

# MP06 : Instruments d'optique

Binôme : Sylvain RAVETS - Jérémie NEVEU

Correcteur : Lionel JACUBOWIEZ

21/01/2010

*"Où finit le télescope, le microscope commence. Lequel des deux a la vue la plus grande ? Choisissez. Une moisissure est une pléiade de fleurs ; une nébuleuse est une fourmilière d'étoiles. (...) Les éléments et les principes se mêlent, se combinent, s'épousent, se multiplient les uns les autres, au point de faire aboutir le monde matériel et le monde moral à la même clarté."*

Victor Hugo



# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>3</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>1 Généralités sur les instruments d'optique</b>	<b>4</b>
1.1 Exemples d'instruments projectifs . . . . .	4
1.1.1 Le rétroprojecteur . . . . .	4
1.1.2 Le téléobjectif . . . . .	7
1.2 La lunette astronomique . . . . .	9
<b>2 Etude complète d'un instrument oculaire : le microscope</b>	<b>13</b>
<i>Réglage de l'oculaire</i> . . . . .	13
<i>Fabrication d'un œil fictif</i> . . . . .	14
2.1 Eclairage de Köhler . . . . .	14
2.2 Grandissement de l'objectif . . . . .	15
2.3 Puissance et grossissement de l'oculaire . . . . .	17
2.4 Puissance et grossissement du microscope . . . . .	18
2.5 Mesure du champ objet . . . . .	18
2.6 Pupille et ouverture numérique . . . . .	18
2.6.1 Mesure de la taille de la pupille . . . . .	19
2.6.2 Ouverture numérique . . . . .	19
2.7 Pouvoir de résolution . . . . .	20
<b>Conclusion</b>	<b>20</b>
<b>Annexes</b>	<b>21</b>
<b>A Les aberrations</b>	<b>21</b>
<b>B Grandissement et projection des objets</b>	<b>22</b>
<b>C Complément sur Köhler</b>	<b>25</b>
<b>D Pouvoir de résolution et microscopie à fond noir</b>	<b>26</b>
<b>E Tableau présenté</b>	<b>28</b>

# Préface

L'exposé qui suit est faisable en 40 minutes avec de l'entraînement. En annexe se trouvent des compléments pour aider à la compréhension des concepts exposés, des points développés par le correcteur après l'exposé du montage, des trucs et astuces. La bibliographie donnée est très utile pour la préparation du montage, en particulier concernant le microscope et ses aspects les plus poussés comme le pouvoir de résolution et l'éclairage de Köhler.

Les passages en italique sont des commentaires, des astuces, ou des parties des expériences réalisées en préparation mais pas montrées lors de l'exposé.

De manière générale, les rayons tracés en rouge seront les rayons de lumière, les rayons tracés en bleu seront les rayons de construction des images.

# Bibliographie

- Optique / G. Bruhat (en particulier pour le pouvoir de résolution)
- Les instruments d'optique / Detwiller (en particulier pour le microscope)
- Images optiques / Fleury Mathieu
- Expériences d'optique à l'agrégation et au capes / Duffait
- Optique expérimentale/ Sextant
- Optique / Pérez (le meilleur rapport qualité/prix)

# Introduction

Le premier des instruments d'optique est l'oeil. Jusqu'à l'invention de la lunette, toutes les observations astronomiques ont été faites à l'oeil, avec une remarquable précision. Mais pour sonder plus en avant l'infiniment grand ou l'infiniment petit, l'oeil possède ses limites. Par exemple, pour un objet situé à son punctum proximum, la résolution de l'oeil emmétrope est d'au mieux 0,1 mm. Il a donc fallu inventer des instruments optiques adaptés aux nouveaux besoins de l'observation. On distingue les instruments projectifs (qui font une image sur un écran) des instruments oculaires (qui font une image à l'infini afin que l'oeil la réceptionne sans accommodation).

Au travers de la présentation succincte de trois instruments d'optique différents, nous allons exposer quelques concepts concernant les instruments d'optique en général, avant de passer à l'étude complète d'un instrument réel : le microscope.

## 1 Généralités sur les instruments d'optique

### 1.1 Exemples d'instruments projectifs

#### 1.1.1 Le rétroprojecteur

Le but d'un rétroprojecteur est de faire l'image d'un objet de format A4 sur un écran assez grand et situé assez loin. Nous allons en faire un modèle sur un banc d'optique afin d'illustrer les problèmes de la formation des images pour un tel instrument.

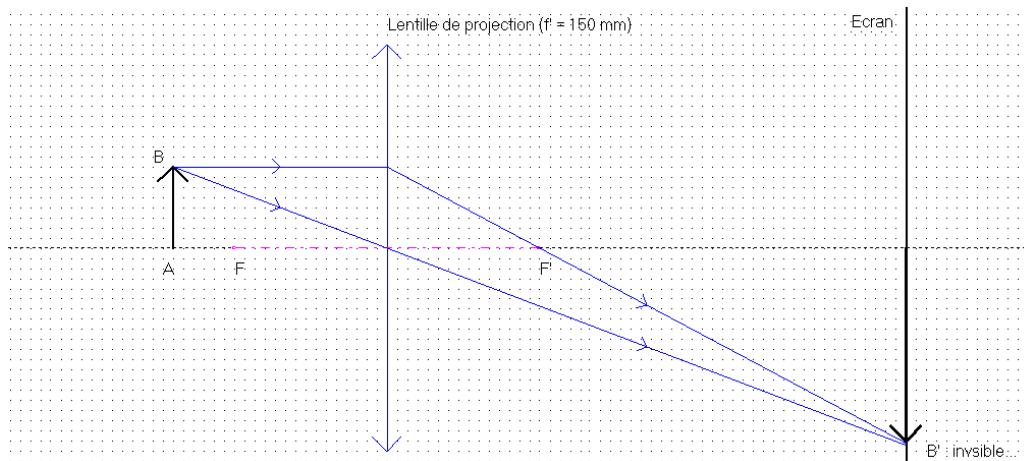


FIGURE 1 – Tracé des rayons de construction : ce ne sont pas de vrais rayons de lumière car sur l'écran on ne voit rien ! Il faut une source lumineuse.

Commençons par prendre une grille comme objet, et une lentille de focale  $f'=150$  mm (qui n'a pas une grande ouverture), sans lampe ni condenseur. On remarque que peut importe où on place l'écran... on ne voit rien ! Pourtant depuis la première, nous faisons des schémas tel que celui de la figure 1, censés représenter la marche des rayons issus d'un objet pour faire leur image sur un écran. En réalité il ne s'agit que de rayons de construction destinés à trouver la position de l'image, qui ne constituent en rien de véritables rayons lumineux. Jusqu'à présent, sur les bancs d'optique en TP, quelqu'un nous a toujours gentiment placé une lampe, que nous allumions sans réfléchir. Et quand la lumière est, l'image apparaît (cf figure 3).

On veillera à coller la lampe à l'objet, en laissant juste la place pour insérer plus tard un condenseur. L'image observée est cependant de très mauvaise qualité. Tout d'abord, le champ observé est très limité par la lentille car les rayons qui traversent la lentille ne couvre qu'une petite partie de l'objet. De plus, on observe des aberrations géométriques et chromatiques sur

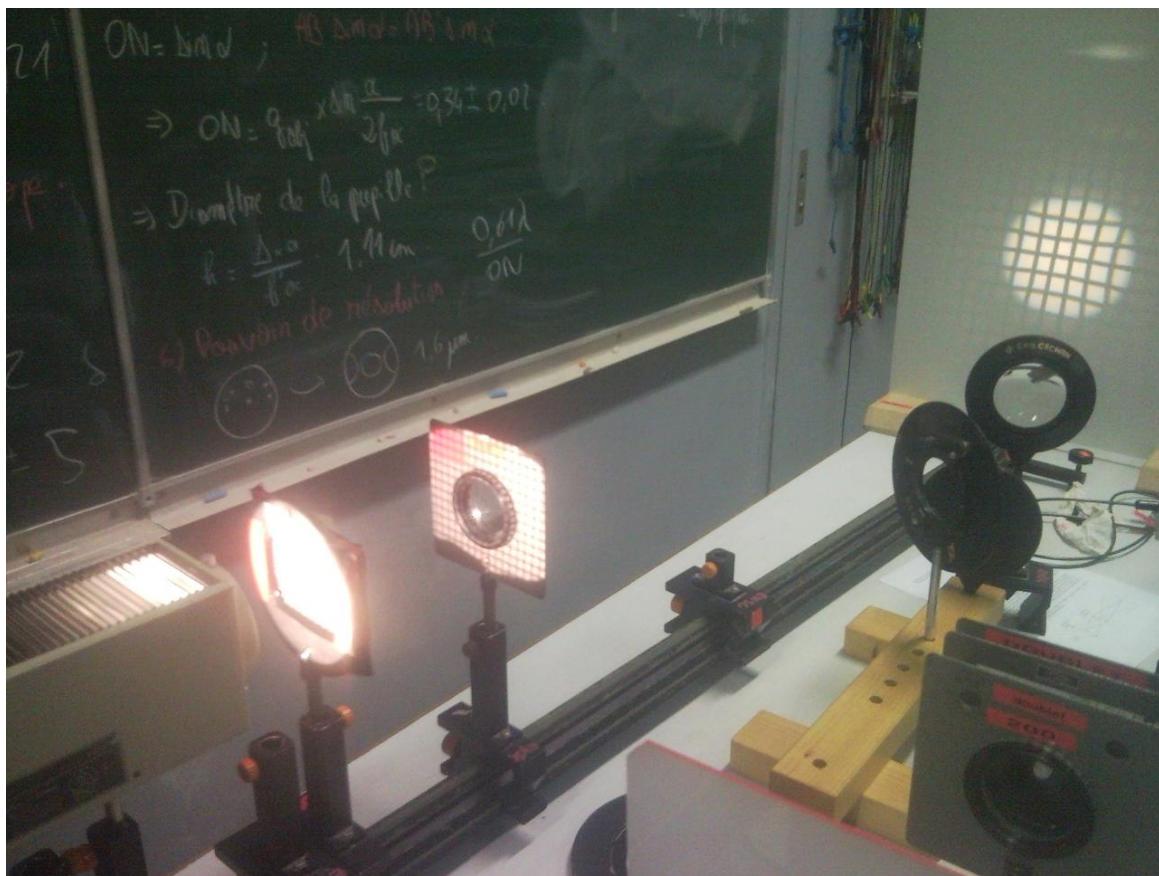


FIGURE 2 – Montage source - objet - lentille - écran : l'image est assez mauvaise ! On distingue bien les aberrations géométriques et chromatiques.

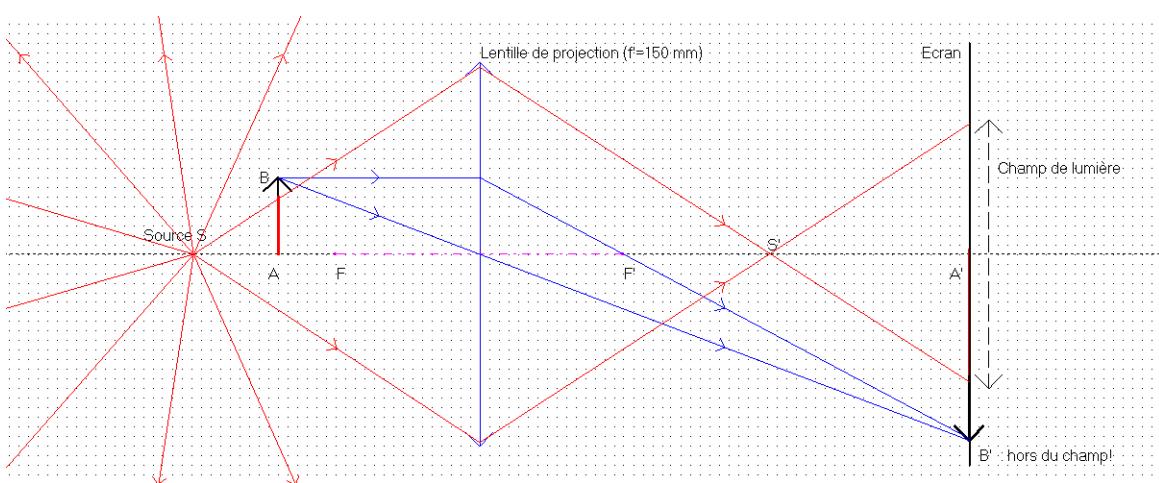


FIGURE 3 – On place une source de lumière avant l'objet. Une image apparaît à l'écran, mais elle comporte de nombreux défauts.

les bords, car la lentille de projection ne travaille pas au centre, dans les conditions de Gauss. L'idée est donc d'utiliser une deuxième lentille appelée condenseur destinée à faire en sorte que tous les rayons de lumière y passant convergent au centre de la lentille de projection tout en éclairant entièrement l'objet (cf figure 5).

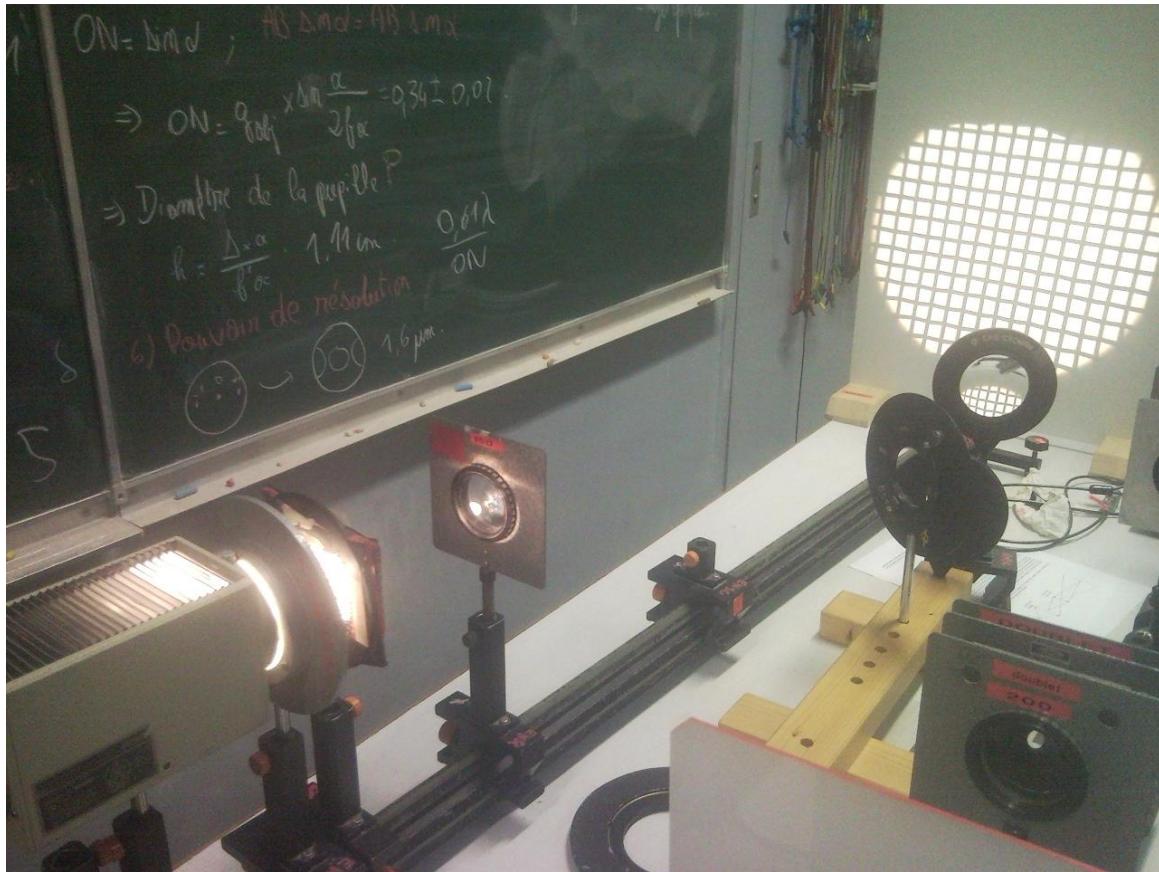


FIGURE 4 – Avec un condenseur bien placé, l'image est nettement meilleure.

Ainsi, le champ est bien agrandi, et les aberrations très limitées. De même, pour un rétro-projecteur réel, une grande lentille de Fresnel joue le rôle de condenseur pour venir focaliser l'image de la lampe au centre d'une lentille dont la focale est telle que l'image d'un objet A4 soit suffisamment agrandi à l'écran. En outre, sur un rétroprojecteur, le miroir qui suit renverse l'image, ce qui la rend lisible.

*L'idée à retenir de cette expérience est qu'il faut distinguer les rayons de construction des rayons de lumière. Les rayons de construction ne servent qu'à déterminer la position des images. La qualité de ces dernières dépendra du travail que l'on fera sur les rayons de lumière. Ainsi, un montage à une lentille sera très mauvais pour former une belle image : on utilisera deux lentilles au minimum.*

*Il est intéressant de bien exposer les aberrations dans cette manipulation car a priori il n'y a pas de temps pour y consacrer des expériences spécifiques (cf annexe A).*

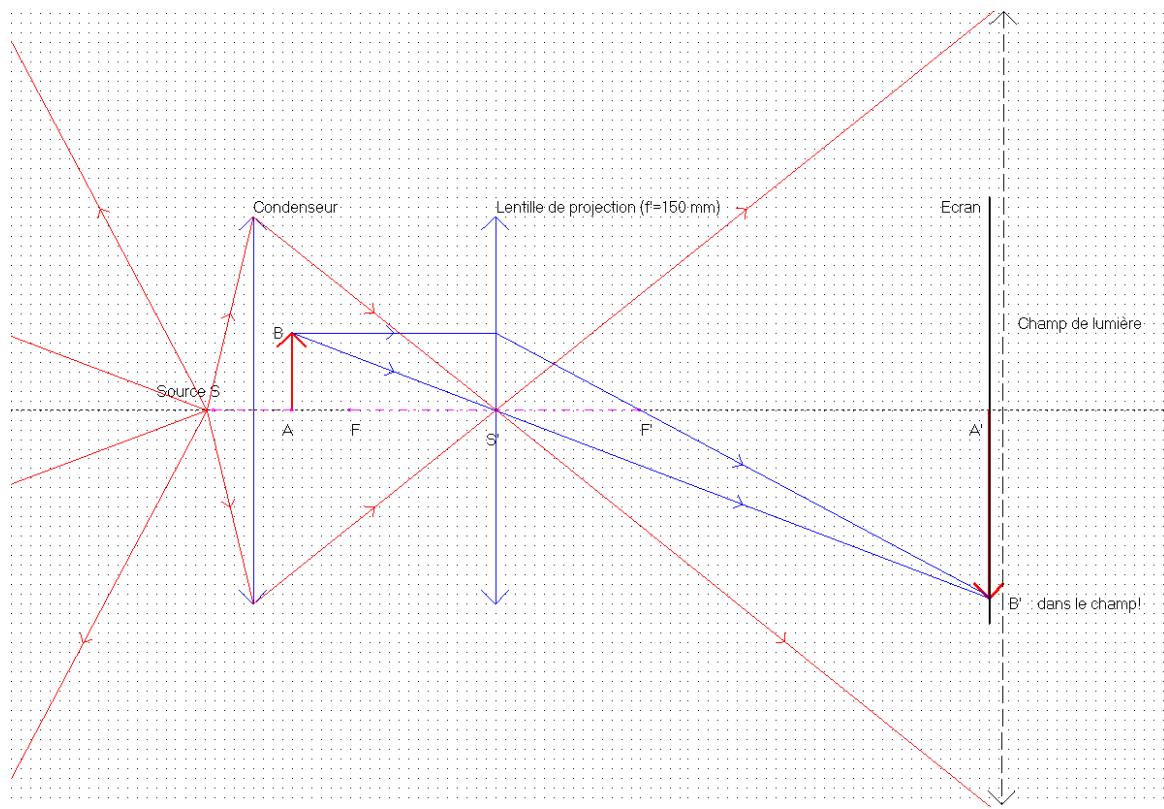


FIGURE 5 – Une fois le condenseur bien placé, tous les rayons de lumière passent par le centre de la lentille, l’objet restant entièrement éclairé : on limite ainsi les aberrations, et le champ est bien plus grand.

### 1.1.2 Le téléobjectif

Le but du téléobjectif est de faire l’image, sur une pellicule ou une barrette CCD, d’un objet situé à grande distance devant la distance système optique-écran. Dans ce cas, pour obtenir une image de grande taille, il faut une lentille convergente de grande focale (cf annexe B). Le grossissement restera toutefois inférieur à 1. Pour des raisons d’encombrement, il est déraisonnable d’utiliser une lentille unique convergente de focale 1 m. L’idée est donc de lui associer une seconde lentille, divergente, afin d’obtenir un ensemble de grande focale qui reste suffisamment compact (cf figure 6).

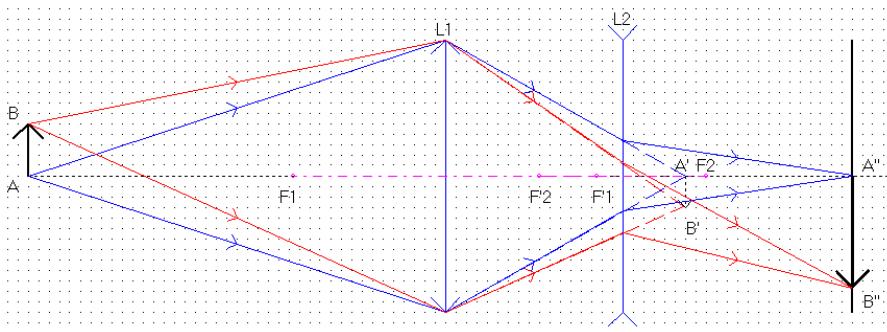


FIGURE 6 – Modèle très simplifié d’un téléobjectif.

On commence par présenter le téléobjectif dévissé d’un appareil photographique. Une bague permet de faire varier la focale de l’ensemble (les deux lentilles bougent de façon à maintenir l’image de l’objet dans le plan fixe de la pellicule).

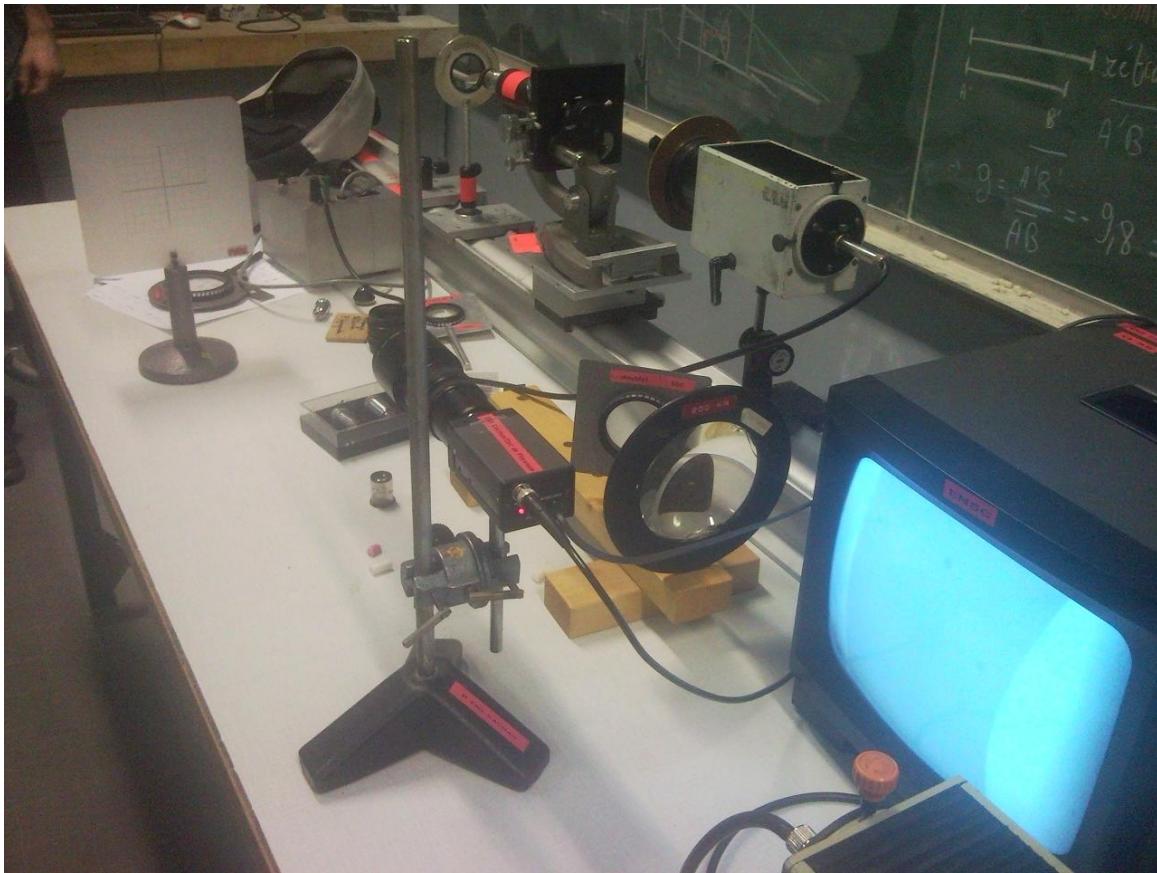


FIGURE 7 – Montage du télescope.

Une deuxième bague sert à fermer ou ouvrir le diaphragme (le bloquer avec la molette gris métallique). C'est un diaphragme d'ouverture. Quand on regarde l'image de ce diaphragme à l'avant du télescope, on voit donc la pupille d'entrée, et quand on regarde à la sortie, on voit la pupille de sortie. Ce diaphragme sert à régler le flux lumineux qui entre dans l'instrument, mais aussi la profondeur de champ de l'image. Pour cela il suffit de regarder les graduations fixes vertes : leur étendue de part et d'autre du trait rouge montre la profondeur de champ pour un nombre d'ouverture donné. Suivant la profondeur de champ voulue, il suffit d'aligner le nombre d'ouverture de la bague du diaphragme avec le trait rouge. En réalité, avec ce réglage, la profondeur de champ est dissymétrique autour de l'objet. Pour corriger cela, il faut aligner la bague d'ouverture non pas avec le trait rouge mais avec le point rouge.

Pour visualiser ces caractéristiques, on utilise un télescope 18-108/2,5 monté sur une caméra branchée à une télévision, et une grille graduée. 18-108 signifie que la focale peut varier de 18 à 108 mm et que son nombre d'ouverture minimal est de 2,5. Le télescope possède deux bagues de réglage : focale et mise au point. En changeant cette distance relative, on fait varier la focale globale de l'instrument, ce qui change la taille de l'image observée au niveau de la caméra CCD.

On fait la mise au point sur la grille avec le grossissement le plus faible ( $f = 18 \text{ mm}$ ) et une ouverture de 2,5. Pour un écran situé à au moins 1 m, on compte environ 9 carreaux à l'écran. Puis on augmente progressivement la focale (bague du milieu) en ajustant la mise au point (bague avant), afin de grossir la grille au maximum. On dénombre alors 4 carreaux à l'écran.

*NB : ce télescope est assez mauvais car il suffit normalement de tourner la bague de focale, sans avoir à refaire la mise au point. De plus le rapport de grossissement mesuré ne correspond pas au rapport des focales 108/18 : le télescope est probablement mal adapté à la caméra (la barrette n'est pas dans le bon plan ? Mais ce n'est pas grave ! ).*

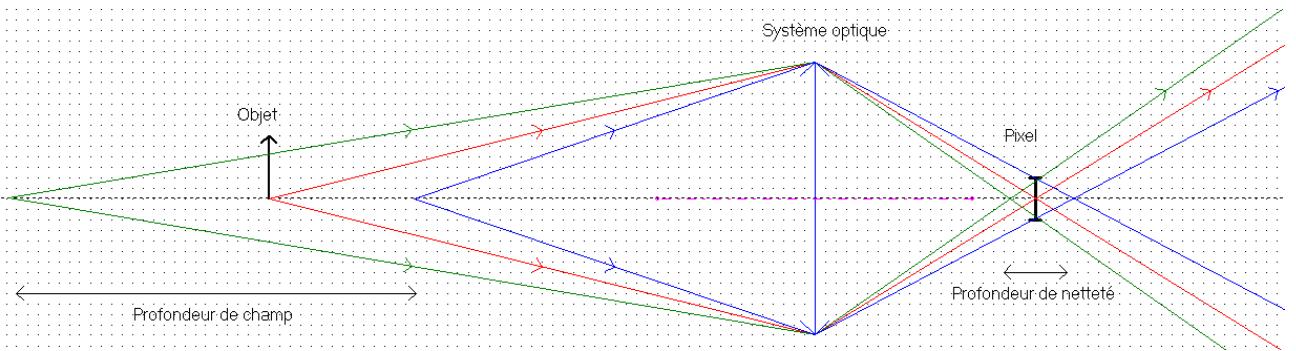


FIGURE 8 – Illustration de la profondeur de champ. Sur une certaine distance appelée profondeur de champ, l'image d'un point est vue comme un point par le pixel, et ce tant que les rayons qui en sont issus sont contenues dans ce pixel. On remarque que cette profondeur de champ est dissymétrique autour de l'objet.

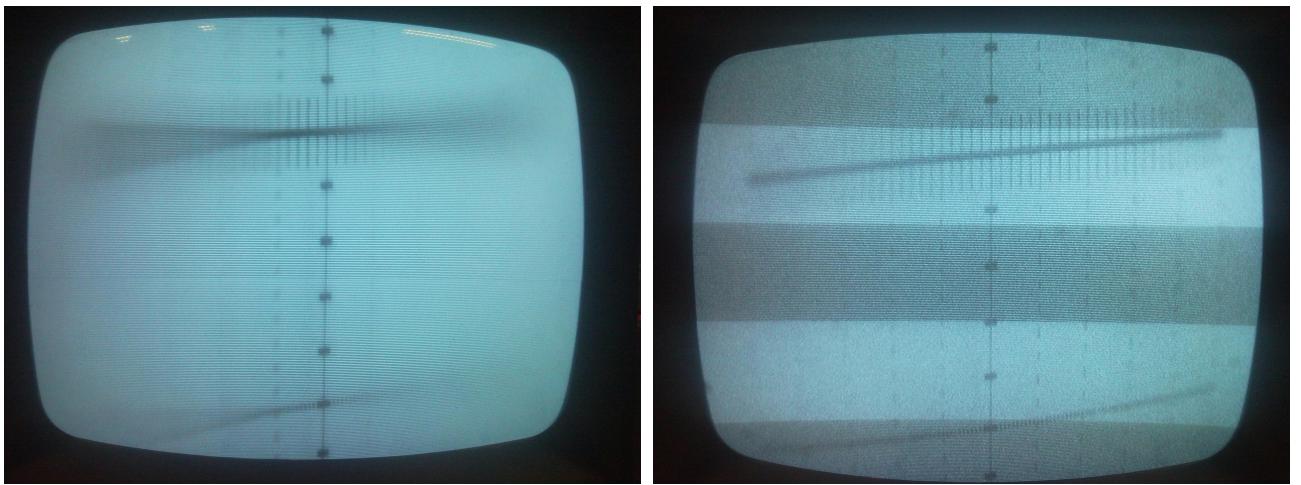


FIGURE 9 – A gauche, le diaphragme d'ouverture est ouvert au maximum et l'image a une faible profondeur de champ. A droite c'est l'inverse, mais la luminosité de l'image a baissé.

Pour mettre en évidence la profondeur de champ, on incline alors la grille et on met au point au centre. On observe que seul un carreau de part et d'autre sont nets, les autres devenant très vite flous. Ceci est dû à la taille finie du pixel : l'ensemble des rayons provenant d'un point objet est contenu dans le pixel pour une certaine distance appelée profondeur de champ. Si on ferme le diaphragme d'ouverture, l'image redevient nette sur toute son étendue car les rayons sont alors tous proches de l'axe optique et sont donc contenus dans le pixel sur une grande profondeur de champ.

*NB : même si le pixel était de taille infiniment petite, ce serait la taille de la tache de diffraction qui remplacerait le pixel dans le raisonnement.*

On remarque cependant que la luminosité de l'image a beaucoup baissé. Ceci confirme bien que le diaphragme utilisé est un diaphragme d'ouverture.

## 1.2 La lunette astronomique

Le but de la lunette astronomique est de faire l'image à l'infini d'un objet à l'infini. Le système est donc nécessairement afocal.

*On commence par simuler un objet à l'infini avec une lampe, un condenseur, un filtre anticalorique, une grille sur dépoli au foyer d'une lentille de 200 mm. L'idéal est d'approcher le plus possible l'objet de la lampe afin d'en éclairer une portion la plus large possible. Puis on*



FIGURE 10 – A gauche, le montage objet à l'infini et oeil fictif. A droite, l'image observée.

simulate un œil fictif avec une lentille de 300 mm et un écran mobile sur banc. Comme l'écran est petit il ne faut pas prendre une focale trop grande. On veillera à placer l'œil à environ 50 cm de la lentille de l'objet pour qu'il y ait juste la place d'y insérer la lunette. On observe alors une image de  $2 \times 2$  carreaux (cf figure 10).

Puis on vient placer la lunette afin de grossir (et non agrandir) l'image obtenue de cet objet à l'infini. Pour cela, on place une lentille de 300 mm munie d'un diaphragme tout près de la lentille de l'objet, puis une lentille de 150 mm à 45 cm pour réaliser un montage afocal. Enfin on déplace un peu l'œil fictif afin de le mettre au niveau du cercle oculaire (ainsi la lentille travaille plus dans les conditions de Gauss). On observe alors toujours une image de  $2 \times 2$  carreaux, mais deux fois plus grande (mesure à la règle). Ceci est normal car on a construit une lunette de grossissement  $G = \frac{f'_2}{f'_1} = \frac{300}{150} = 2$  (cf figure 11).

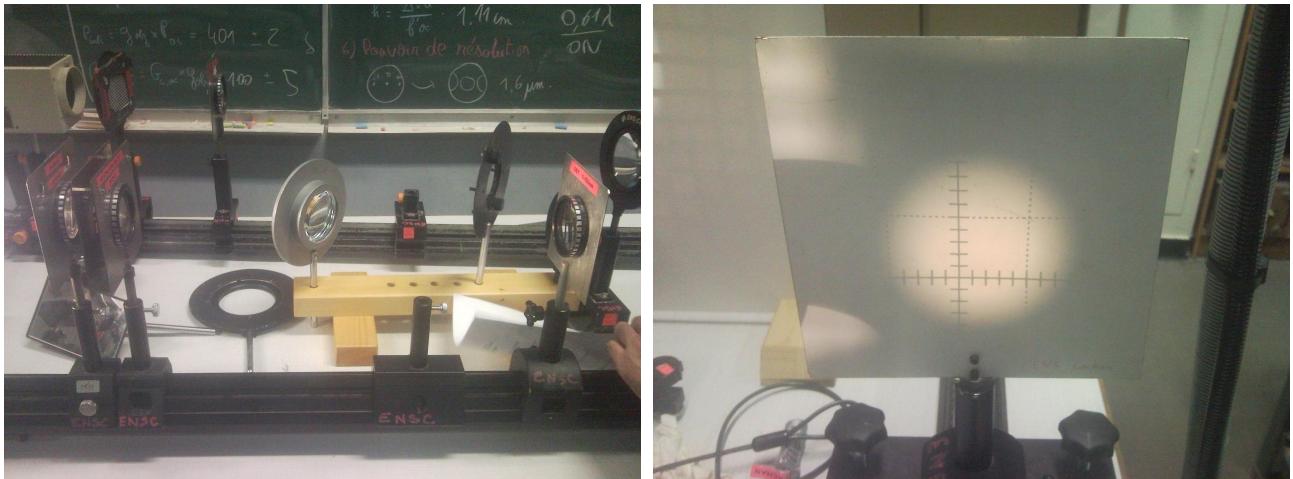


FIGURE 11 – A gauche, la lunette. A droite, l'image observée.

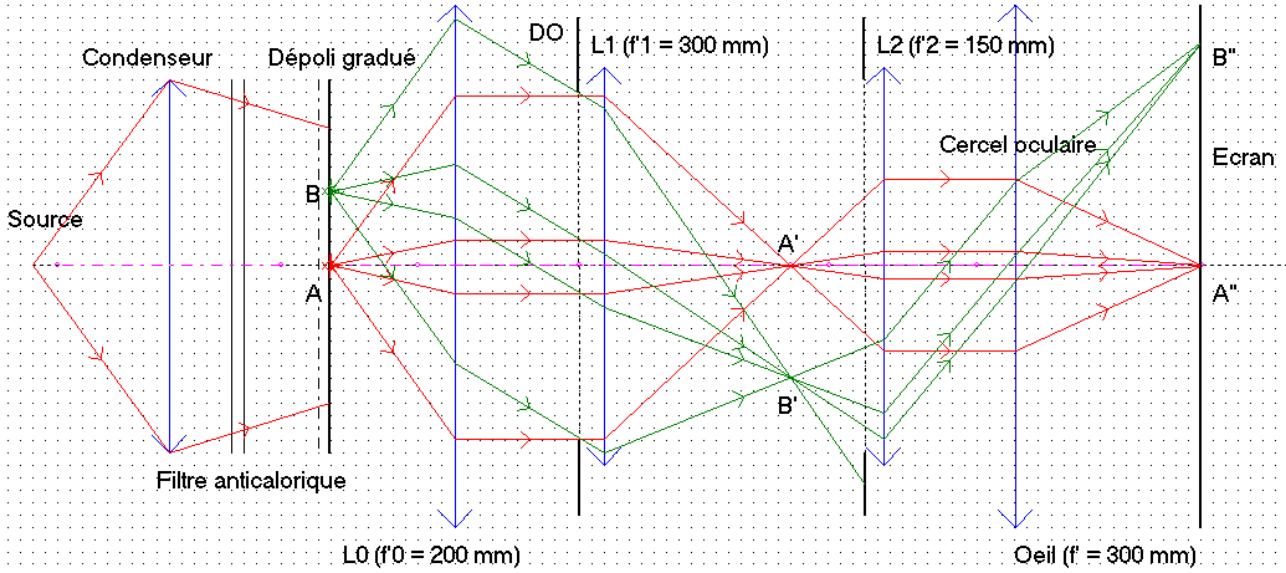


FIGURE 12 – Modèle de la lunette. Le diaphragme d’ouverture est la monture de l’objectif. La monture de l’oculaire coupe certains rayons : sur les 4 rayons verts venant de l’objet, seuls 3 parviennent à l’écran : le bord de l’image est moins lumineux et est appelé champ de contour (cf figure (11)).

Grâce à ce montage, nous allons détailler les questions des pupilles et des lucarnes.

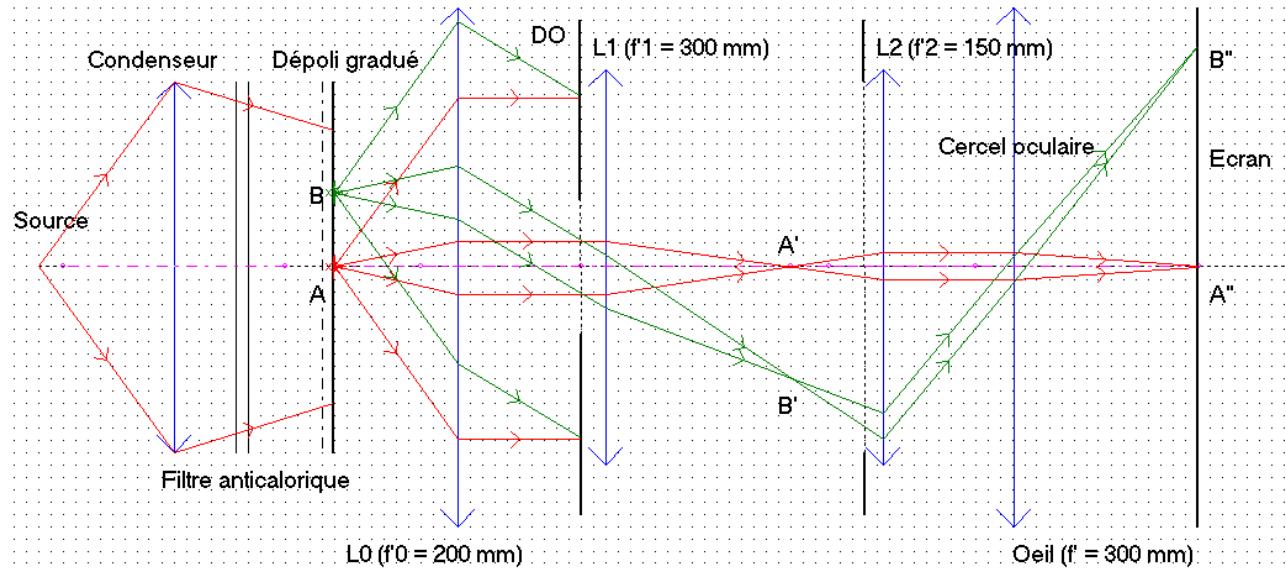


FIGURE 13 – On ferme le diaphragme d’ouverture : le champ n’est pas diminué (on a toujours  $B''$  à l’écran), mais moins de rayons parviennent à l’écran pour l’ensemble des points images.

Si l’on ferme le diaphragme situé devant l’objectif, on observe que seul la luminosité de l’image varie mais le champ reste inchangé : c’est donc le diaphragme d’ouverture (cf figure 13). C’est aussi la pupille d’entrée du système car aucune optique n’est située avant lui. La pupille de sortie ou cercle oculaire est le plan en sortie où le faisceau est le plus étroit : on y reconnaît les bords nets du diaphragme. C’est au niveau du cercle oculaire qu’il faut placer l’oeil car c’est là que se retrouve concentrée toute la lumière sortant de la lunette. Avec un vrai instrument, on cherche à avoir en général un cercle oculaire plus petit que la pupille de l’oeil (environ 4 mm).

Dans cette configuration, le diaphragme de champ est la monture de la lentille, mais avec

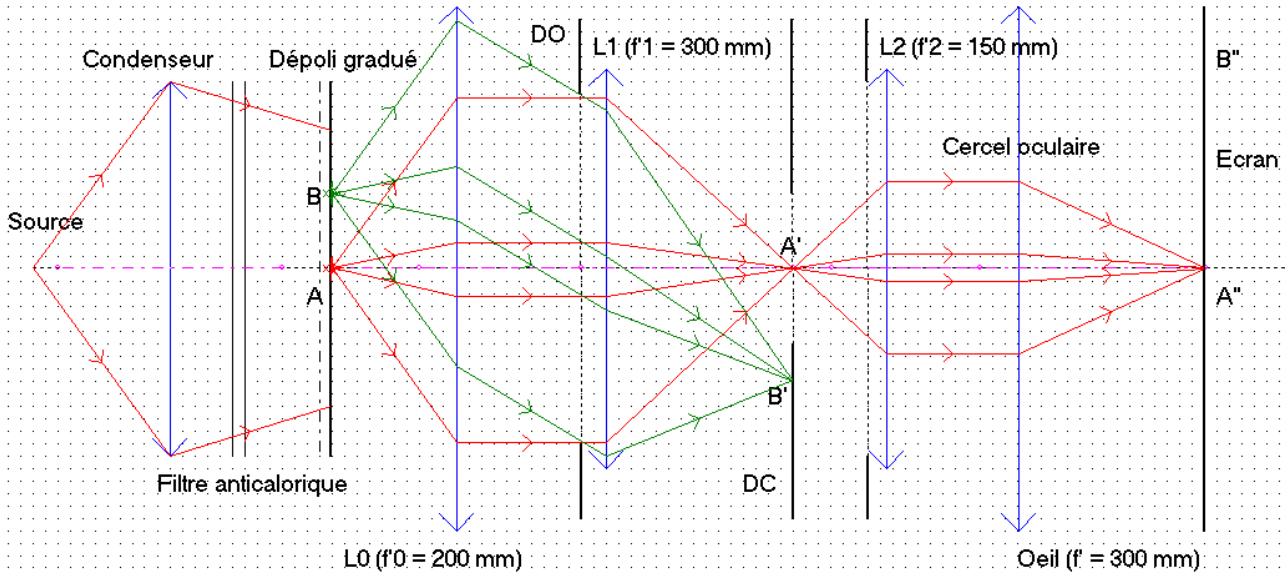


FIGURE 14 – On ferme le diaphragme de champ : le champ est réduit ( $B''$  a disparu de l'écran), mais autant de rayons parviennent à l'écran pour l'ensemble des points images restants.

un autre diaphragme on peut montrer que cette monture limite aussi le flux lumineux. Le véritable diaphragme de champ se trouve dans le plan de l'image intermédiaire donc au foyer de l'objectif et de l'oculaire. Les lucarnes d'entrée et de sortie sont donc à l'infini. Si on place un diaphragme à ce niveau et qu'on le ferme, celui-ci devient le nouveau diaphragme de champ et on voit que le champ diminue mais pas la luminosité (cf figure 15 gauche). On remarque en particulier qu'il peut servir à éliminer le champ de contour et ne garder que le champ de pleine lumière, ce qui améliore la qualité de l'image, mais diminue le champ. Le champ de contour est dû à la monture de l'oculaire qui coupe une partie des rayons de lumière traversant la pupille venant d'un point objet hors d'axe.



FIGURE 15 – A gauche, l'influence du diaphragme de champ. A droite, l'influence du verre de champ : le champ est doublé car on observe  $4 \times 4$  carreaux, mais le grossissement n'a pas changé.

Pour agrandir le champ, on peut placer une lentille appelée verre de champ de focale  $f' = 150$  mm au foyer de l'objectif et de l'oculaire. Les rayons de l'image intermédiaire sont alors rabattus au centre de l'oculaire ce qui permet de faire l'image d'un plus grand champ sur l'écran (cf figure 16). On observe que le champ a doublé ( $4 \times 4$  carreaux) mais que le grossissement n'a

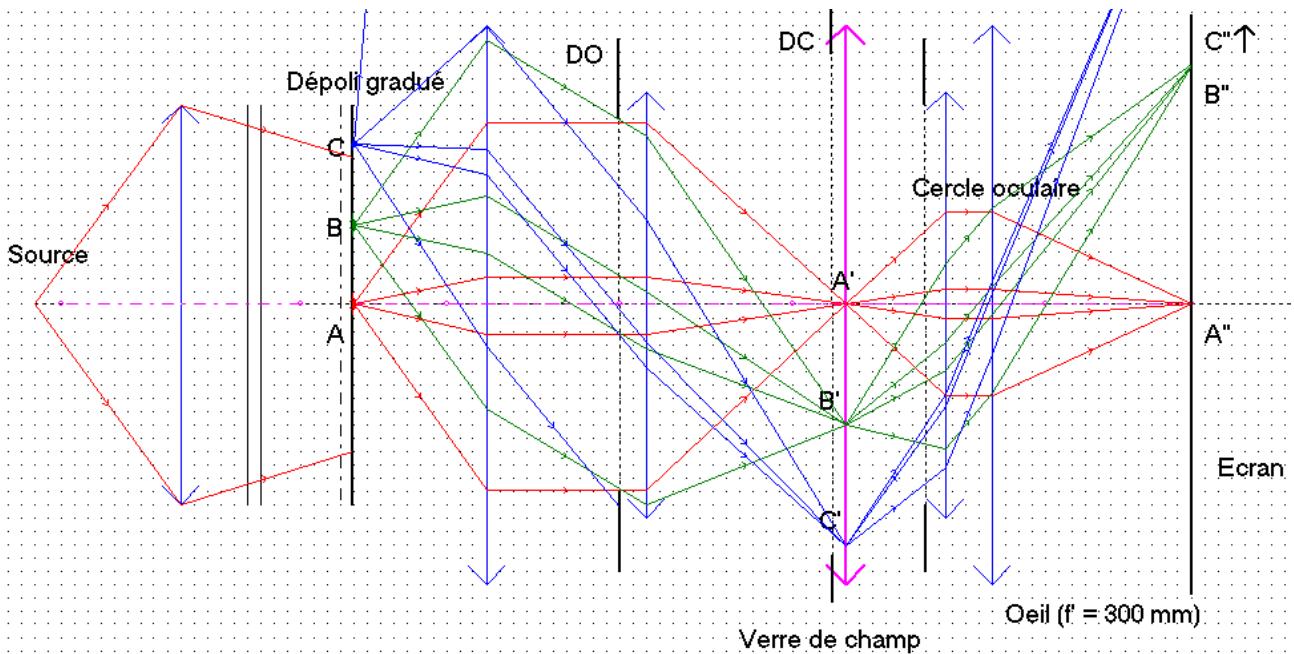


FIGURE 16 – On rajoute un verre de champ ( $f' = 150 \text{ mm}$ ) au foyer de l'objectif et de l'oculaire : on observe que le champ est alors doublé. On peut ensuite ajuster le diaphragme de champ pour couper le champ de contour (situé autour de  $C''$ ). En pratique, le verre de champ est légèrement décalé de cette position pour éviter de faire l'image des poussières situées sur la lentille.

pas changé (mesure d'un carreau à la règle). De plus, le cercle oculaire s'est avancé (cf figure 16). En pratique on décale légèrement le verre de champ de cette position pour ne pas faire l'image des poussières situées sur la lentille. Sa monture sert aussi en général à diaphragmer le champ de contour.

L'image de l'objet à l'infini est alors "splendide".

*NB : la position du cercle oculaire peut se calculer facilement avec la formule de conjugaison de Newton.*

## 2 Etude complète d'un instrument oculaire : le microscope

Le but du microscope est de faire l'image d'un objet de taille microscopique sur la rétine de l'oeil. Par conséquent, d'après ce que nous avons appris avec le téléobjectif, pour avoir un grossissement bien plus grand que 1, il faut un objectif de très courte focale placée au plus près de l'objet, puis un deuxième système pour renvoyer l'image intermédiaire à l'infini : l'oculaire. On voit que les objectifs que l'on donne au microscope déterminent toute sa constitution.

*Commencer par faire une rapide présentation du matériel utilisé.*

*NB : le mieux pour aller au plus vite lors de l'exposé est de préparer une feuille Excel qui servira de "calculatrice" : on y rentre les valeurs mesurées et leurs erreurs et les formules rentrées à l'avance font tout le travail instantanément.*

### Réglage de l'oculaire

*Ce réglage est à faire en préparation mais n'est pas utile à présenter lors de l'épreuve.*

*Pour régler l'oculaire, on vise avec celui-ci un mur lointain et assez éclairé puis on dévisse la bague de façon à être à la limite de netteté du réticule. A ce moment le réticule est au foyer*

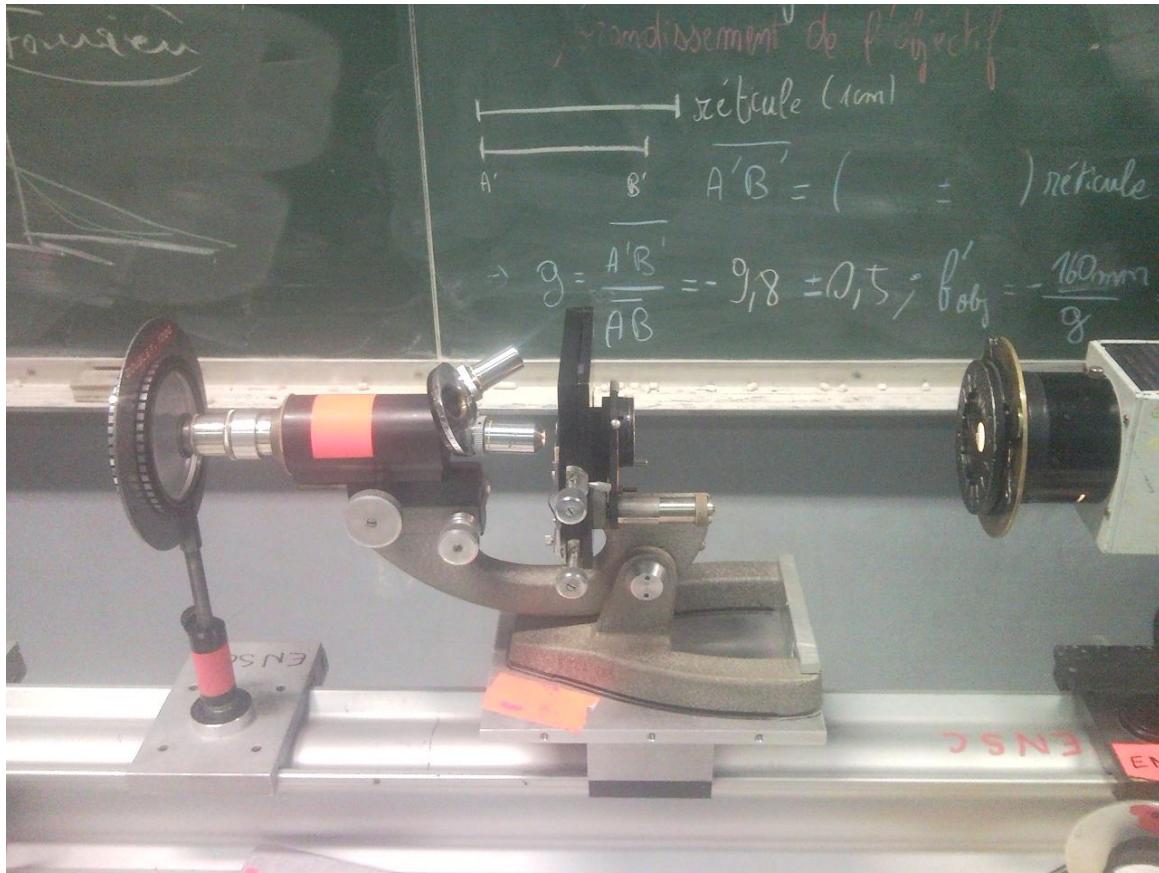


FIGURE 17 – Microscope étudié

*de l'oculaire et on est sûr que l'œil n'accorde pas pour le voir net (car en dévissant on l'a forcé à regarder vers l'infini). Ne plus toucher à cette vis par la suite.*

### **Fabrication d'un œil fictif**

*Pour réaliser l'œil, on utilisera une lentille de 1 m et un grand écran blanc, placée au cercle oculaire du microscope.*

## **2.1 Eclairage de Köhler**

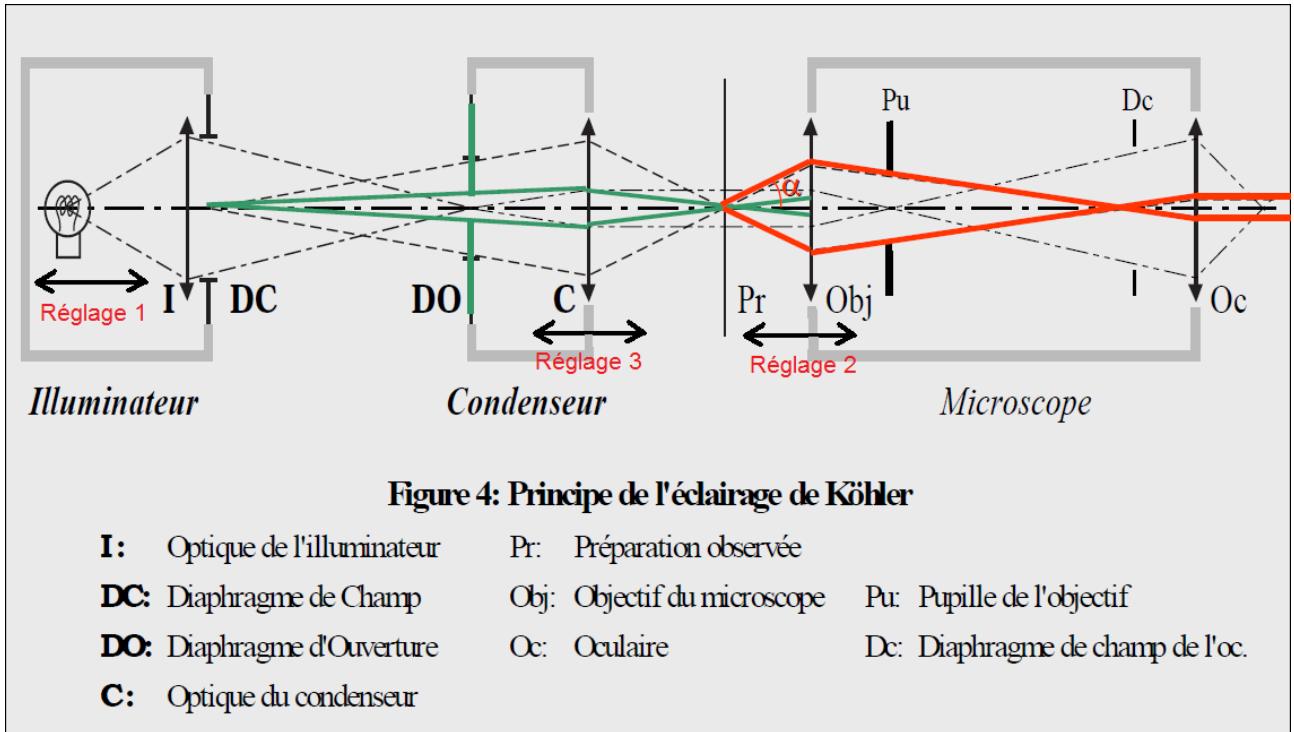
Comme vu avec le rétroprojecteur, pour faire une belle image de l'objet observé, il faut l'éclairer convenablement. Le premier réflexe pour éclairer l'objet est de focaliser la lampe sur l'objet... c'est une très mauvaise solution, car l'image du filament vient alors se former sur la rétine, et on risque en plus de brûler l'objet !

L'éclairage standard de l'objet est l'éclairage de Köhler. Son but est d'obtenir :

1. l'uniformité de l'éclairage (pour voir l'objet et non les défauts de l'éclairage)
2. la limitation de la zone éclairée au champ vu dans le microscope (pour limiter la lumière parasite)
3. le contrôle de l'ouverture numérique (cohérence partielle) de l'éclairage

Pour cela, il faut réaliser trois conjugaisons :

1. Filament de la lampe - Diaphragme d'ouverture, via la position du condenseur de la lampe,
2. Diaphragme de champ de l'éclairage - Préparation, via la position du condenseur du microscope,



**Figure 4: Principe de l'éclairage de Köhler**

I:	Optique de l'illuminateur	Pr:	Préparation observée
DC:	Diaphragme de Champ	Obj:	Objectif du microscope
DO:	Diaphragme d'Ouverture	Oc:	Oculaire
C:	Optique du condenseur	Pu:	Pupille de l'objectif

FIGURE 18 – Principe de l'éclairage de Köhler et marche des rayons dans le microscope.

3. Diaphragme d'ouverture de l'éclairage - pupille d'entrée de l'objectif (à l'infini), via la position du condenseur du microscope (préréglé sur le microscope : ce diaphragme se trouve au foyer du condenseur)

Cette opération se fait en plusieurs étapes :

1. Faire l'image du filament sur le diaphragme du condenseur du microscope en déplaçant la source par rapport à son condenseur (conjugaison 3).
2. Placer une mire sur le microscope, faire la mise au point, et réaliser son image sur l'écran avec l'oeil fictif.
3. Fermer (sans forcer) l'iris de la lampe.
4. Déplacer le condenseur du microscope (diaphragme ouvert) jusqu'à voir apparaître à l'écran l'image de l'iris de la lampe (= le diaphragme de champ) assez net en sus de l'image de la mire.
5. Centrer cette image dans le microscope avec les vis de centrage du condenseur du microscope (attention : la lampe et le microscope doivent tout de même être bien alignés).
6. Ouvrir doucement l'iris de la lampe jusqu'à l'instant où ses bords ne limitent plus le champ observé (conjugaison 1), l'oculaire devient alors le diaphragme de champ (on peut le voir en tournant l'oculaire : l'image de son bord est alors nette sur l'écran et tourne à l'écran aussi).
7. Fermer le diaphragme d'ouverture du condenseur et réajuster le réglage 1. Ouvrir à nouveau ce diaphragme afin d'avoir une luminosité suffisante à l'écran (arrêter de l'ouvrir quand la luminosité semble ne plus varier à l'écran).

## 2.2 Grandissement de l'objectif

Pour mesurer le grandissement de l'objectif, il faut mesurer la taille de l'image intermédiaire qu'il forme au niveau du plan focal objet de l'objectif. Pour cela on utilise une mire graduée

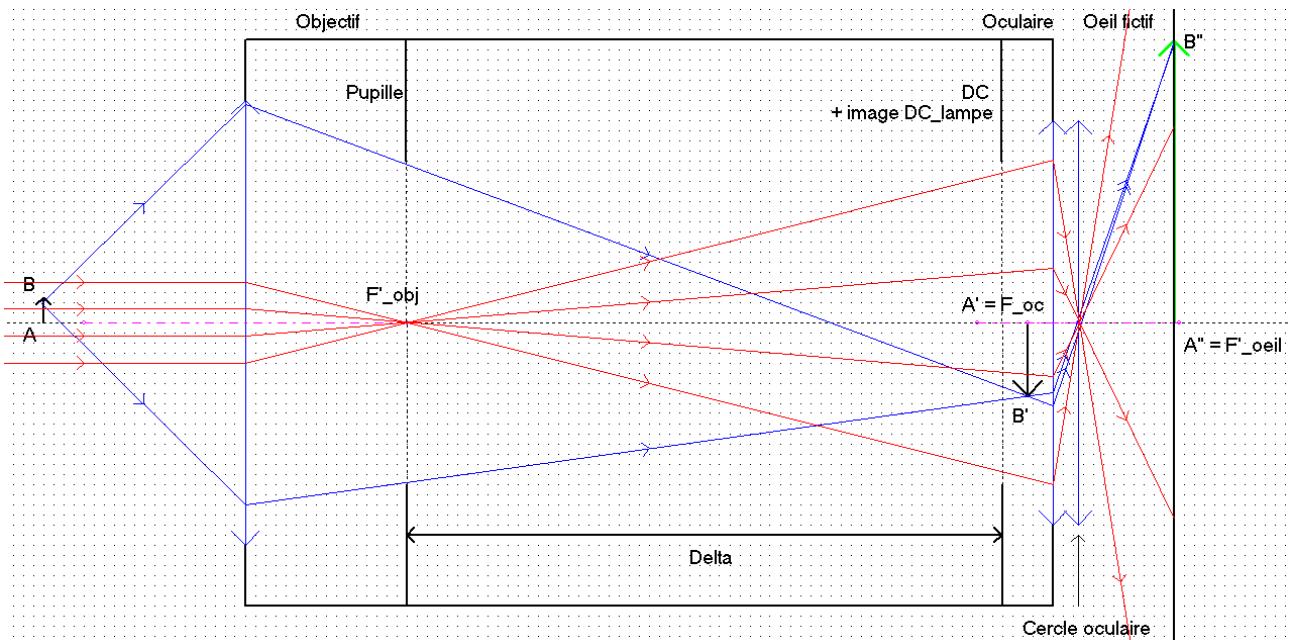


FIGURE 19 – Modèle du microscope dans l'éclairage de Köhler cohérent

comme objet, et le réticule de l'oculaire comme "règle", puisque l'image formée par l'objectif et le réticule se trouvent dans le même plan (plan focal objet de l'oculaire, (cf figure 31)).

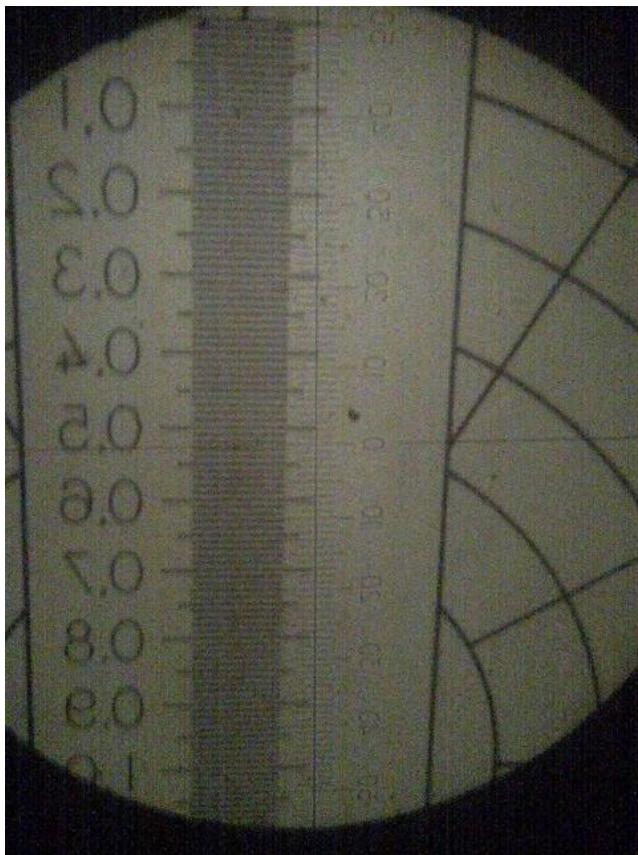


FIGURE 20 – A gauche, l'image de la mire superposée au réticule. A droite, la mire à utiliser.

A l'écran on mesure la taille :

- de  $h = 1 \text{ cm}$  de réticule :  $h' = 409 \pm 1 \text{ mm}$
- de  $AB = 1 \text{ mm}$  de mire :  $A''B'' = 401 \pm 1 \text{ mm}$

On en déduit que  $A'B' = A''B'' \frac{h'}{h} = 9,80 \pm 0,5$  mm d'où le grossissement de l'objectif :

$$g = \frac{A'B'}{AB} = -9,80 \pm 0,5$$

Sur l'objectif, il est noté  $\times 10$  donc la mesure est correcte. On en déduit sa focale avec la formule issue des relations de conjugaison :

$$f'_{obj} = -\frac{\Delta}{g} = 16,32 \pm 0,8 \text{ mm}$$

### Grandissement de l'objectif :

	Valeur	Incertitude	Valeur attendue
Delta (mm) :	160		
Taille écran mire objet (mm) :	401	1	
Taille écran réticule (mm) :	409	1	
Taille réticule (mm) :	10		
Taille mire objet (mm) :	1		
Taille image mire objet (mm) :	9,80	0,49	
Grandissement g :	-9,80	0,49	-10
Focale (mm) :	16,32	0,82	

NB : en réalité on n'est pas sûr que  $\Delta = 160$  mm. Pour s'affranchir d'une éventuelle erreur systématique, on peut mesurer les grossissements  $g_1$  et  $g_2$  pour deux valeurs  $\Delta_1 = 160$  mm et  $\Delta_2 = 200$  mm et remonter à la focale avec la formule  $f'_{obj} = -\frac{\Delta_2 - \Delta_1}{g_2 - g_1}$  où l'erreur sur  $\Delta_2 - \Delta_1$  peut être estimée.

## 2.3 Puissance et grossissement de l'oculaire

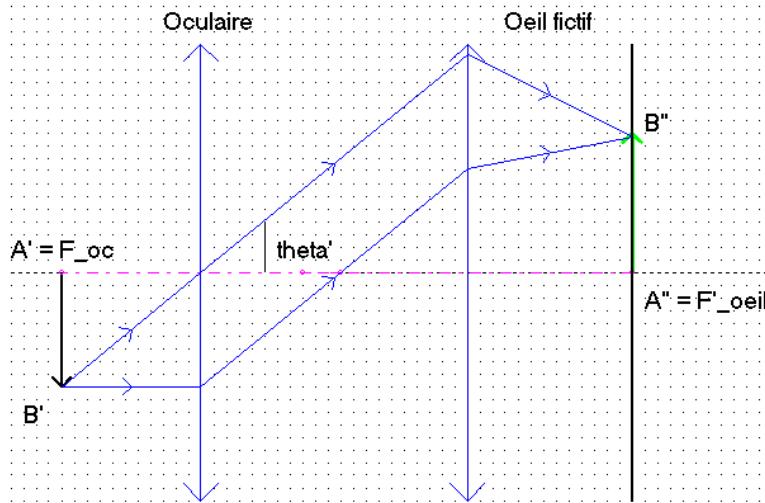


FIGURE 21 – Mesure du grossissement de l'oculaire

Pour l'oculaire, on ne peut mesurer de grossissement car l'image est à l'infini. La grandeur d'entrée de l'oculaire est toujours une longueur, mais sa grandeur de sortie sera un angle. On introduit alors la puissance : c'est le rapport de l'angle sous lequel est vu le réticule à travers l'oculaire, divisé par la taille du réticule :

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

On a mesuré précédemment la taille à l'écran de  $h = 1$  cm de réticule. Il reste donc à mesurer la distance  $D = f'_{oeil}$  oeil-écran. On obtient alors la puissance de l'oculaire et son grossissement commercial (avec 250 mm correspondant au punctum proximum de l'œil, distance la plus courte de vision distincte) :

$$G_{c,oculaire} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{250 \text{ mm}}{f'_{oculaire}}$$

<b>Focale de l'oculaire :</b>	<b>Valeur</b>	<b>Incertitude</b>	<b>Valeur attendue</b>
Taille réticule (mm) :	10		
Taille écran réticule (mm) :	409	1	
<b>Distance lentille écran (mm) :</b>	1000	20	
Puissance de l'oculaire (dioptrie) :	40,9	0,8	
Focale de l'oculaire (mm) :	24,4	0,5	
Grossissement commercial de l'oculaire :	10,23	0,21	<b>11</b>

## 2.4 Puissance et grossissement du microscope

De même, on définit la puissance du microscope et son grossissement :

$$P_{microscope} = \frac{\theta'}{\bar{AB}} = \frac{\bar{A''}\bar{B''}}{f'_{oeil}\bar{AB}} = \frac{\bar{A'}\bar{B'}}{\bar{AB}} \frac{\theta'}{\bar{A'}\bar{B'}} = gP_{oculaire}$$

$$G_c = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\bar{A''}\bar{B''}}{\bar{f'_{oeil}}} \frac{250 \text{ mm}}{\bar{AB}} = G_{c,oculaire}g$$

<b>Grossissement du microscope :</b>	<b>Valeur</b>	<b>Incertitude</b>	<b>Valeur attendue</b>
$P = P_{oculaire} \cdot g$ (dioptrie) :	401	22	
Grossissement du microscope :	100	5	<b>110</b>
<b>Taille écran du champ (mm) :</b>	460		
Taille du champ objet (mm) :	1,15		

## 2.5 Mesure du champ objet

On mesure à l'écran la taille du champ. On en déduit la taille du champ objet par une simple règle de trois (on a déjà mesuré la taille de la mire !). Si par chance la mire est la mire "Nachet 1 div 0,01 mm", celle-ci couvre tout le champ et sert alors de règle à la mesure du champ : on observe 1,11 mm de champ objet.

## 2.6 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.

La pupille est LE diaphragme qui imite les faisceaux traversant l'instrument pour UN point objet de l'axe. Dans notre cas, la pupille est située dans le plan focal image de l'objectif. La pupille d'entrée est donc à l'infini.

## 2.6.1 Mesure de la taille de la pupille

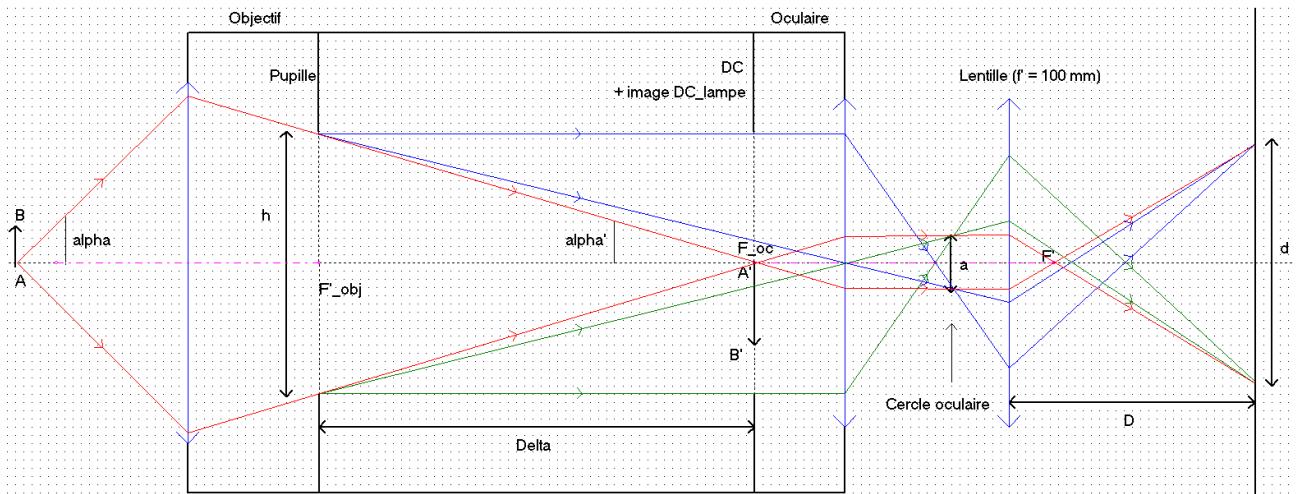


FIGURE 22 – Mesure des pupilles

On fait l'image sur l'écran de la pupille de sortie (le cercle oculaire) avec une lentille  $f' = 100 \text{ mm}$  (cf figure 22). Attention à bien avoir ouvert l'iris de la lampe afin que celui-ci ne diaphragme pas la pupille (ce réglage a dû être fait dès la première partie), et à bien respecter la règle des  $4f'$ . Le diamètre de la pupille de sortie vérifie alors, en vertu du grandissement :

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

Enfin le diamètre de la pupille est :

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

On peut aussi faire directement l'image de la pupille, en enlevant l'oculaire et en utilisant une lentille de focale  $f' = 200 \text{ mm}$ . Il est judicieux de montrer au jury où se trouve la pupille sur un objectif de microscope pour bien montrer qu'elle mesure environ 1 cm.

## 2.6.2 Ouverture numérique

Pour calculer l'ouverture numérique, on va utiliser la relation fondamentale de l'optique instrumentale, j'ai nommé la relation d'Abbe, ainsi que les mesures précédentes.

$$\bar{AB} \sin \alpha = \bar{A'B'} \sin \alpha'$$

$$ON = \sin \alpha = g \sin \frac{a}{2f'_{oculaire}}$$

### Pupille de sortie et ouverture numérique :

	Valeur	Incertitude	Valeur attendue
Diamètre image pupille de sortie (mm) :	26	1	
Distance à l'écran (m) :	1950	20	
Focale de la lentille de projection (mm) :	100		
Diamètre de la pupille de sortie (mm) :	1,41	0,02	< 4 mm
Diamètre de la pupille (mm) :	9,2	0,2	Environ 8 mm
Ouverture numérique :	0,28	0,02	0,27

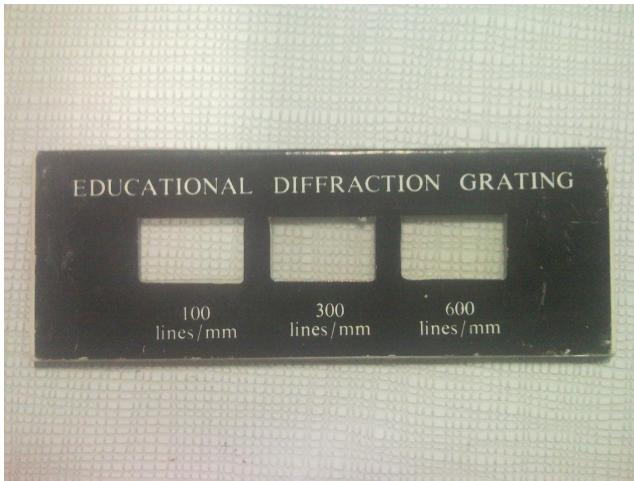


FIGURE 23 – A gauche, le réseau à utiliser. A droite, son image (100 traits/mm).

## 2.7 Pouvoir de résolution

Prenons le réseau indiqué figure 23 et faisons-en l'image sur l'écran (commencer par le réseau 100 traits/mm). Puis on translate le réseau pour observer le réseau à 300 traits/mm. Moyennant une légère remise au point, on aperçoit toujours les traits du réseau. Enfin on termine par le réseau 600 traits/mm : même en touchant la vis de mise au point on n'en voit jamais l'image. On a donc atteint la limite de résolution du microscope.

Si on analyse la situation, on peut dire que le microscope se comporte donc comme un passe-bas pour les fréquences spatiales, de fréquence de coupure 600 traits/mm. Pour comprendre mieux ce qu'il se passe, regardons donc comment se comporte le microscope vis à vis des fréquences spatiales en regardant la transformée de Fourier de l'objet. Tout comme dans le montage de stroboscopie, la transformée de l'objet se trouve au foyer de la lentille qui suit, ici l'objectif, donc dans le plan de la pupille.

Il est également important d'éclairer le réseau en éclairage cohérent afin de bien voir les ordres de diffraction : on ferme l'iris du microscope. Commençons par le réseau à 100 traits/mm. Retirons l'oculaire, et faisons l'image à l'écran de la pupille avec une lentille de focale  $f' = 200$  mm. On observe les différents ordres de diffraction du réseau. Passons au réseau 300 traits/mm : on ne voit plus que deux ordres de diffraction. Enfin, pour le réseau 600 traits/mm, seul le bleu des ordres 1 passe encore la pupille : la pupille coupe la transformée de Fourier de l'objet, on ne voit alors que l'ordre 0, d'où l'éclairage uniforme observé précédemment. Si on réouvre l'iris du microscope, les ordres 1 passent à nouveau la pupille, mais dans ce cas c'est la diffraction qui va limiter la résolution du microscope.

$$\text{On a donc une résolution de } 1/600 \approx 1,5 \mu\text{m} \approx \frac{0,6\lambda_{moy}}{ON}.$$

## Conclusion

Les propriétés des instruments d'optique sont dictées par toutes sortes de paramètres que nous avons essayé de démontrer au cours de ce montage. Retenons que l'étude de la disposition des différents diaphragmes limitant les faisceaux a une importance capitale pour la compréhension du fonctionnement et l'étude optimale de ces instruments. Ces derniers n'en restent pas moins entachés d'un certain nombre de défauts inhérents à l'utilisation de lentilles : les aberra-

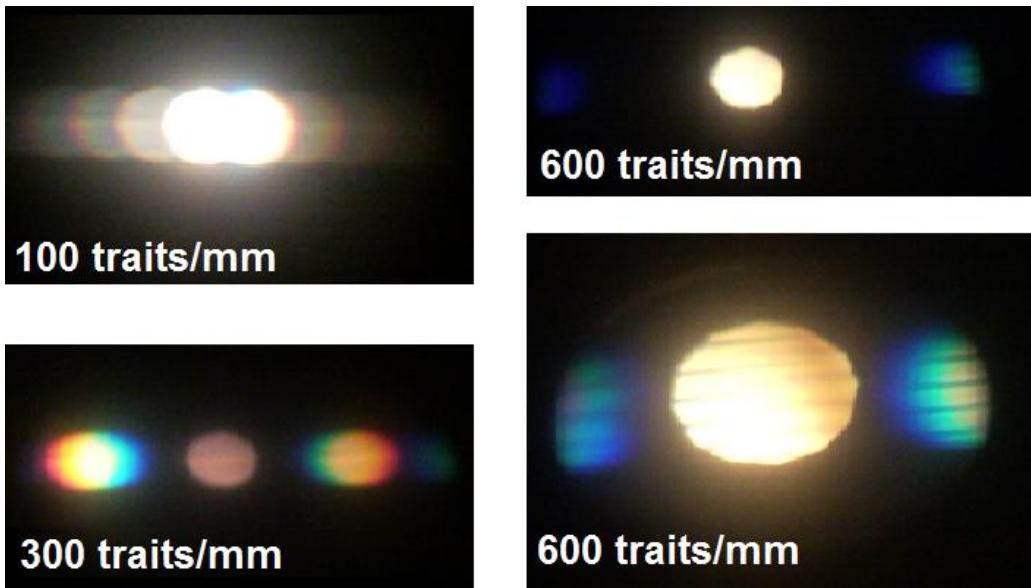


FIGURE 24 – Figures de diffraction des réseaux observés dans la pupille. Plus la densité de traits augmente, plus il y a d'ordres filtrés par la pupille de l'objectif. Si on réouvre l'iris du microscope, on peut faire rentrer plus d'ordres et on perd en cohérence spatiale. (On note que l'on voit bien l'image du filament.)

tions. Tout le savoir faire du constructeur repose dans les choix et dans le calcul des corrections à apporter aux différentes optiques afin d'obtenir un instrument de la meilleure qualité possible. Cela fait des instruments d'optiques des objets parfois très complexes et en perpétuelle évolution.

L'avènement d'instruments perfectionnés au cours du 17<sup>e</sup> siècle a eu des conséquences scientifiques et philosophiques exceptionnelles. Par la suite, les opticiens n'ont eu de cesse de tenter de les perfectionner. On dispose actuellement de techniques de microscopie de plus en plus développées (microscopie à effet tunnel, à force atomique), qui permettent d'observer l'atome ! L'amélioration de la résolution reste un défi bien réel (exemple : optique adaptative des grands télescopes).

## Annexes

### A Les aberrations

Pour bien les distinguer sur le montage rétroprojecteur, il faut utiliser le condenseur et bien l'éloigner de la source et de l'objet (cf figure 26). De plus, il est mieux de remplacer la lentille de projection par une lentille de même focale mais avec un grande ouverture.

En jouant sur sa position on voit la distorsion passer de bâillet à coussinet. La forme bâillet s'explique très bien : les rayons issus du condenseur sont focalisés derrière la lentille de projection et sont ainsi d'autant plus déviés qu'ils sont aux extrémités de la figure.

Les aberrations chromatiques sont visibles sur les extrémités de la figure : le rouge et le bleu se séparent.

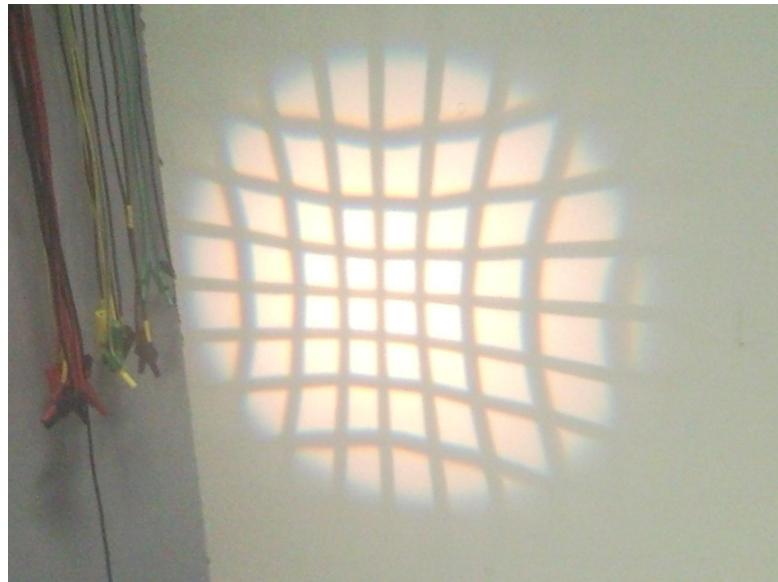


FIGURE 25 – Au bord de l'image on distingue bien les aberrations géométriques et chromatiques.

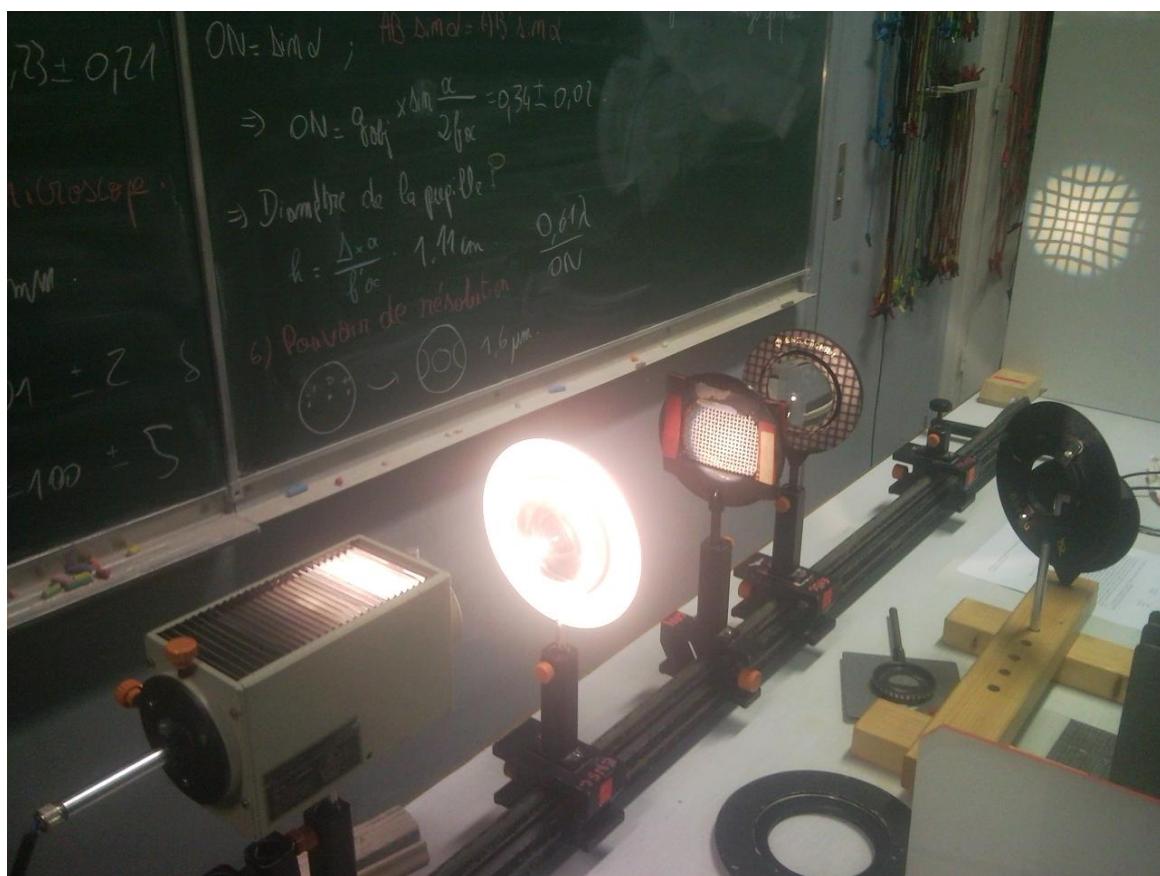


FIGURE 26 – Montage pour voir les aberrations.

## B Grandissement et projection des objets

Pour faire une conjugaison objet-écran lorsque l'objet est généralement plus loin de la lentille que ne l'est l'écran, l'image obtenue est d'autant plus grande que la focale utilisée est grande (cf figure 27). Cette règle est valable aussi pour un objet à l'infini. Attention toutefois à vérifier la règle des 4f sinon on ne peut former l'image de l'objet. Si l'objet est très proche de la lentille,

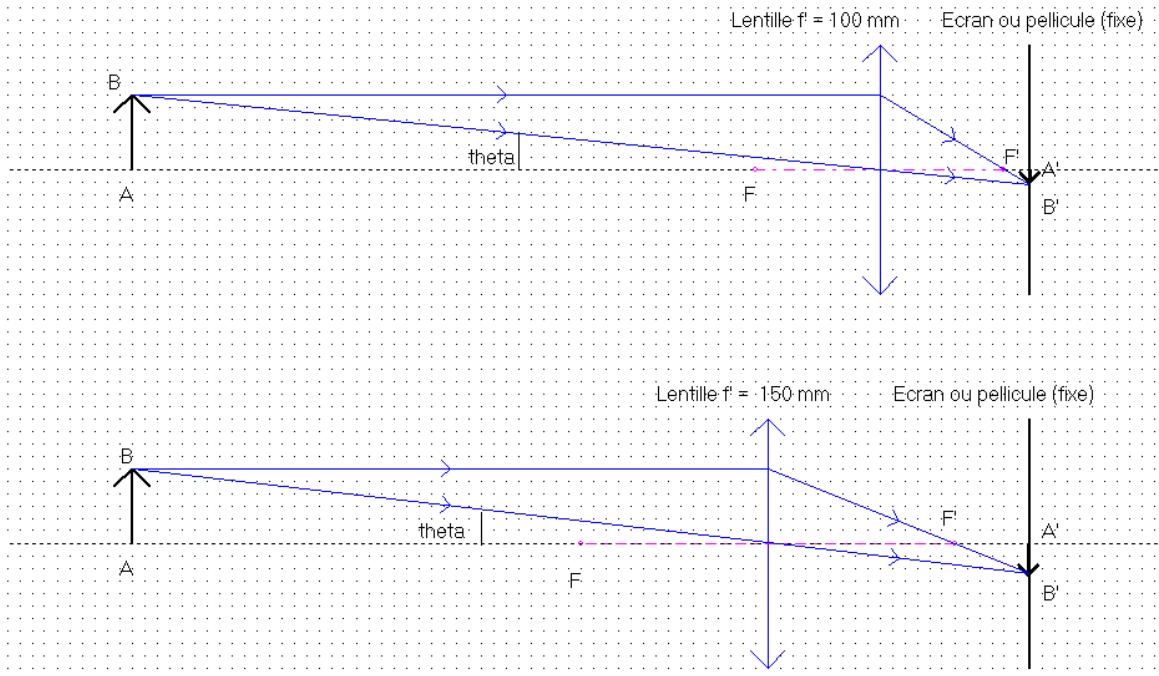


FIGURE 27 – Projection d'un objet à distance finie sur un écran plus proche de la lentille que ne l'est l'objet.

alors on aura intérêt à utiliser une lentille de courte focale, à écran fixe (cf figure 28).

En effet, pour un objet loin de l'ensemble lentille-écran, la taille de l'image obtenue à l'écran vaut  $A'B' \approx f'\theta$ . Tant que l'objet est loin,  $\theta \ll 1$  et  $f'$  est le facteur sur lequel jouer pour agrandir l'image. Lorsque l'objet est proche, cette approximation n'est plus valable.

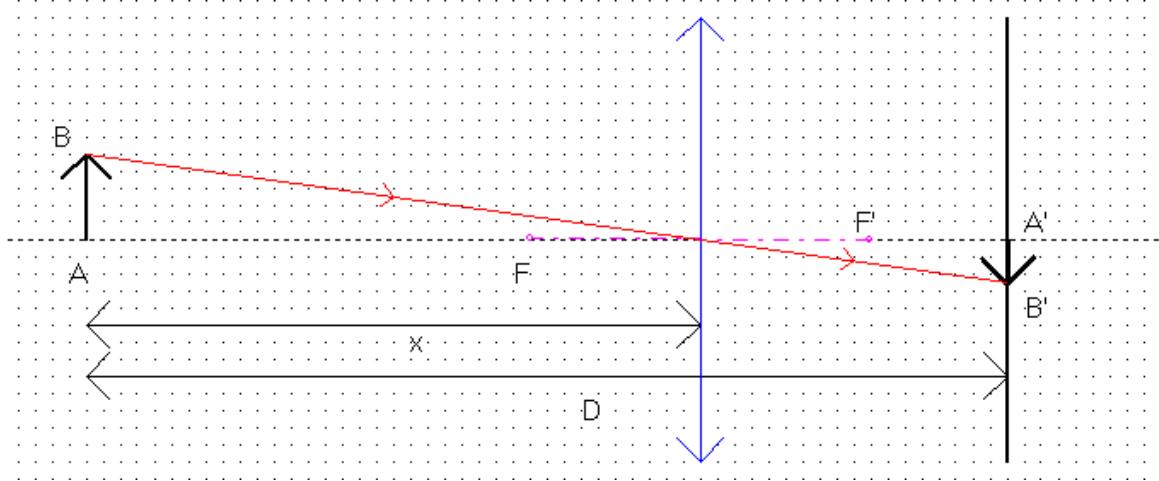


FIGURE 29 – Paramétrisation du problème

Regardons cela plus en détail. Soit  $x$  la distance objet-lentille ( $x < 0$ ) et  $D$  la distance fixe objet-écran (cf figure 29).

$$g = \frac{A'B}{AB} = \frac{x}{D+x} \quad \frac{1}{D+x} - \frac{1}{x} = \frac{1}{f'}$$

Pour réaliser la conjugaison, il existe deux positions de la lentille si  $f' < D/4$  :

$$x_{\pm} = \frac{1}{2}(-D \pm \sqrt{D(D - 4f')})$$

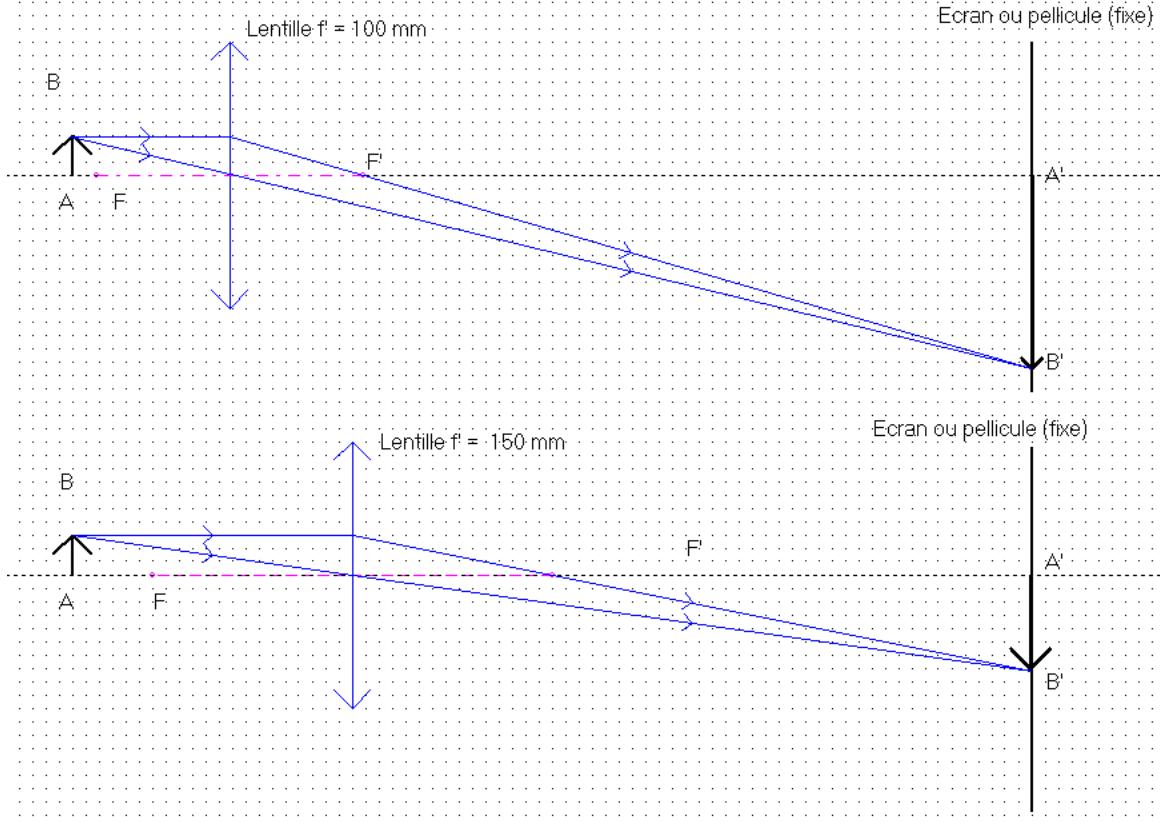


FIGURE 28 – Projection d'un objet plus proche de la lentille que ne l'est l'écran.

Pour  $x_-$ , on a  $D > |x_-| > D/2$  et pour  $x_+$  on a  $0 < |x_+| < D/2$ . On en déduit le grandissement :

$$\begin{cases} D > |x| > D/2 : g = -\frac{1 - \sqrt{1 - \frac{4f'}{D}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{4f'}{D}}} \\ 0 < |x| < D/2 : g = -\frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4f'}{D}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{4f'}{D}}} \end{cases}$$

Si on trace le grandissement en fonction de  $f'/D$ , on observe que pour des situations où la lentille est plus proche de l'objet que de l'écran (cas  $x_+$ ) on a intérêt à prendre une courte focale pour avoir un meilleur grandissement, sinon il faut prendre une grande focale. Cependant, pour un objet de taille finie on a au maximum  $g = -1$  dans une configuration  $2f - 2f$  : l'image que l'on forme à l'écran ne peut être au plus que de même taille que l'objet. Ceci est convenable pour un téléobjectif puisque la pellicule ou la cellule CCD est de toute façon petite devant les objets à observer, mais pas dans le cas du microscope où dans ce cas la surface de la rétine est bien plus grande que les objets à observer. Il faut alors se placer dans le cas d'une lentille de courte focale proche de l'objet pour avoir un grandissement bien supérieur à 1.

Dans le cas où  $f' \ll D$  d'un objet à l'infini, on retrouve  $A'B' \approx -f'\theta$ .

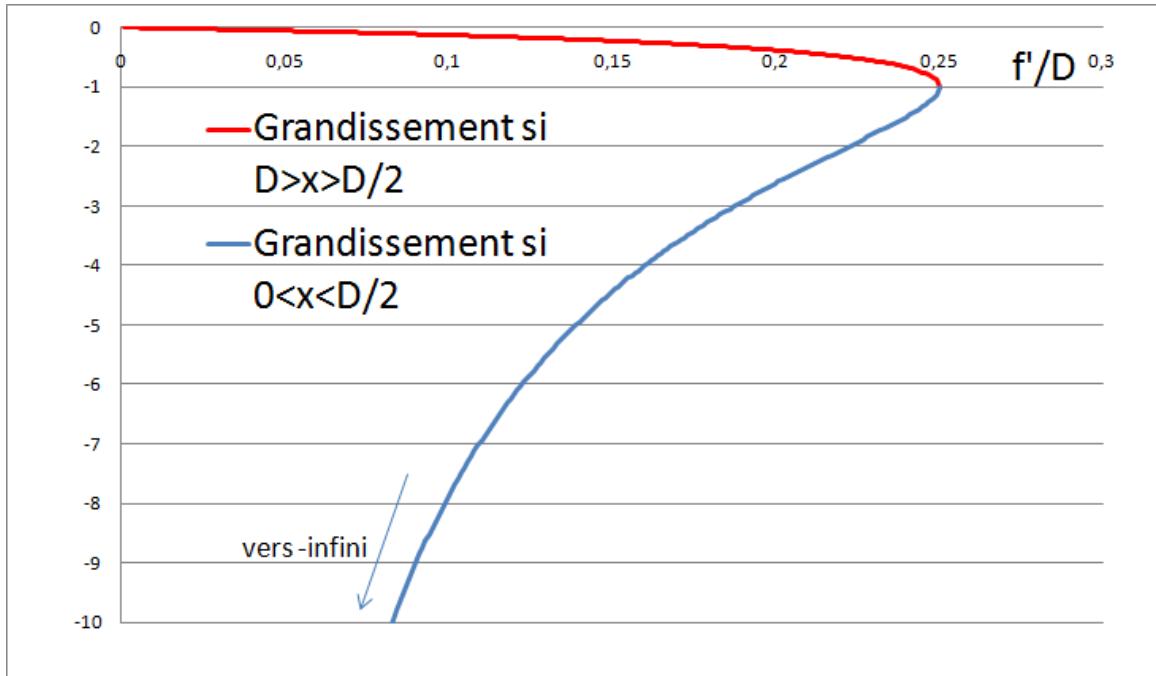


FIGURE 30 – Grandissement en fonction de la focale de la lentille de projection.

## C Complément sur Köhler

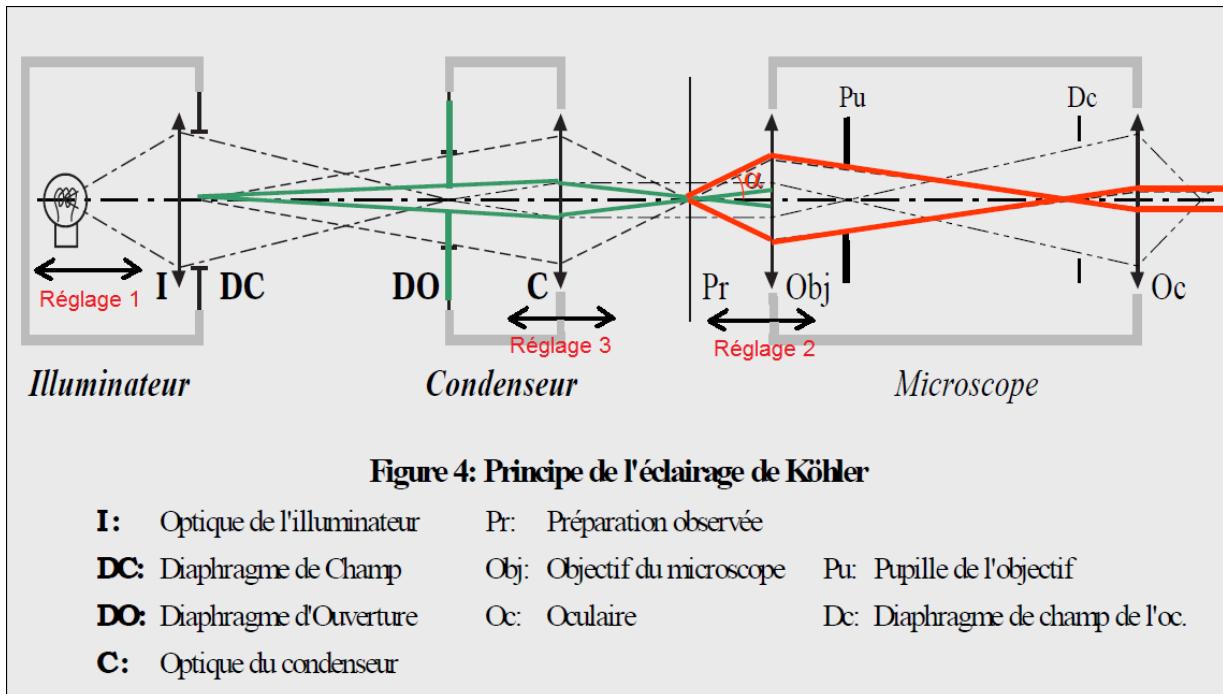


Figure 4: Principe de l'éclairage de Köhler

- |     |                           |      |                              |
|-----|---------------------------|------|------------------------------|
| I:  | Optique de l'Illuminateur | Pr:  | Préparation observée         |
| DC: | Diaphragme de Champ       | Obj: | Objectif du microscope       |
| DO: | Diaphragme d'Ouverture    | Oc:  | Oculaire                     |
| C:  | Optique du condenseur     | Pu:  | Pupille de l'objectif        |
|     |                           | Dc:  | Diaphragme de champ de l'oc. |

FIGURE 31 – Principe de l'éclairage de Köhler

D'après les travaux d'Abbe, la formation d'une image de qualité dépend de deux éléments capitaux. L'objectif avec son ouverture numérique (ON) et la façon d'éclairer le spécimen.

Pour simplifier, la lumière peut avoir deux structures différentes selon que ces rayons sont parallèles ou non. Nous avons deux types d'éclairages opposés l'un est appelé cohérent et l'autre incohérent. L'éclairage parfait qui rend le mieux les détails, est l'éclairage totalement incohérent. Dans ce cas le pouvoir séparateur est maximal, il y a le minimum d'artefacts mais l'image est

sans contraste, sans profondeur de champ. A l'inverse plus l'éclairage est cohérent plus l'image est contrastée plus la profondeur de champ augmente, plus la résolution diminue et plus les artefacts augmentent à cause de la diffraction qui va créer des structures inexistantes. Dans l'éclairage de Köhler, c'est le rôle du diaphragme d'ouverture de régler le degré de cohérence de la lumière.

L'optique I de l'illuminateur est éclairée très uniformément par la lampe. L'éclairage de la préparation, par l'image de la lentille I (limitée par le diaphragme de champ DC) formée par l'optique C du condenseur dans le plan de la préparation Pr est donc uniforme. Par contre, l'image du filament, de texture et d'éclairage plus ou moins uniformes, est formée dans le plan du diaphragme d'ouverture DO. Ce dernier étant par construction dans le plan focal objet de l'optique C du condenseur, l'image du filament est rejetée à l'infini et est donc le plus éloignée possible de la préparation.

Cette configuration possède des propriétés remarquables. Le diaphragme d'ouverture étant dans le plan focal du condenseur, la pupille de sortie du système (DO,C) est donc rejetée à l'infini (système télénestrique image). Ceci signifie que, en sus de recevoir le même éclairage, tous les points de la préparation sont éclairés par le même cône de lumière, ce qui, associé au caractère télénestrique objet de l'objectif du microscope, garantit une réponse photométrique identique pour tous les points du champ du microscope, ce qui est très important en pratique et serait difficile à obtenir dans d'autres configurations... De surcroît, l'éclairage Köhler permet de régler, de manière totalement indépendante l'une de l'autre, la taille du champ éclairé sur la préparation (contrôlé par le diaphragme de champ DC (Il est souvent utile, pour des problèmes de lumière parasite, de limiter la zone éclairée à celle vue ou même simplement étudiée par le microscopiste)) et l'angle du cône de lumière frappant chaque point de la préparation, ou, autrement dit, l'ouverture numérique de l'éclairage (contrôlé par le diaphragme d'ouverture DO (Ceci règle la quantité de lumière totale reçue mais aussi et surtout la manière dont se forme l'image finale de l'objet observé, par son influence sur la cohérence partielle de l'éclairage)). L'éclairage Köhler assure par ailleurs, par conception même, la conjugaison des plans du diaphragme d'ouverture DO et de la pupille Pu de l'objectif. Il en va de même pour le plan du diaphragme de champ DC de l'éclairage et celui du diaphragme de champ Dc de l'oculaire. Par conséquent, l'éclairage Köhler n'introduit aucun vignettage et l'uniformité de l'illumination du champ observé peut effectivement être obtenue.

Ainsi, à l'exception des modèles de très bas de gamme, l'éclairage Köhler est systématiquement intégré dans le statif de tous les microscopes actuels. Il est souvent partiellement préréglé, en particulier en ce qui concerne les centrages. La conjugaison Diaphragme de Champ - Préparation (par translation du condenseur) incombe cependant toujours à l'utilisateur afin de permettre l'observation de préparations réalisées sur des lames d'épaisseurs différentes.

Source :

[http://prn1.univ-lemans.fr/prn1/siteheberge/optique/M11G1\\_JSurrelHSauer/co/Contenu\\_03.html](http://prn1.univ-lemans.fr/prn1/siteheberge/optique/M11G1_JSurrelHSauer/co/Contenu_03.html)

## D Pouvoir de résolution et microscopie à fond noir

Le pouvoir de résolution d'un instrument donne sa capacité à résoudre deux points objets proches l'un de l'autre. En éclairage incohérent, on connaît le critère de Rayleigh, où l'on somme les intensités des taches d'Airy. En éclairage cohérent, il faut cependant sommer les amplitudes ce qui provoque des phénomènes d'interférence entre les points images. Le critère est alors légèrement modifié.

Il est possible de faire de la strioscopie avec le microscope. Pour cela, nous avons un objectif

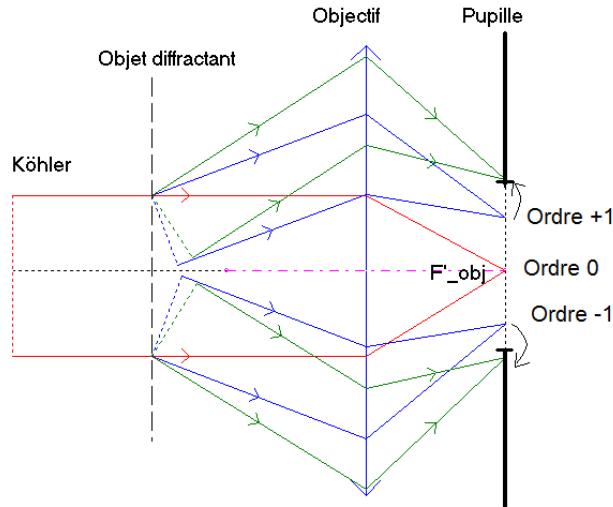


FIGURE 32 – Plan de Fourier du microscope. Pour les détails de petites dimension, les ordres de diffraction sont diaphragmés par la pupille et on ne peut les voir à l'image.

équipé d'une pastille noire au centre de sa pupille capable de couper l'ordre 0 de la transformée de Fourier de l'objet (merci Christian !). Si on utilise cet objectif et que l'on ferme progressivement l'iris du microscope, on voit le contraste s'inverser : les détails deviennent lumineux sur fond noir. On observe bien le phénomène avec le réseau 100 traits/mm mais il est plus démonstratif avec une plume ou une surface rayée. C'est la microscopie à fond noir. S'il reste 2 minute au montage, il peut être très spectaculaire de montrer cette technique.

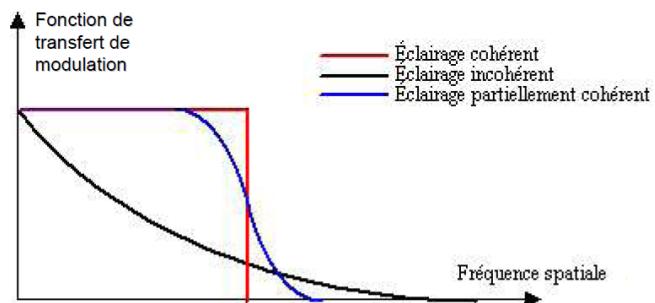


FIGURE 33 – Fonction de transfert de modulation d'un objectif

De manière générale, les microscopistes vont préférer un éclairage partiellement cohérent de l'objet à observer, au vue de la fonction de transfert en fréquence spatiale du microscope appelée aussi fonction de transfert de modulation (cf figure 33).

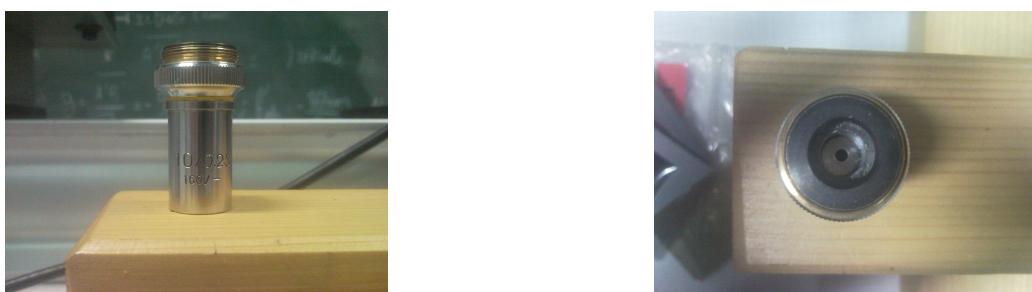


FIGURE 34 – Objectif fabriqué pour faire la microscopie à fond noir.

## E Tableau présenté

### I Généralités

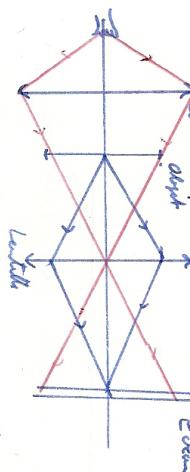
#### 1) Exemples de systèmes projectifs

##### a. La rétroprojection

Image à une lentille : on ne voit rien !



Nécessité d'un bon éclairage :

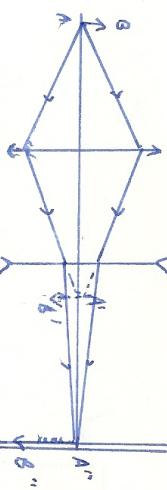


La lentille devra être au centre ce qui limite les aberrations et empêche tout le champ de l'objectif

##### b. L'objectif

Pour faire une grande image d'un objet relativement éloigné, il faut un objectif de grande focale, mais compact

$$\begin{aligned} f_1 &= 300 \text{ mm} \\ f_2 &= 150 \text{ mm} \\ \text{th. voie de champ } (f_1 = 150 \text{ mm}) \\ \text{en } F_1 \text{ double le champ vu } \end{aligned}$$



**II. Étude complète d'un instrument oculaire : le microscope**  
"Là où finit le télescope  
le microscope commence". D. Hugo

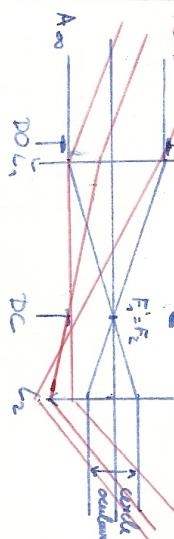
Profondeur de champ :  $f_{obj}$

proportion de l'objectif proportion de l'objectif utilisée est une grille graduée et inclinée : plan objectif : plan

l'objectif et l'œil sont alignés et convergents. Le microscope converge l'objectif et l'œil. La grille graduée et inclinée est conjuguée avec le cercle oculaire de façon à avoir un éclairage uniforme et, si  $D_2$  est assez petit, un éclairage cohérent.

1.) Éclairage de Höhnel  
proportion de champ

2.) Un système à coulissage : la lentille asténométrique

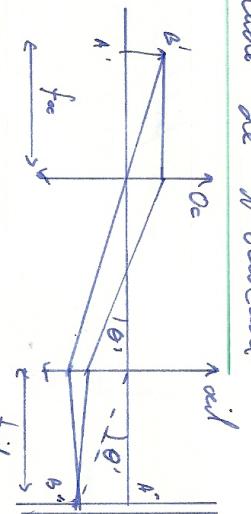


$$\begin{aligned} A_0 &\xrightarrow{\text{DO}} A' \\ f_1 &= f_2 \\ f_2 &= 150 \text{ mm} \\ \text{th. voie de champ } (f_1 = 150 \text{ mm}) \\ \text{en } F_1 \text{ double le champ vu } \end{aligned}$$

1.)  $A'B' = \frac{f}{f_0} A_0 B'$  mm  
 $f = -\frac{A_0 B'}{A_0 B} = \pm$   
 $f_{obj} = -\frac{\Delta}{f} = \pm \text{ mm}$

Construction = 10

### 3° Etude de l'oculaire



Puissance de l'oculaire :

$$P_{oe} = \frac{A'B'}{f'_oe} = \pm 5$$

On en déduit :  $f'_{oe} = \frac{1}{P_{oe}} = \pm \text{mm}$

$$G_{oe} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{d_m}{P_{oe}} = \pm$$

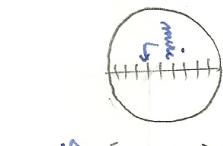
### 4) Grossissement du microscope

$$G_{micro} = |G_{ocu} \times g| = \pm$$

$$G_{construction} = 100$$

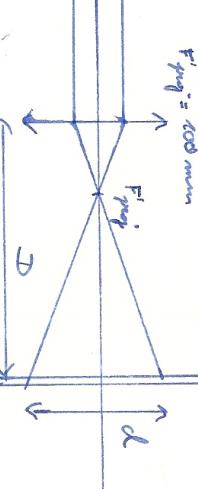
$$\downarrow \text{pour} \quad \text{champ stéréo} = \text{mm}$$

### 5° Puissance d'ouverture numerique



$$r_{pyp} = 100 \text{ mm}$$

centre  
ouïeain



$$a = \frac{d f'_{pyp}}{D - f'_{pyp}} = \pm \text{mm}$$

On utilise la formule la plus importante de l'optique géométrique, qui nomme la formule d'Abbe :  $\overline{AB}_{min} = \overline{A'B'}_{min}$

on en déduit la grandeur la plus importante du microscope : puissance numerique

$$ON = \sin \alpha = f_{pyp} \sin \frac{\alpha}{2f'_{pyp}} = \pm$$

On en déduit ensuite le diamètre de la pupille de l'objectif (diaphragme d'ouverture)

$$h = \frac{\Delta a}{f'_{pyp}} = \text{mm}$$

### 6° Pouvoir de résolution

On obtient des valeurs de 100, 300 et 600 lp/mm

On ne voit plus les traits pour  $N=600 \text{ lp/mm}$   
donc le microscope a atteint sa limite de résolution : c'est donc un passe-bas pour les fréquences spatiales. Si on regarde le plan de la pupille où se trouve la TF de l'objectif, on voit que les ordres 1 sont coupés

$$TF : \quad \begin{matrix} 100 \\ 300 \\ 600 \end{matrix} \text{ lp/mm}$$