

M6 Formation des images en optique

Pour faire l'image d'un objet il faut :

- Un éclairage
- Un système optique
- Un détecteur

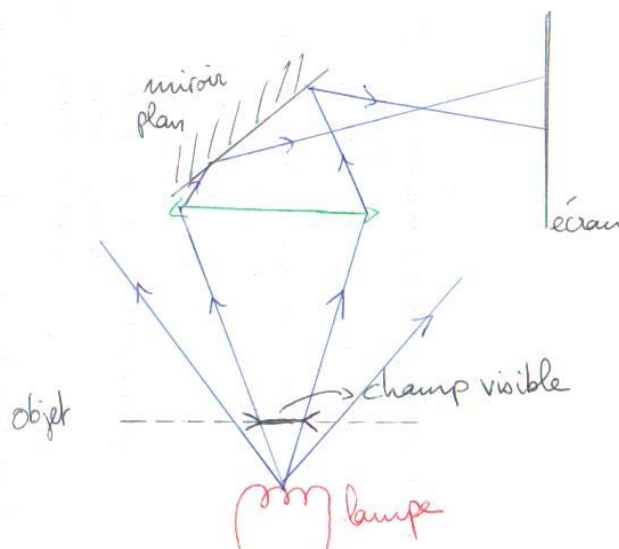
Nous étudierons également les caractéristiques des images :

- Taille
- Résolution
- Profondeur de champ
- Luminosité, contraste
- Aberrations

I) Le Rétroprojecteur :

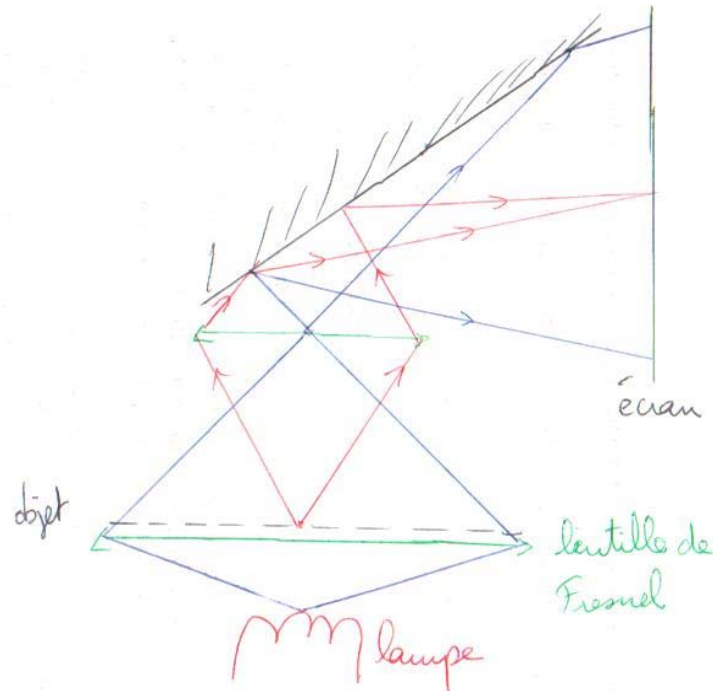
Idée naïve : on place l'objet devant une lentille suivie d'un écran. Il ne se passe rien, une source lumineuse est nécessaire !

Plaçons la lampe derrière l'objet. On ne peut voir qu'une toute petite partie de l'objet sur l'écran, et avec de nombreuses aberrations. Ceci est dû au fait que les rayons qui passent par les bords de l'objet ne rentrent pas dans la lentille. En outre, les rayons qui eux traversent la lentille couvrent toute sa surface. D'où les aberrations.



Il nous faut donc un système permettant de conjuguer la source et l'objectif. De plus, il faut faire en sorte que ces rayons passent au centre de l'objectif.

La solution consiste à placer une lentille de Fresnel juste avant l'objet. De cette manière l'objet est uniformément éclairé, et si l'on conjugue la lampe et la lentille de projection par la lentille de Fresnel, on est dans les conditions décrites ci-dessus.



C'est alors le condenseur qui limite le champ, et l'objectif qui limite l'ouverture. Après ajout de la lentille de Fresnel, l'image formée est de bonne qualité, l'éclairage est uniforme, et la résolution suffisante à l'usage que l'on souhaite en faire.

Remarque : On pourra ouvrir le rétroprojecteur, et retirer la lentille de Fresnel pour illustrer ce propos. Une sécurité enquiquinante (interrupteur « ouvert » lorsque le capot est ouvert) empêche l'appareil de fonctionner lorsqu'il a les tripes à l'air. Il suffit de maintenir cet interrupteur fermé, et le tour est joué !

Nous allons maintenant étudier un dispositif de formation d'images en détail : le microscope.

II) Le Microscope :

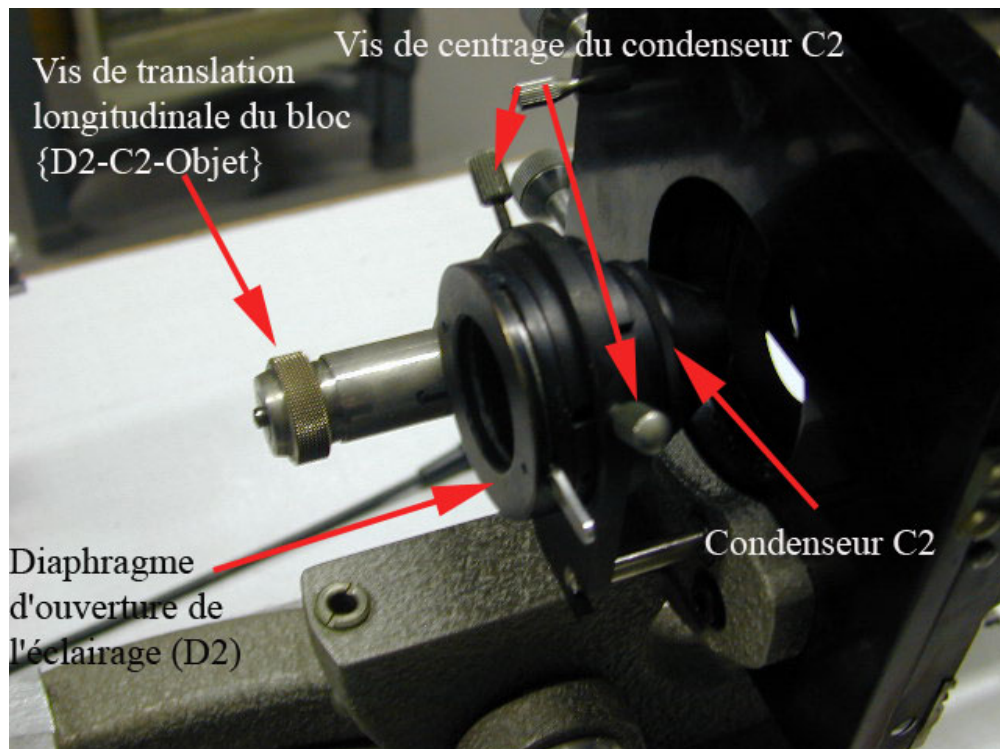
Eclairage de Köhler

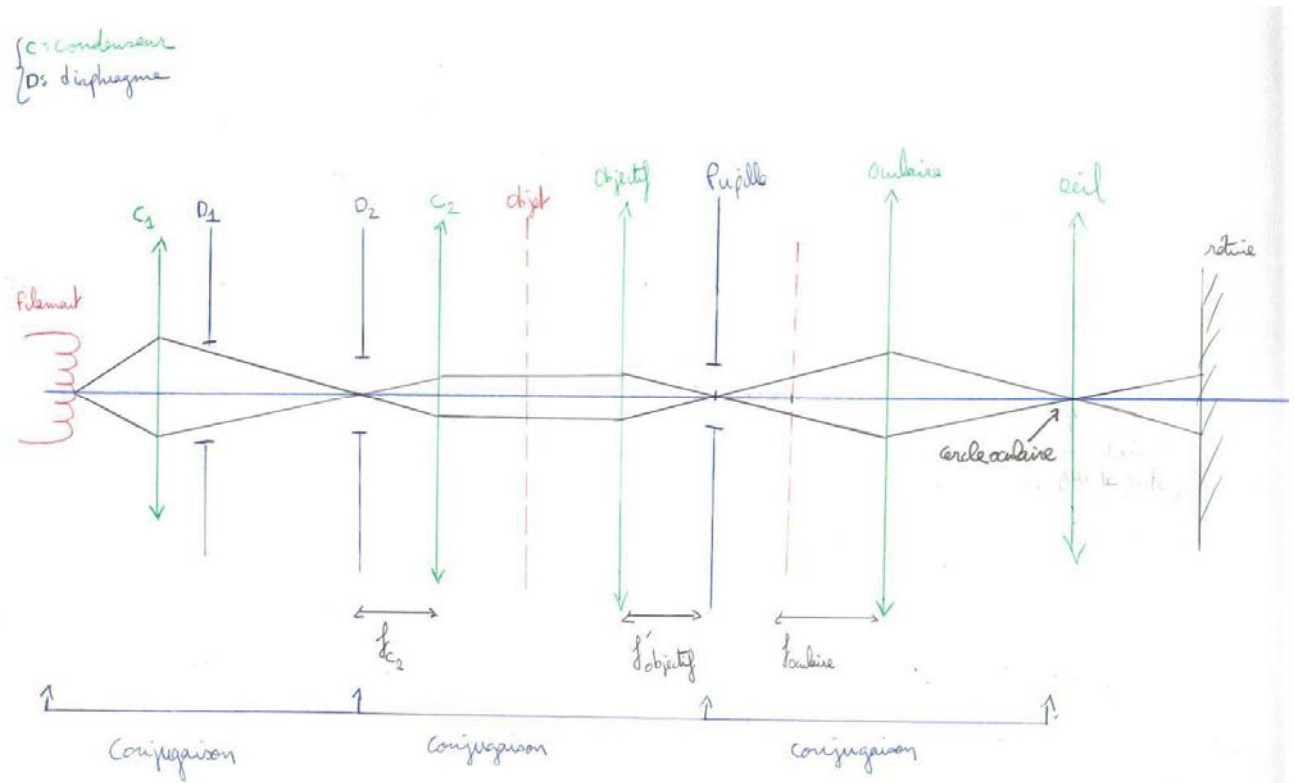
L'éclairage (incohérent) selon la méthode de Köhler permet d'obtenir une image de qualité.

Principe : Faire en sorte que tous les rayons issus d'un même point du filament soient parallèles lorsqu'ils passent à travers l'objet. Ainsi on obtient un éclairage homogène du champ objet. En second lieu, comme nous allons faire l'image d'un objet avec le microscope, il faut que le plan objet soit conjugué à une zone uniformément éclairée (pour que le fond de l'image sur l'écran ou la rétine soit uniforme). La zone uniformément éclairée est limitée par le diaphragme placé derrière le condenseur de la lampe quartz-iode. Deux réglages sont donc nécessaires.

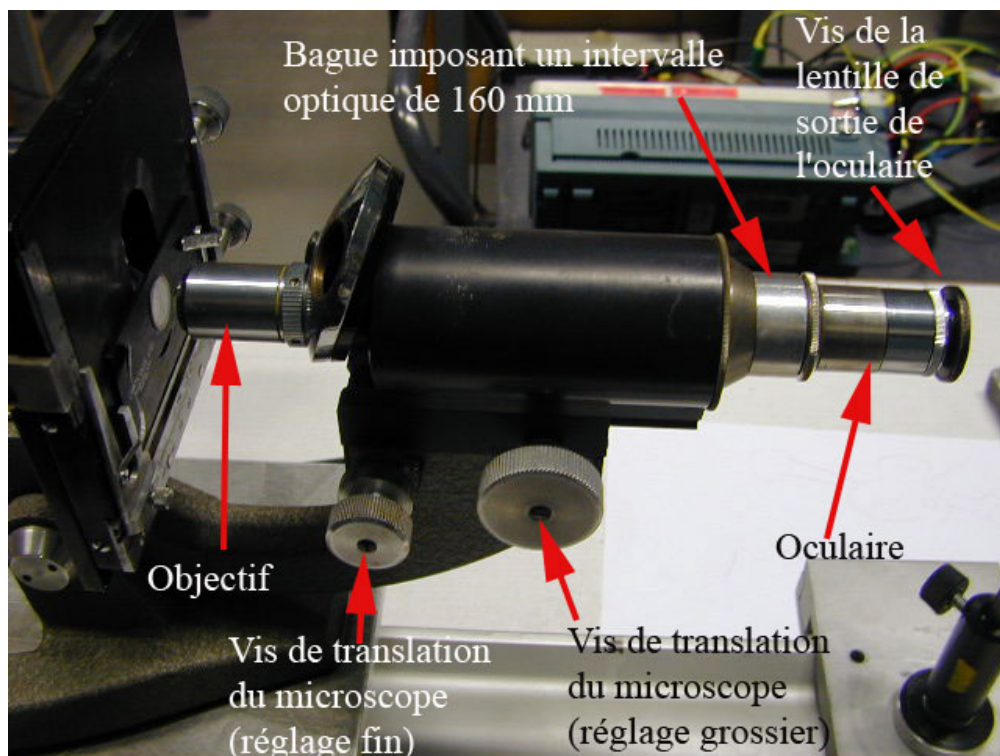
Conseils préliminaires : Utiliser le gros banc en aluminium (couleur aluminium) d'environ 1,60 m de long, avec le microscope couché dont on peut modifier la longueur de l'intervalle optique), la lanterne diaphragmée (ne pas forcer sur le diaphragme, on ne peut pas le fermer au maximum). Il est possible de régler le microscope afin d'obtenir une image sur un écran à 1m.

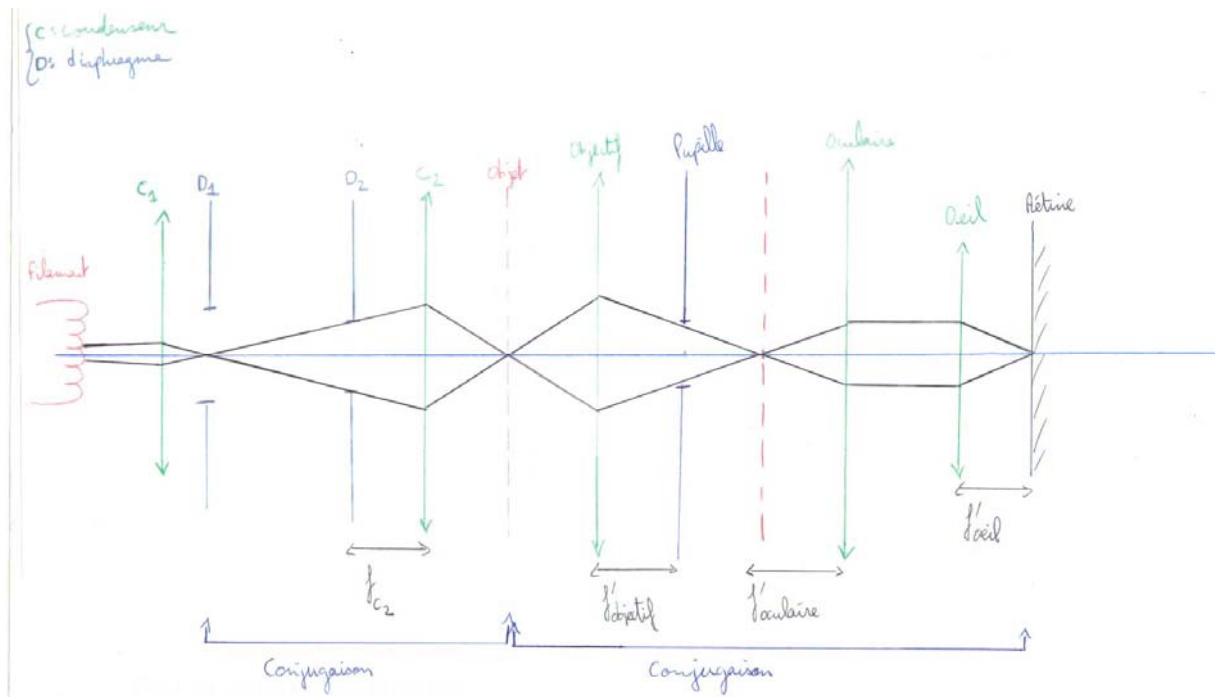
- 1) Réglage de la source : conjugaison filament <-> diaphragme d'ouverture : A l'aide du réglage longitudinal du filament, faire son image sur le diaphragme D2 (que l'on aura fermé au préalable). Centrer l'image du filament en ajustant la hauteur et l'orientation latérale de la lampe. Comme D2 est dans le plan focal objet de C2, et que la pupille est dans le plan focal image de l'objectif, D2 et la pupille sont conjugués. Le conjugué de la pupille à travers la suite du montage est le cercle oculaire. Le cercle oculaire est donc conjugué avec le filament. Et on voit que chaque point de la source éclaire uniformément la rétine de l'œil.





- 2) Alignement et conjugaison diaphragme 1 <-> objet : Placer une lentille de focale 1 m derrière l'oculaire suivie d'un écran à 1 m (œil fictif). Placer une mire objet dans les étriers (bien le bloquer), et mettre au point (en déplaçant le microscope à l'aide des deux vis de translations dont l'une est un réglage fin et l'autre, donc, un réglage grossier). Fermer D1 (sans forcer), et faire le point sur le bord du diaphragme déplaçant le bloc {D2-C2} à l'aide de sa visse de translation. Centrer l'image du diaphragme (jouer sur les visse de centrage de C2).





- 3) Ouverture du diaphragme de « champ illuminé » D1: Le but de cette opération est de limiter le faisceau d'éclairage uniquement à la zone de la préparation couverte par l'objectif afin d'éliminer toute la lumière parasite préjudiciable à la qualité de l'image. Pour cela, rouvrir D2, et fermer D1 (toujours sans forcer), et l'ouvrir petit-à-petit jusqu'à ce que D1 ne limite plus le champ. Il est possible que l'éclairage ne soit pas encore tout à fait uniforme sur les bords, on peut corriger cela ajustant encore les visées de centrage de C2, et si cela ne suffit pas, en trichant légèrement sur le premier réglage (en déplaçant le filament de quelques millimètres). Si D1 est trop fermé, ce sera donc lui qui limite le champ (ce que l'on ne souhaite pas). Et si D1 est assez ouvert, c'est l'oculaire qui limite le champ.
- 4) Réglage du diaphragme D2 : A ce stade, ouvrir D2 pour avoir une image suffisamment lumineuse. En effet, il ne faut pas que D2 limite l'ouverture de l'éclairage.

Oculaire à l'infini

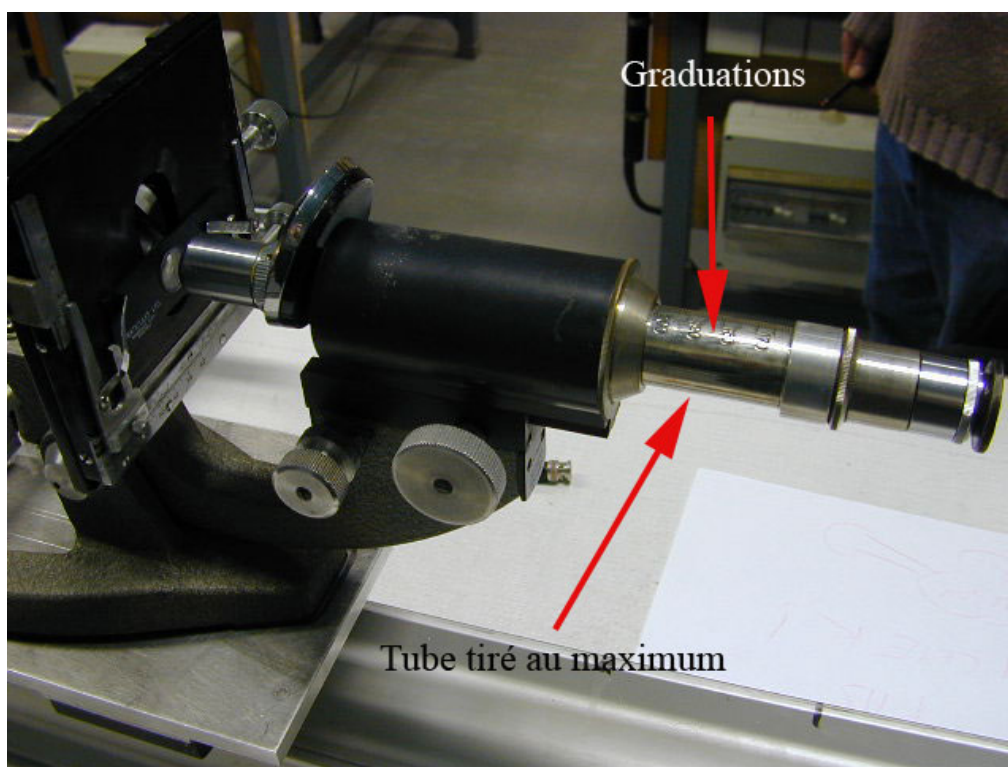
Pour régler l'oculaire à l'infini : retirer l'oculaire du microscope, dévisser la bague de la lentille de sortie au maximum (pas trop quand même !) viser une surface éclairée éloignée, le réticule qui se trouve alors en avant du plan focal objet de l'oculaire vous apparaîtra flou. Revisser alors la lentille de sortie jusqu'à ce que la mire devienne nette. A ce moment là : stop ! L'oculaire est réglé. Si vous continuer à visser, la mire sera toujours nette car l'œil accommode, mais l'oculaire ne sera pas réglé à l'infini.

Objectif

1) Grandissement transverse :

Nous allons mesurer le grandissement transverse de l'objectif du microscope pour deux valeurs de l'intervalle optique. Ceci nous permettra d'abord de vérifier que la valeur de 10 indiquée sur l'objectif est correcte (valeur indiquée pour un intervalle optique de 160 mm), et de montrer que le grandissement transverse de l'objectif varie linéairement avec l'intervalle optique. On pourra ensuite s'affranchir de l'intervalle optique que l'on connaît avec une grande incertitude (jeu dans le réglage), pour remonter à la focale de l'objectif.

Il est possible de faire varier l'intervalle optique de 160 à 200 mm (la longueur standard étant de 160 mm). En effet, l'oculaire est monté dans un tube gradué de 160 à 200 mm, susceptible de coulisser dans le microscope, permettant ainsi à l'expérimentateur de changer l'intervalle optique. Nous allons mesurer le grandissement transverse de l'objectif pour deux valeurs d'intervalle optique.

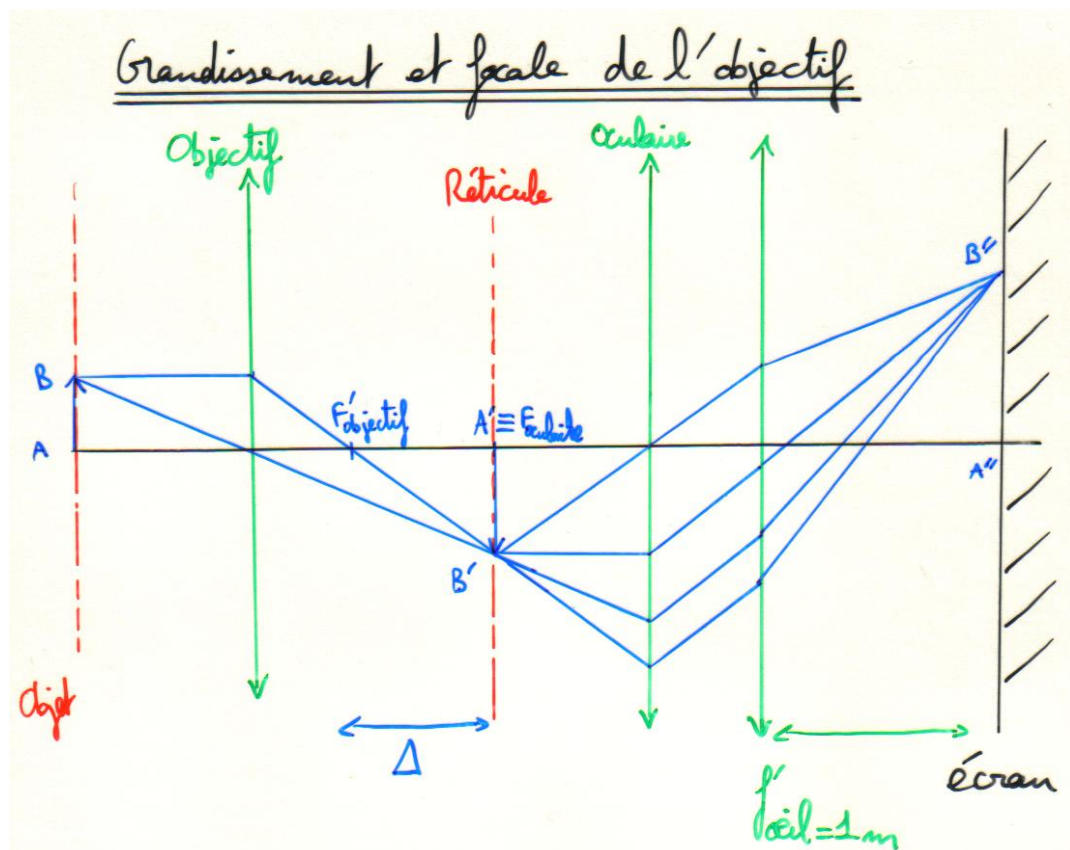
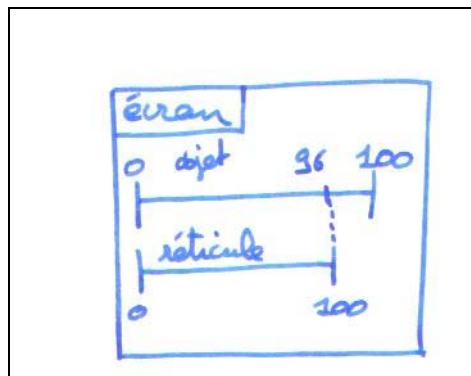


L'image intermédiaire se trouvant dans le plan focal objet de l'oculaire, le grandissement transverse de l'objectif s'écrit (pour les notations : cf. schéma plus bas) :

$$g_{\text{objectif}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'_{\text{objectif}}} = -\frac{\Delta}{f'_{\text{objectif}}} = -\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

Δ est l'intervalle optique.

Refaire le point avec la vis de réglage fin de l'objectif sur la mire de pas $10\ \mu\text{m}$ (de longueur 1mm), qui se trouve normalement toujours tel d'Artagnan dans ses étriers. On voit une deuxième mire (nette dès le départ) qui est celle du plan focal objet de l'oculaire. Comme elle se trouve dans le plan de l'image intermédiaire, elle est toujours nette. Il s'agit du réticule que l'on a vu tout à l'heure lors du réglage de l'oculaire. Sa taille est 1cm . Il faut aligner les deux et mesurer le rapport, pour trouver le grandissement. A l'écran, les deux mires font approximativement la même taille pour un Δ de 160 mm , ce qui est normal puisque le grandissement indiqué par le constructeur est de 10. **Attention !** Il est important de se convaincre qu'à l'écran, l'espace entre deux graduations de la mire objet et l'espace entre deux graduations du réticule n'est pas le même. Il est donc nécessaire de bien aligner les zéros des deux mires et de n'utiliser qu'une des deux échelles pour faire la mesure. (Si les deux dernières phrases vous paraissent abscones, faites vous-même l'expérience et vous comprendrez immédiatement.)



Le rapport de taille entre la mire de l'image intermédiaire (10 mm) et la mire objet (1 mm) est de 10, d'où la valeur du grandissement transverse de l'objectif :

$$g_{\text{objectif}} = 10 \frac{100}{96} \text{ pour } \Delta \approx 160 \text{ mm}$$

$$g_{\text{objectif}} = 10 \frac{100}{96} \text{ pour } \Delta \approx 160 \text{ mm}$$

Grandissement objectif				
	delta = 160 mm	valeur :	incertitude :	pourcentage :
	mire objet :	100	0	
	réticule :	96	0,5	
	g	-10,42	0,05	0,52
	delta = 200 mm	valeur :	incertitude :	pourcentage :
	mire objet :	100	0	
	réticule :	77	0,5	
	g	-12,99	0,08	0,65

Remarques : Nous n'avons pas besoin de la lentille de 1m pour faire cette mesure, puisqu'on fait un rapport de taille. Mais comme elle est en place, autant l'y laisser puisque nous en aurons besoin par la suite.

Le grandissement trouvé pour $\Delta = 160$ mm ne vaut pas 10, et pourtant nous l'avons mesuré avec une grande précision. Il doit y avoir une erreur sur l'étalonnage du tube (réalisé à l'aide d'une bague) qui lorsqu'il est rentré doit en fait conférer un intervalle optique de 155 mm à l'instrument (cf. la suite : focale de l'objectif en s'affranchissant de l'intervalle optique).

Remarque : La valeur de dix ne peut être obtenue qu'en utilisant un objectif Nachet sur un tube Nachet, avec un oculaire Nachet.

Remarque 2 : Le but de la remarque précédente n'est en aucun cas de faire la promotion de Nachet, qui signalons-le au passage est un grand constructeur français de microscopes opérant depuis 1839. Cocorico !

Toutes les incertitudes sont calculées à l'aide de la formule :

$$(\Delta f)^2 = \sum \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|^2 |\Delta x_i|^2$$

2) Focale de l'objectif

A l'aide des deux mesures précédentes, il est possible d'évaluer la focale de l'objectif. En effet, si l'on note $\Delta 1$ l'intervalle optique lors de la première mesure, et $\Delta 2$ lors de la seconde ($\Delta 1 \sim 160$ mm et $\Delta 2 \sim 200$ mm), on a $\Delta 1 = \Delta 2 + L$ avec

$L = 40 \pm 2$ mm (il y a un peu de jeu dans le tube, d'où l'incertitude)

$$g_{objectif1} = -\frac{\Delta}{f'_{objectif}}$$

$$g_{objectif2} = -\frac{\Delta + L}{f'_{objectif}}$$

$$f'_{objectif} = \frac{L}{g_{objectif1} - g_{objectif2}}$$

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

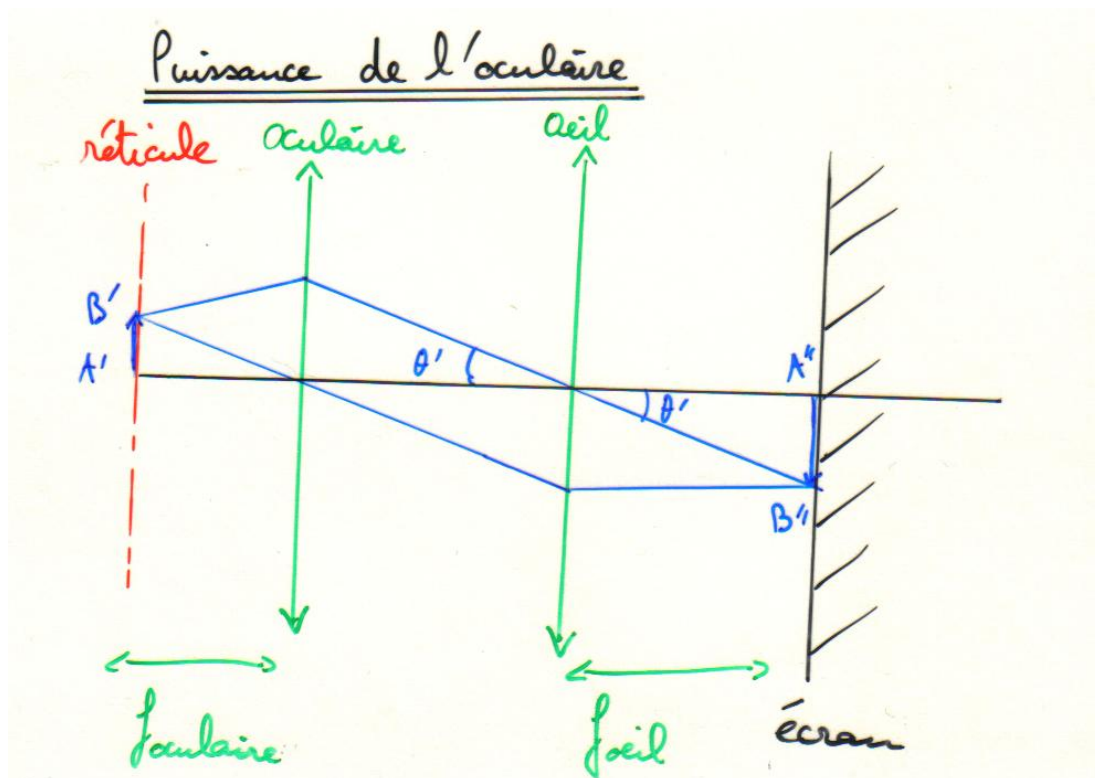
<u>Focale objectif</u>	translation (mm) :	40	1	
	focale (mm) :	15,56	0,72	4,63

Puissance, focale et grossissement commercial de l'oculaire

La grandeur d'entrée de l'oculaire est une longueur (taille de l'image intermédiaire) et la grandeur de sortie est un angle. Il est donc naturel d'introduire une grandeur caractéristique de l'oculaire, rapport de l'angle de sortie sur la taille de l'image intermédiaire. Il s'agit de la puissance.

La puissance de l'oculaire est le rapport de l'angle sous lequel est vu le réticule à travers l'oculaire, divisé par la taille du réticule.

$$P_{oculaire} = \frac{\theta'}{\overline{A'B'}} = \frac{\overline{A''B''}}{f'_{oeil} \overline{A'B'}} = \frac{1}{f'_{oculaire}}$$



On mesure la taille D de la mire sur l'écran, et on a :

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

<u>Puissance de l'oculaire</u>	taille du réticule sur l'écran (cm) :	39,3	0,8	
	taille du réticule en vrai (cm) :	1	0	
	Focale oeil (cm) :	100	2	
	Puissance de l'oculaire :	39,3	1,12	2,85

On s'attendait à trouver $40 \delta = 1/25\text{mm}$.

Nous pouvons maintenant remonter à la focale de l'oculaire.

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

<u>Focale oculaire</u>	Focale de l'oculaire (calculée mm) :	25,45	0,73	2,85
------------------------	--------------------------------------	-------	------	------

On attendait 25 mm.

Les fabricant d'instruments d'optique on également défini ce que l'on appelle le grossissement commercial pour répondre à la question des clients : « Ca grossit de combien votre truc ? ».

Il est indiqué sur l'oculaire que le grossissement commercial de l'oculaire est de 10. (250 mm correspond au punctum proximum d'un homme dans la force de l'âge.)

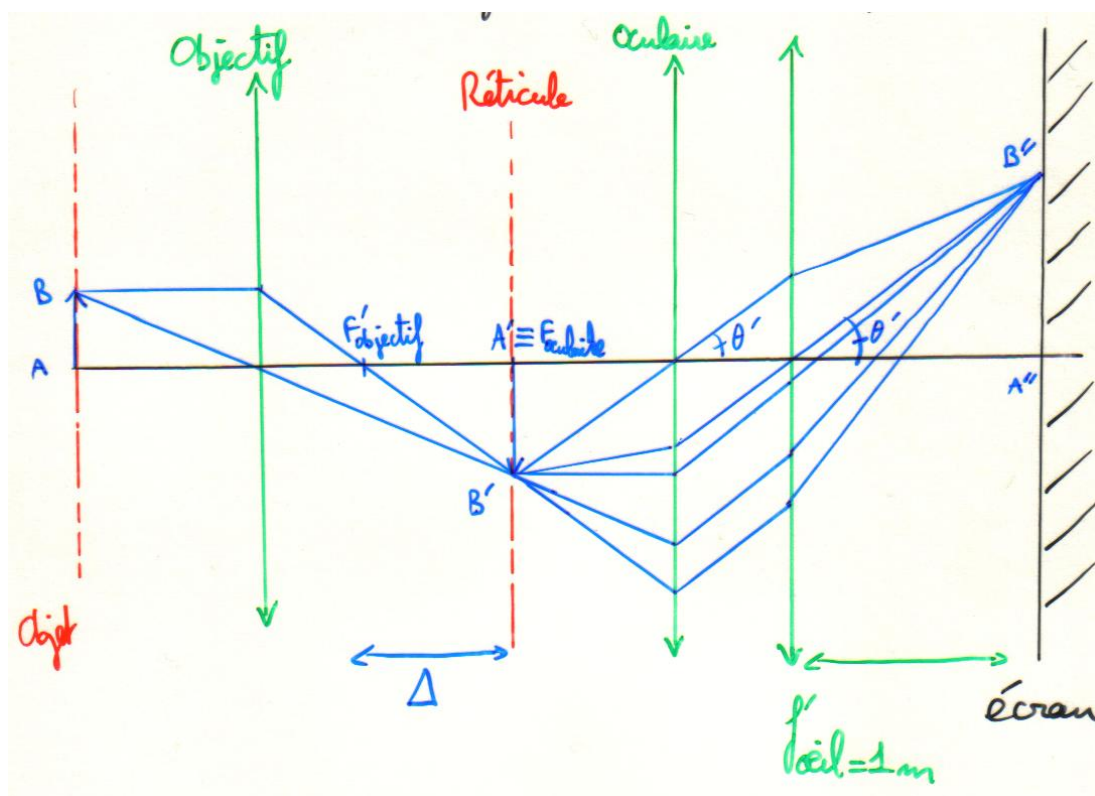
$$G_{c \text{ oculaire}} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\overline{A''B''}}{f'_{\text{oeil}}} \frac{250\text{mm}}{\overline{A'B'}} = \frac{250\text{mm}}{f'_{\text{oculaire}}}$$

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

Grossissement oculaire	Grossissement (calculé) :	9,83	0,28	2,85
-------------------------------	----------------------------------	------	------	------

Puissance et grossissement commercial du microscope

1) Puissance :



De même que pour l'oculaire, la relation naturelle « entrée-sortie » du microscope est la puissance.

$$P = \frac{\theta'}{AB} = \frac{\overline{A''B''}}{f'_{\text{oeil}} AB}$$

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

<u>Puissance</u>	taille de la mire sur l'écran (cm) :	40,5	1	
	taille de la mire (cm) :	0,1	0	
	Focale de l'oeil (cm) :	100	2	
	Puissance (mesurée dioptries) :	405	12,87	3,18

On remarque également que

$$P = \frac{\theta'}{AB} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \frac{\theta'}{\overline{A'B'}} = g_{\text{objectif}} P_{\text{oculaire}}$$

On peut donc déterminer la puissance du microscope par une autre méthode en utilisant la valeur du grossissement de l'objectif calculée précédemment ainsi que celle de la puissance de l'oculaire.

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

<u>Puissance</u>	Puissance (calculée dioptries) :	409,38	11,88	2,9
-------------------------	----------------------------------	--------	-------	-----

2) **Grossissement commercial :**

Il s'agit du même calcul que pour le grossissement commercial de l'oculaire, sauf que cette fois-ci on regarde la mire objet et non le réticule.

$$G_c = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\overline{A''B''}}{f'_{\text{oeil}}} \frac{250\text{mm}}{\overline{AB}}$$

On peut également le déterminer par une autre méthode en utilisant la relation :

$$G_c = G_{c \text{ oculaire}} g_{\text{objectif}}$$

Nous obtenons les valeurs :

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

Grossissement commercial	taille de la mire sur l'écran (cm) :	40,5	1	
	taille de la mire (cm) :	0,1	0	
	Focale de l'oeil (cm) :	100	2	
	Grossissement commercial :	101,25	3,22	3,18
	Grossissement commercial calculé à partir des mesures précédentes:	102,34	2,97	2,9

La valeur attendue est $100 = 10 * 10$ (10 est le grandissement transverse de l'objectif, et 10 est le grossissement commercial de l'oculaire. Quant à savoir lequel est lequel ?...)

Pupille et ouverture numérique

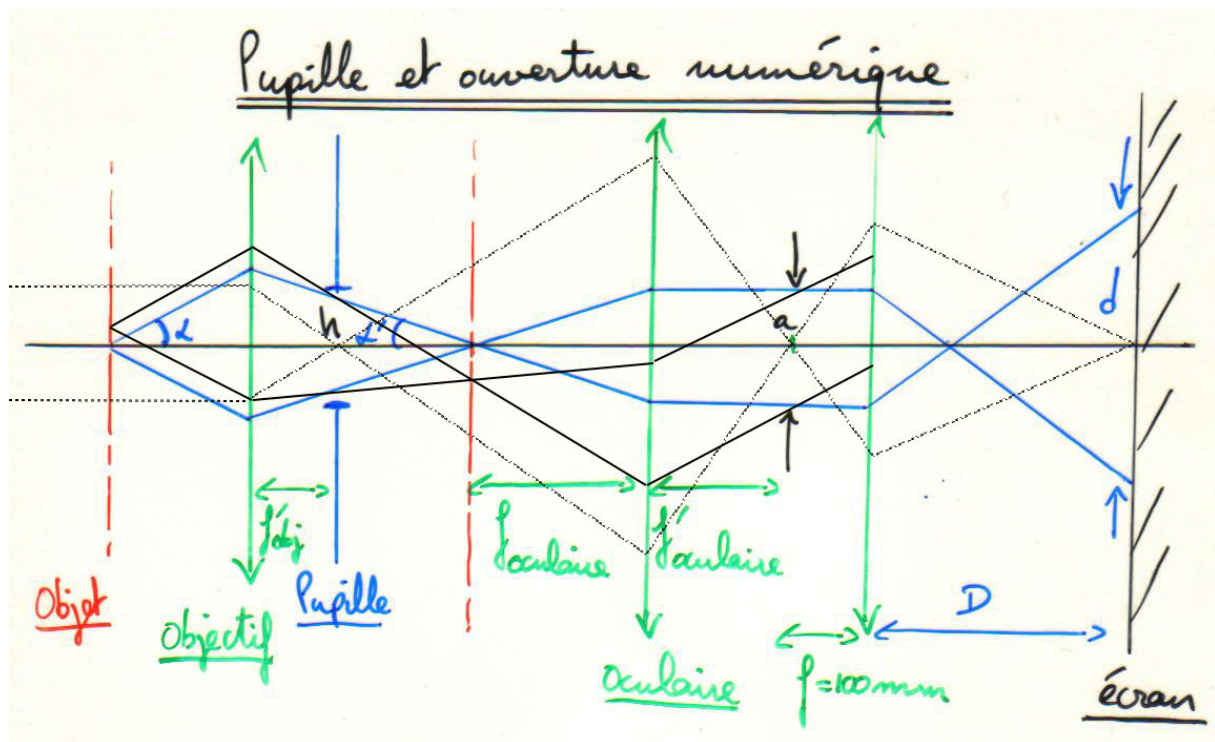
Nous allons déterminer la taille de la pupille de sortie, ce qui nous permettra de remonter à la taille de la pupille du microscope, et à l'ouverture numérique de l'objectif, qui est la grandeur la plus intéressante, puisqu'elle permet de remonter au pouvoir de résolution du microscope. En outre, augmenter l'ouverture numérique implique également d'augmenter le coût de l'objectif. D'où l'intérêt porté à cette grandeur.

A graver en lettre d'or au dessus de toutes les cheminées :

La pupille est LE diaphragme qui limite les faisceaux traversant l'instrument pour UN point objet sur l'axe.

La pupille se situe dans le plan focal image de l'objectif. La pupille d'entrée est donc à l'infini (on dit que le système est télécentrique).

1) Mesure de la taille de la pupille :



Sur le schéma, les deux traits pleins (rouge et bleu) mettent en évidence le fait que l'ouverture est la même pour tout point de l'objet. Le trait en pointillés met en évidence la conjugaison entre la pupille, la pupille de sortie et l'écran.

On fait l'image de la pupille de sortie (image de la pupille du microscope à travers l'oculaire) à l'aide d'un doublet de focale 100 mm sur un écran. Il faut bien s'assurer que le diaphragme d'ouverture de l'éclairage est suffisamment ouvert (sinon, c'est son image que l'on verra). Puis on mesure le diamètre d de l'image sur l'écran, ainsi que la distance D entre la lentille et l'écran (la distance entre l'oculaire et l'écran doit être au moins égale à $4 \cdot 100\text{mm}$ en vertu la règle des $4f'$).

Le diamètre de la pupille de sortie s'écrit :

$$a = \frac{d \cdot f'_{\text{projection}}}{D - f'_{\text{projection}}}$$

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

<u>Taille de la pupille de sortie</u>	Distance lentille écran(cm) :	98,5	1	
	Diapètre image écran (mm) :	10	1	
	Taille de la pupille de sortie :	1,13	0,11	10,05

La pupille de l'œil a un diamètre de l'ordre de 4 mm (taille typique de la pupille du microscopiste en action). Il est donc préférable que le diamètre de la pupille de sortie soit inférieur à celui de la pupille de l'œil. Face à ce résultat, nous sommes donc les opticiens les plus heureux du monde.

Enfin, le diamètre de la pupille est :

$$h = \frac{\Delta * a}{f'_{oculaire}} = \frac{g_{objectif} f'_{objectif} * a}{f'_{oculaire}}$$

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

<u>Taille de la pupille</u>	Taille de la pupille (mm, calculée) :	7,2	0,82	11,44
------------------------------------	---------------------------------------	-----	------	-------

On pourrait également mesurer la taille de la pupille directement en retirant l'oculaire et en faisant l'image de la pupille à l'aide d'un doublet de 200 mm.

Il peut être bon de montrer au jury la pupille en dévissant l'objectif.

2) Ouverture numérique :

Il est possible de mesurer l'ouverture numérique directement (cf. Sextant). Ici nous effectuons un calcul en utilisant la relation des sinus d'Abbe dont il est indispensable de parler dans ce montage.

Le schéma sur lequel s'appuie ces calculs est le même que celui qui nous a permis de calculer le diamètre des pupilles.

On a $\boxed{ON = \sin \alpha}$

$$\alpha' = \frac{d}{2 * f'_{oculaire}}$$

Or

Et la condition des sinus d'Abbe (relation fondamentale de la formation des images en optique) s'écrit :

$$\overline{AB} * \sin \alpha = \overline{A'B'} * \sin \alpha'$$

D'où

$$ON = g_{\text{objectif}} * \sin \frac{d}{2 * f'_{\text{oculaire}}}$$

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

Ouverture numérique	ON :	0,23	0,02	10,46
----------------------------	-------------	------	------	-------

La valeur indiquée sur l'objectif est 0,25. L'erreur faite est très importante car l'ouverture numérique est calculée à partir de 3 valeurs incertaines.

Diaphragme de champ – Champ objet

C'est le diaphragme qui se trouve au niveau du réticule dans le plan focal objet de l'oculaire qui limite le champ (lorsque le diaphragme de la lampe est suffisamment ouvert bien sûr). En effet, le plan de l'image intermédiaire se trouve dans l'oculaire. Le champ est donc limité par le diamètre de l'oculaire, au niveau de l'image intermédiaire. On pourrait mesurer la taille du champ sur l'écran et remonter au champ objet. Il serait également possible de mesurer le diamètre de l'oculaire avec un pied à coulisse, et remonter au champ objet.

Nous allons maintenant étudier un système afocal de formation d'image : la lunette astronomique, avec laquelle il sera plus simple de mettre en évidence les notions de diaphragme de champ, diaphragme d'ouverture, verre de champ, etc.

II) Lunette astronomique :

Faire ce montage sur banc d'optique.

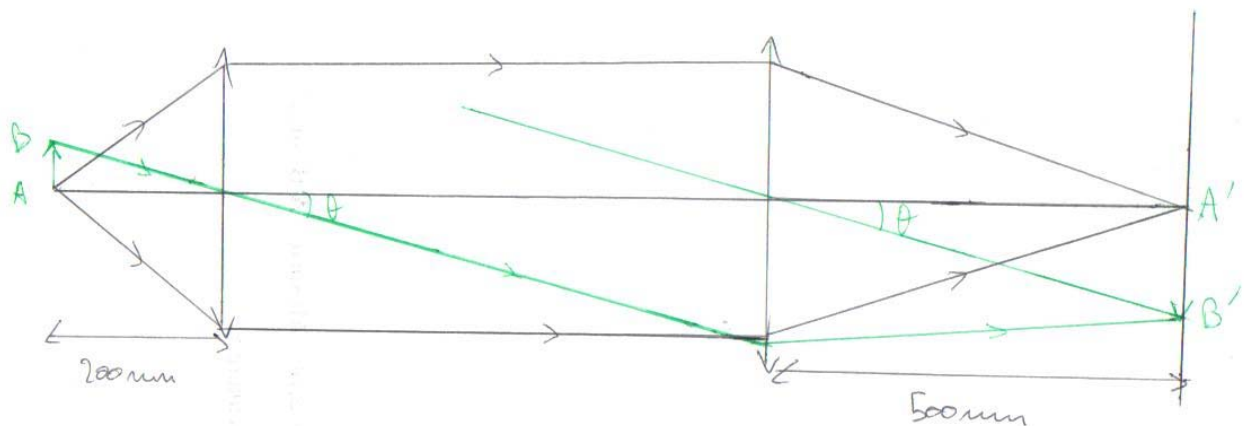
Collimateur et œil fictif

La lunette astronomique est un système afocal, elle ne possède donc pas de foyers : tout rayon qui rentre parallèle à l'axe sort parallèle à l'axe. Elle est constituée de deux doublets convergents placés de telle sorte que leurs foyers coïncident.

Réalisation du collimateur et de l'œil fictif :

On place un papier calque millimétré (qui fera office d'objet) juste derrière une lampe quartz-iode (tirette du condenseur tirée à fond pour éclairer tout l'objet uniformément) suivi d'un doublet de 200 mm. A l'aide d'un miroir, on autocollimate pour mettre l'objet dans le plan focal objet de la lentille, en cachant la moitié de l'objet avec un contour blanc (afin de bien voir l'image retour sur l'objet).

Ensuite, la lunette fournissant une image à l'infini, il convient de projeter cette image sur un écran à l'aide d'un doublet de 500 mm (œil simulé) placé pour l'instant à environ 500 mm du doublet de 200 mm (on aura ainsi juste la place d'insérer la lunette)). On fait l'image de l'objet sur l'écran que l'on place dans le plan focal image de la lentille « œil fictif ».



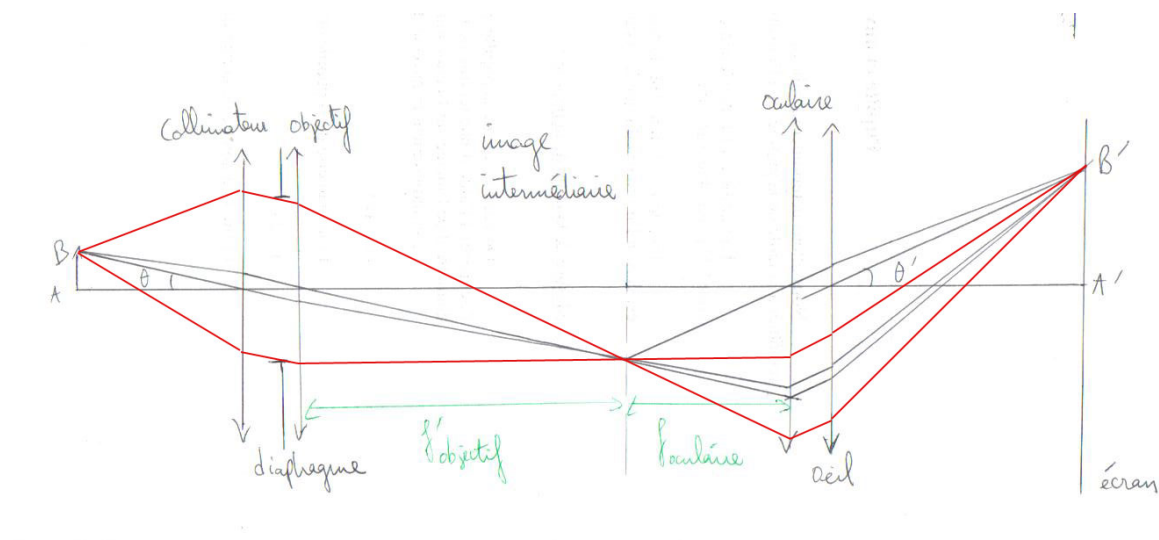
Grossissement de la lunette

La lunette astronomique étant un système afocal, la grandeur d'entrée est un angle, ainsi que la grandeur de sortie. Il est donc naturel de définir le grossissement de la lunette comme étant le rapport de ces deux angles.

On a :

$$\theta = \frac{A'B'_{\text{sans lunette}}}{f'_{\text{œil}}}$$

Après avoir mesuré A'B' sans la lunette, nous allons insérer la lunette. Il faut placer le doublet de 300 mm (objectif) avec un diaphragme accolé proche du collimateur ainsi qu'un le doublet de 150 mm (oculaire) à 450 mm côté œil fictif. Faire le point en ajustant la distance entre les deux doublets. Le doublet de 300 mm doit être accolé au collimateur, et le doublet de 150 mm doit être accolé à l'œil (pour éviter que l'œil ne limite le champ). Si ce n'est pas le cas, tout défaire et tout recommencer après avoir ajustée la distance collimateur-œil de manière à avoir tout juste la place d'insérer la lunette.



Maintenant, on a la relation :

$$\theta' = \frac{A'B'_{\text{aveclunette}}}{f'_{\text{oeil}}}$$

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{A'B'_{\text{aveclunette}}}{A'B'_{\text{sans lunette}}}$$

D'où le grossissement :

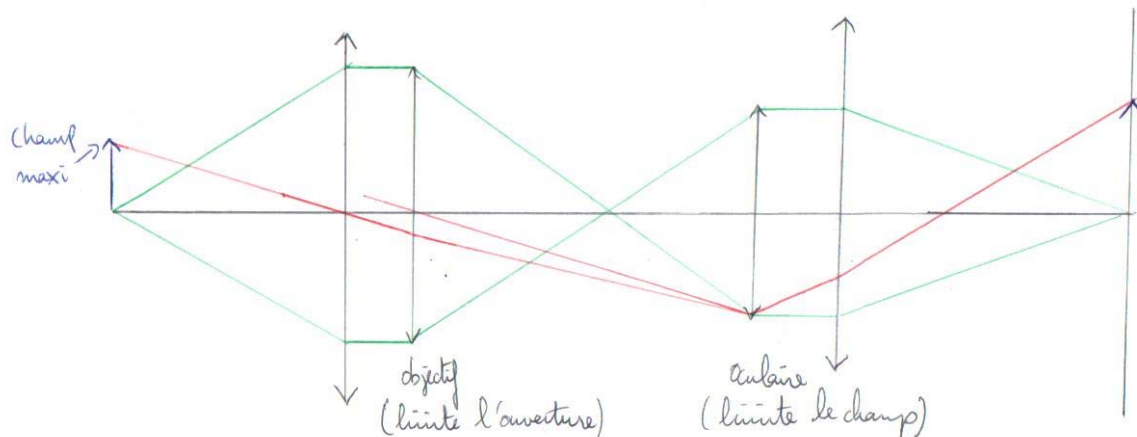
Les mesures ont été faites sur un écran enduit de papier millimétré.

	<u>Grandeur</u>	Valeurs	Incertitude	Pourcentage
<u>Grossissement lunette</u>	Largeur objet (cm)	1		
	Largeur image sans lunette	2,6	0,1	
	Largeur objet (cm)	2		
	Largeur image avec lunette	12	0,2	
	Grossissement	2,31	0,1	4,19

Valeur à comparer à 2, rapport des focales de la lunette, qui est l'expression théorique du grossissement :

$$G = \frac{f'_{\text{objectif}}}{f'_{\text{oculaire}}}$$

Diaphragme de champ, diaphragme d'ouverture



On voit sur ce schéma que c'est l'objectif qui limite l'ouverture (cf. définition du diaphragme d'ouverture dans la partie microscope), et que l'oculaire limite le champ.

L'image que l'on voit sur l'écran n'est pas belle, on voit du champ de contour, sorte de couronne marronasse. Ceci est dû au fait que l'oculaire est dans un plan quelconque. Les rayons destinés au contour de l'image ne passent pas tous à travers l'oculaire. Nous allons donc tenter de supprimer ce champ de contour en plaçant un diaphragme (qui sera alors le « nouveau diaphragme de champ ») dans le plan de l'image intermédiaire. Ainsi, lorsqu'on ferme ce diaphragme, on réduit le champ, sans réduire la quantité de lumière qui passe à travers l'instrument (cf. schéma ci-dessus : on bloque les rayons rouges, pas les verts.) On vérifie de plus que lorsqu'on ferme le diaphragme accolé à l'objectif, la luminosité diminue uniformément. Une expérience supplémentaire consisterait à mesurer à l'aide d'une photodiode l'intensité lumineuse en fonction du rayon du diaphragme d'ouverture.

Il est possible de montrer la pupille de sortie en supprimant l'œil, et en rapprochant l'écran. (La pupille est le diaphragme accolé à l'objectif). Cette méthode permet également de déterminer le grossissement de la lunette d'une autre manière, car le grossissement est également le rapport du diamètre de la pupille et de celui de la pupille de sortie.

On observe que le champ visible est bien plus faible que le champ objet éclairé. Nous allons y remédier en ajoutant un verre de champ (doublet de 200 mm que l'on place dans le plan de l'image intermédiaire), ayant pour but de ramener les rayons trop divergents dans l'oculaire (les rayons rouges). On augmente ainsi le champ visible, sans modifier le grossissement, car le verre de champ se trouve dans le plan focal image de l'objectif qui est aussi le plan focal objet de l'oculaire.

Aberrations géométriques

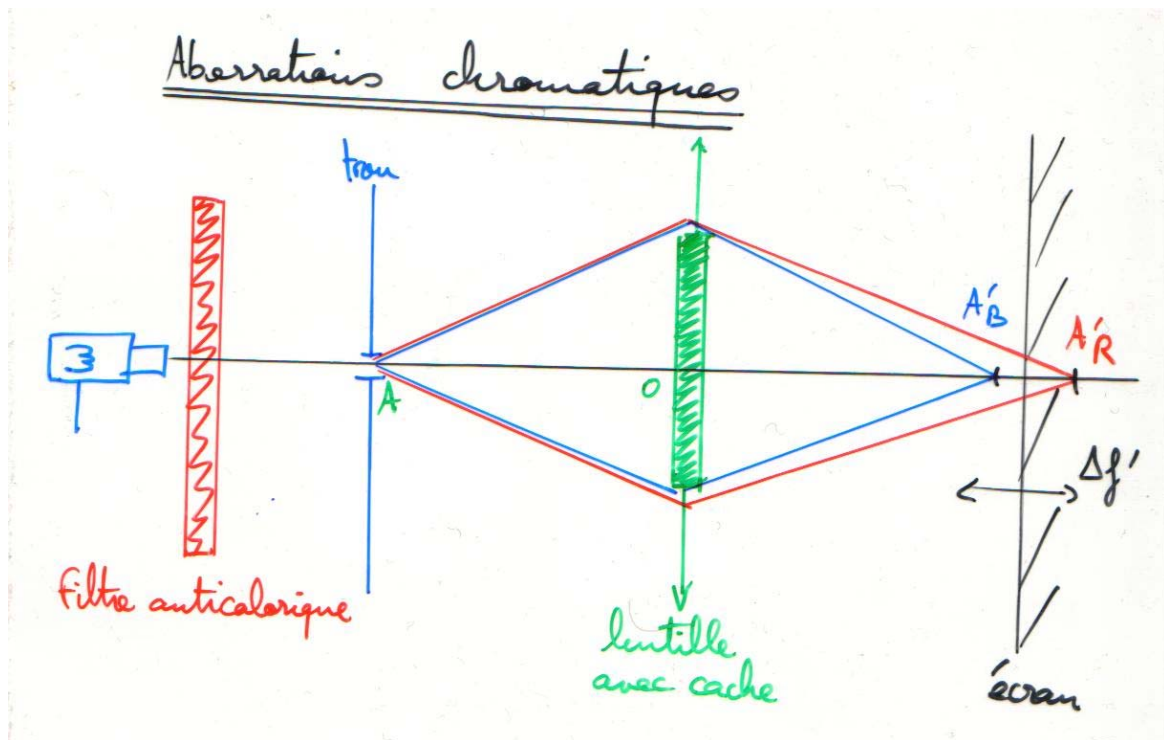
Il est possible de mettre en évidence plusieurs aberrations géométriques sur le montage (avec verre de champ).

Courbure de champ : On peut voir de la courbure de champ en déplaçant l'écran longitudinalement : l'image se fait sur une sphère et non un plan, donc les bords ne sont pas nets pour la même distance œil-écran que le centre.

Astigmatisme : L'astigmatisme se manifeste sur les bords du champ : l'image d'un point est un segment. L'image semble étirée horizontalement sur les bords droit et gauche, et verticalement en haut et en bas de l'image.

Distorsion : L'image d'un carré n'est pas un carré, les bords sont courbés vers l'intérieur (coussinet) (elle se nomme barillet lorsque les bords sont courbés vers l'extérieur). (Cf. dessins dans la fiche de l'année dernière.)

III) Aberrations chromatiques :



Nous présentons l'expérience telle que nous l'avons montrée. Notez qu'elle peut être mieux faite avec une simple lentille de 200 mm et des filtres interférentiels (cf. fiche de l'année dernière). Tout dépend du temps qu'il vous reste...

Il faut une fois de plus tout monter sur un banc.

Le but de l'expérience est de faire l'image d'un trou sur un écran à l'aide d'une lentille simple, et de montrer l'aberration chromatique longitudinale, c'est –à –dire le fait que le rouge, le bleu et le jaune ne focalisent pas au même endroit.

- 1) Focaliser la lumière de la lampe sur le diaphragme que l'on aura fermé au préalable.
- 2) Placer la lentille « aberrations chromatiques » de focale (pour le jaune) 30 cm.
- 3) Placer l'écran à une distance respectant la règle des $4f'$ (à au moins 1m 20 du diaphragme)
- 4) Pour présenter l'effet, il est possible de reprendre l'image du diaphragme avec un doublet de 100 mm, et de projeter sur un écran placé beaucoup plus loin (pour avoir une image plus grosse). En déplaçant le doublet de 100 mm, on fait successivement l'image des foyers bleu et rouge.
- 5) Après avoir rangé la lentille de 100 mm, relever la position de l'objet (A), la position de la lentille (O), et la position de l'écran pour les foyers bleu (A_R') et rouge (A_B') (on bouge l'écran ! pas la lentille.)
- 6) Au passage on peut montrer l'aberration de coma en faisant pivoter la lentille autour de son axe vertical.

Les relations de conjugaison s'écrivent :

$$\frac{1}{OA'_R} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_R} \quad \text{et} \quad \frac{1}{OA'_B} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_B}$$

L'expression donnant la distance entre les deux focales est :

$$\Delta f' = (O - A) \left[\frac{A'_R - O}{2O - A - A'_R} - \frac{A'_B - O}{2O - A - A'_B} \right]$$

valeur :	incertitude :	pourcentage :
----------	---------------	---------------

Aberrations chromatiques	Position objet (cm) :	30	0,5	
	Position lentille (cm) :	80	0,5	
	Position écran rouge (cm) :	186,2	1	
	Position écran bleu (cm) :	171,9	1	
	OA	50	0,5	
	OA'R	106,2	1	
	OA'B	91,9	1	
	Différence des focales (mm) :	9	2,6	11

Attention, le calcul d'incertitude est complexe. Nous avons utilisé une Ti-89.

Il est également possible de remonter à une estimation du pouvoir dispersif K du verre de la lentille.

$$K = \frac{n_B - n_R}{n_J - 1}$$

Les relations de conjugaisons peuvent s'écrire :

$$\frac{1}{OA'_R} - \frac{1}{OA} = (n_R - 1) * c \quad \text{et} \quad \frac{1}{OA'_B} - \frac{1}{OA} = (n_B - 1) * c$$

Où c est la courbure de la lentille définie par :

$$c = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}$$

Au final :

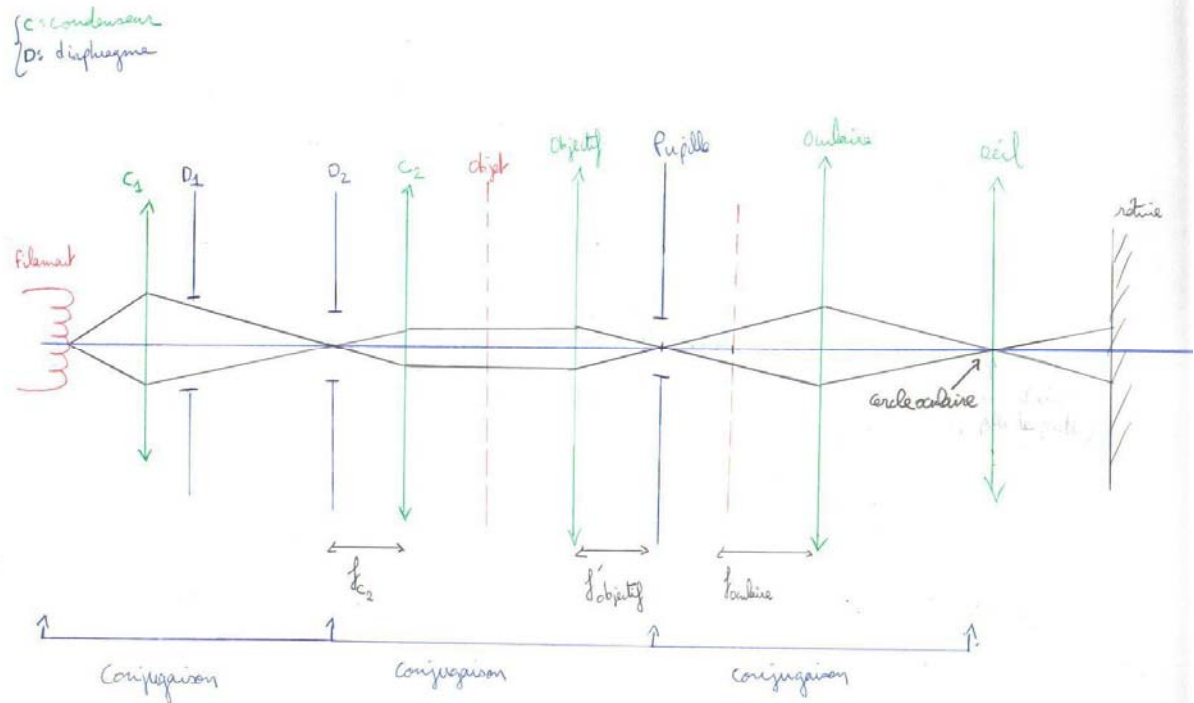
$$K = f'_J \left(\frac{1}{OA'_B} - \frac{1}{OA'_R} \right)$$

On trouve $K=4,4 \%$ et la constringence $A=1/K = 23$. Mais l'incertitude est énorme, **et il faudrait refaire les mesures avec la lentille de 200mm et les filtres interférentiels.** (Cf. fiche de l'année dernière). On doit trouver quelque chose autour de 50.

Nous avons discuté de la manière dont il fallait s'y prendre pour former une image, et nous avons commencé à parler de qualité d'image en mentionnant et en montrant des aberrations. Nous allons maintenant nous intéresser à la résolution des appareils de formation d'image.

IV) Pouvoir de résolution du microscope :

La question est : quelle est le plus petit détail que je peux voir à travers le microscope ?



L'expérience consiste à placer un réseau dans le plan objet. Puis à fermer le diaphragme D_2 (ce qui augmente la cohérence de la source, car D_2 est conjugué avec le filament). La pupille se trouve alors dans le plan de Fourier, et l'on est dans les conditions de l'expérience d'Abbe (filtrage spatial). Le réseau va diffracter la lumière issue du trou (D_2), et dans le plan de la pupille se trouve la transformée de Fourier de la modulation, car c'est le plan focal image de l'objectif. La résolution est donc limitée par la pupille. En effet, si l'on diminue le pas du réseau, il arrive un moment où les ordres 1 et -1 de diffraction ne passeront plus à travers la pupille. On ne pourra donc plus voir le réseau à travers le microscope, c'est-à-dire qu'on aura atteint la limite de résolution.

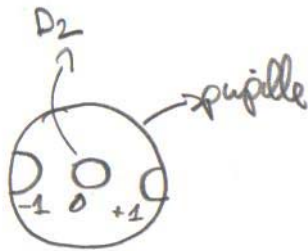
Marche à suivre :

- 1) Le microscope doit être bien réglé (éclairage de Köhler), le diaphragme d'entrée D_2 doit être ouvert.
- 1) Placer le réseau dans les étriers. (Il y a plusieurs réseaux de pas différents sur la même plaque (le nombre indiqué en face de chaque réseau est le pas en microns), et on peut passer de l'un à l'autre par simple translation du plan objet.)
- 2) Choisir le réseau de pas le plus grand (pour être sûr de ne pas avoir déjà atteint la limite de résolution).
- 3) Faire l'image du réseau sur l'écran et mettre au point. Le réseau apparaît parfois difficilement, car le fond est tapissé de bandes vertes et noires. **Attention !** Le réseau n'est pas l'alternance de bandes vertes et noires, il beaucoup plus petit et difficile à voir.
- 4) Retirer l'oculaire, et placer un doublet de 200 mm entre le microscope et l'écran.
- 5) Faire l'image de la pupille sur l'écran.
- 6) Fermer le diaphragme D_2 au maximum.

Le diaphragme D2 et la pupille étant conjugués par l'objectif, on voit l'image du diaphragme au centre de l'image de la pupille, avec une tache à gauche et une à droite, qui sont les ordres 1 et -1 de diffraction.

- 7) Translater le plan objet, afin de regarder l'effet d'un réseau de pas inférieur. On observe que l'angle de diffraction augmente : les taches des ordres 1 et -1 s'écartent de part et d'autre de l'ordre zéro.

Arrive un moment où l'on voit :



Les ordres +1 et -1 sont à moitié sortis. On a atteint la limite de résolution. Nous avons trouvé cette situation pour un réseau de pas $1,6 \mu\text{m}$, mais il est difficile de donner une valeur précise, car il faudrait plus de choix de pas de réseaux.

On peut montrer au passage les irisations des ordres +1 et -1, la diffraction dépend de la longueur d'onde, et donc il en va de même de la résolution.

La résolution du microscope est donc de l'ordre de $1,6 \mu\text{m}$

Bibliographie :

- Les instruments d'optique, Dettwiller

Ch. 10 sur la lunette, Ch. 8 sur le microscope, mais compliqué car fait avec du matériel différent.

- Optique instrumentale 5, Collection de la société française d'optique, P. Bouchareine, article de G. Roblin
- Introduction to geometrical optics, Milton Katz
- Cours de Frédéric Moulin
- <http://www.microscopyu.com/>
- Pérez d'optique pour les aberrations chromatiques (constringence etc.)