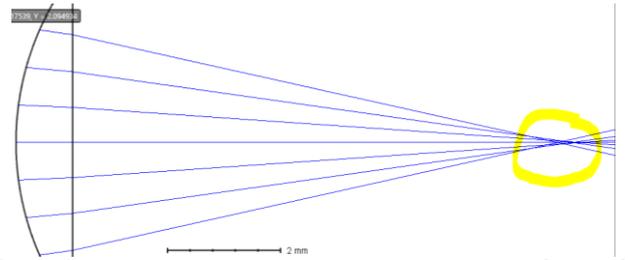


1. Les aberrations

Comme vous avez pu le voir dans le TD1, en zoomant sur la simulation de l'exercice 2, on voit que tous les faisceaux ne coïncident pas en un même point, cela est dû aux aberrations de la lentille.

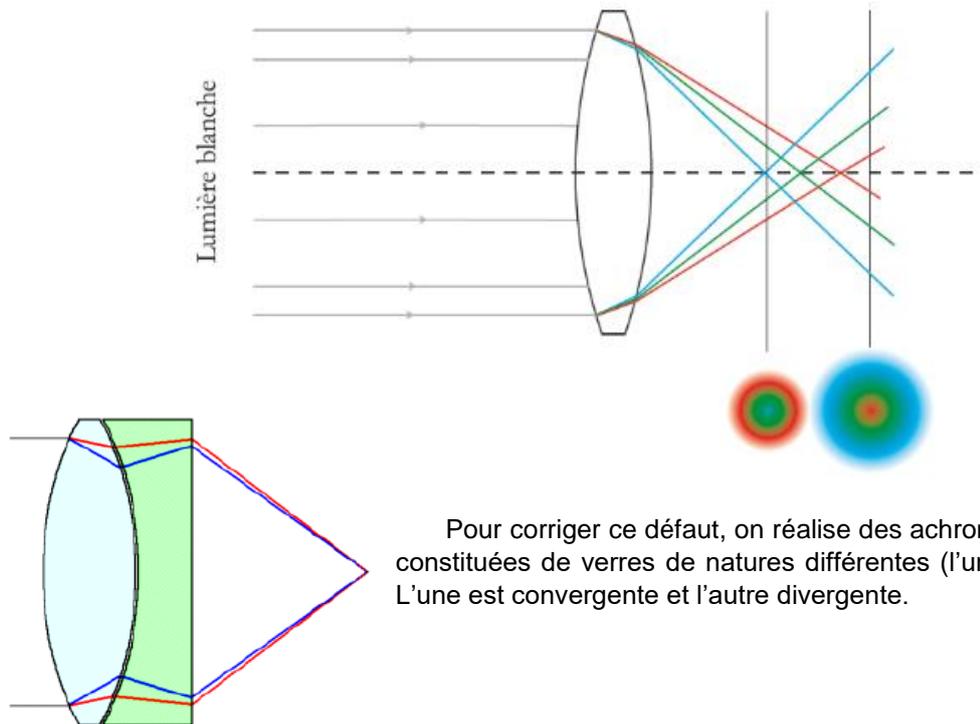
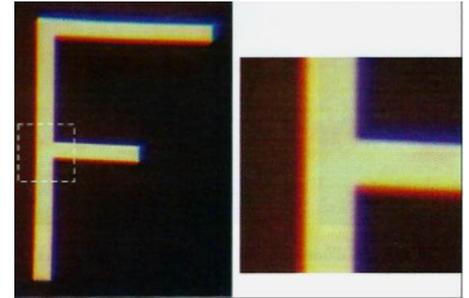
L'idéal serait que l'image d'un point par le système optique soit également un point (stigmatisme rigoureux). Mais ceci est rarement le cas car le système réel présente des aberrations qui détériorent l'image. Zemax permet de les mettre en évidence et d'y remédier.



a) Aberrations chromatiques

L'image (ci-contre) en lumière blanche présente des irisations. Ces aberrations sont dues à la dispersion de la lumière par le verre qui constitue la lentille. Il décompose la lumière comme un prisme.

Les positions des foyers images diffèrent d'une longueur d'onde à l'autre. Le schéma ci-dessous montre les aberrations longitudinales (le long de l'axe optique) et les aberrations transversales (perpendiculaires à l'axe optique).



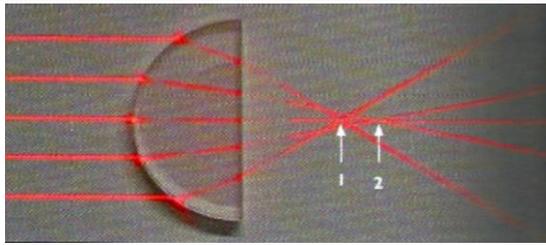
Pour corriger ce défaut, on réalise des achromats : on accole deux lentilles constituées de verres de natures différentes (l'un en flint et l'autre en crown). L'une est convergente et l'autre divergente.

b) Aberrations géométriques

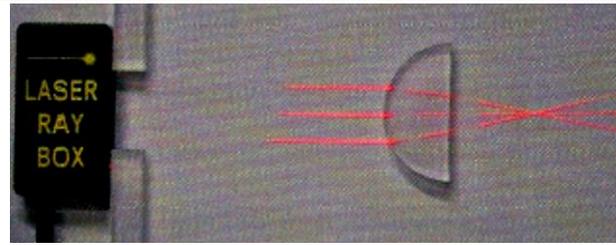
Elles sont dues au fait que, même en lumière monochromatique, tous les rayons qui passent par le système optique ne coupent pas l'axe optique au même point.

On distingue les défauts d'ouverture qui surviennent quand le système reçoit des faisceaux de large ouverture angulaire mais très peu inclinés sur l'axe optique (microscopes, lunettes astronomiques, téléobjectifs photographiques).

Les défauts de champ se produisent quand l'instrument reçoit des faisceaux de faible ouverture mais très inclinés sur l'axe (loupe).



Les rayons qui frappent la lentille loin de son axe ne convergent pas au même point (foyer image) que les rayons proches de l'axe. L'image n'est pas un point unique à cause de l'aberration sphérique.

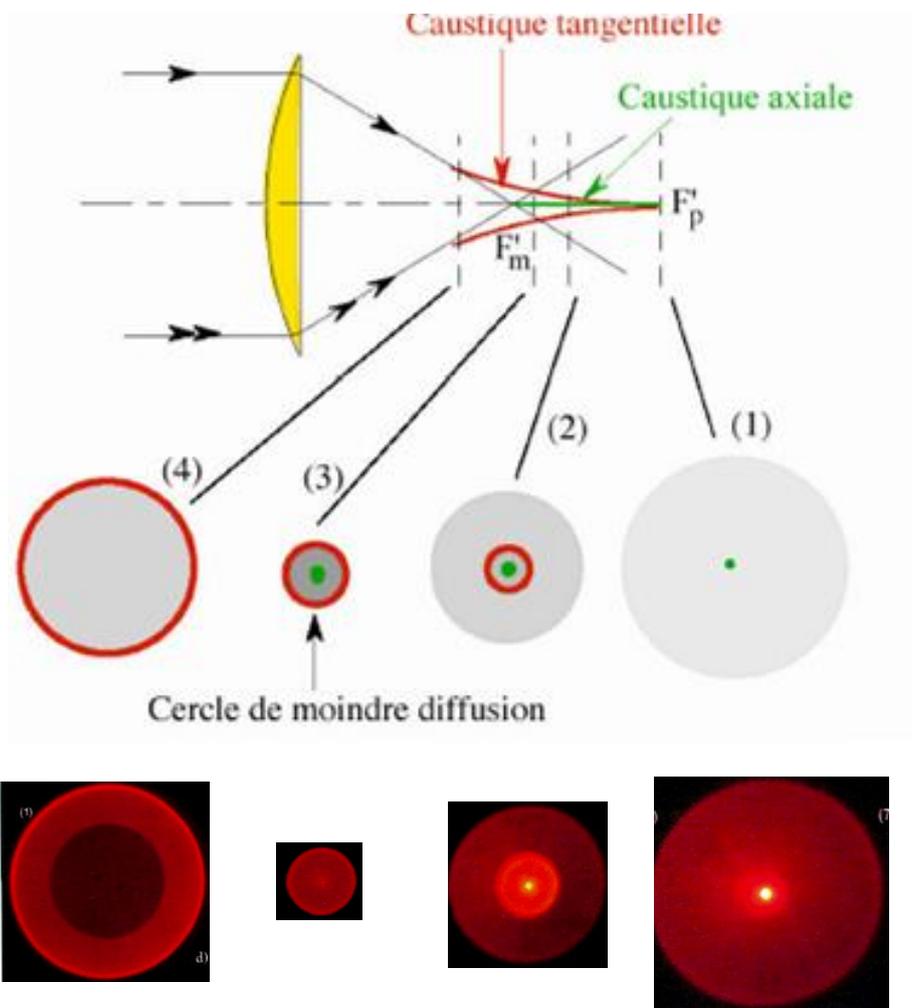


Un cache permet de sélectionner uniquement les rayons proches de l'axe : **rayons paraxiaux (voir conditions de Gauss)**. On a un seul point image, **l'image paraxiale**. L'effet de l'aberration est éliminé.

Conditions de Gauss (conditions de l'optique paraxiale) :

- ✚ Les rayons lumineux issus de l'objet sont peu inclinés par rapport à l'axe optique ;
 - ✚ Les rayons lumineux issus de l'objet frappent la lentille (ou le miroir) au voisinage de l'axe optique.
- Dans les conditions de Gauss, il y a stigmatisme approché : l'image d'un point est presque un point (tache très petite).

Analyse de l'aberration sphérique



Explications :

On éclaire en lumière monochromatique.

La caustique est l'enveloppe des rayons lumineux transmis par le système optique (la lentille ici). Elle représente une surface d'accumulation de la lumière.

L'image du point objet situé sur l'axe optique dépend de la position de l'écran. Cette image n'est pas un point mais une tâche circulaire dont la répartition de l'intensité lumineuse est inégale.

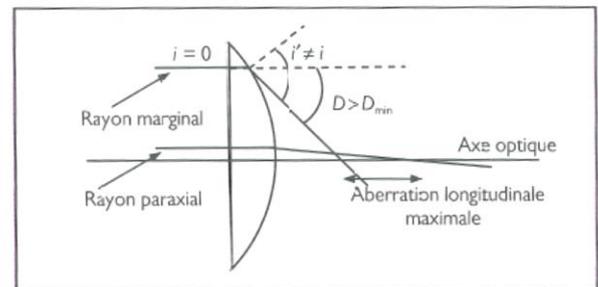
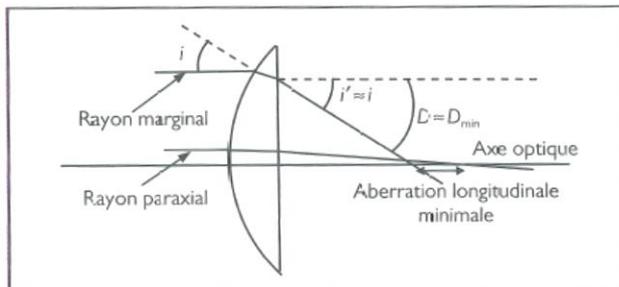
- (1) image ponctuelle est l'image paraxiale de l'approximation de Gauss : F'_p est le **foyer image paraxial**
 - (2) image ponctuelle entourée d'un cercle lumineux
 - (3) le diamètre de la tâche de diffusion est minimum : **cercle de moindre diffusion**
- entre (3) et (4) on trouve un premier point de convergence des rayons : F'_m est le **foyer marginal**. Il correspond aux rayons marginaux qui sont plus convergents que les rayons voisins de l'axe optique. La distance $F'_m F'_p$ est une mesure de l'aberration sphérique longitudinale. Le diamètre du cercle de diffusion de l'image paraxiale mesure l'aberration sphérique transversale.

Comment limiter l'aberration sphérique ?

On peut arrêter les rayons marginaux par un diaphragme, comme dans l'expérience de mise en évidence et comme dans les photos ci-contre. La photo de droite est plus nette car le diaphragme est moins ouvert. Mais ceci se fait au dépend de la luminosité de l'image, puisque celle-ci reçoit moins de rayons lumineux. Tout sera donc affaire de compromis...



Conséquence sur l'utilisation d'une lentille plan-convexe : la règle des 4P



Règle des 4P (plus Plus Plat Plus Près) : la face la plus plane de la lentille doit être disposée du côté de l'image, si celle-ci est plus proche de la lentille que l'objet, ou du côté de l'objet, si celui-ci est plus proche de la lentille que l'image.

Dans l'exemple ci-dessus : l'objet est à l'infini et donc l'image est plus proche de la lentille que l'objet. Il faut donc placer la face plane de la lentille face à l'image pour faire une meilleure utilisation de la lentille.

c) Aberration de coma

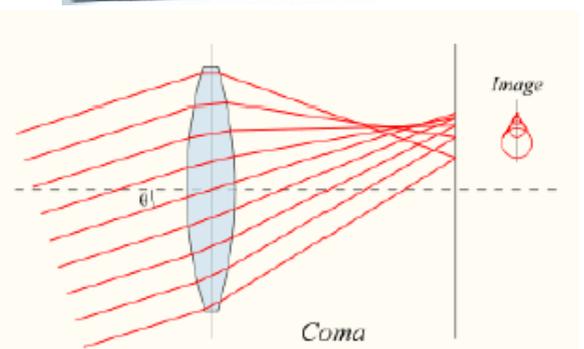
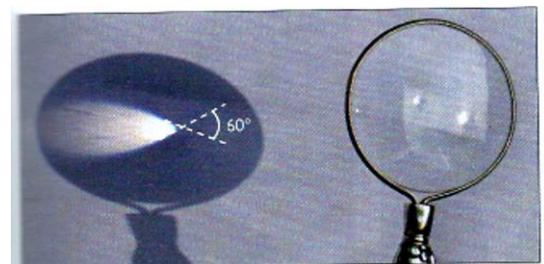
Cette aberration géométrique apparaît avec des objets qui ne sont pas situés sur l'axe optique mais proches de l'axe optique.

Mise en évidence :

On fait l'image du soleil dans le plan focal image d'une lentille convergente, que l'on incline légèrement. Le soleil devient un objet ponctuel en dehors de l'axe. Son image prend la forme d'une queue de comète, d'où le terme « coma » de ce défaut.

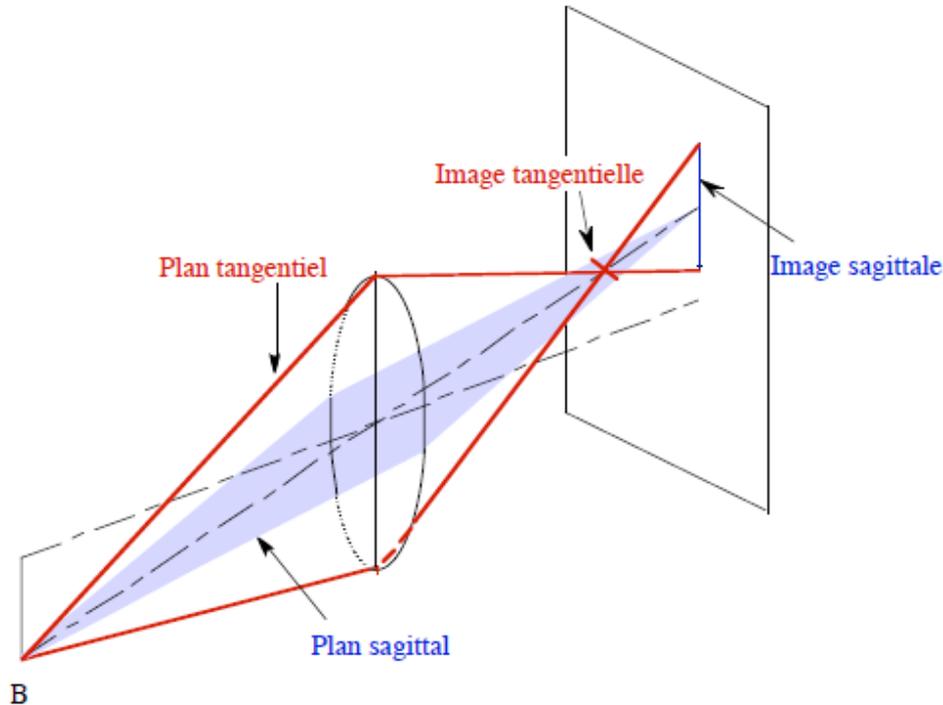
Explication :

La forme de l'image se justifie car la lentille est plus convergente aux bords qu'au centre. La caustique n'est plus de révolution autour de l'axe optique. La tâche image présente un aspect allongé.



d) Astigmatisme et courbure de champ

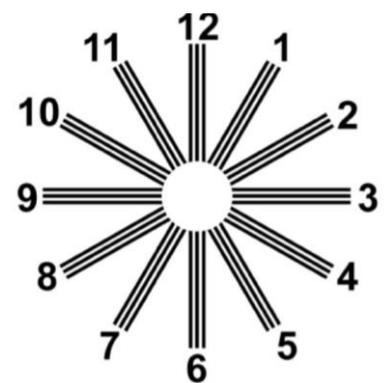
Ces aberrations de champ apparaissent quand on éloigne un peu plus l'objet de l'axe optique.



Astigmatisme :

Pour faciliter la description du phénomène deux plans particuliers sont définis ainsi qu'un rayon spécifique. Le plan contenant l'axe optique et le point objet B éloigné de l'axe optique s'appelle le **plan tangentiel**. Le rayon issu de B passant par le centre de la lentille est un rayon principal. Le plan perpendiculaire au plan tangentiel qui contient le rayon principal s'appelle le **plan sagittal**.

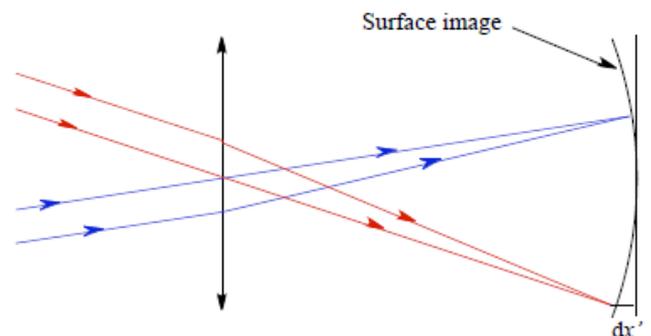
Le phénomène d'astigmatisme provient du fait que les rayons contenus dans le plan tangentiel ne convergent pas à la même distance du système optique que les rayons contenus dans le plan sagittal. Dans notre cas de figure, si l'écran est positionné au niveau de l'image sagittale, l'image du point B apparaît comme une ellipse très fortement aplatie de grand axe contenu dans le plan tangentiel. Si l'écran est positionné au niveau de l'image tangentielle, l'image du point B est une ellipse de grand axe contenu dans le plan sagittal. La distance entre ces deux images s'appelle la distance d'astigmatisme. Elle dépend fortement des couples de plans conjugués considérés et de la distance du point B à l'axe. Au niveau d'un plan situé à peu près à mi-distance entre les images tangentielle et sagittale, l'image B' est un cercle appelé cercle de moindre diffusion ; c'est la meilleure image que l'on puisse obtenir.



L'astigmatisme est très fréquent dans le cas de l'œil. La netteté dépend alors de la direction des détails visualisés. Le défaut est alors corrigé par des verres eux-mêmes astigmatés. Ci-contre, voici un test d'astigmatisme de l'œil : sans lunettes, on cache un œil puis l'autre. Si certaines lignes paraissent plus noires que les autres, c'est que l'œil est probablement astigmaté.

Courbure de champ :

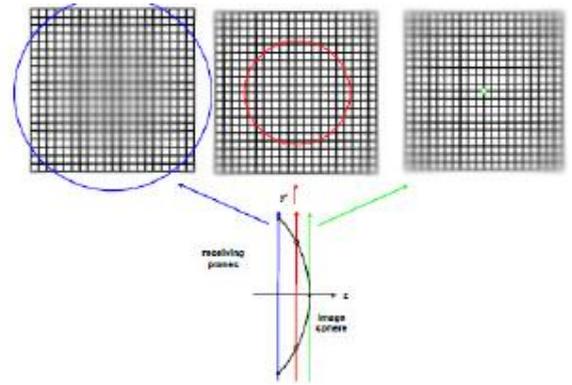
C'est une aberration due au fait que l'image d'un objet plan de grande dimension se forme sur une surface image paraboloidale et non sur un plan. L'écart dx' varie comme la dimension au carré de l'objet : y^2 .



Suivant l'endroit où on met au point, on obtient les bords nets et le centre flous ou l'inverse.

Pour corriger cette aberration, on associe lentilles convergentes et divergentes.

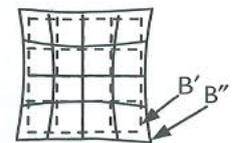
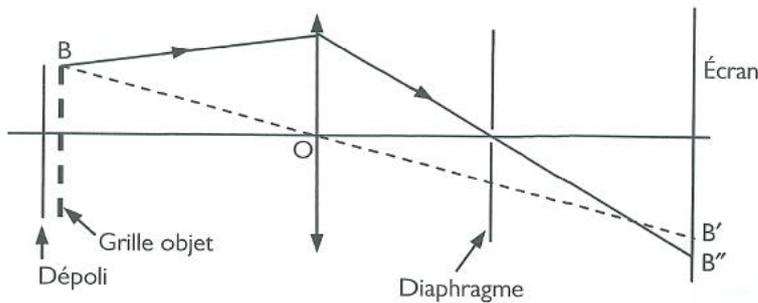
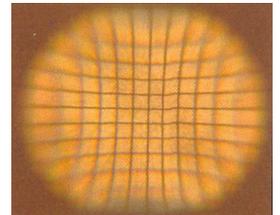
L'objectif d'un microscope ne sera en général pas corrigé de la courbure de champ lors d'une observation visuelle car l'expérimentateur peut facilement ajuster la distance de mise au point pour une observation au bord du champ. Par contre pour réaliser de la microphotographie l'objectif devra être corrigé aussi de la courbure de champ. Ces objectifs sont dits plans.



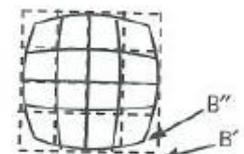
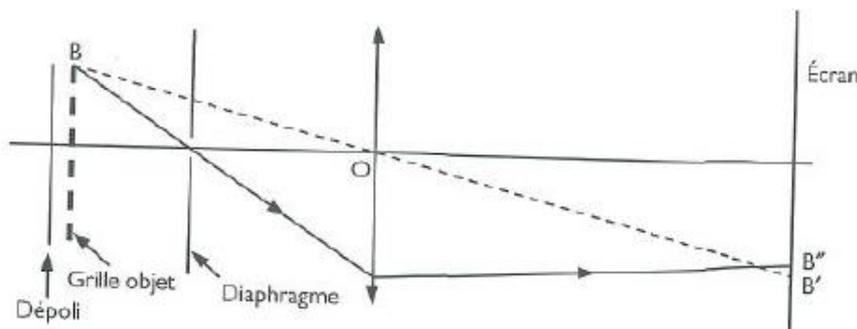
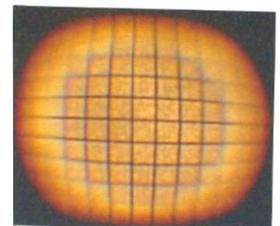
e) Distorsion

Elle s'observe pour une ouverture très réduite et pour des points objets très éloignés de l'axe optique.

Lorsque le diaphragme est placé après la lentille, la distorsion est en **coussinet**. La distorsion diminue si on rapproche le diaphragme de la lentille, pour disparaître s'il est collé contre elle. Quand le diaphragme est placé après la lentille, l'image du point B n'est plus formée par des rayons paraxiaux (en pointillés) mais par des rayons marginaux, dont la déviation plus importante conduit à une image B'' plus éloignée de l'axe que l'image paraxiale B'. Il en résulte un étirement de la grille à ses bords.



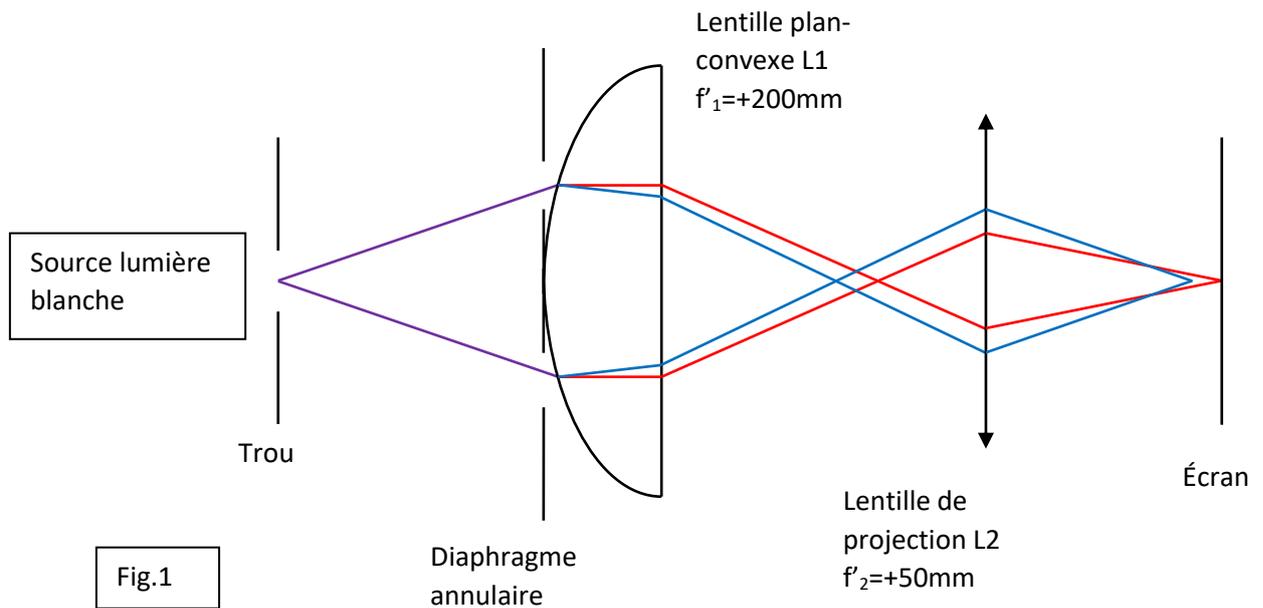
Si le diaphragme est placé avant la lentille, les rayons marginaux donnent cette fois une image en B'' plus rapprochée de l'axe que l'image paraxiale B'. Il en résulte une contraction de la grille à ses bords. La distorsion est dite en **barillet**.



Pour remédier à la distorsion, dans un objectif d'appareil photo, on dispose les différents éléments optiques de manière symétrique par rapport au diaphragme limitant.

2. Mise en évidence des aberrations

a) Exemple 1 : aberrations chromatiques



Un trou source circulaire de diamètre 1 ou 2mm est placé devant une source de lumière blanche, sur l'image du filament de l'ampoule.

On place une lentille plan-convexe de L1 de grand diamètre à environ 1m du trou, face bombée vers le trou. Le faisceau lumineux doit couvrir entièrement L1.

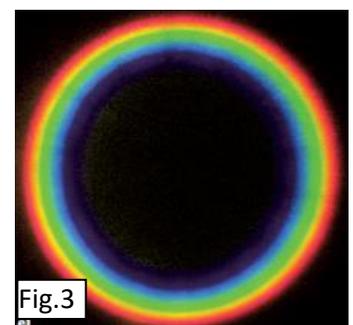
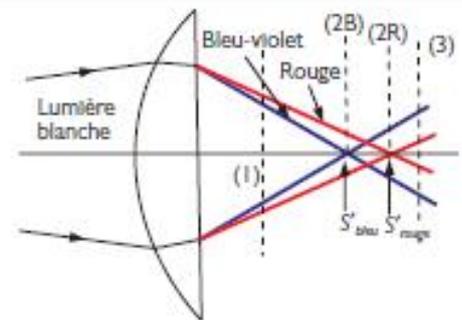
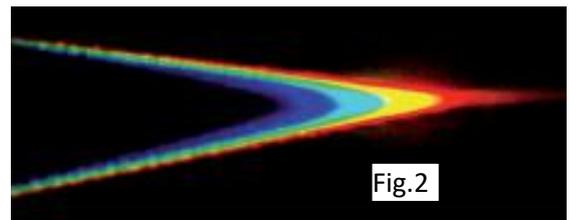
On place un diaphragme annulaire, préalablement découpé, juste devant L1.

On observe **l'aberration chromatique longitudinale** (Fig.2) en plaçant un écran dans un plan contenant l'axe optique de L1.

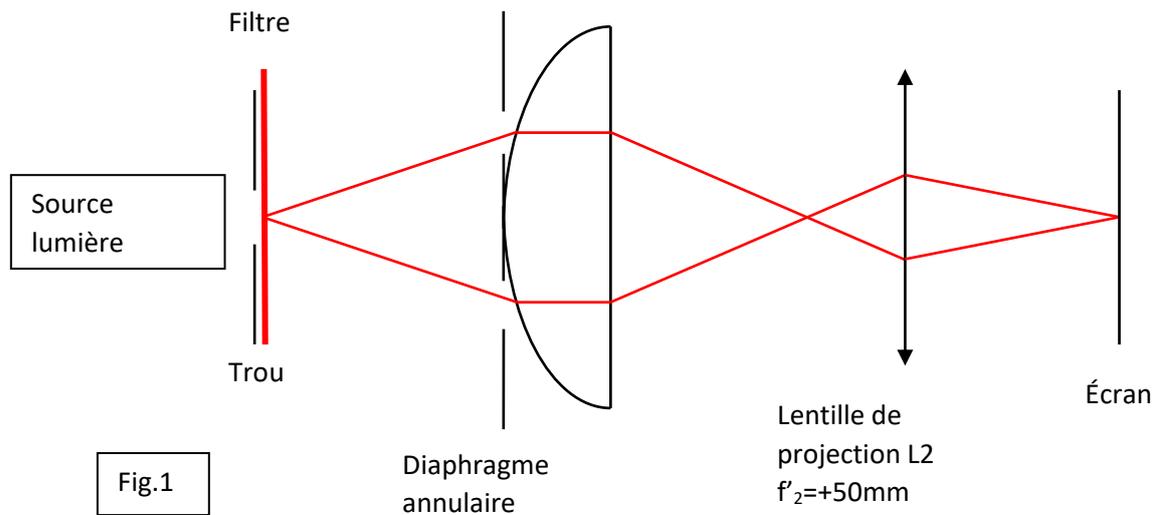
En présence du diaphragme annulaire, la lentille se comporte comme un prisme et les rayons bleus sont plus déviés que les rouges. Ils convergent donc plus rapidement.

Si on place un écran parallèlement au plan de L1, on observe l'aberration chromatique transversale (Fig.3). L2 permet d'en former une image agrandie.

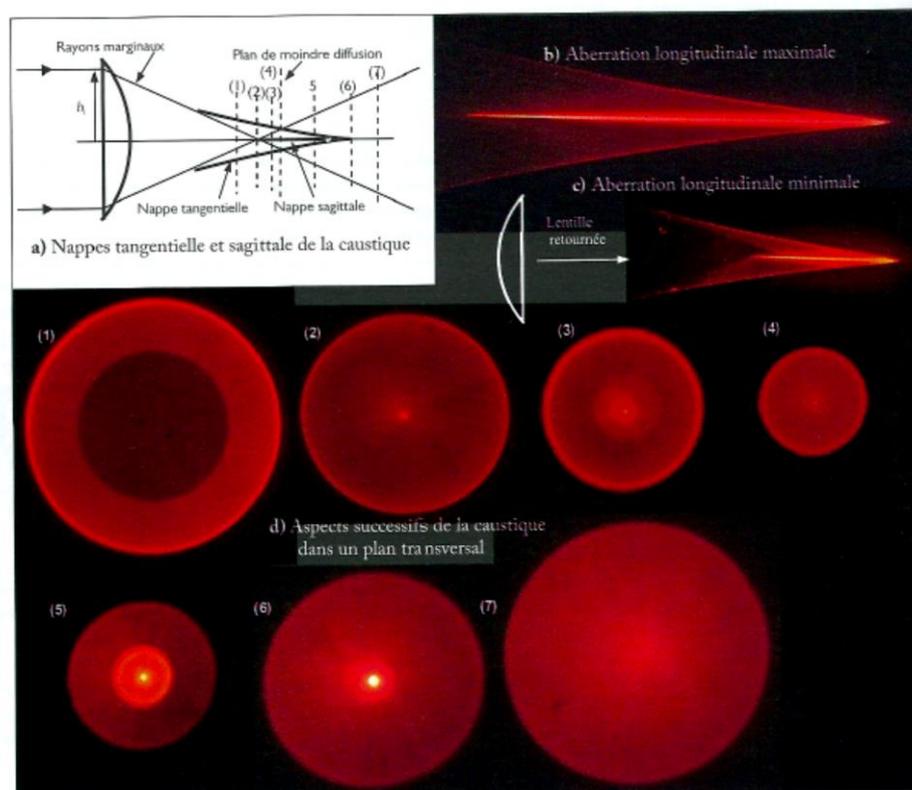
Si l'on reprend la même expérience en utilisant un achromat cette fois à la place de la lentille L1, on n'observe plus les aberrations chromatiques car ce défaut est compensé.



b) Expérience 2 : aberrations de sphéricité



On refait le même montage en ajoutant un filtre de couleur juste après le trou. On observe l'**aberration sphérique** en plaçant un écran dans un plan contenant l'axe optique de L1.



3. Conclusion :

La correction des aberrations que nous venons de décrire constitue un problème majeur et complexe que l'on résout par simulation sur ordinateur à l'aide de logiciels (dont Zemax) et en associant des lentilles de natures et de verres différents. Par exemple, les objectifs d'appareil photo « grand angle » dont le faisceau lumineux émergent est très ouvert (environ 100°) nécessitent un grand nombre de lentilles (exemple ci-contre) et, de ce fait, coûtent très cher.

