

Florent Plouy
Loïc Robert

M

Instruments d'optique

Bibliographie: -Sextant

-Sylvain Houard, Optique

-Les instruments d'optique, Dettwiller

Correcteur: Jean Cviklinski

I Expérience introductive:

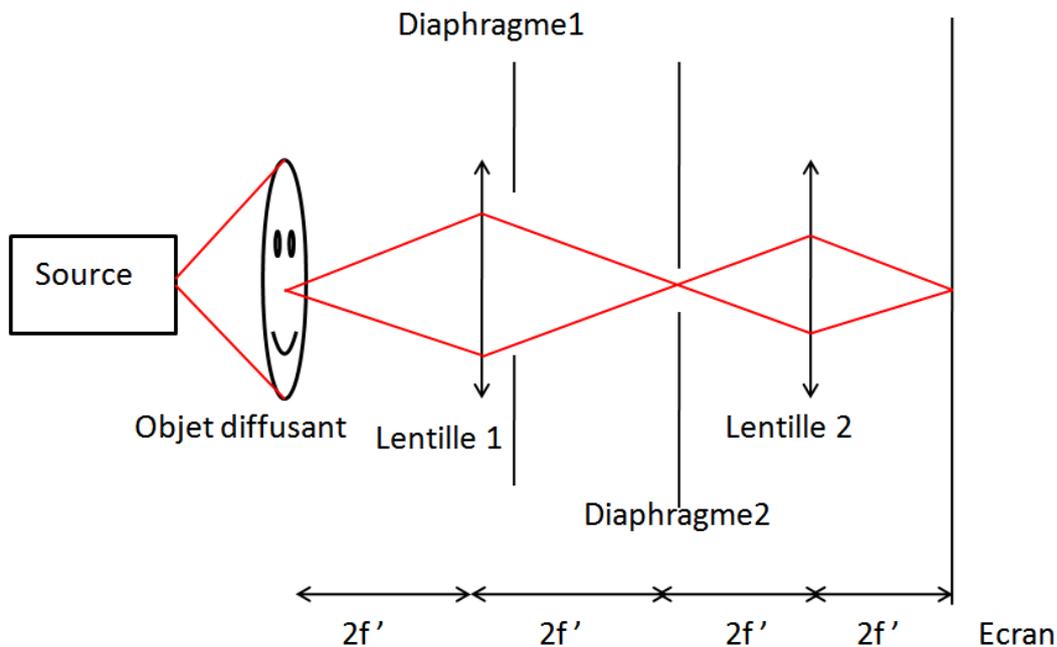
Cette première expérience a pour but d'introduire le sujet, elle a pour but de montrer les problèmes liés aux systèmes optiques, leur moyens de correction et l'intérêt des diaphragmes de champ/d'ouverture.

On commence par montrer les aberrations géométriques avec un système source->objet->lentille->écran classique. Celles-ci se manifestent par une déformation de l'objet et se corrigent en se plaçant dans les conditions de Gauss. On veillera donc de manière générale à placer les différents composants du système orthogonalement à l'axe optique et à centrer ces composants sur l'axe optique (on ne développera pas plus loin la réflexion mais garder en tête les questions du type: " Y a-t-il des composants optiques ne nécessitant pas les conditions de Gauss ?" ou bien " Les conditions de Gauss conviennent-elles à tout système optique?" qui ont de fortes chances de tomber en question). On peut également parler de la règle des 4P.

On expose ensuite les aberrations chromatiques d'abord avec un système lampe blanche->lentille noircie au centre->écran on pourra ainsi facilement montrer les aberrations longitudinales (cercle irisé). On cherche ensuite l'image d'un point source (un diaphragme peu ouvert par exemple), et on observe que l'image pour le bleu ne se situe pas à la même distance de la lentille que celle pour le rouge, il s'agit des aberrations longitudinales. La cause de ces aberrations est la dispersion par la lentille et la solution est d'utiliser un doublet , celui-ci a pour principe de faire correspondre $f(\lambda_1)=f(\lambda_2)$ (λ_1 étant une longueur d'onde étalon prise dans le rouge et λ_2 une longueur d'onde étalon prise dans le bleu) le doublet est donc dispersif mais beaucoup moins qu'une simple lentille. Afin de garder des réserves pour les questions et aussi pour ne pas se perdre en explications, il peut être judicieux de ne pas expliquer le principe du doublet durant l'exposé du montage. On notera que ces aberrations se produisent également en utilisant les conditions de Gauss.

Il est finalement intéressant de montrer brièvement mais clairement les diaphragmes d'ouverture et de champ, ceci afin de mettre en évidence leurs effets et les avantages qu'ils procurent. De plus lors de l'expérience sur le

microscope, on aura besoin que ces notions soient bien posées, on évitera ainsi de nous emmêler les pinceaux ou de perdre l'auditoire. Le montage suivant permet une explication bien claire:



(pas à l'échelle)

Ici on a choisi $f'_1=f'_2$, notons que cette configuration n'est pas unique, on peut prendre des lentilles différentes ou changer d'autres paramètres, mais cette configuration est très rapide à réaliser et ne peut pas rater à priori. On constate facilement que si l'on ferme le diaphragme 1, on limite la quantité de lumière admise par le système, il s'agit donc du diaphragme d'ouverture (DO). A l'inverse, le diaphragme 2 limite la portion d'objet visible par le système optique, c'est donc le diaphragme de champ (DC). Si le montage est proprement réalisé, on ne doit pas voir d'effet sur le champ en touchant au DO et inversement (et c'est ce que l'on veut dans un système optique, contrôler les deux paramètres séparément). On peut aussi montrer rapidement qu'il y a un compromis entre intensité lumineuse et profondeur de champ (cela s'explique par le fait que plus le DO est fermé, plus les conditions de Gauss sont bien respectées).

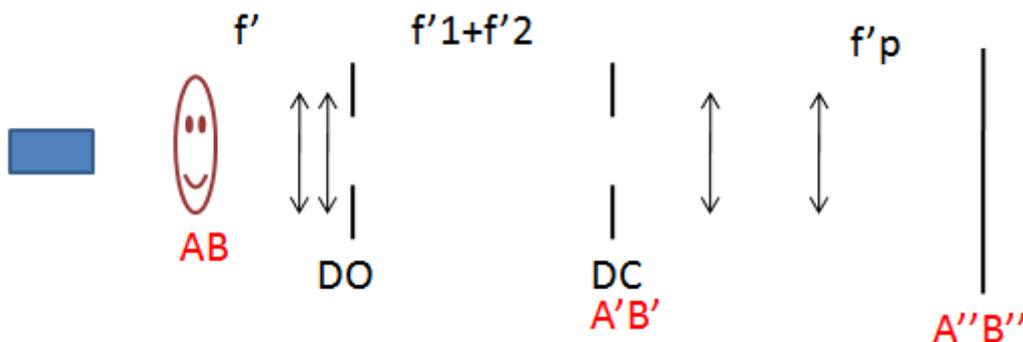
Note: cette configuration est pratique car il est difficile de se tromper en la réalisant mais on a au final un grandissement de 1, l'image est donc un peu petite pour être montrée avec confort. On peut donc après avoir réalisé cette configuration, éloigner l'écran et adapter l'image en rapprochant la lentille 1 et l'objet. Attention, le diaphragme 2 doit se situer au niveau de l'image de l'objet par la lentille 1, si on se décale trop de la configuration initiale on peut perdre cette image et ne plus trouver de lieu où placer le DC.

Le but des systèmes optiques sont de donner une image projetée ou à l'infini d'un objet (on parle de système projectif ou subjectif), les principales caractéristiques d'un système optique qui définissent son champ d'utilisation et sa qualité sont : le grandissement, la luminosité, la résolution et le champ. Nous allons maintenant nous intéresser à la lunette puis au microscope et mesurer certaines de ses caractéristiques.

II Etude de la lunette astronomique

Remarque: Pour simplifier les explications j'ai séparé l'introduction du DO et DC de la lunette astronomique mais si on veut l'aborder il est plus malin d'expliquer les DO et DC directement sur la lunette pour éviter de perdre du temps (sur le microscope ce serait trop délicat à mon goût).

Pour le montage c'est simple, il suffit d'éclairer un objet diffusant (au maximum en jouant avec le condenseur de la source), de mettre cet objet au foyer objet d'une lentille (de focale d'environ 20 cm pour ne pas étaler trop le montage ni trop disperser la lumière dans la pièce). On a alors simulé un objet à l'infini , on peut l'observer directement sans grossissement en plaçant une lentille de projection (de l'autre bout du banc optique, il faut laisser de la place pour la lunette). On peut alors mesurer la taille de cette image et constater qu'elle est pas bien grande. Pour l'agrandir, on va utiliser deux lentilles (qui constituent la lunette en elle même), on a alors le montage suivant:



On choisira $f'1 > f'2$ pour avoir un grossissement supérieur à 1 (se limiter à un rapport de deux pour éviter de tomber sur certains problèmes pratiques). On ajuste l'image et on devrait avoir une distance $f'1+f'2$ entre les lentilles. On place ensuite le DO et le DC de la manière décrite ci dessus.

Remarque: faire très attention à l'alignement, comme il s'agit du montage " instrument d'optique" ce serait mal vu d'avoir un montage bancal.

Ici la mesure la plus rapide et utile à réaliser est celle du grossissement. Puis comparer ce grossissement au grossissement théorique :

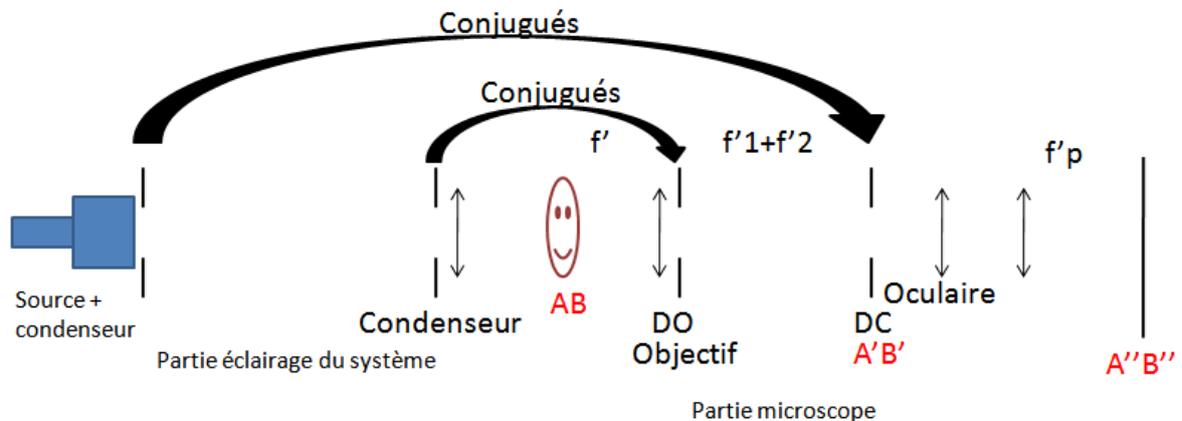
$$G = \frac{f'1}{f'2}$$

Pour la mesure il suffit de mesurer l'angle de sortie (rendue facile avec la lentille de projection) et l'angle d'entrée.

Remarque: Je ne l'ai pas précisé pour alléger un peu les explications déjà lourdes, mais à chaque fois que l'on voudra placer un objet dans le foyer objet d'une lentille, il faudra le faire par auto-collimation pour plus de netteté (il est déjà suffisamment facile d'obtenir une image floue au final).

Remarque: Il se peut que des aberrations géométriques se manifestent au final (coussinet si on a utilisé une grille). Si c'est le cas, en profiter pour montrer l'intérêt du DC et couper la zone de l'image qui est déformée.

III Etude du microscope



(Ce type d'éclairage s'appelle éclairage de Köhler)

Le but de ce montage est de montrer et de mesurer les caractéristiques principales de l'instrument : grossissement, champ, résolution, luminosité.

En préparation il faut commencer bien sur par régler l'appareil, il faut pour cela suivre quelques étapes simples:

-Placer sur un banc optique les différents éléments du montage: lampe blanche->diaphragme accolé à la source(appelé D1 pour la suite)->filtre anti calorique->diaphragme D2(devant le condenseur du microscope)->condenseur du microscope->microscope ->lentille de projection-> écran.

-Régler grossièrement l'alignement des différents éléments du système (obtenir une intensité lumineuse non nulle sur l'écran).

-Faire grossièrement l'image du filament de la source sur D2(ouvrir D1 pour une profondeur de champ minimale), pour cela jouer avec le condenseur de la source.

-Placer un objet à observer, par exemple une mire de 1mm de long, on s'en servira par la suite pour les mesures.

-Ajuster avec les vis de réglage l'image à l'écran.

-On observe alors que l'image à l'écran n'est pas centrée (la mire de l'oculaire n'est pas au centre du cercle de vision) on peut d'abord régler plus

précisément l'alignement des éléments du système. Il faut ensuite régler la position du condenseur, pour cela faire l'image de D1 à l'écran (utiliser la vis de déplacement selon l'axe optique (noté z)), ensuite utiliser les petites vis de réglage selon x,y pour centrer la mire de l'oculaire.

-Refaire proprement l'image du filament sur le condenseur

-Régler les diaphragmes pour avoir un bon éclairage/champ de vision (ne pas trop les ouvrir pour éviter d'éclairer tout le montage inutilement).

On observe alors que D1 règle le champ de vision, ce qui est logique puisqu'on a fait son image à l'écran et D2 règle la quantité de lumière admise, logique également car D2 est placé juste avant le condenseur qui éclaire l'objet.

Plusieurs mesures sont alors possibles, nous avons choisi une suite cohérente:

Grossissement

Le grossissement étant la caractéristique principale du microscope , on va le mesurer en premier:

-Mesure du grossissement global du système. Il s'agit ici du grandissement commercial:

$$G = \frac{\alpha}{\beta}$$

Avec α l'angle de sortie du système et β l'angle sous lequel on verrait l'objet à une distance de 25cm (utiliser les graduations de la mire pour connaître la taille de l'objet observé).

On peut aussi mesurer le grandissement de l'objectif et le grossissement de l'oculaire:

Le grandissement de l'objectif est le rapport entre la taille de l'image intermédiaire et la taille de l'objet correspondante, ces deux grandeurs sont données par la mire de l'oculaire et celle de l'objet.

Le grossissement de l'oculaire est le rapport entre α' (déjà mesuré) et l'angle sous lequel on verrait l'image intermédiaire si on était situé à 25 cm de lui.

Pour cette partie ne pas oublier de comparer les valeurs mesurées à celles indiquées sur l'objectif et l'oculaire mais **attention** le grandissement n'est pas une caractéristique de l'objectif et en déplaçant le lieu où se forme l'image intermédiaire (en changeant la taille du tube) on change la valeur de ce grandissement.

Résolution

La résolution est également un critère de qualité dans un appareil d'optique, il est donc intéressant de s'y attarder.

-La mesure de la résolution du système se fait simplement en utilisant un jeu de réseaux de pas divers et de trouver à l'œil celui qui n'est plus résolu.

-L'évaluation de celle ci en fonction des autres caractéristiques du système est quant à elle plus sujette à discussions, cela dépendra surtout de votre compréhension du montage et du temps qu'il vous reste (à mon avis si le jour J vous avez mesuré la résolution, c'est déjà bien...).

En théorie, la résolution du microscope est surtout due à la diffraction par l'objectif, on montre (avec la relation des sinus d'Abbe) qu'elle vaut:

$$AB_{min} = \frac{0.61\lambda}{n \sin u}$$

Avec n l'indice du milieu objet ici il vaut donc 1. Cette relation est intéressante à montrer même si on ne l'utilise pas, ne serai-ce que pour expliquer pourquoi on crée des microscopes à immersion ou pourquoi on peut vouloir éclairer des microscopes avec des ultraviolets.

- $n \sin u$ est appelée ouverture numérique, il s'agit de l'angle sous lequel l'objectif est éclairé, on peut utiliser sa valeur qui est donnée sur le microscope ou bien effectuer sa mesure qui peut être réalisée de trois façons:

1) Si on démonte l'objectif, que l'on place un diaphragme très étroit à l'endroit où est sensé se former l'image intermédiaire (lorsque le microscope est monté) et que l'on éclaire l'objectif à travers le diaphragme (focaliser l'image du filament de la source sur le diaphragme), on peut mesurer l'angle de sortie qui correspond à u .

Remarque: cette méthode nécessitant de démonter l'objectif, de trouver un moyen de le fixer pour l'éclairer etc, cette méthode est un peu ennuyeuse, surtout s'il faut le faire devant le jury

2) Le principe est le même que le 1) mais on va ruser un peu. Plutôt que de créer un objet réel, on peut également créer un objet ponctuel à l'endroit voulu en éclairant l'oculaire avec des faisceaux parallèles (attention, très parallèles). Cela paraît étrange d'éclairer l'appareil à l'envers mais comme on éclaire l'oculaire avec des faisceaux parallèles, l'objet ponctuel est au niveau de l'image intermédiaire et les rayons de sortie par l'objectif nous donnent donc u .

3) Cf poly de TP de jean, cette méthode est un peu délicate à expliquer (et pas triviale à comprendre) . Je déconseille cette méthode si vous voulez être efficace dans la préparation et garder votre assurance lors de l'exposé.

Il reste maintenant à effectuer le calcul et à comparer le résultat avec la résolution mesurée à l'aide de la lame sur laquelle se trouvent plusieurs réseaux de paramètre différents.

Remarque: Pas mal de détails peuvent vous échapper si vous ne vous fiez qu'aux livres pour la manipulation du microscope, je conseille de bien le faire au moins une fois, surtout qu'il est absolument incontournable pour ce montage.

Questions possibles:

Quelles sont les différences fondamentales entre les deux instruments présentés?

-Le microscope est prévu pour observer des petits objets réels tandis que la lunette observe des objets à l'infini (d'où la différence de définition de G).

What else?

-Il n'y a pas besoin d'éclairer l'objet pour la lunette, contrairement au microscope. Ce point peut paraître banal à dire mais il est très important, en effet il faut donc éclairer l'objet dans le cas du microscope, et cela n'est pas évident (éclairage de Köhler), il faut insister sur ce point dans la leçon.

Les aberrations chromatiques se produisent même si les conditions de Gauss sont respectées. Pourquoi avoir alors utilisé une lentille munie d'un cache pour travailler avec le bord de la lentille?

-Les rayons traversant les bords de la lentille seront plus déviés et la dispersion sera plus forte et les aberrations plus visibles.

Comment améliorer la résolution du microscope?

-D'après la formule précédemment citée, on peut diminuer la longueur d'onde (on travaille dans l'ultraviolet ou même avec un flux d'électrons -> principe du microscope électronique) ou bien augmenter n (placer l'objet et l'entrée de l'objectif dans de l'eau par exemple).

Pourquoi est-il préférable d'utiliser un objet diffusant pour la lunette astronomique?

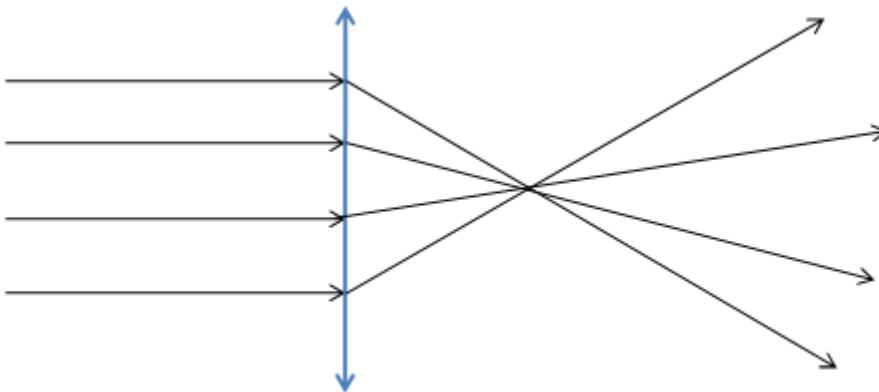
-Cela permet de réduire la profondeur de champ et donc de placer plus facilement l'écran de projection.

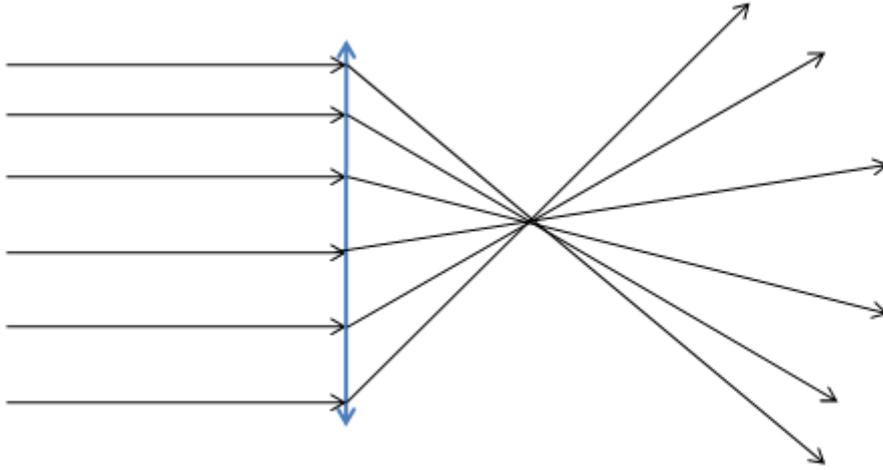
Qu'es-ce qui joue sur la profondeur de champ en général dans un système optique?

-Il y a compétition entre luminosité et profondeur de champ (plus le système est lumineux moins la profondeur de champ sera grande.

Pourquoi?

-Plus on ouvrira le diaphragme d'ouverture plus on laissera passer de rayons marginaux loin de l'axe optique et plus la zone où l'image pourra se former sera petite. Petit schéma pour résumer :





On comprend visuellement que plus j'ajoute de rayons plus la profondeur de champ sera faible (mais plus la luminosité sera grande).

Pourquoi un objet diffusant réduit la profondeur de champ?

-Quelque soit le type d'éclairage, chaque point de l'objet va arroser dans toutes les directions, cela revient aux schémas ci-dessus.

La limite de résolution calculée pour le microscope est-elle due uniquement à l'objectif ou bien d'autres paramètres sont-ils à prendre en compte?

-Oui elle est due uniquement à la diffraction par les objectif. On pourrait se dire qu'il y a également la diffraction créée par les autres " bords" qu'il existe dans le microscope mais celui-ci a en réalité été étudié pour qu'ils ne coupent pas de rayon lumineux et donc pas de diffraction (c'est en fait le diaphragme d'ouverture du microscope qui provoque la diffraction). On pourrait aussi penser aux aberrations mais celles-ci sont clairement négligeables (encore une fois, le microscope a été étudié pour).

Pour la mesure de la résolution, on observe que fermer le diaphragme d'ouverture permet d'avoir un meilleur contraste. Commenter.

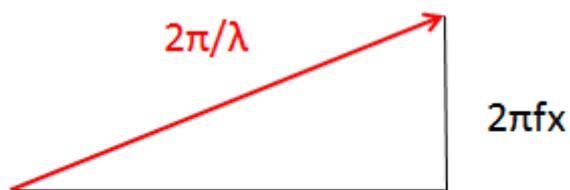
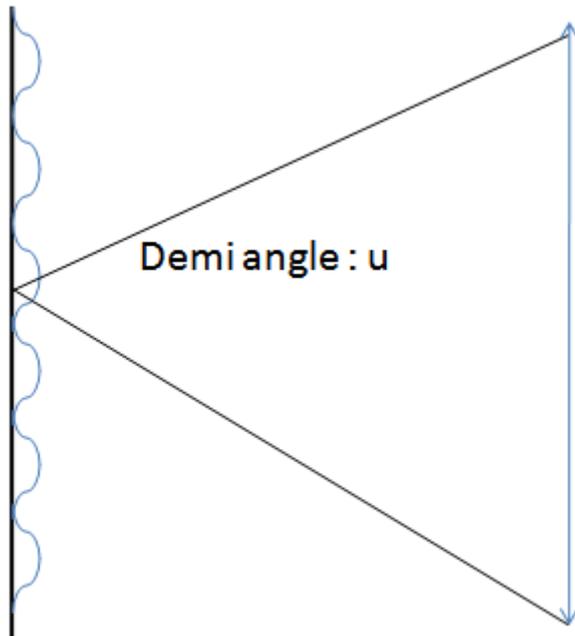
-Le réseau à travers le microscope donne une figure de diffraction, fermer le diaphragme d'ouverture limite le caractère incohérent (spatialement) de la source éclairant le réseau, le contraste est donc meilleur.

Mais alors la formule de calcul de la résolution est-elle toujours valable?

-Non, celui-ci a été réalisé avec un calcul de diffraction à deux sources A et B incohérentes, il faut donc veiller à laisser le diaphragme d'ouverture bien ouvert lors de la mesure pour rester cohérent.

Que donnerait les FTM (Fonction de Transfert de Modulation) dans le cas cohérent?

-La FTM pour une source incohérente serait égale à 1 jusqu'à ce que les ordres de diffraction (on pourrait les montrer en sortant l'objectif du microscope) soient coupés par la lentille (ou autre) située après la source. Pour plus de détails voir le TD de Jean sur la FTM. Une explication rapide serait la suivante:



(Cf début du cours de Jean)

Donc la limite des fréquences spatiales f_x qui pourront passer par la lentille est donnée par la relation:

$$\sin u = 2\pi f_x / (2\pi/\lambda) \Rightarrow f_x = \sin u / \lambda$$

Commentaires:

On peut présenter le montage de différentes manières (comme toujours), mais ne pas oublier de garder une partie de manipulations pour que le jury comprenne que vous savez le faire. Bien expliquer chaque partie du

système, les diaphragmes, comparer le grossissement/grandissement de l'oculaire/objectif du microscope mesurés à ceux indiqués sur le microscope.

Montrer les différentes aberrations chromatiques n'est pas très intéressant, surtout au vu du temps imparti. On peut simplement montrer qu'elles se manifestent lorsqu'on utilise des lentilles simples et expliquer pourquoi elles interviennent (dispersion du verre).