

Les trois parties du problème sont largement indépendantes. Les réponses non justifiées aux questions qualitatives ne seront pas prises en compte.

**Partie I - Généralités sur la microscopie**

**LA - Ordres de grandeur**

Un microscope optique permet d'observer des globules sanguins, un microscope électronique des défauts d'une structure cristalline, un microscope à sonde locale des atomes. Quels sont les ordres de grandeur des objets observés et du pouvoir de résolution minimal de chacun des microscopes utilisés ?

**I.B - Microscope optique ; étude géométrique**

Un microscope optique porte les indications suivantes. Sur son objectif : x40 ; sur l'oculaire: x10. La notice constructeur précise : ouverture numérique de l'objectif  $\omega_0 = 0,65$ , intervalle optique  $\Delta = 16 \text{ cm}$ . **La signification de ces indications sera précisée dans la suite.** Le microscope sera modélisé par deux lentilles minces convergentes. Il est réglé pour donner une image à l'infini d'un objet réel AB, perpendiculaire à l'axe optique, A étant placé sur l'axe, légèrement en avant du foyer objet de l'objectif. Cette image est observée par un œil emmétrope placé au voisinage du foyer image de l'oculaire. L'œil nu voit nettement des objets situés entre la distance  $\hat{o} = 25 \text{ cm}$  et l'infini.

I.B.1) Faire un schéma du dispositif (sans respecter l'échelle) et tracer soigneusement la marche de 2 rayons lumineux issus du point B de l'objet AB, l'un émis parallèlement à l'axe optique, l'autre passant par  $F_1$  foyer objet de la lentille  $L_1$  équivalente à l'objectif de centre optique  $O_1$ .

- I.B.2)
- a) L'indication portée sur l'oculaire (x10) est le grossissement commercial, c'est-à-dire le rapport de l'angle sous lequel on voit l'image à l'infini d'un objet à travers l'oculaire seul et l'angle sous lequel on voit ce même objet à l'œil nu lorsqu'il est situé à la distance minimale de vision distincte. Déterminer  $f'_2$ , distance focale image de l'oculaire.
  - b) L'intervalle optique correspond à la distance  $F_1'F_2$ . La valeur absolue du grandissement de l'objet AB par l'objectif est : x40. Calculer  $f'_1$ , distance focale image de la lentille équivalente à l'objectif. Calculer la distance  $O_1A$  permettant de positionner l'objet.
  - c) Déterminer la latitude de mise au point, c'est-à-dire la variation de la distance  $O_1A$  compatible avec une vision nette de l'image finale par l'observateur, dont l'œil est au foyer image de l'oculaire. Interpréter le résultat obtenu.
  - d) Calculer dans le cas d'une image finale à l'infini le grossissement commercial du microscope.

I.B.3) L'ouverture numérique du microscope,  $\omega_0$ , correspond à  $n \sin u$ ,  $n$  indice du milieu dans lequel plonge l'objectif,  $u$  angle maximum des rayons issus de A arrivant sur l'objectif. Calculer  $u$  pour un objectif plongé dans l'air. Le microscope est-il utilisé dans les conditions de Gauss ? Quel type d'aberrations doit-on corriger ? Quel est l'ordre de grandeur du diamètre de la monture de l'objectif ?

I.B.4) Déterminer la position et la taille du cercle oculaire, image de la monture de l'objectif à travers l'oculaire. Quel est l'intérêt de placer l'œil dans le plan du cercle oculaire ? On serait tenté pour augmenter le grossissement du microscope de prendre un oculaire de grossissement élevé ; est-ce judicieux ? Justifier votre réponse.

## I.C - Pouvoir séparateur

Pour déterminer le pouvoir séparateur du microscope, on considère que l'objet est un réseau périodique dont la distance entre 2 traits est  $d$ , éclairé sous incidence normale par une lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0 = 586 \text{ nm}$ .

I.C.1) Établir par des considérations simples la relation donnant les directions dans lesquelles la lumière est transmise par le réseau.

I.C.2) Montrer que le premier ordre contient une information sur le pas du réseau utilisé. En déduire une condition sur l'angle maximal du rayon arrivant sur l'objectif pour que cette information soit transmise par le microscope.

I.C.3) En déduire une relation entre le pouvoir séparateur du microscope, c'est-à-dire la plus petite distance  $d_{\min}$  discernable entre 2 objets, et l'ouverture numérique de l'objectif, pour un objectif plongé dans l'air.

I.C.4) Lorsque le pouvoir séparateur est limité par l'objectif, on utilise le critère de Rayleigh qui indique  $d_{\min} = 0,61 \cdot \lambda_0 / \omega_0$ . Justifier la différence avec l'expression obtenue précédemment. Quel serait selon vous un moyen d'améliorer le pouvoir séparateur ?

I.C.5) Le microscope utilisé est-il adapté à l'observation des globules sanguins ?

I.C.6) Commenter l'affirmation suivante : « Le microscope est vis-à-vis de la fréquence spatiale l'analogue d'un filtre passe-bas utilisé en électronique » ; quelle serait la fréquence de coupure ?

## I.D - Microscope électronique

Pour augmenter le pouvoir séparateur d'un microscope, on peut envisager de remplacer les photons par des électrons et réaliser un microscope électronique. La longueur d'onde associée à un électron de quantité de mouvement  $p$  est  $\lambda = h / p$  (relation de de Broglie), avec :

constante de Planck :  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

masse de l'électron :  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .

I.D.1) Un électron, supposé initialement au repos, est accéléré sous une différence de potentiel de 10 kV. En supposant que l'on peut effectuer le calcul en mécanique classique, calculer la longueur d'onde associée à l'électron.

I.D.2) Déterminer, à partir de la relation de Rayleigh, le pouvoir séparateur ultime d'un tel microscope d'ouverture numérique 0,4 et le comparer à celui du microscope optique utilisé.

I.D.3) Quelles limites peut-on prévoir à l'utilisation de faisceaux électroniques plus énergétiques ?

Les limitations évoquées précédemment ont conduit à l'avènement d'une nouvelle famille de microscopes, d'un principe différent, les *microscopes à sonde locale*. Les microscopes à sonde locale sont des appareils dont la caractéristique commune est d'explorer une surface par des déplacements nanométriques d'une sonde au contact ou au voisinage de cette surface. L'invention du *microscope à effet tunnel* en 1984 a valu le prix Nobel à G. Binnig et H. Rohrer dès 1986 ; elle a été rapidement suivie par l'invention du *microscope à force atomique*. Dans le premier cas, la grandeur mesurée est un courant de l'ordre du picoampère (courant tunnel) circulant entre la sonde et l'échantillon. Dans le second cas, la grandeur mesurée est la force d'interaction entre la sonde et l'échantillon.