

MP 07 : Instruments d'optique

Elio Thellier & Dihya Sadi

Session 2021

1 Introduction

[HOUARD]

[EPREUVE A 2015] [lien ici !!](#)

Le premier instrument d'optique est l'oeil mais pour sonder l'infiniment petit ou l'infiniment grand il possède des limites. Par exemple pour un objet situé à son punctum proximum la résolution de l'oeil emmétrope est d'au mieux 0,1 mm. Nouveaux instruments adaptés aux besoins d'observation.

- Instruments projectifs : font une image sur un écran
- Instruments oculaires : font une image à l'infini afin que l'oeil la receptionne sans accommodation

On va exposer sur banc optique quelques concepts généraux avant de passer à l'étude d'un instrument réel commercial, le microscope.

2 Un instrument projectif : le rétroprojecteur

Principe

Le rétroprojecteur fait l'image d'un objet de format A4 sur un grand écran situé assez loin.

Matériel

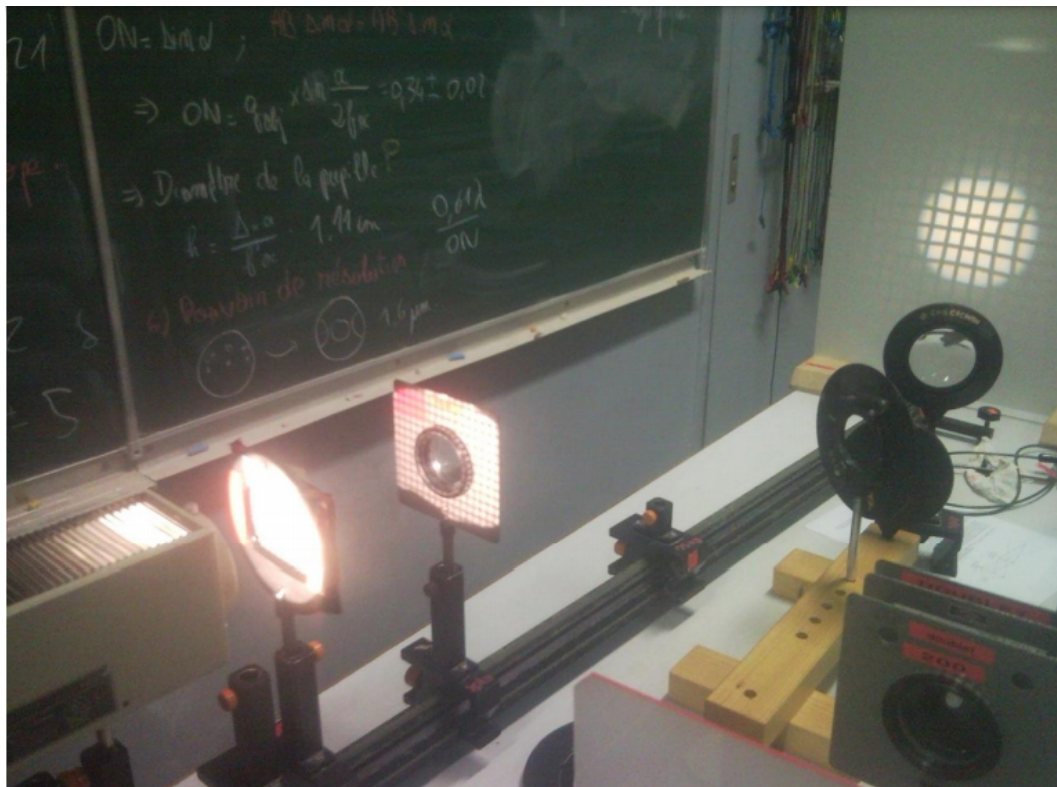
- Objet : grille
- Doublet de 150mm avec une faible ouverture
- QI + AC
- Condenseur

Protocole

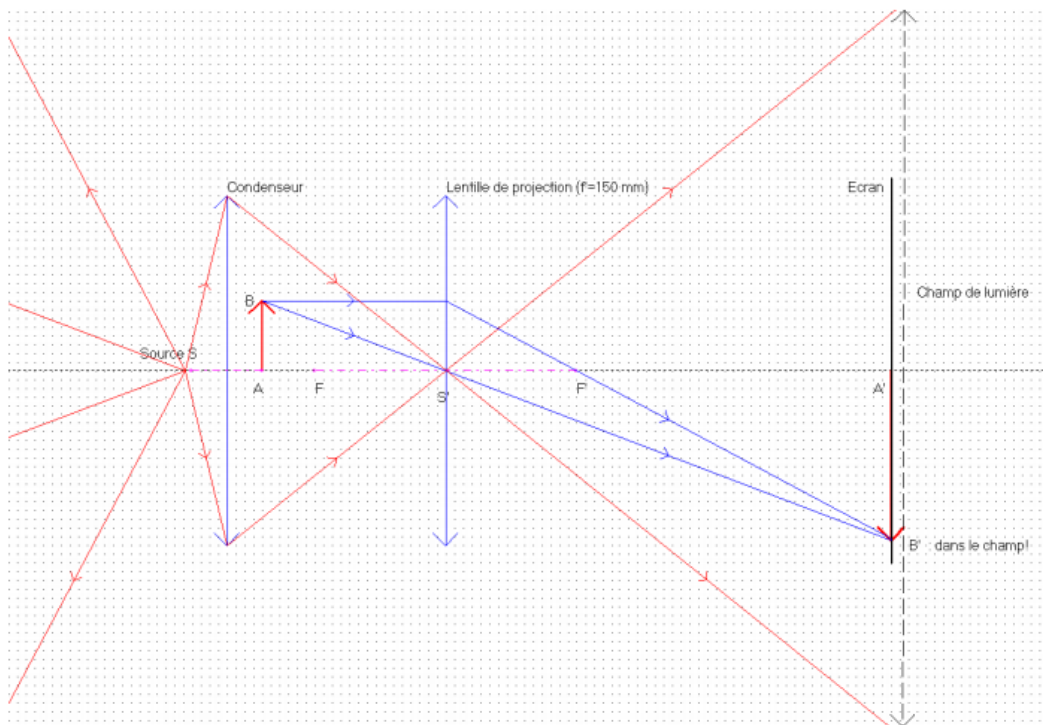
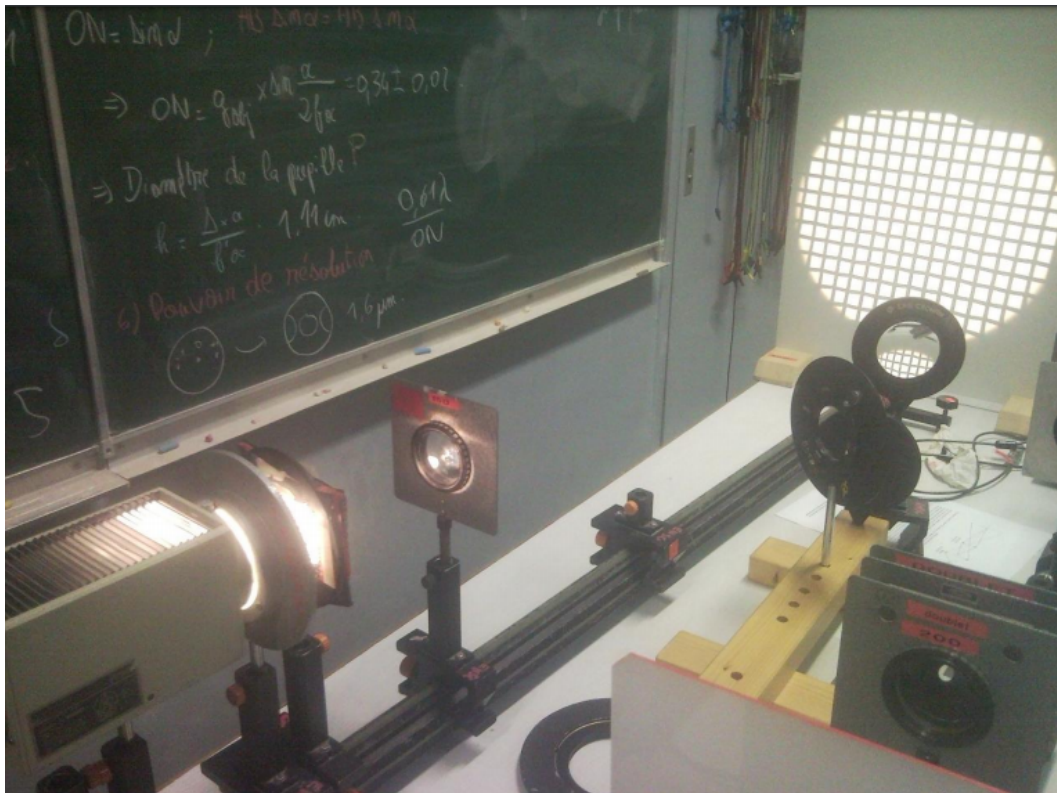
- On prends une grille comme objet et une lentille de 150 mm. Peu importe où on place l'écran on ne voit rien. Tracé optique ne représentent pas réellement les rayons lumineux. On ajoute une lampe. (en rouge les rayons lumineux en bleu les rayons de construction)



- L'image observée est de mauvaise qualité : 1) le champ observé est limité par la lentille car les rayons qui traversent la lentille ne couvrent qu'une petite partie de l'objet 2) on observe des aberrations géométrique et chromatiques sur les bords car la lentille ne travaille pas au centre dans les conditions de gauss.



- On ajoute une deuxième lentille appelée condenseur qui va 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



Le champ est agrandi, aberrations limitées. Sur un rétroprojecteur réel le rôle du condenseur est assuré par une grande lentille de Fresnel et l'image est ensuite renversée par un miroir.

Transition : première chose à noter : il faut distinguer les rayons de construction, qui nous servent simplement à prévoir la position de l'image, des rayons de lumière. Deuxième chose : la qualité de l'éclairage influe directement sur la qualité de l'image : aberrations chromatiques et géométriques dont on peut discuter si y a le temps.

3 Un instrument oculaire : la lunette astronomique

Principe

Le but de la lunette astronomique est de faire l'image à l'infini d'un objet à l'infini, tout en permettant d'augmenter la luminosité et la taille apparente des objets. Composée d'un objectif et d'un oculaire. Elle est afocale : le foyer image de l'objectif est à la même position que le foyer objet de l'oculaire. De sorte à ce que, l'objet observé se situant à l'infini, l'image finale soit aussi à l'infini. Ainsi l'oeil n'accomode pas !

Matériel

- Objet : une grille sur dépoli
- Doublet de 200mm
- Doublet de 500mm
- Doublet de 300mm avec un diaphragme accolé (objectif)
- Doublet de 150mm (oculaire)
- Diaphragme circulaire
- Miroir plan pour auto-collimation
- Ecran
- Lampe QI+AC
- Banc optique

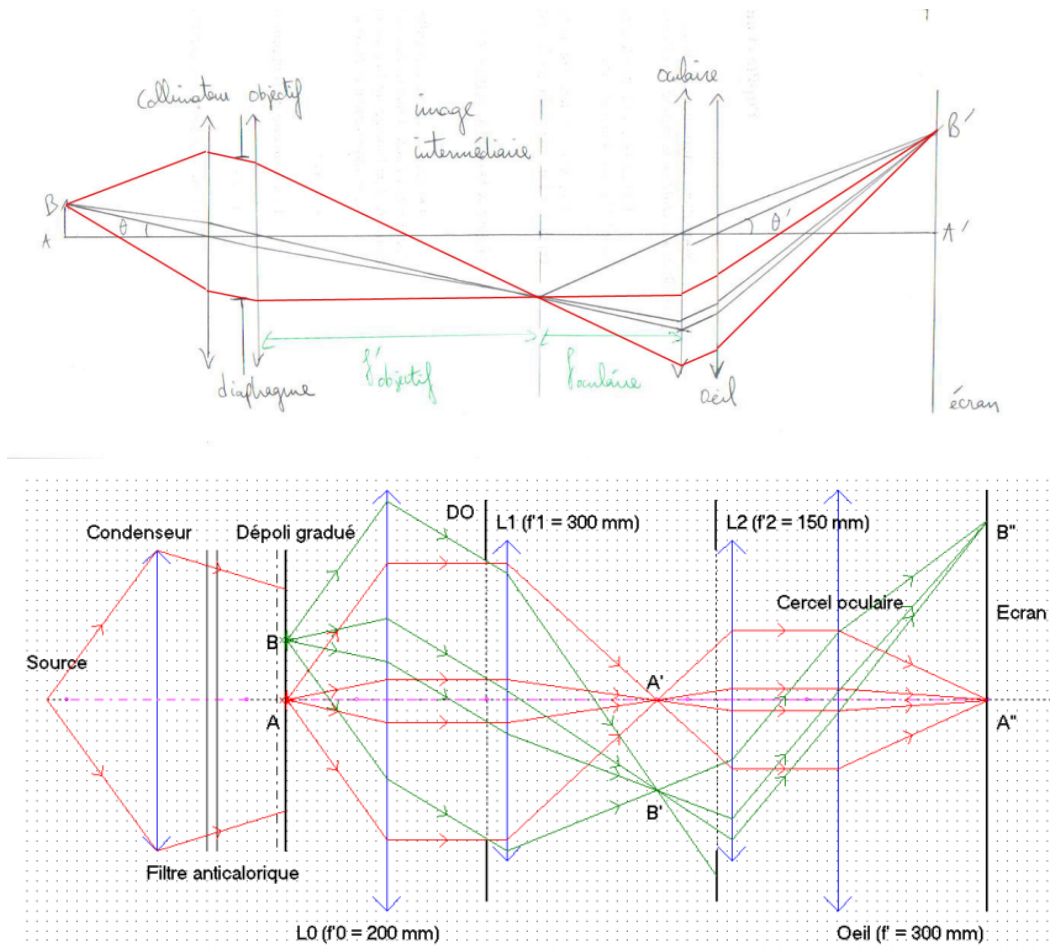
Protocole

- Collimateur : On commence par simuler un objet à l'infini avec la lampe, le filtre AC, la grille objet, que l'on place au foyer de la lentille de 200mm par autocollimation. Utiliser un bout de papier pour visualiser le retour.
- Oeil fictif : Maintenant on simule un oeil fictif en projetant l'image à l'infini sur un écran mobile avec une lentille de 500mm. On place l'oeil à à peu près exactement 50cm du collimateur.

- Là on aimerait connaître la taille de l'objet pour pouvoir quantifier le grossissement de la lunette. Toutefois, c'est un système afocal donc la grandeur d'entrée, comme la grandeur de sortie, est un angle, donc on définit le grossissement comme le rapport de ces deux angles. Avant l'ajout de la lunette on mesure la taille d'une graduation sur l'écran, on a :

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

- Maintenant on va ajouter la lunette afin de grossir l'image obtenue. Pour l'instant le diaphragme accolé est grand ouvert on s'en occupera plus tard. Pour ce faire on accole la lentille de 300 au collimateur et la lentille de 150 à l'oeil fictif, puis on ajuste, de sorte à bien avoir un système afocal



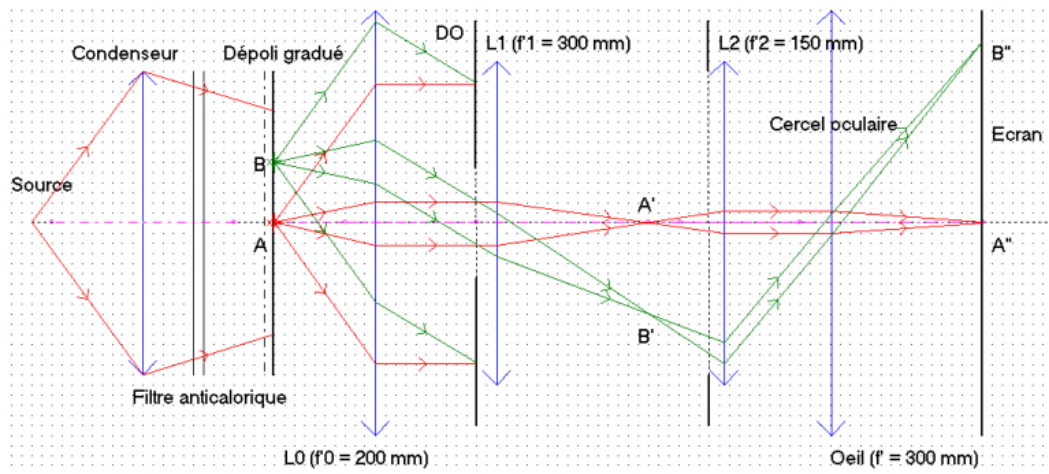
- On mesure à nouveau la taille d'une graduation sur l'écran :

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

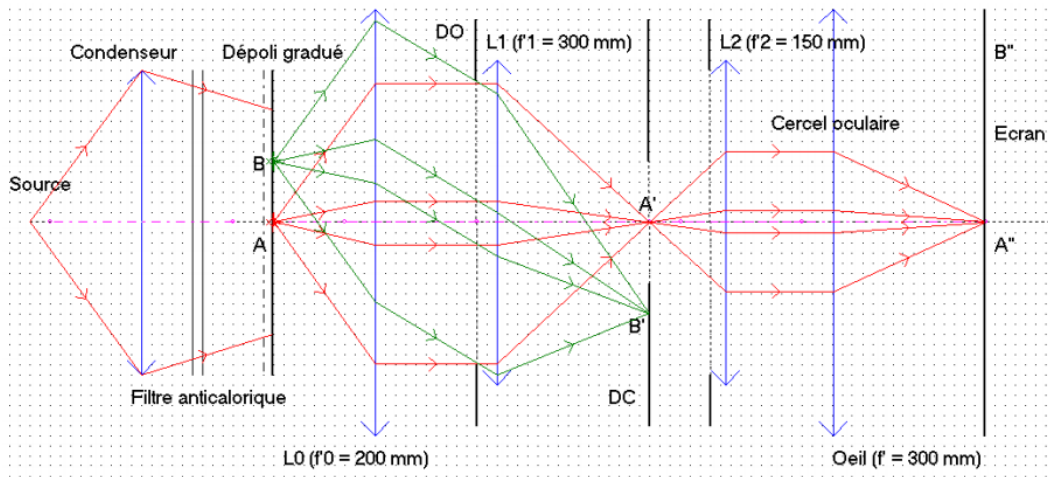
On en déduit le grossissement avec les incertitudes, on compare à la valeur théorique attendue de 2 ($G = \frac{f_{obj}}{f_{oc}} = \frac{300}{150}$) :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{A'B'_{avec}}{A'B'_{sans}}$$

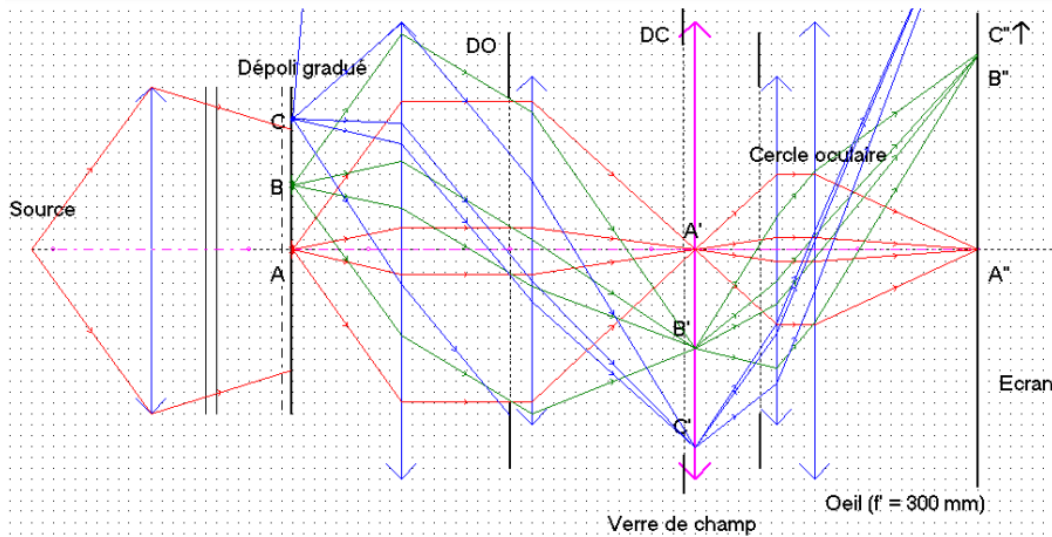
- Maintenant grâce à ce montage on va pouvoir détailler certains éléments importants du montage notamment la notion de diaphragme de champ et d'ouverture.
- Regardons le schéma optique : qu'est ce qui limite la luminosité ? La monture de l'objectif. Ainsi en jouant sur l'ouverture du diaphragme qui y est accolé on joue sur la luminosité. C'est ce qu'on appelle un diaphragme d'ouverture.



- Qu'est ce qui limite l'étendue de la tâche lumineuse ? la monture de l'oculaire. On voit bien qu'il coupe certains rayons. Et en effet le bord de l'image est moins lumineux. On appelle ça le champ de contour. Pour contrôler le champ on peut utiliser un autre diaphragme, que l'on appelle diaphragme de champ. Ou le placer ? Dans le plan de l'image intermédiaire donc au foyer de l'objectif et de l'oculaire ! On voit ainsi qu'on peut ne garder que le champ de pleine lumière, ce qui améliorera la qualité de l'image mais diminue le champ.



- Pour augmenter le champ on peut placer une lentille qu'on appelle verre de champ. On la place au foyer de l'objectif et de l'oculaire, à la place du diaphragme de champ. Pourquoi ça marche ? Les rayons de l'image intermédiaire sont rabattus au centre de l'oculaire ce qui permet de faire l'image d'un plan grand champ sur l'écran. Et sa monture sert aussi à diaphragmer le champ de contour ! On vérifie bien que le champ est doublé mais le grossissement reste identique.



4 Un instrument oculaire réel : le microscope

Principe

Le microscope fait l'image d'un objet de taille microscopique sur la rétine de l'oeil. Pour avoir un grandissement plus grand que 1 il nous faut donc un objectif de très courte focale au plus près de l'objet puis un oculaire pour renvoyer l'image intermédiaire à l'infini.

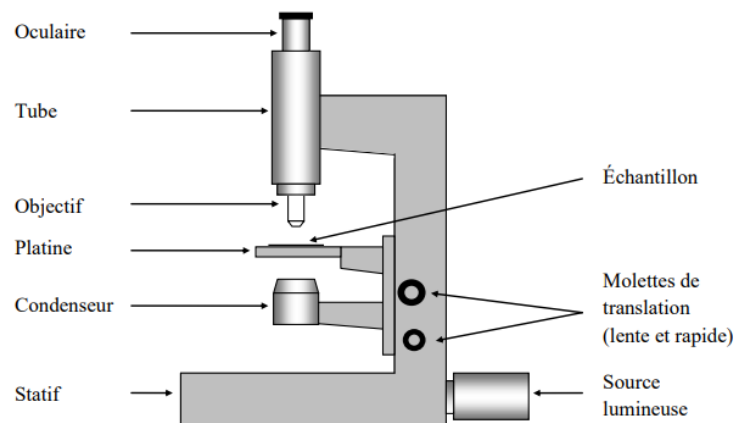
Matériel

- Microscope commercial
- Lentille de 1m
- Grand écran blanc
- Lampe QI avec un diaphragme fixé au condenseur

4.1 Théorie

Un microscope optique élémentaire à champ large se compose de 4 parties :

- Le tube optique, aux extrémités duquel se trouvent deux systèmes optiques centrés convergents de même axe optique : objectif, du coté de l'objet, et oculaire, du coté de l'oeil
- Platine sur laquelle est placé l'objet
- Dispositif de translation du tube
- Système d'éclairage de l'objet : source + condenseur + diaphragme



4.2 Travail expérimental

4.2.1 Principe de l'éclairage de Kohler

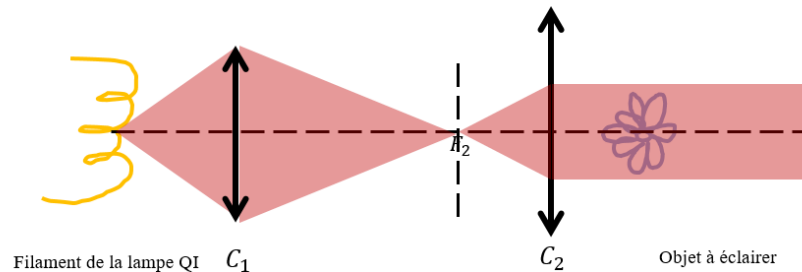
Principe de l'éclairage de Köhler

On dispose d'une source lumineuse type lampe blanche avec un filament. On veut réaliser un éclairage de Köhler c'est-à-dire qu'on veut :

1. Eclairer l'objet de manière homogène
2. Disposer d'un diaphragme d'ouverture pour contrôler uniquement l'intensité lumineuse avec laquelle on éclaire l'objet
3. Disposer d'un diaphragme de champ pour contrôler uniquement l'étendue spatiale sur laquelle on éclaire l'objet

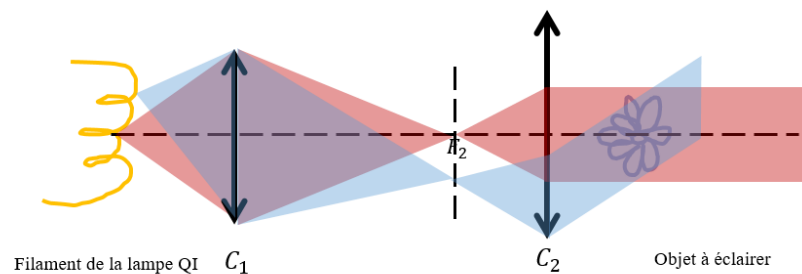
Etape 1 : éclairer la source de manière homogène

Pour éclairer l'objet de manière homogène on veut qu'un point du filament donne sur l'objet un faisceau à l'infini, donc pour réaliser cela on place deux lentilles comme suit de sorte à ce que l'image du filament par l'une tombe sur la focale de l'autre



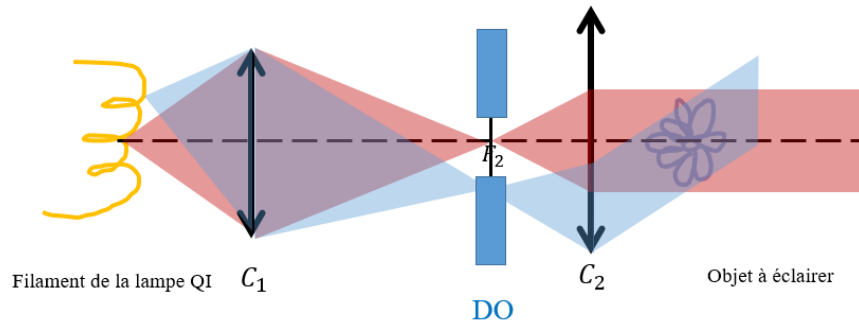
Etape 1 : éclairer la source de manière homogène

Quel que soit le point du filament qu'on considère, les faisceaux qu'il produira éclaireront toujours de la même manière l'objet :



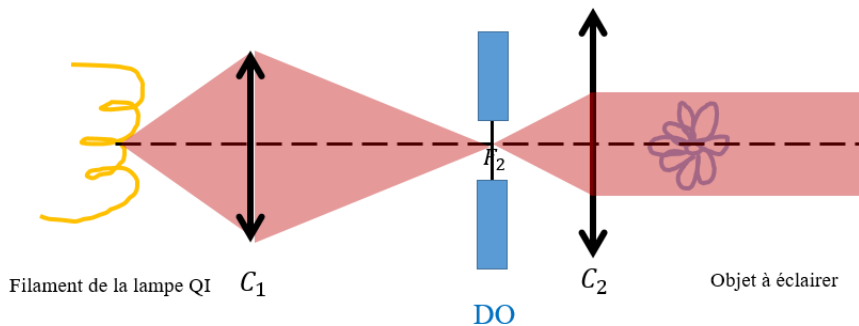
Etape 2 : créer un diaphragme d'ouverture

Maintenant si on veut intervenir sur l'intensité lumineuse d'éclairage de la source il suffit « d'empêcher » les faisceaux d'arriver sur l'objet et pour cela il suffit de placer un diaphragme sur le plan focal objet de la lentille C_2 : en effet ainsi on annule l'impact du rayon lumineux hors axe sans modifier la zone d'éclairage.



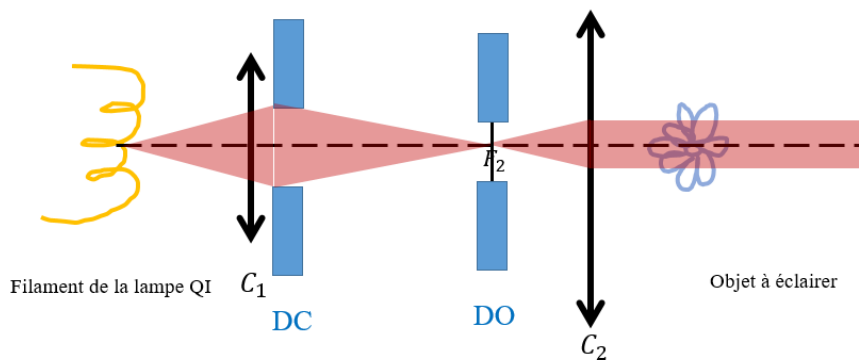
Etape 3 : créer un diaphragme de champ

Enfin si on veut intervenir sur l'étendue de l'éclairement de la source il suffit de placer un diaphragme juste après C_1 .



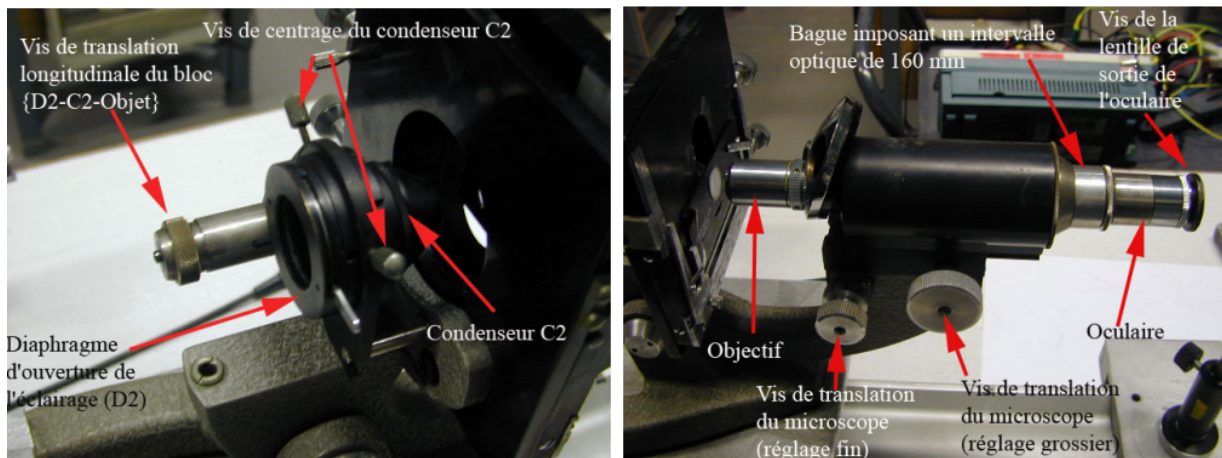
Etape 3 : créer un diaphragme de champ

Enfin si on veut intervenir sur l'étendue de l'éclairement de la source il suffit de placer un diaphragme juste après C_1 .

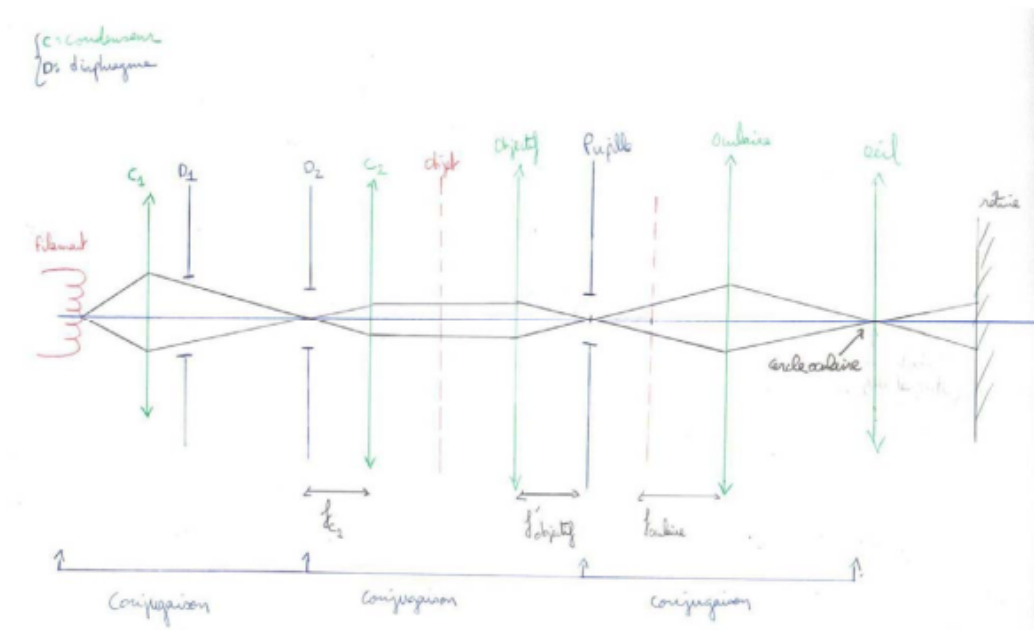


4.2.2 Protocole de réglage du microscope commercial

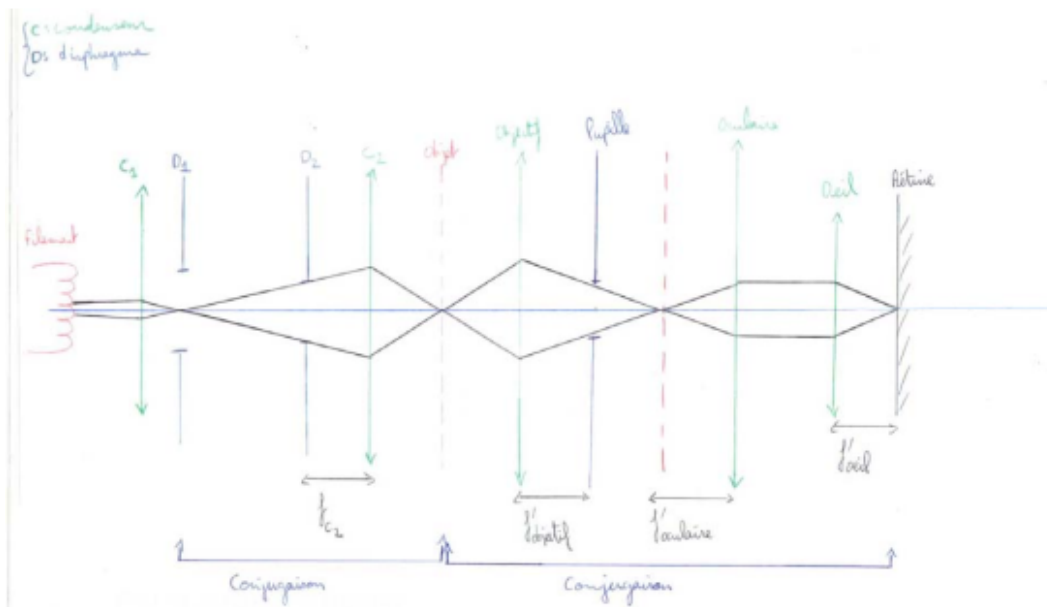
- On commence par régler l'oculaire : on place un écran vraiment loin et on dévisse au maximum la bague extrême (attention à maintenir le reste pour que ça ne tourne pas avec). Le réticule paraît alors entièrement flou. On revisse petit à petit jusqu'à ce que la mire devienne nette, alors l'oculaire est réglé à l'infini. Ne pas continuer à visser, même si la mire aura toujours l'air nette, c'est simplement que l'oeil accomode, mais elle n'est plus sur le plan focal de l'oculaire.
- Maintenant il faut éclairer correctement le microscope. On réalise ce qu'on appelle l'éclairage de Kohler :



- Attention bien utiliser la lampe blanche avec le diaphragme intégré (ce sera le diaphragme de champ). La rapprocher au maximum du microscope sinon on perd trop de lumière.
- On fait l'image du filament sur le diaphragme d'ouverture du microscope (D2 sur la photo) en translatant simplement le réglage longitudinal de la lampe QI. Comme D2 est dans le plan focal objet de C2 et que la pupille est dans le plan focal image de l'objectif, alors D2 et la pupille sont conjugués : cf schéma juste en dessous. On est content parce que le conjugué de la pupille à travers la suite du montage est le cercle oculaire, il est donc conjugué avec le filament, et on voit avec le schéma que chaque point de la source éclaire uniformément la rétine de l'oeil (qui est en fait notre oeil fictif).



- Maintenant on place notre objet, une mire, dans les étriers. On fabrique un oeil fictif avec une lentille de 1m en sortie et un écran dans son plan focal image. Puis en déplaçant le microscope avec les deux vis de translations, fines et grossières, la mise au point de l'image de la mire. Ensuite on ferme D1 (qui limite le champ) et on fait la mise au point sur les bords du diaphragme en déplaçant le bloc D2-C2 avec la vis de translation longitudinale de ce bloc. Puis on la centre en utilisant les 2 petites vis. Utiliser un tournevis si on a des gros doigts. On a ainsi conjugué D1 avec l'objet et l'objet avec la rétine de l'oeil !

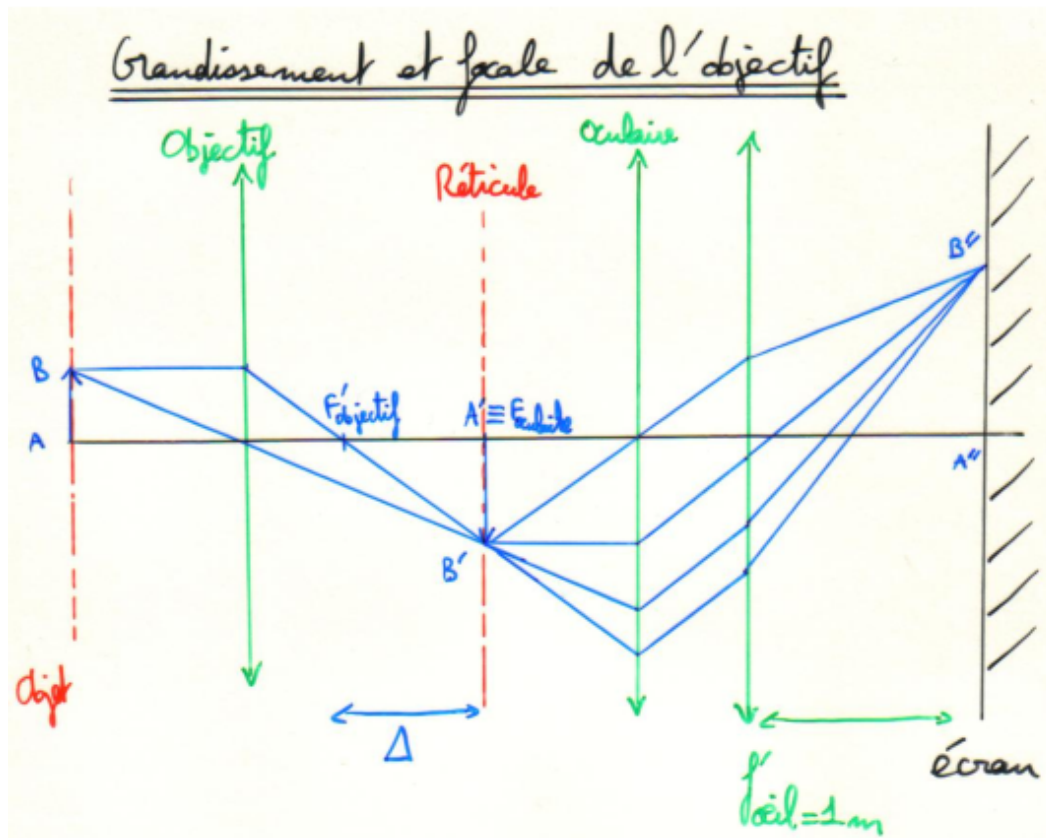


- Réajuster le filament en refaisant son image sur D2 parce qu'on a un peu défait la première étape, pour avoir de nouveau un bon diaphragme d'ouverture.
- Maintenant qu'on a bien fabriqué un diaphragme de champ (D1) et un diaphragme d'ouverture (D2) on les ajuste comme il faut pour avoir une bonne qualité d'image : on commence par rouvrir D2 et fermer D1 puis on l'ouvre petit à petit jusqu'à ce que D1 ne limite plus le champ. Ensuite on rouvre D2 pour avoir une image suffisamment lumineuse.

4.2.3 Mesure du grandissement de l'objectif



On utilise comme objet la mire. Pour caractériser le grandissement de l'objectif on veut connaître la taille de l'image intermédiaire qui est formée par l'objectif au niveau du plan focal objet de l'oculaire. D'où l'intérêt d'avoir placé le réticule dans le plan focal objet de l'oculaire, le réticule est alors utilisé comme "règle" !



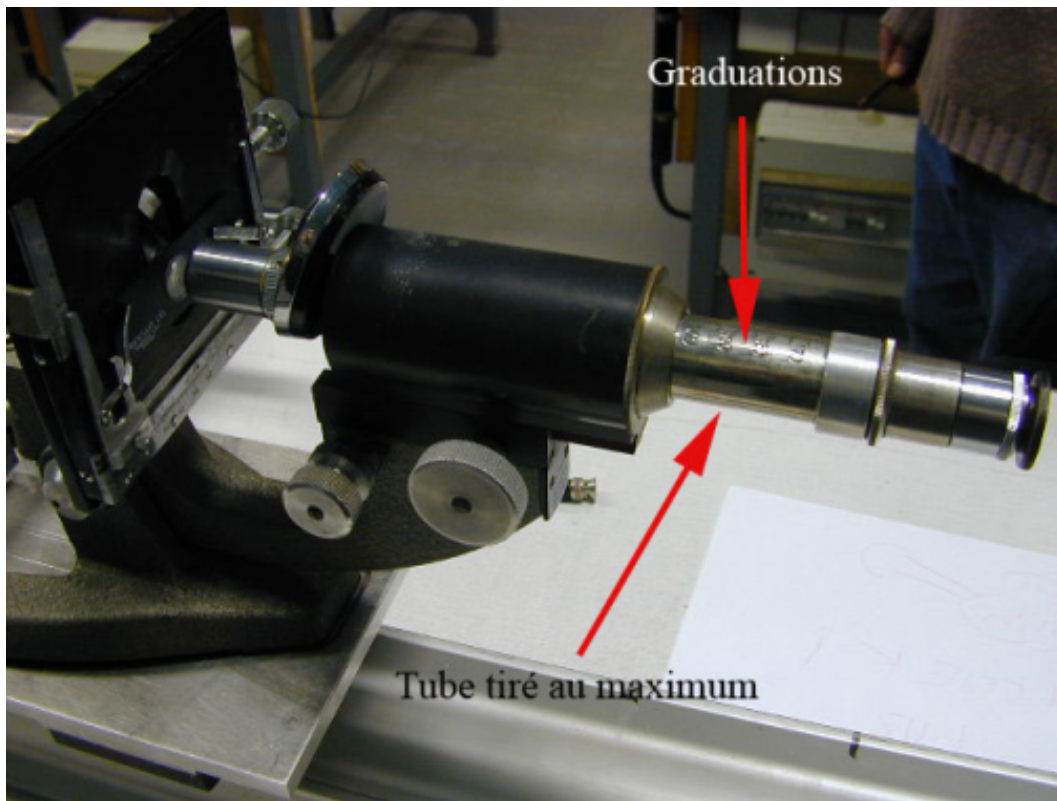
On utilise le schéma optique : On en déduit :

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

Où Δ est l'intervalle optique. On varie Δ et on mesure à chaque fois le grandissement :

- A l'écran on mesure une distance h de 1 cm de réticule, qui vaut à l'écran h'
- A l'écran on mesure une distance AB de mire qui vaut, sur l'écran, $A''B''$
- On en déduit $A'B' = A''B'' \frac{h'}{h}$ puis le grandissement de l'objectif $g = \frac{A'B'}{AB}$

On réalise la même chose pour plusieurs valeurs de l'intervalle optique, que l'on fait varier comme dans la photo ci-dessous, on trace une droite, on fait une régression linéaire, on en déduit la valeur de la focale de l'objectif. Incertitudes estimées avec les incertitudes sur les mesures de position au réglet, à la demi-graduation près.



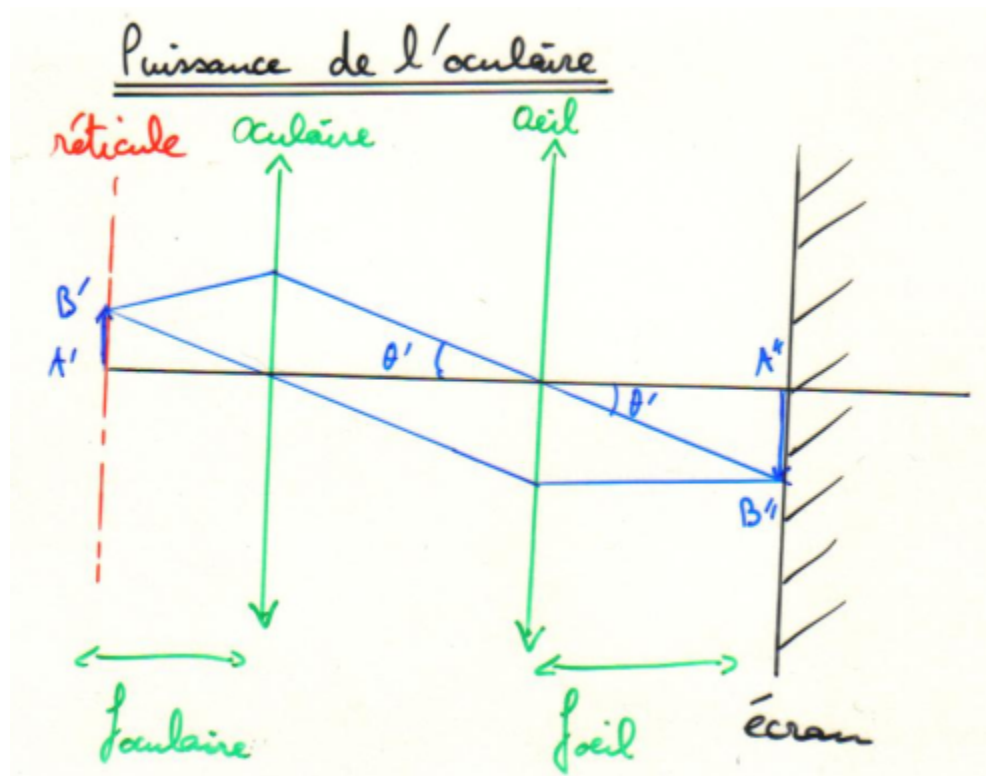
Remarque : on est censé trouver 10 pour $\Delta = 160mm$, ce n'est pas le cas. On suppose qu'il y a une erreur sur l'étalonnage du tube. On pourrait ajouter une incertitude sur l'intervalle optique pour prendre cela en compte, la mettre à 5mm.

4.2.4 Grossissement de l'oculaire

Pour l'oculaire la grandeur d'entrée est une longueur (taille de $A'B'$ l'image intermédiaire) mais la grandeur de sortie est un angle car on envoie tout cela à l'infini.

On peut définir ce qui est appelé la puissance de l'oculaire, rapport de l'angle sous lequel est vu le réticule sur la taille du réticule:

$$P_{oc} = \frac{\theta'}{A'B'} = \frac{A''B''}{f'_{ocil}A'B'} = \frac{1}{f'_{oc}}$$

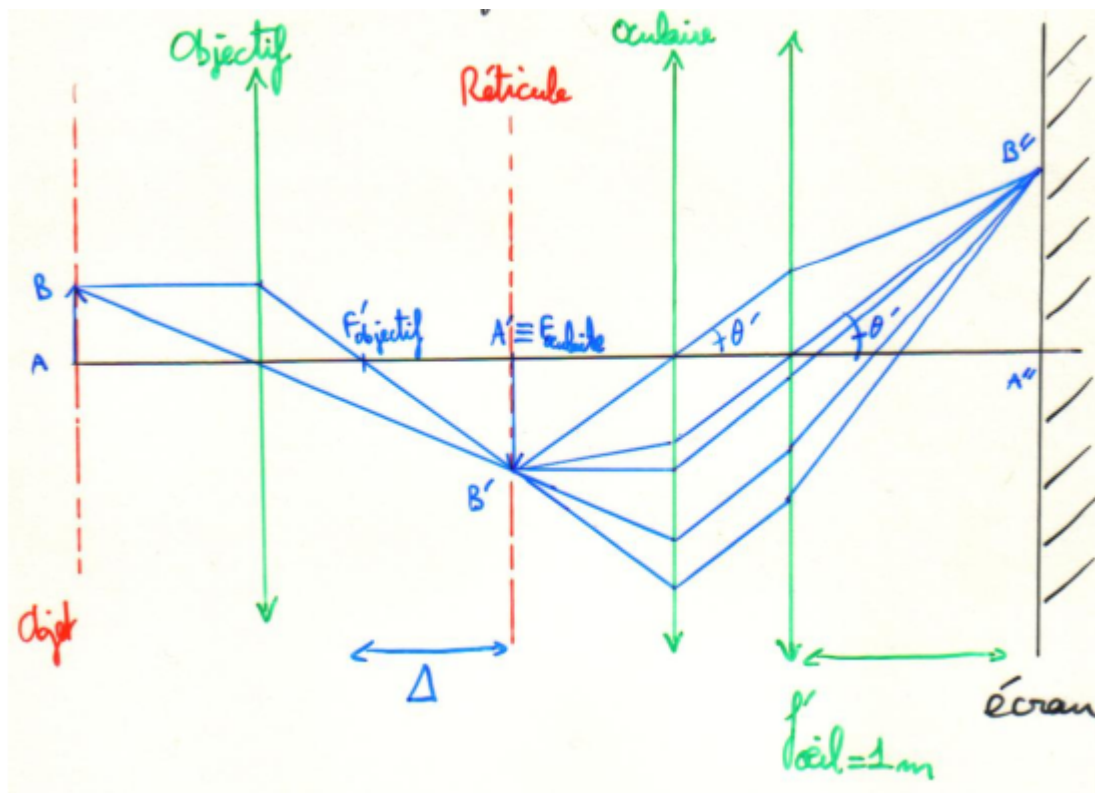


On mesure donc simplement la taille du réticule sur l'écran.
 On peut en déduire la focale de l'oculaire qui est attendue à 25mm.
 On peut aussi utiliser le grossissement commercial :

$$G_{c,oc} = \frac{\theta'}{\theta}$$

Où θ' est l'angle de sortie sous lequel le réticule est vu à travers l'oculaire, donc $\theta' = \frac{A''B''}{f'_{oeil}}$ et θ est l'angle sous lequel serait vue l'image intermédiaire si on la regarde au punctum proximum.

4.2.5 Grossissement total du microscope



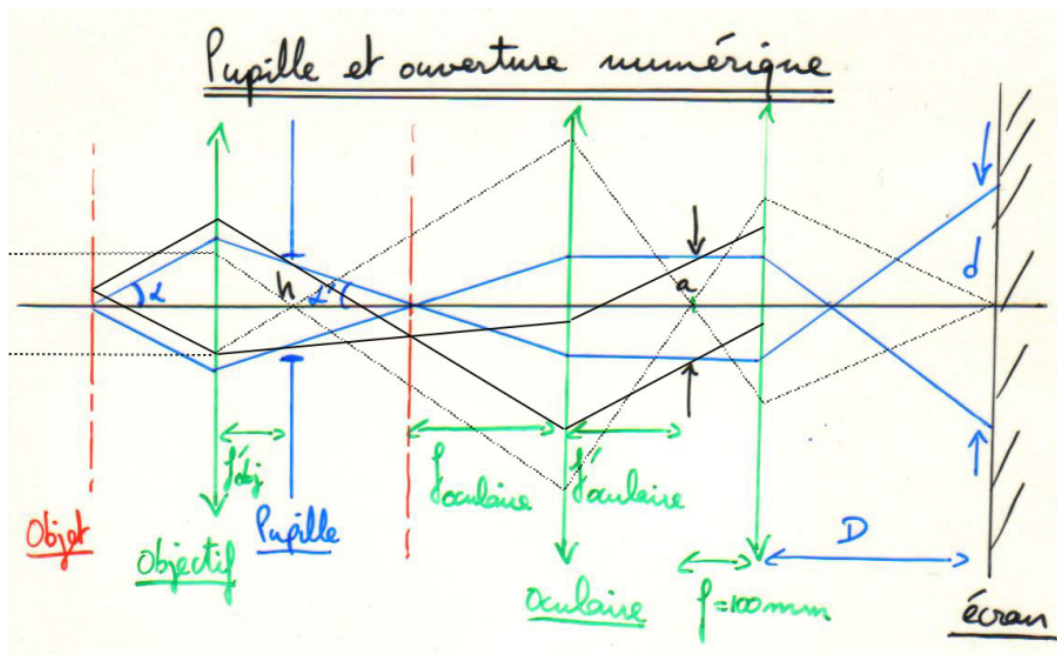
Pour obtenir la puissance totale du microscope :

$$P = \frac{\theta'}{AB} = g_{obj} P_{oc}$$

Ce qui n'est pas la chose la plus intéressante de la terre donc on peut passer et plutôt discuter du pouvoir de résolution, ce qui est plus intéressant.

4.2.6 Pupille et ouverture numérique

On regarde ce schéma là maintenant et on s'intéresse aux rayons en pointillés.



On appelle pupille de l'ensemble, le diaphragme d'ouverture, c'est à dire qui limite les rayons qui permettent de former l'image sur l'écran pour un point donné de l'objet. On regarde donc les rayons bleus. La pupille est ce qui est donc noté en bleu ! Avec le microscope commercial on ne peut pas la voir parce que elle est à l'intérieur du tube, mais on sait qu'elle se trouve dans le plan focal image de l'objectif. Pour résumer en une phrase : **la pupille est LE diaphragme qui limite les faisceaux traversant l'instrument pour UN point objet sur l'axe.**

Remarque : attention à bien ouvrir le diaphragme d'ouverture (D2) de notre éclairage sinon c'est lui qui va jouer le rôle de pupille si il est trop limitant.

Maintenant on appelle **pupille d'entrée** l'image de la pupille par tout ce qui se trouve **avant** elle. On regarde les rayons en pointillés : on voit que la pupille d'entrée est à l'infini. On dit que le système est télécentrique.

On appelle **pupille de sortie** l'image de la pupille par tout ce qui se trouve **après** elle. On regarde les rayons en pointillés et on repère sa position. C'est la section la plus étroite du faisceau sortant de l'oculaire, où l'œil reçoit le maximum de lumière du coup.

Protocole

- On enlève l'oeil, on prends une lentille de focale 100mm et un écran translatable.
- On fait l'image de la pupille de sortie à l'aide du doublet sur l'écran. Comment on sait qu'on est au bon endroit ? Cf les rayons en pointillés sur le schéma du dessus : c'est la position où l'image est la plus petite

- On mesure alors d et D et on en déduit le diamètre du cercle oculaire par la formule :

$$a = \frac{f'_{proj} d}{D + f'_{proj}}$$

Les valeurs attendues sont à $d = 2\text{cm}$, $D = 20\text{cm}$, $a = 1\text{mm}$

- On peut ensuite enlever l'oculaire et montrer où se situe la pupille sur l'objectif du microscope pour montrer qu'elle mesure environ 1cm .
- On peut le vérifier en déduisant de la mesure précédente si on veut le diamètre de la pupille par la relation :

$$h = \frac{a\Delta}{d'_{oc}}$$

La valeur attendue est autour de 8mm

- Paramètre le plus intéressant : ouverture numérique. On utilise la relation d'Abbe et les mesures précédentes (et l'épreuve A 2015 pour les calculs) :

$$AB \sin \alpha = A'B' \sin \alpha'$$

Qui nous donne l'ouverture numérique :

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

On obtient environ $0,27$. D'où viens la valeur attendue ? Ye ne sé pa

4.2.7 Pouvoir de résolution