

Examen d'optique instrumentale

durée 3h

aucun document autorisé (formulaire fourni)

calculatrice autorisée

Le sujet présente trois pages, un formulaire et une annexe.
L'annexe, en mentionnant vos nom&prénom, est à rendre avec votre copie.

Etude d'un microscope de recherche

Dans les microscopes utilisés en recherche, l'objectif travaille le plus souvent pour une conjugaison foyer-infini. Un tel objectif nécessite donc un autre système optique, appelé lentille de tube, pour redonner une image réelle à distance finie au foyer objet de l'oculaire et dont la taille est bien agrandie du facteur mentionné sur le corps de l'objectif. Cette configuration permet de placer entre l'objectif et la lentille de tube, des éléments optiques à faces parallèles, tels que des densités, des cubes ou des lames séparateurs de faisceaux, des filtres spectraux.

La 1^{ère} partie du sujet traite de la "voie visuelle" du microscope. La 2^{ème} partie traite de la "voie numérique" dans laquelle l'image est acquise par un capteur pixellisé.

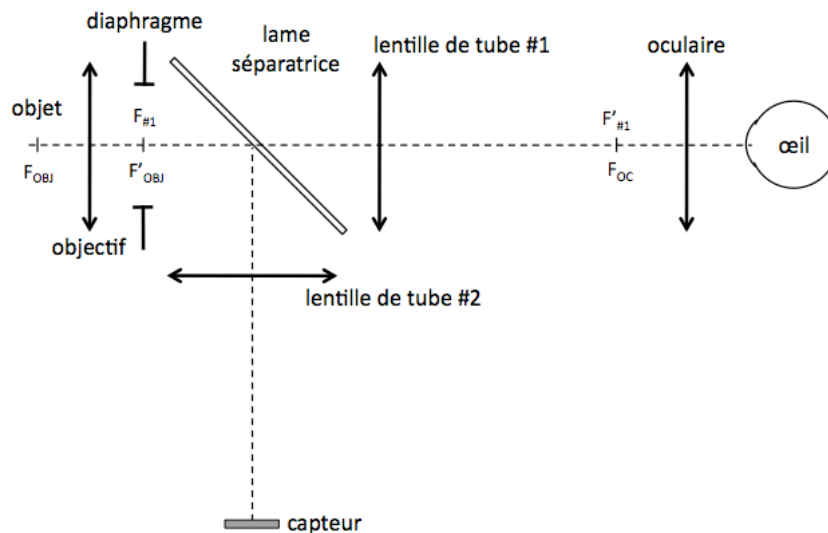


Figure : schéma de principe du microscope avec ses voies visuelle et numérique.

On supposera, dans cette étude simplifiée, que tous les éléments peuvent être remplacés par des lentilles minces. On se limitera au domaine paraxial et on supposera que l'œil de l'observateur est au repos sans défaut (regarde à l'infini). La lame séparatrice est suffisamment fine pour ne pas en tenir compte dans les conjugaisons et suffisamment grande pour ne pas limiter le champ.

Vous ferez systématiquement les applications numériques.

A. Voie visuelle

Les éléments du microscope sont les suivants :

- Le grandissement de l'objectif de microscope associé à la lentille de tube #1 est -5.
- Le diaphragme d'ouverture D est placé au foyer image de l'objectif F'_{OBJ} et son diamètre est 5 mm.
- La distance entre le diaphragme et la lentille de tube #1 est 100 mm.
- La lentille de tube #1 a une focale de 100 mm.
- La distance entre la lentille de tube #1 et le foyer objet de l'oculaire F_{OC} est 100 mm.
- L'oculaire est une lentille mince convergente de focale 12,5 mm.

1. Reprendre le schéma de principe de la voie visuelle (sans la lame séparatrice et sans être à l'échelle) et faire apparaître deux rayons partants du point objet sur l'axe placé au foyer objet de l'objectif de microscope et s'appuyant sur le diaphragme.
2. Ecrire l'ensemble des conjugaisons (positions intermédiaires des images) à travers tous les éléments du microscope pour un point objet placé au foyer objet de l'objectif de microscope.
3. Montrer que la focale de l'objectif de microscope vaut 20 mm.
4. Déterminer le grossissement commercial de l'oculaire.
5. Déterminer la puissance et le grossissement commercial du microscope.
6. Où se trouve la pupille d'entrée du microscope et sous quel angle est-elle vue ? Montrer que l'ouverture numérique dans l'espace objet du microscope vaut 0,125.
7. Déterminer les résolutions transversales dans le plan objet compte tenu de la diffraction (la longueur d'onde est $\lambda=500$ nm) et de l'acuité visuelle (vous prendrez 2' d'angle comme résolution d'entrée de l'œil). Commentez vos résultats.
8. Déterminer la position et le diamètre de la pupille de sortie du microscope.

L'annexe, fournie pour les tracés de rayons, présente une échelle $\times 1$ le long de l'axe et $\times 10$ en transversal. Les lentilles pré-positionnées ont des tailles arbitraires.

9. Sur l'annexe, tracer deux rayons provenant d'un objet ponctuel placé au foyer du microscope sur l'axe et traversant l'objectif dans sa totalité en s'appuyant sur les deux bords du diaphragme d'ouverture. Vous positionnerez également la pupille de sortie.

On souhaite obtenir un champ de pleine lumière objet de diamètre 1 mm.

10. Sur l'annexe, tracer deux rayons qui s'appuient sur les deux bords de la pupille d'entrée, pour un point objet provenant d'un bord du champ de pleine lumière et qui traversent l'ensemble du microscope.
11. Déterminer graphiquement les diamètres minima de l'objectif, de la lentille de tube #1 et de l'oculaire pour obtenir le champ de pleine lumière défini précédemment.
12. Déterminer par le calcul le champ de pleine lumière image du microscope.
13. Où doit-on placer l'œil pour observer le plan objet dans les meilleures conditions ? Justifiez votre réponse.
14. Déterminer l'erreur de mise au point dans l'espace objet par rapport au foyer de l'objectif si l'observateur accommode à 250 mm (vous pourrez utiliser le grandissement longitudinal de l'objet-lentille#1) ?
15. Déterminer la profondeur de champ (ou précision de pointé) due à la diffraction. Comparer cette valeur à celle de la question précédente et commentez.

B. Voie numérique

La lame séparatrice placée à 45° entre l'objectif et la lentille de tube #1 permet de créer une seconde voie qui permettra de projeter l'image sur un capteur CCD avec une seconde lentille de tube #2 de même focale que la lentille de tube #1. La distance entre le diaphragme et la lentille de tube #2 (via la lame) est également de 100 mm. Le capteur carré est constitué de 500 pixels par 500 pixels et le pixel fait $5 \mu\text{m}$ de côté.

16. Déterminer le champ objet imagé sur le capteur.
17. Déterminer le diamètre minimum de la lentille de tube #2 nécessaire pour ne pas vignetter le champ de pleine lumière (il est recommandé de faire un schéma pour vous aider).
18. En justifiant votre réponse, quel est l'élément limitant la résolution de l'image acquise ?

objectif

lentille L#1

oculaire

D



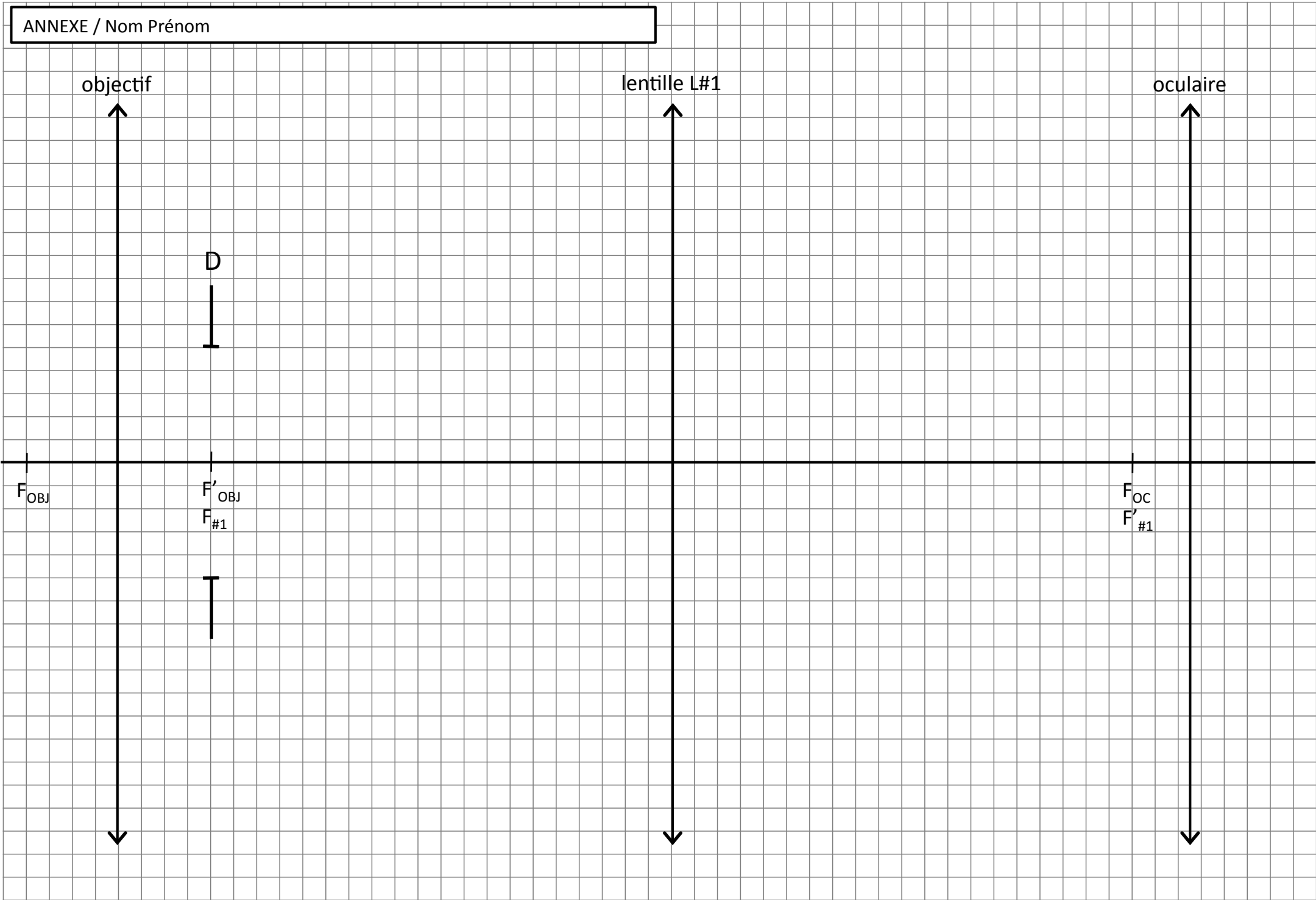
F_{OBJ}

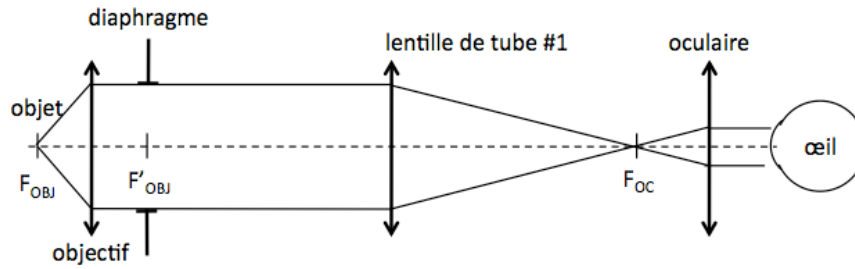
F'_{OBJ}

$F_{\#1}$

F_{OC}

$F'_{\#1}$





1.

$$F_{OBJ} \xrightarrow{\text{OBJECTIF}} \infty \xrightarrow{\#1} F'_{\#1} = F_{OC} \xrightarrow{\text{OCULAIRE}} \infty$$

2.

$$y \xrightarrow{\text{OBJECTIF}} \theta' = -\frac{y}{f'_{OBJ}} \xrightarrow{\#1} y' = f'_{\#1} \times \theta' \xrightarrow{\text{OCULAIRE}} \theta'' = -\frac{y'}{f'_{OC}}$$

3.

$$g_y = \frac{y'}{y} = \frac{f'_{\#1} \times \theta'}{-f'_{OBJ} \times \theta'} = -\frac{f'_{\#1}}{f'_{OBJ}} = -5 \longrightarrow f'_{OBJ} = 20\text{mm}$$

4.

$$G_{C\text{-oculaire}} = \frac{P_{oculaire}}{4} = \frac{1}{4f'_{oc}} = \times 20$$

$$P_{\text{scope}} = g_{y\text{-objectif}} \times P_{oculaire} = \frac{g_{y\text{-objectif}}}{f'_{oc}} = 400\text{m}^{-1}$$

5.

$$G_{C\text{-scope}} = \frac{P_{\text{scope}}}{4} = \times 100$$

6. Pupille à l'infini vue sous l'angle $2ON_{\text{scope}}$ et $ON_{\text{scope}} = \frac{\Phi_D}{2f'_{OBJ}} = 0,125$

$$\Phi_{DIFF} = \frac{1,22\lambda}{ON_{\text{scope}}} = 4,88\mu\text{m} \xrightarrow{\text{Rayleigh}} \text{Re } s = 2,44\mu\text{m}$$

7.

$$\delta\theta_{\text{oeil}} = 2' \xrightarrow{\text{scope}} \delta\theta_{\text{oeil-objet}} = \frac{\delta\theta_{\text{oeil}}}{P_{\text{scope}}} = 1,45\mu\text{m}$$

La résolution est limitée par la diffraction.

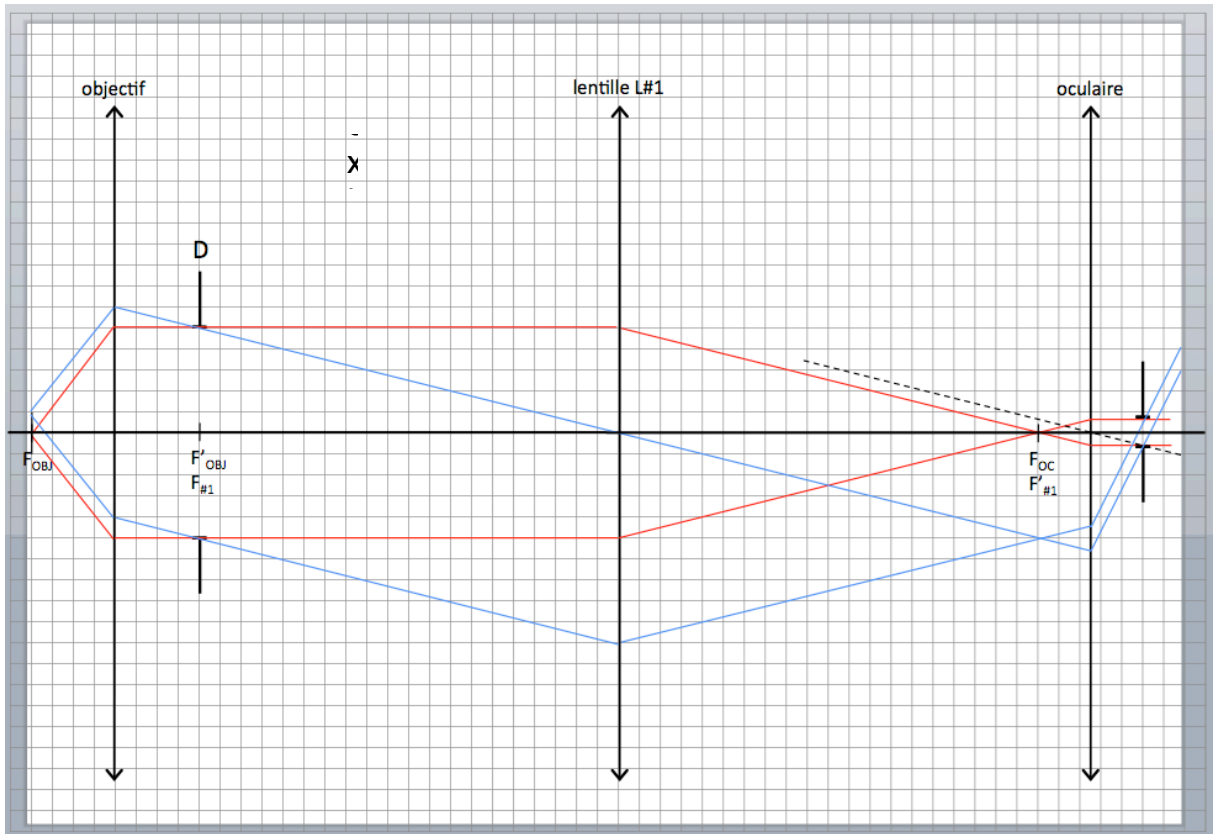
$$DO = \text{diaph} = F_{\#1} \xrightarrow{\#1} \infty \xrightarrow{\text{OCULAIRE}} F'_{OC}$$

8.

$$\Phi_{PE} = 5\text{mm} \xrightarrow{\#1} \theta_{Pi} = \frac{\Phi_{PE}}{f'_{\#1}} \xrightarrow{\text{OCULAIRE}} \Phi_{PS} = f'_{oc} \times \theta_{Pi} = \Phi_{PE} \frac{f'_{oc}}{f'_{\#1}} = 0,625\text{mm}$$

9. schéma

10. schéma



11. $\Phi_{Oculaire} \approx 5,5mm$ $\Phi_{\#1} \approx 10mm$ $\Phi_{objectif} \approx 6mm$

12. $\theta_{CPL} \approx \Phi_{CPL} \times P_{\mu scope} = 0,001 \times 400 = 0,4rad \approx 23^\circ$

13. Oeil au niveau de PS pour ne pas vignetter le champ de l'instrument

$$F_{OBJ} \xrightarrow{OBJECTIF+\#1} F'_{\#1} = F_{OC} \xrightarrow{OCULAIRE} \infty$$

14. $A \xrightarrow{OBJECTIF+\#1} A' \xrightarrow{OCULAIRE} A''$

$$dz = F_{OBJ} A = \frac{dz'}{g_x} = \frac{F_{oc} A'}{g_y^2} = \frac{f_{oc}^2}{F'_{oc} A'' \times g_y^2} = \frac{12,5^2}{250 \times 5^2} = 25\mu m$$

15. Il suffit de calculer la profondeur de champ de l'objectif, soit

$$dz' = \frac{\Phi_{DIFF}}{ON_{image}} \approx \frac{\lambda}{ON_{image}^2} \xrightarrow{obj+\#1} dz \approx \frac{\lambda}{ON_{OBJET}^2} = \frac{0,5\mu m}{0,125^2} = 32\mu m \gg dz_{acco} = 25\mu m$$

L'accommodation n'est donc pas limitante.

16. $\Phi_{vue} = \frac{\text{diagonale CCD}}{g_y} = \frac{500 \times 5\mu m \times \sqrt{2}}{5} = 0,7mm$

17. $\Phi_{\#2} = \Phi_D + \frac{\sqrt{2} \times N_{pix} \times pix}{f'_{\#2}} \times DL_{\#2} = 5 + \frac{\sqrt{2} \times 500 \times 5\mu m}{100mm} \times 100mm = 8,5mm$

18. $\Phi_{DIFF} = \frac{1,22\lambda}{ON'_{objectif+\#1}} = g_y \times \frac{1,22\lambda}{ON_{objectif+\#1}} = 24\mu m > pixel = 5\mu m$