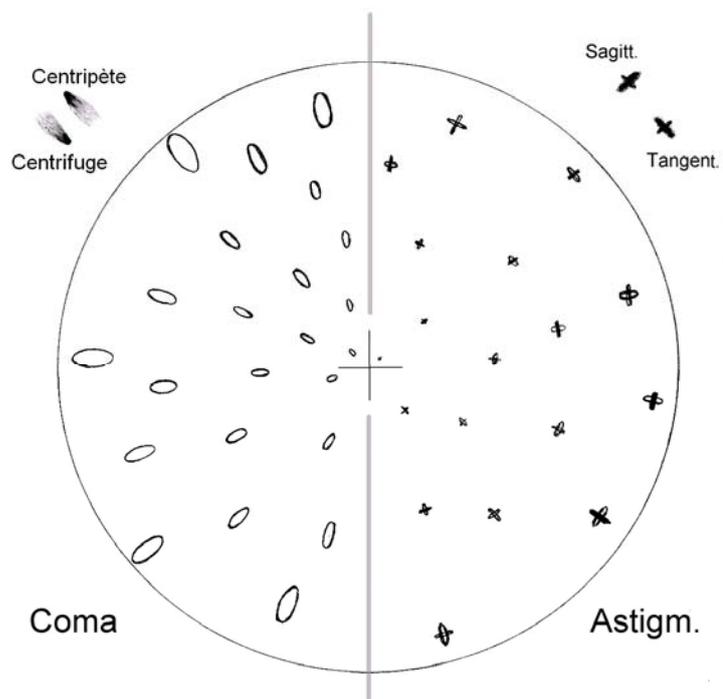
-- Seulement «hors axe», (sur les bords du champ), ou “coma symétrique.”

Si les figures de coma sont disposées de manière symétrique par respect à l’axe (voir en bas de cette page la fig. 25, pag. 38, de l’article n° 18), mais toujours absentes au centre du champ, il s’agit d’un défaut du dessein de l’objectif qui n’admet aucune correction de la part de l’utilisateur. La longueur des figures de coma sera plus ou moins proportionnelle à leur distance du centre du champ.

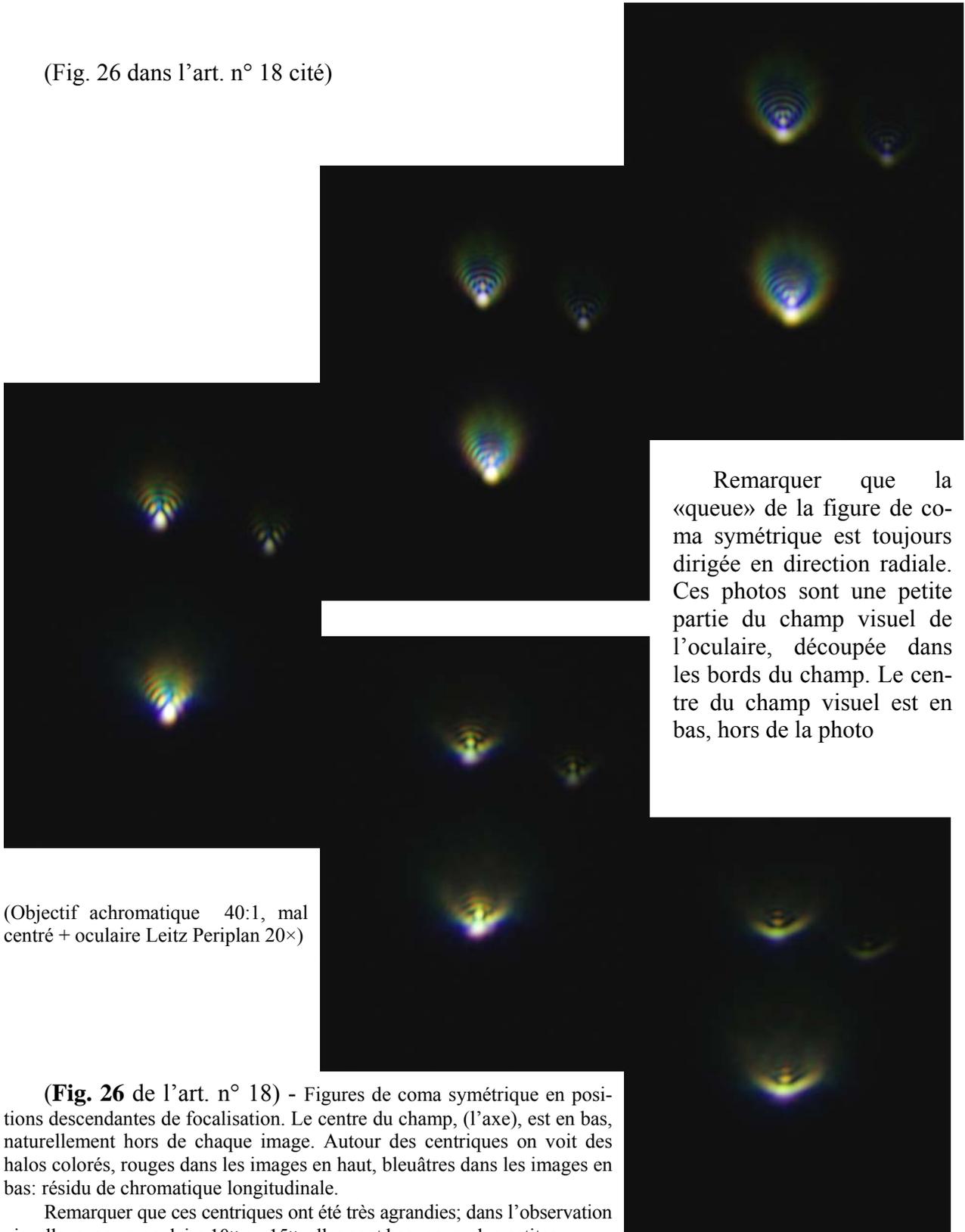
La «queue» de la figure de la coma symétrique peut être dirigée vers le centre du champ ou vers la périphérie.

(Fig. 25 de l’art. n° 18)

Même les figures de coma changent d’aspect au changement de la focalisation. Nous reportons dans la page suivante l’exemple de la fig. 26 de l’art. 18 cité.



(Fig. 26 dans l'art. n° 18 cité)



Remarquer que la «queue» de la figure de coma symétrique est toujours dirigée en direction radiale. Ces photos sont une petite partie du champ visuel de l'oculaire, découpée dans les bords du champ. Le centre du champ visuel est en bas, hors de la photo

(Objectif achromatique 40:1, mal centré + oculaire Leitz Periplan 20×)

**(Fig. 26 de l'art. n° 18)** - Figures de coma symétrique en positions descendantes de focalisation. Le centre du champ, (l'axe), est en bas, naturellement hors de chaque image. Autour des centriques on voit des halos colorés, rouges dans les images en haut, bleuâtres dans les images en bas: résidu de chromatique longitudinale.

Remarquer que ces centriques ont été très agrandies; dans l'observation visuelle, avec un oculaire 10× ou 15×, elles sont beaucoup plus petites.

## L'ASTIGMATISME

-- Sur l'axe, au (centre du champ) ou "astigmatisme asymétrique"

Dans ce cas, il s'agit d'un alignement (inclinaison) erroné de quelque élément optique de l'objectif (lentille), ou de l'instrument (filtre, prisme, lentille).

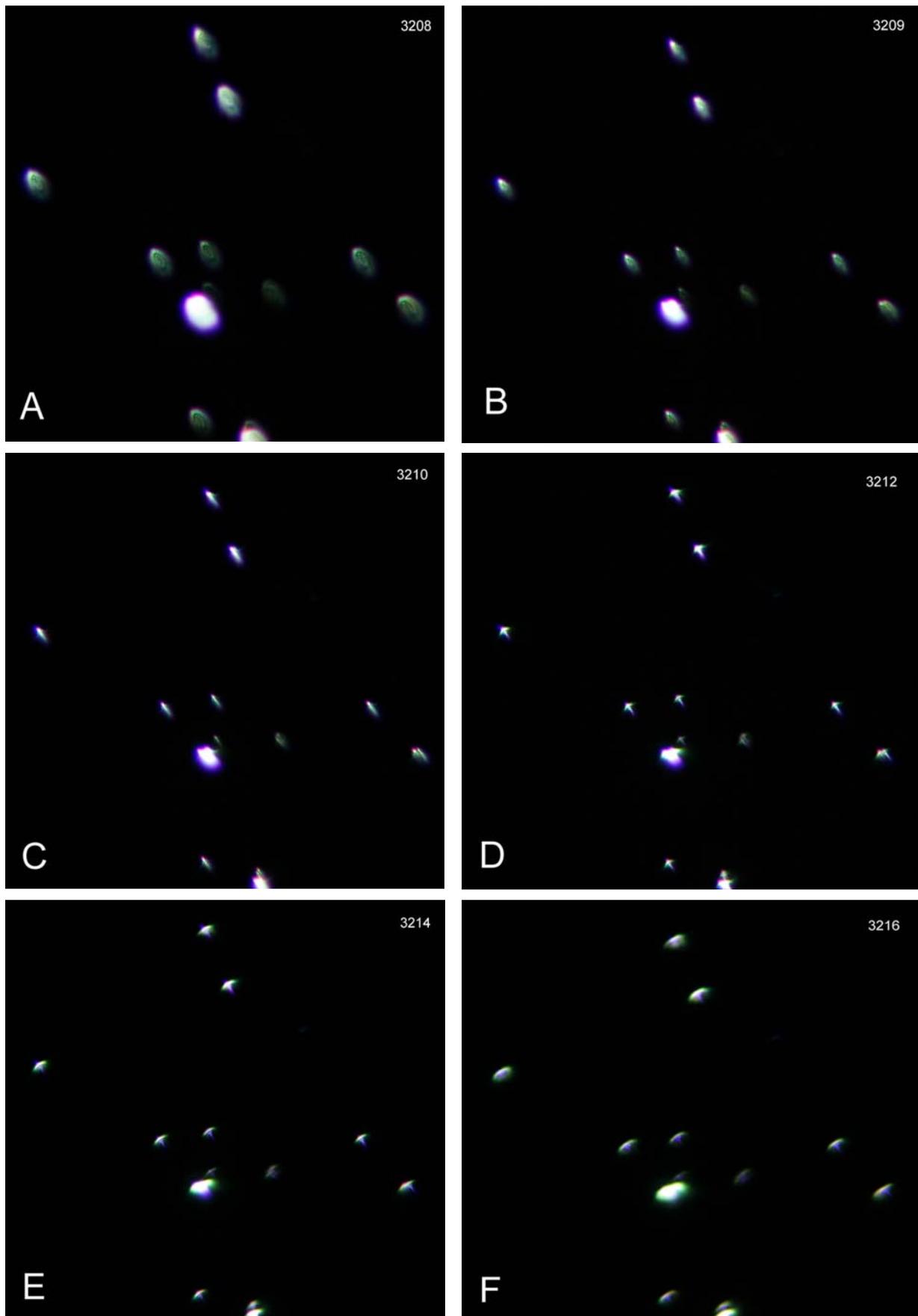


Fig. 14 - Astigmatisme, avec les focalines sagittales (A- C) et tangentielles (E – F), mais avec un résidu de coma. «Focalines» indique les sections de moindre largeur de la centrique à trois dimensions.

Le centre du champ visuel se trouve hors image, en bas à droite. Les six images ont été prises à différentes hauteurs de la focalisation. Obj.10/0,20. L'oculaire utilisé est un 20 ×.

Noter que, dans différentes photos, les focalines sont dirigées selon deux directions orthogonales.

Si le défaut est dans un objectif particulier, on le démontre en comparant la figure fournie par différents objectifs du même model: le défaut apparaît seulement avec cet objectif particulier. Une intervention de correction est presque impossible car les lentilles de l'objectif sont serrés chacune dans un barillet métallique.

Si le défaut dépend de quelque autre partie de l'instrument, il restera après le changement de l'objectif.

-- Seulement hors de l'axe, (sur les bords du champ), ou "astigmatisme symétrique."

Si les focalines ont toutes la même orientation, (toutes dirigées en étoile, ver l'axe, ou toutes tangentielles pour une date position de la focalisation, et de toute façon absentes sur l'axe, symétriquement disposée autour de l'axe – voir la fig. 25, pag. 15), il s'agit d'un défaut de projet, avec bien peu possibilités d'intervention (changement de l'oculaire)<sup>4</sup>.

En général, soit pour le symétrique que pour l'asymétrique, l'astigmatisme est accompagné d'un certain degré de coma.

Dans les photos qui précèdent, (fig. 14), un exemple réel. Entre les différentes photos, prises dans différentes positions de focalisation, on remarquera celles indiquées B ou C, qui montrent quelque focaline sagittale, trop large pour ne pas rappeler une classique queue de coma, et trop étroite pour faire penser seulement à la coma.

(Fig 28) - Focalines astigmatiques sur, au centre et dessous la position de la meilleure focalisation.

Le centre du champ est en bas à droite, hors image. La figure supérieure, donc, correspond aux focalines tangentielles; celle inférieure aux focalines radiales ou "sagittales". Celle au milieu correspond à la position de meilleure focalisation.



Même dans ce cas, les images ont été fortement agrandies.



On observe les bords colorés (CVD, chromatique latérale). Noter aussi que les "anneaux" de la centrique normale sont ici invisibles: l'astigmatisme les cache.

Cette situation vient d'un objectif de grande réputation. Puisque il s'agit d'astigmatisme symétrique, le défaut dérive du projet.

(Objectif Zeiss Oberkochen Neofluar 100/1,30 Oel + oculaire Leitz 8 ×; grandissement électronique 6 ×)



<sup>4</sup> Voir l'art. n° 19: "La compensation de l'astigmatisme et de la coma."

Ci dessus, une autre série de photos reprises encore de l'art. n° 18, un autre cas réel d'astigmatisme symétrique. La photo centrale, pour la meilleure mise à point, ressemble à celle d'un objectif corrigé, ma ça suffit une petite variation de mise au point pour révéler les focalines: sans une focalisation variable, donc, l'astigmatisme pourrait ne pas être remarqué.

\* \* \*

À ce point là, la conclusion semble escomptée: il faut avoir quelque idée claire, beaucoup de patience et un peu d'expérience. Et peut-être une lampe puissante.

Après un certain apprentissage, le star test devient la meilleure radiographie d'un objectif.

Si en plus on dispose du réseau aux lignes parallèles, peu d'incertitude peuvent rester.

Il est bien vrai que l'expérience d'un observateur "expérimenté" est irremplaçable. J'ai plusieurs fois vu des diagnostics précis établis sur l'observation d'une bonne vieille préparation, bien connue. Mais, vu qu'il y a des examens objectifs simples, aisément répétables, capables même de donner quelque mesure numérique (par ex., largeur des franges de chromatique), pourquoi renoncer?

PS: pour celui qui désirât ordonner un ou plusieurs star test à une industrie capable d'exécuter des dépôts métalliques sous vide, il faut spécifier:

- le type de support (porte-objets standard)
- dépôt d'aluminium, qui doit être mince, même au dépenses d'une transparence résiduelle de 1- 2 ‰ (0,001- 0,002)
- aucune préparation de base ("grippage" de chrome ou semblables)
- aucune protection (en silice, etc.): cela provoquerait la formation de couleurs d'interférence dans les trous.