

MP07 – INSTRUMENTS D’OPTIQUE

18 novembre 2016

Bon, c’est toujours la même ruse...
JOËL BELLESSA

Jérémy Sautel & Alexandre Michel

Niveau : L2

Commentaires du jury

2009-2012 : Les candidats doivent connaître et comprendre les conditions d’obtention d’images de bonne qualité. Il ne faut pas appliquer sans discernement un protocole trouvé dans un livre.

2013-2016 : Les candidats doivent connaître et comprendre les conditions d’obtention d’images de bonne qualité. L’étude des limitations et de défauts des instruments présentés est attendue.

Bibliographie

- ↗ *Optique expérimentale*, **Sextant** → Donne de bonnes indications sur l’étude de l’objectif photographique.
- ↗ *Expériences CAPES*, **Duffait** → Egalement utile sur le microscope et l’objectif photographique.
- ↗ *Instruments d’optique*, **Dettwiller** → Excellent, et qui fait plaisir à Michou en plus !

Table des matières

1	Le microscope	2
1.1	Principe	2
1.2	Grossissement commercial	2
1.3	Limite de résolution en diffraction	3
2	L’objectif photographique	5
2.1	Principe	5
2.2	Influence du nombre d’ouverture sur l’intensité lumineuse	5
2.3	Influence du nombre d’ouverture sur la profondeur de champ	6

Introduction

De nombreux instruments d’optique sont utilisés dans notre vie quotidienne, de la simple paire de lunettes de vue, aux caméras les plus sophistiquées. Mais ces instruments sont également très utiles dans les laboratoires scientifiques, en tant qu’outils d’analyse privilégiés de nombreux phénomènes : on pense ici aux télescopes et autres microscopes. Ce montage débute d’ailleurs par l’étude d’un microscope.

1 Le microscope

1.1 Principe

➤ Duffait

Le microscope étudié ici est une reconstitution, à l’aide des éléments de la collection, du modèle d’un microscope optique. Celui-ci comporte deux lentilles convergentes, 1 et 2, appelées respectivement objectif (car plus proche de l’objet observé) et oculaire (plus proche de l’oeil de l’observateur). Le principe de fonctionnement est le suivant : on observe un objet AB perpendiculaire à l’axe optique, avec A situé peu avant F_1 . On a alors l’image de AB par la lentille 1, notée A_1B_1 . Le réglage du microscope fait que le foyer objet F_2 de l’oculaire est confondu avec A_1 . Ainsi, l’image de A_1B_1 par 2, et donc de AB par le microscope, est renvoyée à l’infini, les rayons formant un angle α' avec l’axe optique. Nous projetons cette image dans le plan focal image d’une lentille modélisant l’oeil.

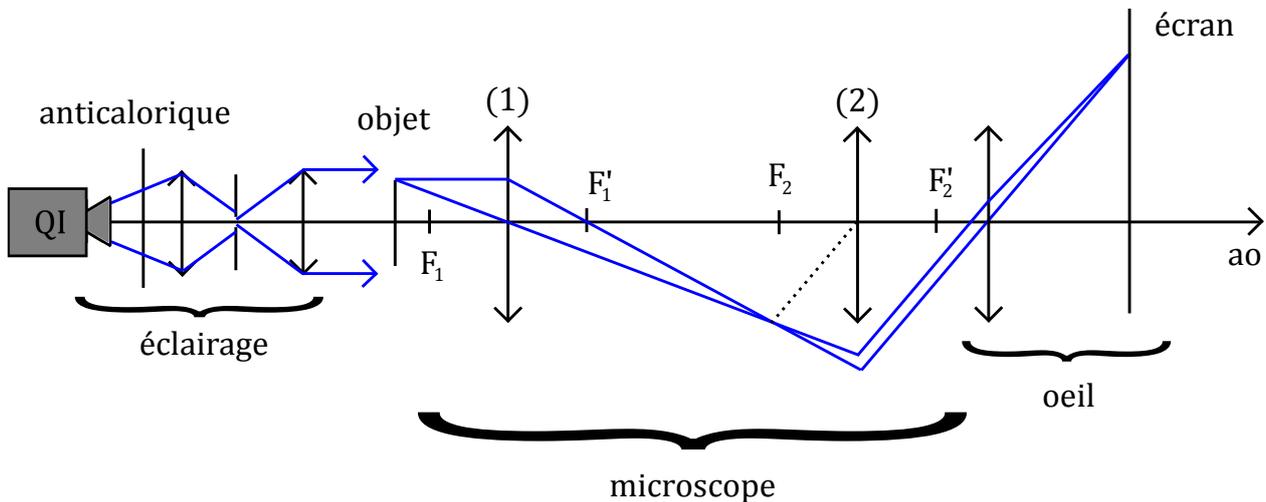


FIGURE 1 – Principe du montage effectué pour l’étude du microscope.

Aberrations

On peut ici observer assez facilement l’aberration de distorsion, due au fait que l’on éclaire des zones de l’oculaire assez éloignées de l’axe optique.

1.2 Grossissement commercial

Une des principales caractéristiques intéressantes d’un tel microscope est son grossissement commercial G_C , défini comme suit :

$$G_C = \frac{\alpha'}{\alpha_{PP}} \quad (1)$$

où α' est l’angle sous lequel on voit l’objet à travers le microscope, à l’infini, et α_{PP} l’angle sous lequel on verrait l’objet si on l’observait au *Punctum Proximum*, soit à une distance $d_m = 25$ cm de l’oeil (pour un oeil jeune émetrope).

On va chercher ici à déterminer le grossissement commercial de notre microscope. Pour ce faire, on va dans un premier temps s’intéresser au grandissement de l’objectif, noté γ_{obj} . Avec la relation de conjugaison de Descartes appliquée à AB et son image A_1B_1 , on obtient que :

$$\gamma_{obj} = \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{AB}} = -\frac{\Delta}{f_1'} \quad (2)$$

où Δ est la distance (positive) entre le foyer image F_1' et l'image $A_1 (= F_2)$.

Par ailleurs, on va également s'intéresser au grossissement commercial de l'oculaire. Celui-ci est égal au rapport de l'angle α'' sous lequel on voit un objet placé en F_2 à travers l'oculaire seul, divisé par α_{PP} .

$$G_{C,oc} = \frac{\alpha''}{\alpha_{PP}} = \frac{\overline{A_1 B_1}}{f_2'} \frac{d_m}{\overline{A_1 B_1}} = \frac{d_m}{f_2'} \quad (3)$$

On a alors que $G_C = \frac{\alpha'}{\alpha_{PP}} = \frac{\overline{A_1 B_1}}{f_2'} \frac{d_m}{\overline{AB}} = \gamma_{obj} G_{C,oc}$.

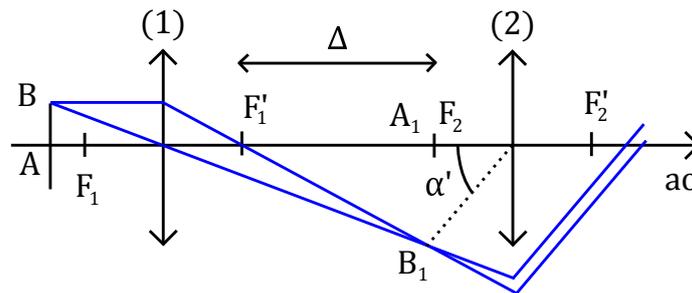


FIGURE 2 – Définition des paramètres Δ et α' .

Mesure du grossissement commercial



⊖ 10 min

Le but est de déterminer le grossissement commercial du microscope dans les conditions d'utilisation adoptées, en déterminant d'une part le grandissement de l'objectif, et d'autre part le grossissement commercial de l'oculaire. Les objets sont éclairés en lumière parallèle, réalisée à l'aide de l'alignement d'une lampe quartz-iode, d'un filtre anti-calorique, d'un condenseur récoltant la lumière sur un diaphragme, et enfin d'une lentille convergente dont le foyer objet est situé au niveau du diaphragme.

- On a déterminé en préparation la focale f_1' par autocollimation ;
- On mesure Δ à l'aide du banc d'optique et on déduit γ_{obj} ;
- On a mesuré de même la focale f_2' par autocollimation, ce qui nous donne $G_{C,oc}$;
- On a donc enfin accès à G_C .

On trouve $G_C =$

Dans un microscope, les montures des lentilles jouent le rôle de diaphragme d'ouverture (limite la luminosité) pour l'objectif et de diaphragme de champ (limite la zone observée) pour l'oculaire. Hors tout diaphragme diffracte, ce qui induit une limite de résolution...

1.3 Limite de résolution en diffraction

On va chercher ici à calculer la limite de résolution **en diffraction** de notre microscope. En effet, la diffraction sur la monture de l'objectif (qui est notre diaphragme d'ouverture) fait que les rayons issus d'un point de l'objet et

passant par la monture vont apparaître comme des faisceaux d’une certaine largeur angulaire. On comprend alors que si deux points de l’objet sont trop proches, les taches qu’il formeront sur un écran placé en sortie du microscope, au foyer image d’une lentille convergente (le tout modélise l’œil d’un observateur) risquent de se confondre. Pour quantifier cette confusion des images, on utilise le critère de Rayleigh. Son principe est le suivant : chaque tache est un profil lumineux symétrique par rapport à l’image géométrique du point qui la crée. Nous voyons la somme de tous ces profils lumineux. Ainsi, si la distance entre les centres de deux taches est inférieure à leur largeur à mi-hauteur, nous ne voyons qu’une seule tache large et les deux points ne sont plus résolus. Ceci constitue le critère de Rayleigh. Il existe donc une distance x dans le plan d’observation du microscope qui correspond à X sur l’écran de projection, avec X la largeur à mi-hauteur des taches de diffraction. La distance x est la limite de résolution en diffraction. Si l’objet diffractant est de taille a , la longueur d’onde utilisée est λ , et la longueur entre cet objet et l’écran d’observation est d , alors la tache centrale de la figure de diffraction est de largeur $\lambda d/a$. Au vu du profil de la tache, la largeur à mi-hauteur est bien approximée par $\lambda d/2a$. Au critère de Rayleigh, on a donc $\lambda d/2a = X$. En fait, les largeurs des tâches sont agrandies par le microscope, mais on va voir comment s’affranchir de ce pré-facteur.

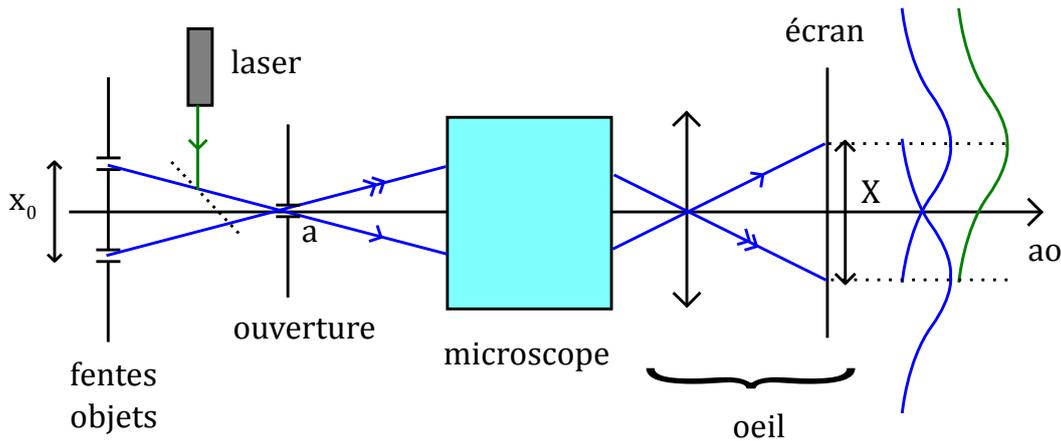


FIGURE 3 – Principe de l’étude de la limite de résolution en diffraction.

Limite de résolution en diffraction



⊖ 10 min

Le but est de déterminer la valeur de x . Sachant que celle-ci est trop petite pour être aisément mesurable, il faut employer une ruse. On va en fait diminuer artificiellement le diaphragme d’ouverture en plaçant une fente de largeur réglable devant l’objectif. Par ailleurs, on va fixer la distance $x_0 = 1$ mm entre les deux points de l’écran que l’on cherche à résoudre : en l’occurrence, deux fentes verticales. On mesure la taille a du diaphragme d’ouverture qui met nos deux fentes à la limite de résolution. On sait qu’alors $ax_0 = a_{obj}x_{reel}$ où a_{obj} est le diamètre de l’objectif utilisé (connu) et x_{reel} la « vraie » limite de résolution en diffraction du microscope (ce que l’on cherche).

- On observe l’image géométrique des deux fentes : les fentes objets sont séparées d’une distance $x_0 = 1$ mm, leurs images sont séparées d’une certaine distance X sur l’écran. On repère ces images au crayon ;
- On diminue la largeur a de la fente jouant le rôle de diaphragme d’ouverture jusqu’à ne plus distinguer les images des deux fentes objets (ce point est un peu délicat à trouver) ;
- Il nous faut donc affiner puis mesurer la largeur a que nous venons d’obtenir. Pour cela, on utilise une diode-laser à $\lambda = 532$ nm, verte pour une visibilité optimale. Le faisceau issu de celle-ci est injecté dans le montage *via* une lame semi-réfléchissante, ce qui permet de superposer son image et celle des fentes objets. Le faisceau laser a été auparavant ajusté de sorte à ce que son image géométrique sur l’écran se fasse sur celle d’une des deux fentes objets. Comme on a resserré le fente d’ouverture, le laser est diffracté et forme une tâche centrale de largeur $\lambda d/a$. La première annulation de sa figure de diffraction se situe alors à une distance $\lambda d/2a$ du centre de la figure, soit X (en vertu du critère de Rayleigh). En fait ces distances sont multipliées par un préfacteur lié au microscope, mais qui se simplifie lorsqu’on les compare, puisque TOUS les rayons (laser compris) passent par le microscope. Le premier zéro donc être au niveau de l’image de la seconde fente objet. Si ce n’est pas exactement le cas, on peut re-régler l’ouverture de la fente pour affiner ;
- Une fois ce réglage précis effectué, on retire l’objectif et l’oculaire du banc d’optique, et on place un écran à

une distance d' connue de la fente d'ouverture. On mesure alors la largeur de la tâche centrale de diffraction, qui vaut (sans préfacteur ici) exactement $\lambda d'/a$ et on calcule donc a ;

- On a finalement accès à $x_{reel} = ax_0/a_{obj}$.

On trouve $x_{reel} =$

Dans la plupart des instruments d'optique de la vie courante, les aberrations géométriques sont corrigées du mieux possible, ainsi que les aberrations chromatiques. On va étudier maintenant un instrument du commerce : l'objectif photographique.

2 L'objectif photographique

2.1 Principe

Dans cette partie, on s'attache à l'étude d'un second instrument d'optique : l'objectif photographique. Celui-ci peut être assimilé à une lentille convergente de focale $f = 135$ mm, munie d'un diaphragme d'ouverture dont le diamètre d est contrôlable. En effet, sur l'objectif photographique on peut régler le nombre d'ouverture N , défini comme :

$$N = \frac{f}{d} \tag{4}$$

Attention aux confusions possibles : on voit bien ici que ce nombre d'ouverture **diminue** en fait avec la taille du diaphragme d'ouverture.

On va utiliser cet objectif de la manière suivante : avec une lampe QI suivie des éléments appropriés (les mêmes que pour le microscope), on envoie de la lumière parallèle sur un objet donné, placé à une distance p de l'objectif **retourné**. On forme alors l'image de l'objet observé sur un écran situé à une distance p' de l'objectif. L'objectif est ici retourné afin de respecter la règle du « plus plat, plus près ». En effet, on se place dans des conditions où $p' > p$, alors qu'habituellement un appareil photo fonctionne avec $p < p'$, voire $p \ll p'$.

Aberrations

Ici on est surtout sujet à l'aberration chromatique, due au fait que la lentille utilisée pour créer un faisceau parallèle n'est pas « achromat ».

2.2 Influence du nombre d'ouverture sur l'intensité lumineuse

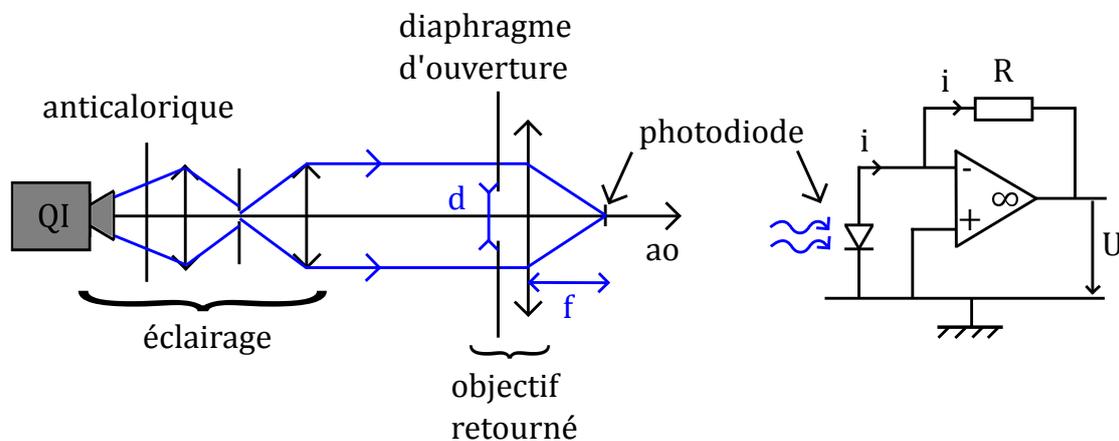


FIGURE 4 – Montage pour l'étude de l'influence de N sur I .

Si on éclaire l'objectif retourné en lumière parallèle et que l'on s'intéresse au flux lumineux récolté en son foyer image, celui-ci va dépendre de la quantité de lumière que le diaphragme d'ouverture, de diamètre d , laisse passer.

On a que $I \propto S \propto d^2 \propto \frac{1}{N^2}$ où N est le nombre d'ouverture.

L'idée est donc ici de faire des mesures de luminosité pour différentes valeurs de N et d'essayer de retrouver une loi en $I \propto 1/N^2$.

Influence de N sur I

⚡ Sextant

⊖ 10 min

Pour réaliser ces mesures de luminosité, on va placer une photodiode en A' . Cette photodiode relie la masse à la branche $-$ d'un A.O. Elle est passante de l'A.O. vers la masse. La branche $+$ de l'A.O. est elle directement reliée à la masse. Une résistance R de l'ordre de $1 \text{ M}\Omega$ constitue la rétroaction négative. Ainsi, la tension aux bornes de la photodiode est toujours nulle, ce qui implique qu'elle est traversée par un courant négatif $-i$ relativement faible, mais dont la valeur absolue i croît avec le flux lumineux reçu. Ce même courant traverse la résistance R et on a donc une tension positive $U = V_- - V_S = Ri$ proportionnelle au flux lumineux reçu, donc à la grandeur recherchée I . On doit donc trouver une loi en $U \propto 1/N^2$.

- Pour diminuer au maximum le bruit sur cette mesure, on peut envelopper le faisceau lumineux sortant de l'objectif d'un tube noir, jusqu'à la photodiode ;
- On prend les valeurs de U , au voltmètre, pour les différentes valeurs de N possibles pour l'objectif étudié (il y en a un nombre fini réglables) ;
- on trace U en fonction de $1/N^2$ sur LatisPro ou Regressi, on vérifie que l'on a bien une droite. La régression linéaire effectuée par ces logiciels utilise la méthode des moindres carrés, ce qui donne une interprétation du χ^2 renvoyé par l'ordinateur.

2.3 Influence du nombre d'ouverture sur la profondeur de champ

Maintenant, on considère un point A sur l'axe optique pour lequel on fait le point, donc son image par l'objectif retourné est nette sur l'écran. On voit alors que si on prend des points légèrement éloignés de A , on obtient sur l'écran non pas des images nettes ponctuelles, mais des tâches d'un certain diamètre. En photographie, la profondeur de champ de l'objectif se définit comme étant la distance Δ entre les objets B et C disposés de part et d'autre de A , sur l'axe optique, et tels que les tâches qu'ils créent sur l'écran sont de diamètre ε égal à $30 \mu\text{m}$. Pour information, cette valeur correspond typiquement au grain d'une pellicule photo argentique. Toutefois, nous travaillerons avec une grandeur environ 10 fois plus grande, pour des raisons détaillées plus loin.

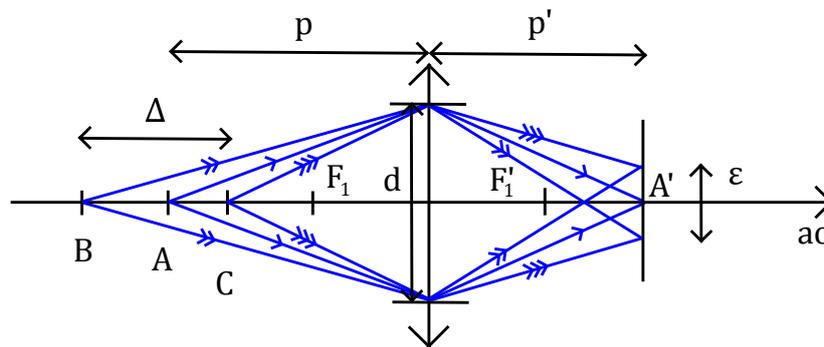


FIGURE 5 – Définition de la profondeur de champ pour l'objectif photographique. Qualitativement, on voit bien que si le nombre d'ouverture N est plus grand (donc le diamètre d du diaphragme d'ouverture plus petit), les points B et C créeront des faisceaux strictement inclus dans le cercle de diamètre ε . Ceci signifie qu'on aura de nouveaux points B' et C' plus éloignés de A et correspondant à un diamètre ε sur l'écran, et donc que Δ a augmenté. Conclusion : on s'attend à ce que Δ croisse avec N .

On peut en fait démontrer, en appliquant les relations de conjugaison aux points objets B et C et à leurs images, la relation donnant la profondeur de champ en fonction de N :

$$\Delta = \frac{2p}{\frac{fp'}{N\epsilon p} - \frac{N\epsilon p}{fp'}} \quad (5)$$

On voit donc que si on travaille à p et p' fixés, et qu'on a choisi notre ϵ (et c'est le cas ici), la profondeur de champ ne dépend que de N . Au vu des ordres de grandeur : $f = 135$ mm, $p \sim 10$ cm, $p' \sim 1$ m, $N \leq 10$ et $\epsilon \simeq 100$ μm , on a $\frac{fp'}{N\epsilon p} \gg 1$, et la formule se simplifie alors en :

$$\Delta = \frac{2N\epsilon p^2}{fp'} \quad (6)$$

On doit donc avoir une profondeur de champ proportionnelle au nombre d'ouverture.

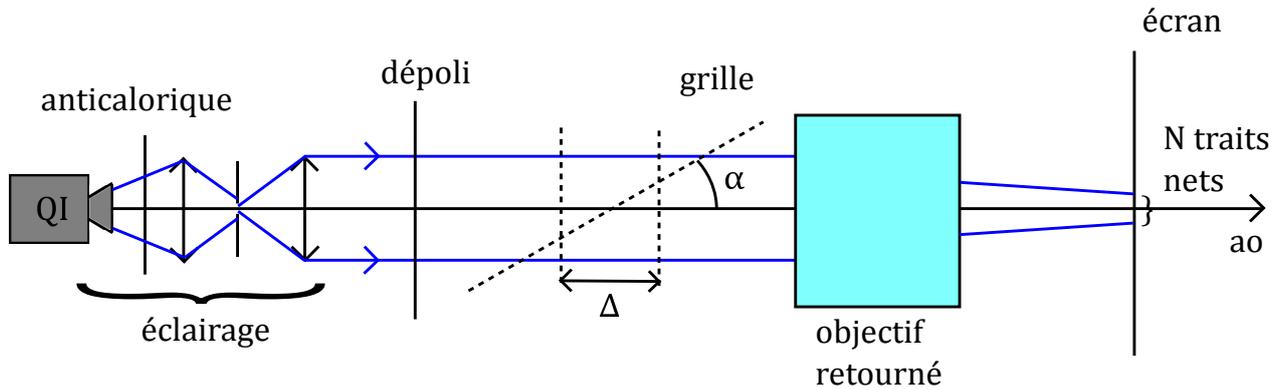


FIGURE 6 – Montage pour l'observation de l'influence de N sur Δ .

Influence de N sur Δ

⚡ Sextant

⊖ 10 min

Pour mettre en évidence la croissance de Δ avec N et, pourquoi pas, mesurer quelques valeurs de Δ , on utilise comme objet une grille à 2 traits/mm. Il est important d'éclairer la grille en lumière parallèle et de plus forte intensité possible avec la QI, car on place devant la grille un dépoli, pour assurer que chaque trait de la grille envoie des rayons incohérents entre eux dans tout l'objectif.

- Au début, la grille est normale à l'axe optique, qu'elle coupe en un point A dont on fait l'image sur l'écran par l'objectif retourné ;
- Maintenant, on fait pivoter la grille autour de ce point A , de sorte qu'une partie de la grille se trouve hors de la profondeur de champ. L'image de la grille sur l'écran apparaît donc comme une grille nette pour un certain nombre de traits horizontaux (ceux suffisamment proches de l'axe optique pour que l'inclinaison les maintienne dans la profondeur de champ) entourés en haut et en bas par des traits horizontaux plus flous (que l'inclinaison a poussé hors de la profondeur de champ) ;
- En faisant augmenter N , on réduit le diaphragme donc la luminosité, mais on peut voir que le nombre de traits vus nettement augmente ; les zones floues en haut et en bas de l'image régressent ;
- En comptant pour un N donné le nombre n de traits vus nettement, on peut remonter à la profondeur de champ Δ , à condition de connaître l'inclinaison α que fait la grille par rapport à l'axe optique, et le nombre linéique a de traits de la grille. En effet, on a que $\Delta = N \cos \alpha / a$.
- Le critère « traits vus nettement » détermine notre critère de sélection ϵ . On considère qu'un trait n'est plus vu net à partir du moment où son image sur l'écran se retrouve réduite d'environ un quart. Sachant que l'image sur l'écran d'un trait fait environ 1 mm d'épaisseur, on peut donc considérer que notre critère de sélection correspond à $\epsilon = 0,25$ mm.
- On peut donc calculer Δ par la formule (6) et comparer à la valeur mesurée en comptant les traits nets. On doit obtenir sensiblement les mêmes valeurs.

Source d'erreur

Une des sources d'erreur de cette manipulation est que l'on étend la définition de la profondeur de champ à des points non situés sur l'axe optique, ce qui n'est pas parfaitement rigoureux...

Conclusion

On a donc au cours de ce montage réalisé plusieurs manipulations :

- la mesure de grandeurs importantes permettant la caractérisation d'un microscope optique, ainsi que de ses performances en tant qu'instrument d'observation ;
- la mise en évidence de certains phénomènes limitant ces performances (aberrations des lentilles, diffraction) ;
- l'étude d'un compromis à trouver, dans le cadre des instruments photographiques, entre la luminosité et la profondeur de champ, dont les dépendances en le nombre d'ouverture sont opposées...

Ouverture : On peut réfléchir à l'amélioration des performances des instruments d'optique, en corrigeant du mieux possible les aberrations des lentilles, et en essayant de diminuer la limite de résolution en diffraction. Jouer sur l'écart aux conditions de Gauss permet par ailleurs de trouver de bons compromis (voir sujet A de l'agreg blanche, Amici,...). Enfin, il est des cas où les instruments optiques peuvent être dépassés en performance (microscopie électronique).