Optique géométrique dans les instruments d'observation de l'astronome amateur
Mario Lessard - La chronique de Mario, Avril 2003

Dans ce dossier, nous étudierons le trajet des rayons lumineux et la formation d'images dans les systèmes optiques utilisés en astronomie amateur. Dans l'article sur les **Lumières**, nous avons vu ce qu'était un flux ou un faisceau lumineux, et aussi dans quelles circonstances, le concept de rayon lumineux peut être employé. Par exemple lorsque la longueur d'onde de la lumière traitée est beaucoup plus courte que les objets qu'elle éclaire. Il ne faut pas oublier toutefois qu'un rayon lumineux n'est rien d'autre qu'une abstraction mathématique qui n'existe que dans notre façon de nous représenter un système optique.

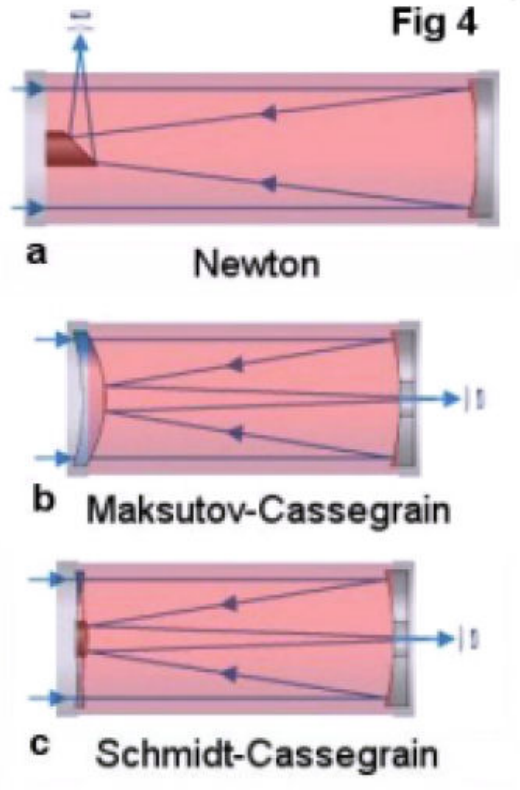
Rayon lumineux et système optique.

Une source de lumière est considérée comme ponctuelle lorsque la lumière qu'elle émet parcourt une distance beaucoup plus grande que sa dimension propre, et ce, peu importe sa forme géométrique. Et les rayons de lumière d'une source ponctuelle sont émis dans toutes les directions, et à une grande distance de cette source, les fronts d'onde sont pratiquement parallèles, et les rayons sont des droites parallèles exemple : la lumière émise par une étoile (source à l'infini).

Un système optique parfait est stigmatique. C'est-à-dire que la lumière entre dans ce système sous forme de faisceau, et en ressort sous forme de faisceau identique. Malheureusement, les fabricants de ces systèmes ont beau faire des pieds et des mains, les systèmes optiques sur le marché ont plutôt un certain degré d'astigmatisme, et le système idéal reste encore à venir. Le mieux que l'on peut faire est un système qui se rapproche le plus des conditions idéales. Nous reviendrons sur les défauts optiques de ces systèmes.

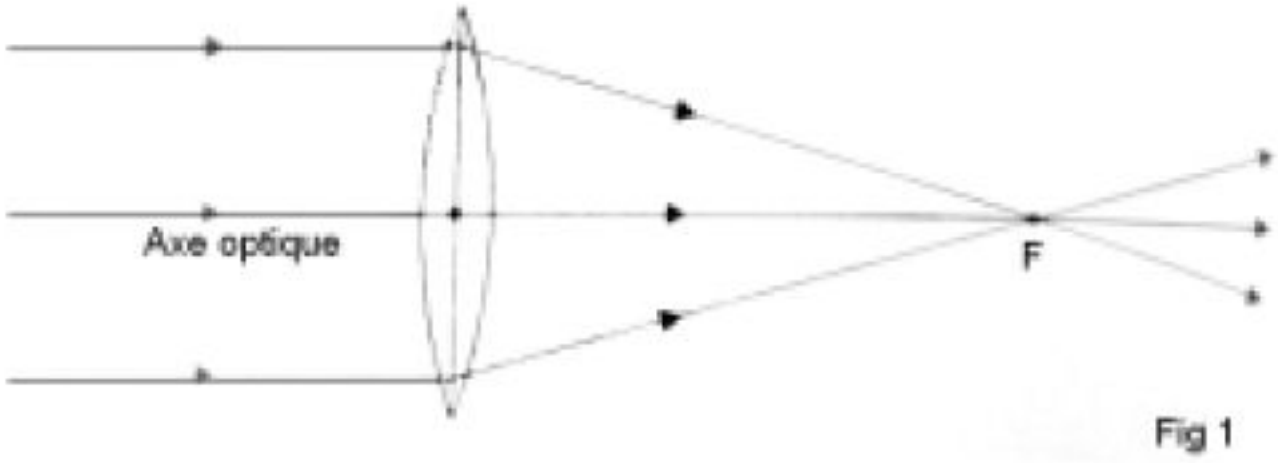
Longueur focale, échelle d'image et grossissement.

Nous allons voir les instruments les plus utilisés en astronomie amateur, mais avant, commençons par le système le plus simple, **le réfracteur** ou **la lunette**. Le but est de se faire une image globale des trajets lumineux et de transporter cette image lorsque nous traiterons des réflecteurs, car le principe de base du parcourt de la lumière est le même (voir figure 4).



Commençons par regarder l'image d'un objet distant comme une étoile (et supposons sa lumière monochromatique pour l'instant), formée par une lentille convergente, comme sur la figure 1. Comme mentionné plus haut, les rayons ou les lignes qui «frappent» la lentille, sont parallèles. La ligne parcourant par le centre de la lentille est l'axe optique. Une « bonne» lentille convergera ensuite ces rayons en un point nommé foyer désigné par la lettre F sur la fig.1. La distance entre le centre de la lentille et le point F est la **distance focale** ou **longueur focale**. On nomme aussi le r**apport focal** ou **rapport d'ouverture** *f/D* le rapport entre la focale de l'instrument et D, le diamètre du collecteur primaire.

.



Maintenant, observons ce qui se passe lorsque la lumière d'une autre étoile située dans le même champ entre aussi dans notre instrument. Pour fins de commodités, nous ne tracerons que les rayons de cette deuxième étoile comme nous le montre la figure 2. La loi de la réfraction nous dit que le rayon qui entre par l'axe optique en ressort avec le même angle par rapport à celui-ci, et ira vers le foyer. La lentille s'occupera de «ramener» les autres rayons vers ce foyer. On voit maintenant que l'image se forme avec une certaine distance ou hauteur h de l'axe optique (voir fig. 2). Le plan entre le foyer de ce rayon et l'axe optique se nomme **le plan focal**.

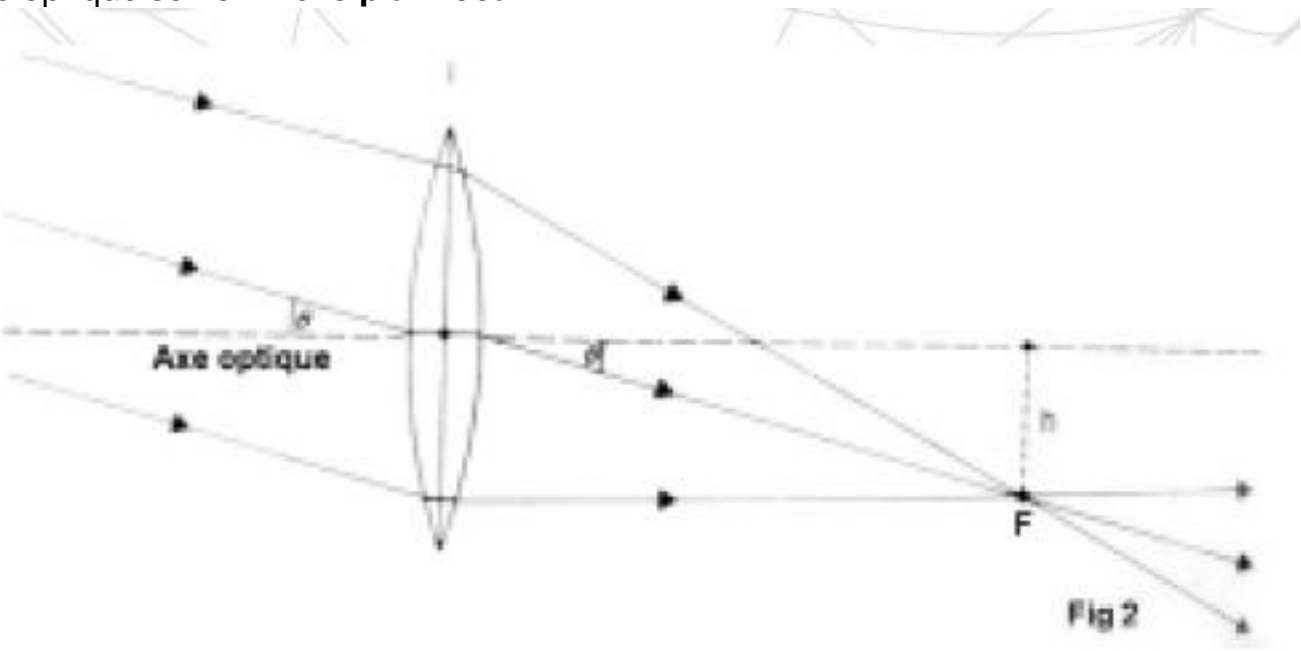
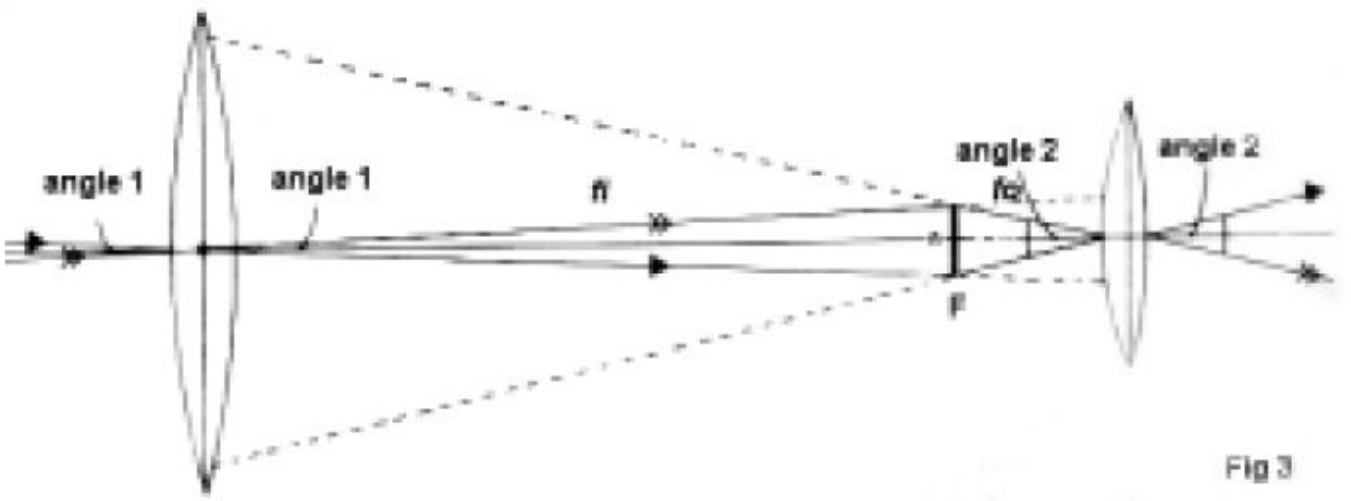


Fig 2

Ce dernier paramètre définit une des valeurs les plus importantes de tous les types d'instruments : **l'échelle d'image** ou **l'échelle angulaire**. Étant donné que les angles mentionnés ci-haut, formés dans les instruments d'observation sont petits, on peut se servir de la géométrie du cercle avec assez de précision pour calculer l'échelle d'image de notre instrument. On a premièrement : *angle (radians) = h/f* (voir fig. 2). Étant donné qu'il y a 57,3 degrés par radian, et qu'il y a 3600 secondes d'arc par degrés on peut faire plutôt : *angle (sec. d'arc) = 206280 x h/F*. D'où ensuite, on peut calculer l'échelle d'image en faisant : *angle (sec. d'arc)/h = 206280/F*. La distance focale étant souvent mesurée en millimètres, l'échelle d'image nous est alors donnée en secondes d'arc/mm. Exemple pour mon réflecteur de 1525 mm de longueur focale, l'échelle est de : *206280/1525 = 135,3 secondes d'arc/mm*. Ainsi, je sais que Jupiter à 48 secondes d'arc de taille angulaire, formera une image de 0,3 mm au foyer de mon télescope. Et je sais aussi qu'une pellicule photo de 24 mm x 36 mm couvrira un angle de 0,9 degré x 1,35 degré au foyer primaire. Le calcul de l'échelle d'image s'applique aussi pour tout système optique utilisé en astronomie amateur. Comme pour un appareil photo conventionnel avec une lentille de 50 mm, l'échelle d'image est de 4125 secondes d'arc/mm et le champ couvert est alors de 27,5 degrés x 41,3 degrés.

Maintenant, étudions le cas du grossissement des images formées par un système optique. J'ai toujours trouvé que les schémas que l'on voit couramment dans les manuels ou la littérature d'optique géométrique sur le grossissement, étaient non-intuitifs. Je vous propose un schéma qui selon moi sera plus explicite sur le grossissement.



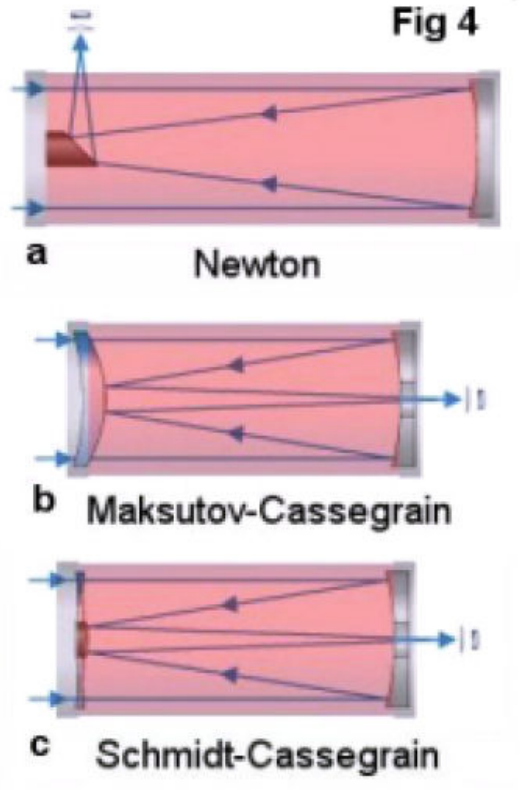
La figure 3 nous montre le même système que celui traité précédemment, mais dont on a enlevé les rayons «gênants» ou inutiles pour notre bonne compréhension. Seuls **les rayons paraxiaux** ont été illustrés. Une lentille représentant un oculaire a aussi été rajoutée. On a la longueur focale de l'instrument *fi*de la lentille primaire jusqu'au plan focal, et la longueur focale de l'oculaire *fo* du plan focal à la deuxième lentille. Les deux rayons entrants représentent la taille angulaire de l'objet. Je répète que seuls les rayons utiles sont illustrés, afin d'alléger l'illustration pour mieux comprendre. Comme mentionné plus haut, la lentille primaire forme une image de hauteur h au foyer, et l'angle 1 est calculé ainsi : *angle 1 = h/fi*. Or, comme la longueur focale de l'oculaire *fo* est plus courte que *fi*(voir figure 3), l'angle 2 est donc plus grand : *angle 2 = h/fo*. Donc le grossissement est donné par le rapport : *angle 2/angle 1 = fi/fo.* D'où notre équation classique du grossissement lorsque l'on divise *fi/fo*.

Réflecteurs et catadioptriques.

La conception de grandes lentilles est très onéreuse en plus d'être lourdes et de causer des problèmes mécaniques. De plus, l'autre principal défaut des lentilles, réside dans la qualité imparfaite des images que l'on doit corriger par des agencements de lentilles complexes, ce qui augmente leur coût encore plus. En fait, les bonnes lentilles coûtent très chères. C'est pourquoi aujourd'hui on utilise surtout des instruments à miroir, qui nous en donnent plus sur le rapport qualité-diamètre/prix.

Le principe de base des rayons lumineux est le même pour un réflecteur ou télescope qu'une lunette. La principale différence réside dans le fait que nous utilisons un miroir à la place d'une lentille, comme collecteur primaire. Les miroirs sont moins onéreux et plus

faciles à fabriquer et de plus, ils ne possèdent pas les principaux défauts optiques inhérents aux lentilles (mais ils en ont tout de même).



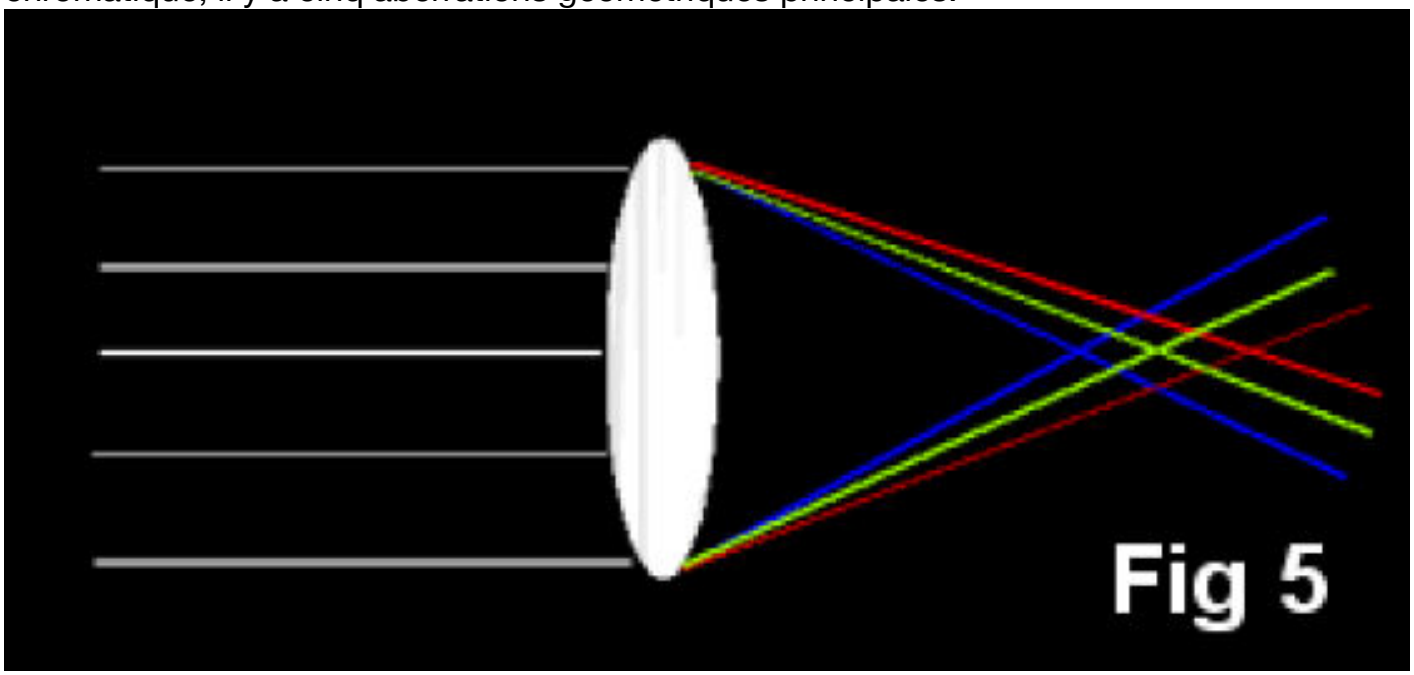
La figure 4 nous montre trois des télescopes les plus couramment utilisés par les amateurs. En 4a, on a le type **Newton**. L'image provenant du miroir de forme parabolique (nous verrons pourquoi plus loin) est réfléchie vers l'oculaire par un petit miroir secondaire placé à 45 degrés sur l'axe optique. En 4 b et 4 c, on a **les catadioptriques**, sorte d'hybrides entre réfracteurs et réflecteurs. En4 b c'est le **Maksutov-Cassegrain** et en 4 c le **Schmidt-Cassegrain**. Les deux possèdent un miroir sphérique et une plaque correctrice devenue essentielle afin de corriger l'instrument de l'aberration de sphéricité. Remarquez le trajet de la lumière dans chaque instrument. Je n'entrerai pas dans le trip du «… lui c'est le meilleur…», car je crois que chaque type a sa propre spécificité.

Aberrations.

Comme mentionné précédemment, l'image d'un système optique n'est ponctuelle (stigmatique) que si les rayons lumineux émit par ce point, sont proches de l'axe optique (rayons paraxiaux) et peu incliné par rapport à celui-ci. Ce sont **les conditions de Gauss**. Malheureusement, force est d'admettre qu'un tel système ne nous servirait pas à grand-chose à moins de faire des lunettes ou des télescopes de focale extraordinairement longues, ce qui nous ramène au problème du coût et de la mécanique.

En fait, la réalité est que les systèmes optiques ne donnent pas une image stigmatique, mais distribuent plutôt la lumière autour ou au voisinage de cette image stigmatique. Ce que l'on appelle la **fonction d'étalement de point (FEP)** de l'anglais «point spread

function». Donc l'image n'est plus ponctuelle et des aberrations géométriques indépendantes les unes des autres apparaissent alors, déformant ou modifiant l'image. Attention, ces aberrations ne comprennent pas les effets sur l'image liés à la nature ondulatoire de la lumière ainsi que la déformation des images par la turbulence atmosphérique (deux sujets que nous aborderons prochainement). Outre l'aberration chromatique, il y a cinq aberrations géométriques principales.



Pour un système composé de lentilles dont l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde, la FEP dépend aussi de la longueur d'onde : c'est **l'aberration chromatique** (figure 5), qui répartit le foyer des couleurs d'une lumière blanche « décomposée» par la lentille, le long de l'axe optique. La distance focale étant plus longue pour le rouge que pour le bleu (fig.5), une image caractérisée par un «halo» rouge est souvent un symptôme de cette aberration. On corrige cette aberration en agençant différents types de lentilles (Flint ou Crown), qui diffèrent par leur **indice de réfraction** et leur **dispersion des couleurs.** Sans entrer dans les détails, disons qu'une lunette **achromatique** corrige sur deux couleurs tandis qu'une **apochromatique** corrige sur une plus grande bande quoique le rendement en lumière violet demeure pauvre.

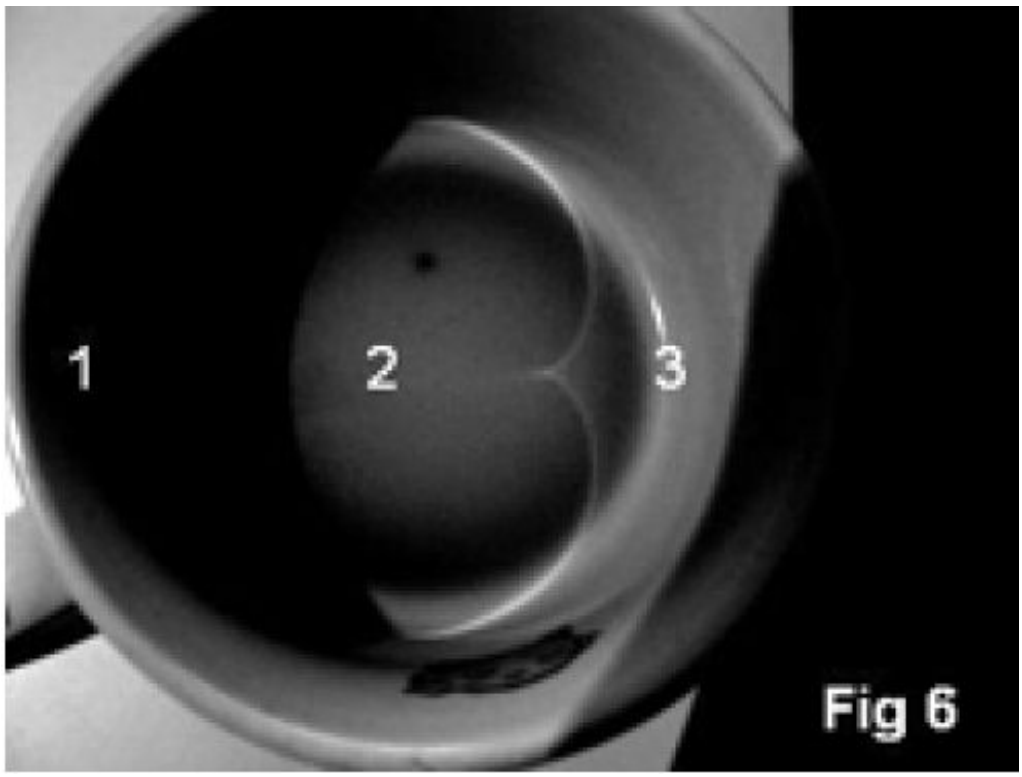
L'aberration de coma ou simplement coma, est une aberration complexe, et distribue la FEP en lui donnant l'apparence d'une chevelure de façon non symétrique par rapport à une image ponctuelle (d'où son nom de coma rappelant une comète), si la source est hors de l'axe optique. **L'astigmatisme** modifie la FEP en lui donnant l'aspect d'une ellipse pour une source ponctuelle hors axe. Cependant, un œil peut-être astigmatique et conduire à un mauvais diagnostic de cette aberration sur un système optique. Une façon de vérifier si c'est vous ou l'instrument qui est en cause est de tourner la tête d'un côté puis de l'autre, tout en gardant l'œil à l'oculaire. Si les défauts «tournent» avec vous, c'est votre œil qui est en cause. L'astigmatisme chez l'humain provient d'une courbure non symétrique de la cornée, sur deux axes. Les effets sont plus marqués vers la périphérie de l'œil. Le degré

d’astigmatisme peut être réduit de beaucoup si vous utilisez un grossissement maximal possible, car le faisceau de lumière frappera alors une surface moins grande de votre cornée.

Parmi les autres aberrations que l’on peut retrouver dans un système optique, citons rapidement la **courbure de champ** qui transforme la concentration de lumière sur le plan focal sous forme de segment de courbe, **la distorsion** qui déformera l’image d’un quadrillage, et **l’aberration sphérique**, que je détaillerai un peu plus ici.

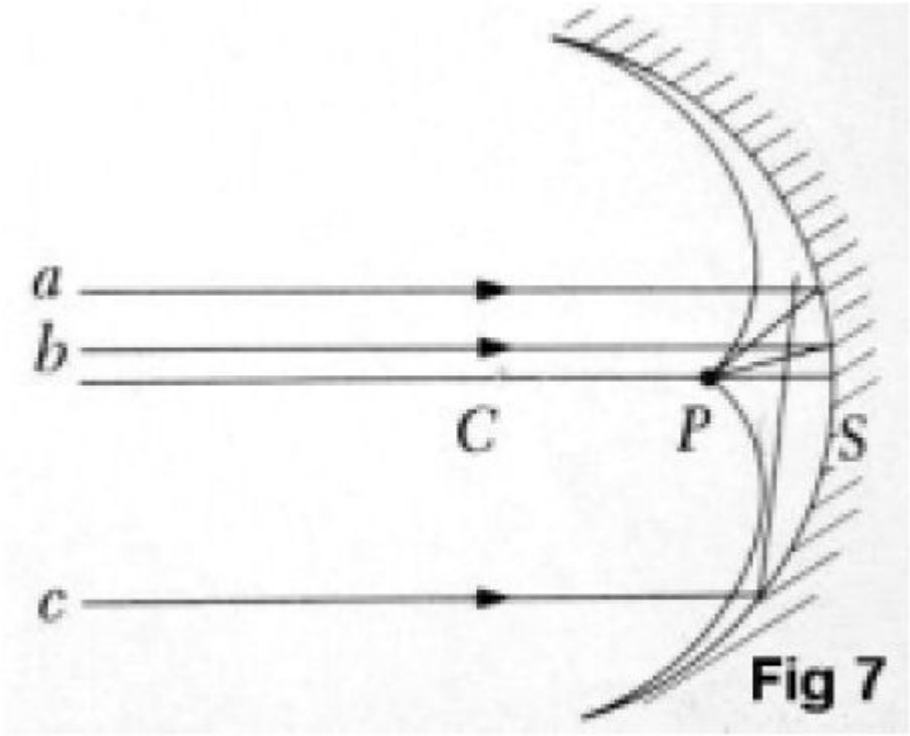
L’image formée par un miroir sphérique.

Asteure, nous allons voir ce que ça a l’air un système optique qui souffre de l’aberration de sphéricité. Pour vous le montrer, rien ne vaut une bonne tasse de café comme celle que je déguste présentement en écrivant ces lignes, et dont je me suis fait un plaisir de prendre en photo (ça arrive pas souvent qu’on prenne une tasse de café en photo!!!!!). Oui oui!!! une vulgaire tasse de café pour «voir» l’aberration sphérique. On la voit sur la figure 6. Les parois internes de la tasse constituent un excellent modèle de projection de lumière par un miroir sphérique, lorsque la source est située loin du centre de courbure du système.



La tasse est vue du dessus et éclairée obliquement. Je vous laisse deviner de quel côté provient l’éclairage… Bravo!!!…Du côté gauche évidemment, et cette source est loin du centre de courbure du système qui se situe naturellement au centre de la tasse. En regardant de plus près, on y distingue trois zones d’éclairages distincts 1, 2 et 3. Ces chiffres correspondent aussi à ce qui serait l’axe optique. La zone 1 est l’ombre sur le côté

de la tasse qui est aligné vers la lumière. La zone 2 est éclairée directement par la source et la région 3 qui est la plus éclairée des trois zones, reçoit de la lumière de la source, et aussi de la lumière réfléchie par les parois circulaires de la tasse. C'est cette dernière zone que nous allons approfondir. On voit nettement que le patron de réflexion a la forme d'une belle paire de fesses, et que les rayons ne convergent pas tous au foyer. Pour ce faire, il aurait fallu plutôt que la paroi qui reçoit la lumière soit un paraboloïde d'où l'utilité du miroir parabolique pour une source à l'infini.



La figure 7 est une illustration du trajet de quelques rayons principaux afin de mieux comprendre ce qui se passe. Le rayon qui passe au centre de l'axe optique est réfléchi sur lui-même et les rayons paraxiaux (près de l'axe optique) a et b, sont réfléchis vers P. Par contre, le rayon c, qui est éloigné de l'axe, passera près de la fesse du bas et viendra éclairer la paroi du haut, ce qui formera ensuite un des segments brillants que l'on voit sur la figure 6. Donc, les rayons éloignés de l'axe optique convergent vers des points qui ne sont pas situés vers le foyer de l'axe principal. L'intégrale de tous les rayons réfléchis, et qui compose tous ces foyers secondaires forment la paire de fesses que l'on appelle **la caustique.**

*Dans la prochaine chronique je parlerai des sujets comme la tolérance du foyer, le disque d'Airy et la dégradation de l'image par les caprices atmosphériques. D'ici là, portez-vous bien et bons cieux !!!

*Voir l'article suivant sur cette page qui traite de la Turbulence et diffraction.