

SESSION 2026

---

**AGRÉGATION  
CONCOURS EXTERNE**

**Section : PHYSIQUE-CHIMIE  
Option : CHIMIE**

**COMPOSITION DE PHYSIQUE**

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire**

**Tournez la page S.V.P.**

A

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1500B	102	0385





## Données

### Constantes fondamentales

Charge élémentaire	$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron	$m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Constante de Planck	$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Constante de Planck réduite	$\hbar = h/2\pi = 1,06 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
Nombre d'Avogadro	$\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = k_B \mathcal{N}_A = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	$\epsilon_0 = 8,82 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

### Équation de Schrödinger

pour une particule non relativiste de masse  $m$  évoluant dans un potentiel  $V$  :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}(M, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(M, t) + V(M, t) \cdot \Psi(M, t)$$

où  $\Delta$  désigne l'opérateur laplacien.

## Formulaire et notations

### Notations :

La notation  $1'$  désigne 1 minute d'angle :  $1' = 1/60^\circ = 2,9 \times 10^{-4} \text{ rad}$ .

$i$  est le nombre complexe de partie réelle positive tel que  $i^2 = -1$ .

$\sinh(x)$  et  $\cosh(x)$  désignent respectivement le sinus et le cosinus hyperboliques de  $x$ .

Relation de conjugaison et expression du grandissement pour une lentille mince de centre optique  $O$  :

$$-\frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{f'}$$

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

où  $A$  est un point objet sur l'axe optique et  $A'$  est son image par la lentille,  $f'$  désigne la distance focale de la lentille et  $\gamma$  le grandissement. Les grandeurs  $\overline{OA}$  et  $\overline{OA'}$  sont algébriques et comptées positivement dans le sens de propagation de la lumière, qui correspond à l'orientation de l'axe optique sur les schémas de l'énoncé.

Formulaire d'analyse vectorielle en coordonnées cartésiennes :

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

# Voir de plus en plus petit, « voir » les atomes

Ce problème se compose de quatre parties. La partie 1 mobilise les bases de l'optique géométrique et le modèle optique de l'œil humain. La partie 2 aborde les principaux aspects du microscope optique et son pouvoir de résolution. La partie 3 examine le principe du microscope électronique à balayage. La partie 4 propose d'étudier un exemple de microscope à champ proche pour « voir » les atomes.

Ces quatre parties sont très largement indépendantes.

Des questions considérées comme relevant d'un socle fondamental de connaissances et de compétences en physique sont repérées par une étoile.

Le ou la candidat(e) attachera une grande importance à la clarté, à la précision et à la concision des réponses, qui devront être justifiées avec soin.

**Si, au cours de l'épreuve, un ou une candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur ou une imprécision dans l'énoncé, il ou elle le signale sur sa copie et poursuit la composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il ou elle est amené(e) à prendre.**

La révolution qui consiste, à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, à regarder non plus directement un objet mais son image agrandie « à la loupe » est à l'origine de la microscopie. L'étymologie (du grec *mikros*, petit, et *skopein*, examiner) renvoie à l'examen d'objets ou de détails d'objets à peine perceptibles ou invisibles à l'œil nu. La microscopie s'est ensuite progressivement imposée comme une technique d'observation indispensable pour accéder aux propriétés de la matière, inanimée ou vivante.

En introduisant de nouveaux modes d'observation et grâce à une perception de plus en plus fine, jusqu'à l'échelle atomique, la microscopie a ainsi bouleversé notre culture scientifique.

Le mode de production des images, leurs supports physiques, la nature et le traitement de l'information qu'elles contiennent ont conditionné l'évolution de la microscopie.

La production d'images par les microscopes traditionnels suppose ainsi :

- une **source** et un dispositif d'éclairage de l'objet,
- un **système de transmission** assurant la fonction d'agrandissement,
- un **détecteur** traduisant l'image sur un support (œil, plaque photographique, matrice CCD pour des images numérisées).

## 1 Préliminaires - L'œil humain et son pouvoir de résolution

Dans cette partie, il s'agit de mettre en place le cadre de l'optique géométrique et les bases de l'utilisation du modèle des lentilles minces, ainsi que la modélisation de l'œil humain.

Les candidat(e)s sont encouragé(e)s à appuyer leurs réponses sur des schémas, même lorsque l'énoncé ne l'indique pas.

\*□ **Q1** – Rappeler la définition et le cadre de validité de l'approximation de l'optique géométrique.

\*□ **Q2** – Citer deux situations expérimentales, l'une pouvant être décrite dans le cadre de l'optique géométrique, et l'autre ne pouvant pas être décrite dans ce cadre.

La relation de conjugaison et l'expression du grandissement rappelées dans le formulaire sont valables dans l'approximation de Gauss.

\*□ **Q3** – Rappeler en quoi consiste l'approximation de Gauss.

Pour les questions Q4 et Q5, on accompagnera chaque définition d'un schéma.

\*□ **Q4** – Définir les notions de stigmatisme rigoureux, de stigmatisme approché et d'aplanétisme.

\*□ **Q5** – Définir la notion de foyer objet et de foyer image d'un système optique.

La figure 1 ci-dessous schématise l'œil humain.

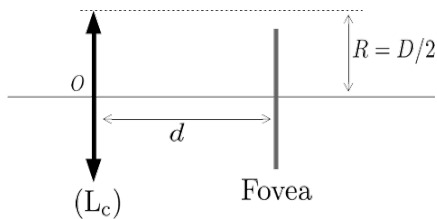


FIGURE 1 – Schéma de l'œil humain

L'ensemble {cristallin - pupille} est modélisé par une lentille mince convergente ( $L_c$ ) de distance focale  $f'$ , de rayon d'ouverture maximal  $R = D/2 = 1,5$  mm.

La distance entre le cristallin et la rétine est  $d = 17$  mm. La fovea, partie centrale de la rétine, est tapissée de cellules photosensibles, avec une densité moyenne  $N_c = 160 \times 10^3 \text{ mm}^{-2}$ .

Un œil est dit emmétrope lorsqu'il est sans défaut visuel. L'accommodation par le cristallin a lieu en modifiant son épaisseur, ce qui modifie la distance focale de la lentille ( $L_c$ ).

Le plan du Punctum Remotum (PR) est le conjugué de la fovea à travers l'œil quand celui-ci n'accommode pas. Le Punctum Remotum est le point le plus éloigné que l'œil puisse voir net sans accommoder. On le considère comme étant à une distance infinie pour un œil emmétrope. Dans cette situation, la distance focale du cristallin est notée  $f'_r$ .

Le Punctum Proximum (PP) est le point le plus proche que l'on peut voir distinctement. Pour un œil emmétrope, il est situé à une distance de  $d_{pp} = 25$  cm. Dans cette situation, où l'œil accommode, la distance focale du cristallin est notée  $f'_p$ .

\*□ Q6 – Déterminer l'expression de la distance focale  $f'_p$  du cristallin lorsque celui-ci accommode sur le Punctum Proximum, en fonction de  $d$  et  $d_{pp}$ . Calculer la valeur de  $f'_p$ .

Dans la suite de cette partie, on considère deux objets ponctuels  $A_\infty$  et  $B_\infty$  placés à très grande distance de l'œil et séparés d'un angle  $\alpha$  (voir figure 2). On prendra  $\alpha > 0$  jusqu'à la question 9 incluse. On prendra  $\lambda_0 = 500$  nm pour la longueur d'onde moyenne du rayonnement visible.

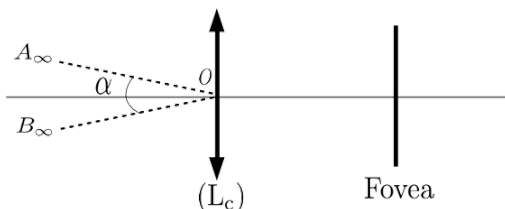


FIGURE 2 – Observation par l'œil de deux objets ponctuels à l'infini. L'œil est modélisé par l'association lentille ( $L_c$ ) + Fovea.

\*□ Q7 – Dans cette question, on ne tient pas compte de la diffraction. Déterminer la valeur minimale de l'angle  $\alpha$ , notée  $\alpha_1$ , permettant de distinguer les deux objets. On exprimera le résultat en fonction de  $f'_r$  et de  $N_c$ . Calculer la valeur de  $\alpha_1$  et l'exprimer en minutes d'angle.

En raison du phénomène de diffraction par la pupille, l'image d'un objet ponctuel est une tache sur la fovea, appelée tache d'Airy (voir figure 3). Lorsque l'objet ponctuel est situé à l'infini sur l'axe optique, la tache d'Airy est centrée sur  $F'$  et son rayon, noté  $\epsilon_d$ , est donné par la relation :

$$\epsilon_d \approx \frac{1,22 \lambda_0 f'}{D}$$

**Tournez la page S.V.P.**

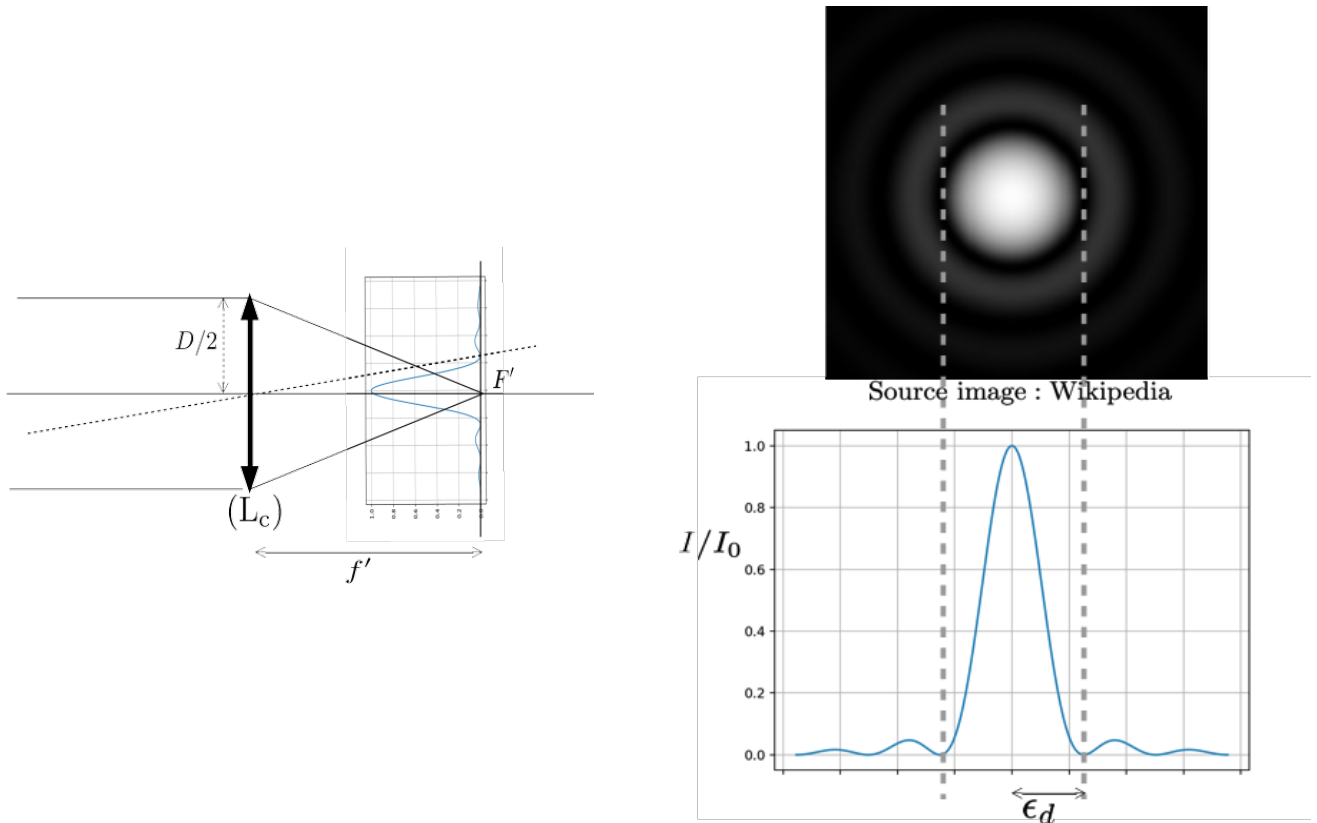


FIGURE 3 – Diffraction par la pupille, modélisée par un diaphragme circulaire de diamètre  $D$  associé à la lentille ( $L_c$ ).  $I$  représente l'intensité lumineuse en un point de l'écran,  $I_0$  l'intensité lumineuse en  $F'$ .

Le critère de Rayleigh affirme que l'on peut distinguer deux images de deux points objets si les centres des deux taches d'Airy sont distants d'au moins la demi-largeur des taches (cas 2 et 3 de la figure 4).

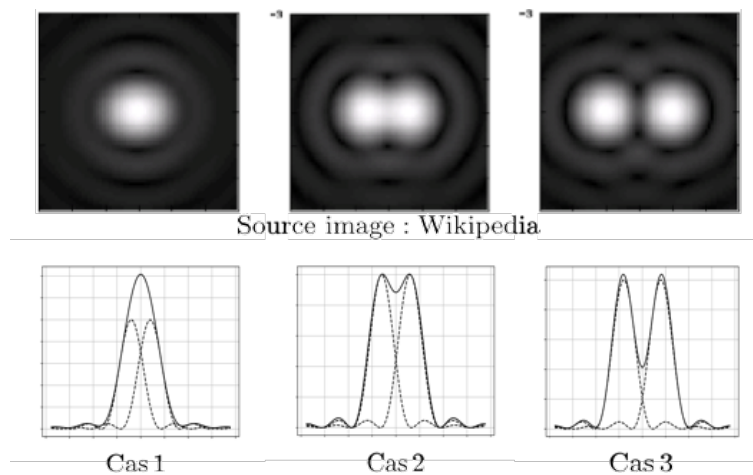


FIGURE 4 – Images, dans le plan focal de la lentille, des taches d'Airy de deux points objets  $A_\infty$  et  $B_\infty$  situés à l'infini, écartés d'un angle  $\alpha$ , pour différentes valeurs de  $\alpha$

Dans le cas 1, on ne peut pas distinguer les deux images  $A'$  et  $B'$ . Le cas 2 correspond au cas limite où l'on peut distinguer les deux images. Dans le cas 3, on distingue nettement deux images (figure 5).

□ **Q8** – Déterminer, en appliquant le critère de Rayleigh, la valeur minimale  $\alpha_2$  de  $\alpha$  pour laquelle on peut distinguer les deux points  $A_\infty$  et  $B_\infty$ . On exprimera  $\alpha_2$  en fonction de  $\lambda_0$  et de  $D$ . Calculer la valeur de  $\alpha_2$  et l'exprimer en minutes d'angle. Comparer  $\alpha_2$  à  $\alpha_1$  et commenter.

□ **Q9** – En déduire une estimation de la taille  $a_{\min}$  du plus petit objet observable à l'œil nu emmétrope, compte-tenu de la diffraction. Effectuer l'application numérique. Donner un exemple d'objet de taille de l'ordre de  $a_{\min}$ .

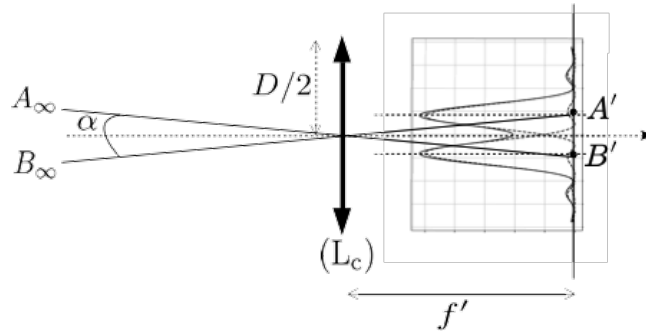


FIGURE 5 – Illustration du critère de Rayleigh dans le cas 3

## 2 Microscopie photonique

Le microscope est modélisé figure 6 par un système de deux lentilles minces convergentes :

- l'une constituant l'objectif, lentille ( $L_1$ ) de centre  $O_1$  et de distance focale image  $f'_1$ ,
- l'autre constituant l'oculaire, lentille ( $L_2$ ) de centre  $O_2$  et de distance focale image  $f'_2$ .

On note  $\overline{O_1O_2} = d_0 > 0$ .

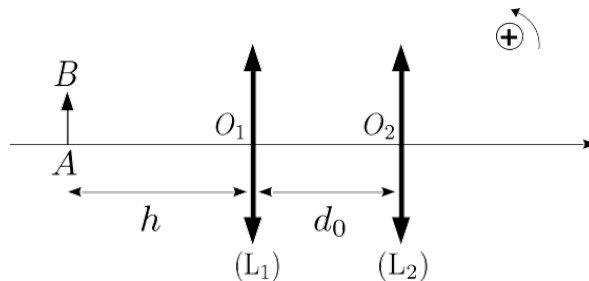


FIGURE 6 – Modélisation du microscope optique par deux lentilles convergentes ( $L_1$ ) et ( $L_2$ )

Dans cette partie, les angles sont désormais orientés selon le sens conventionnel indiqué sur la figure 6. On choisit le sens positif de l'axe optique dans le sens de propagation de la lumière.

Un microscope optique porte sur son objectif l'indication **x40** et sur l'oculaire l'indication **x10**.

La notice constructeur indique une ouverture numérique de l'objectif  $w_0 = 0,65$  et un intervalle optique  $\Delta = 160$  mm. La signification de ces indications sera précisée dans la suite de l'énoncé.

On note  $F'_1$  le foyer image de ( $L_1$ ) et  $F_2$  le foyer objet de ( $L_2$ ). On définit l'intervalle optique par la grandeur algébrique  $\Delta = \overline{F'_1F_2}$ .

□ **Q10** – Exprimer  $\Delta$  en fonction de  $f'_1$ ,  $f'_2$  et  $d_0$ .

Un objet réel  $AB$  perpendiculaire à l'axe optique est éclairé et placé à une distance  $h = |\overline{O_1A}|$  de ( $L_1$ ), à sa gauche, de façon à ce que l'observation, par un œil emmétrope placé au contact de l'oculaire, se fasse sans accommodation (voir figure 6).

□ **Q11** – Exprimer  $h$  en fonction de  $f'_1$  et  $\Delta$ .

□ **Q12** – L'indication (x 40) portée sur l'objectif est son grandissement (en valeur absolue)  $|\gamma_1|$ . Exprimer le grandissement  $\gamma_1$  de l'objectif seul en fonction de  $f'_1$  et  $\Delta$ . En déduire la valeur numérique de  $f'_1$ .

\*□ **Q13** – Compléter le schéma, **annexé en fin d'énoncé**, en traçant soigneusement la marche de deux rayons lumineux issus du point  $B$  de l'objet  $AB$ , l'un émis parallèlement à l'axe optique, l'autre passant par  $O_1$ . On fera apparaître l'angle  $\alpha'$  sous lequel est vue l'image à la sortie du microscope, ainsi que l'image  $A_1B_1$  de l'objet  $AB$  à travers l'objectif. **Ce document complété est à rendre avec la copie.**

On considère l'oculaire seul. L'indication portée sur l'oculaire (x10) est son grossissement  $G_2$ , c'est-à-dire le quotient de l'angle sous lequel on voit l'image à l'infini d'un objet à travers l'oculaire seul par l'angle sous lequel on voit ce même objet à l'œil nu lorsqu'il est situé à la distance minimale de vision distincte  $d_{pp}$ .

**Tournez la page S.V.P.**

□ Q14 – En vous appuyant sur le schéma de la question 13, exprimer  $G_2$  dans le cadre de l'approximation de Gauss, en fonction de  $f'_2$  et  $d_{pp}$ . En déduire la valeur numérique de  $f'_2$ .

Le grossissement commercial du microscope est défini par  $G = \frac{\alpha'}{\alpha_0}$ , où  $\alpha_0$  est l'angle sous lequel on voit l'objet

$AB$  à l'œil nu :  $\tan(\alpha_0) = \frac{\overline{AB}}{d_{pp}}$ .

□ Q15 – Exprimer  $G$  dans le cadre de l'approximation de Gauss, en fonction de  $\Delta$ ,  $d_{pp}$ ,  $f'_1$  et  $f'_2$ , puis en fonction de  $|\gamma_1|$  et  $G_2$ . Calculer la valeur de  $G$ .

□ Q16 – En choisissant une taille d'objet observé usuellement au microscope optique, évaluer un ordre de grandeur des angles  $\alpha_0$  et  $\alpha'$ . Au regard de ces valeurs, indiquer s'il est justifié de se placer dans l'approximation de Gauss.

La puissance d'un microscope est définie par le rapport entre l'angle sous lequel on voit l'image finale et la taille de l'objet :  $\mathcal{P} = \frac{|\alpha'|}{AB}$ . C'est une grandeur positive.

\*□ Q17 – Donner l'unité de  $\mathcal{P}$ . Exprimer  $\mathcal{P}$  en fonction de  $|\gamma_1|$ ,  $G_2$  et  $d_{pp}$  puis calculer sa valeur attendue pour le microscope étudié ici.

Afin de mesurer la valeur de  $\mathcal{P}$ , on met en œuvre le protocole suivant. L'objet  $AB$  est constitué d'une lame de verre sur laquelle est gravé un micromètre au  $\frac{1}{100^e}$  mm. Il est observé au microscope, qui en donne une image grossie. On observe cette même image à travers une lunette afocale placée au-dessus du microscope (voir figure 7(a)). La lunette a été préalablement étalonnée de telle sorte que la taille angulaire de l'une de ses graduations élémentaires représente un angle  $\theta_e = 0,0482^\circ \pm 0,0005^\circ$ .

□ Q18 – En utilisant la figure 7(b), déterminer la valeur de la puissance  $\mathcal{P}$  du microscope ainsi que l'incertitude sur la mesure. La comparer quantitativement à la valeur attendue, obtenue à la question précédente. **Cette question n'est pas guidée et nécessite de prendre des initiatives. On fera apparaître clairement les étapes du raisonnement.**

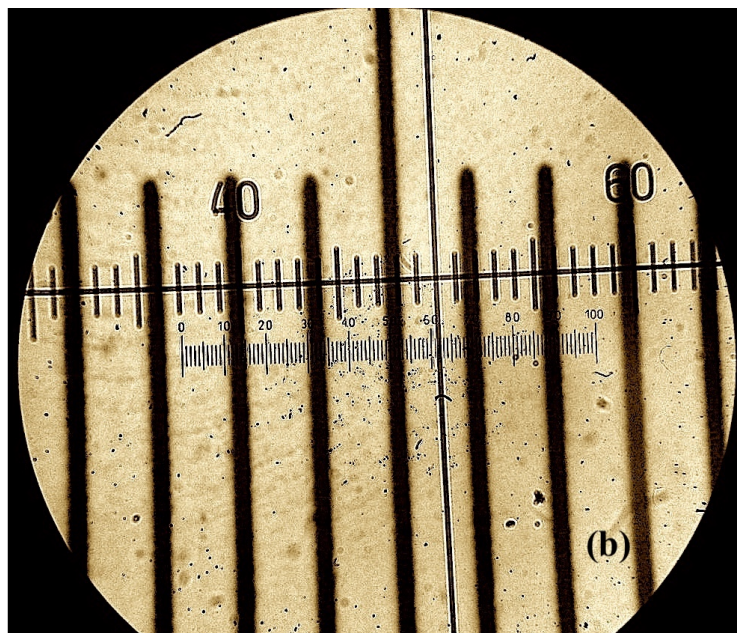
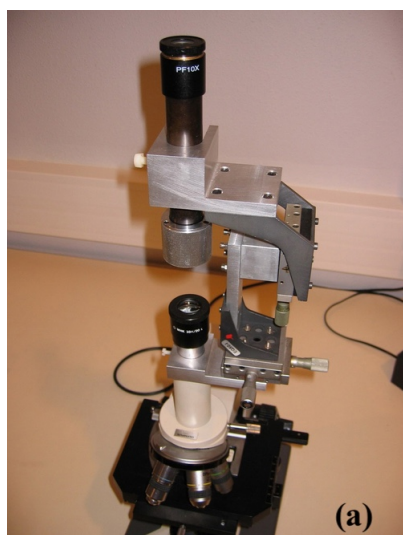


FIGURE 7 – (a) Montage associant le microscope à une lunette afocale pour la mesure de la puissance  $\mathcal{P}$ . (b) Image obtenue en sortie de la lunette. **Les plus petites graduations, appelées graduations élémentaires dans l'énoncé, correspondent à celles de la lunette afocale.** Les graduations de taille intermédiaire ne sont pas à prendre en compte. Source : [www.optique-ingenieur.org](http://www.optique-ingenieur.org)

On s'intéresse maintenant au pouvoir de résolution latéral du microscope optique, c'est-à-dire sa capacité à séparer deux objets ponctuels situés dans un plan perpendiculaire à l'axe optique. Ce pouvoir de résolution, comme pour l'œil, est limité par la diffraction par l'objectif, d'ouverture numérique  $w_0$ .

En utilisant le critère de Rayleigh, on montre que deux objets ponctuels sont discernables par le microscope s'ils sont séparés d'une distance supérieure à :

$$a'_{\min} = \frac{0,61 \lambda_0}{w_0} \quad (1)$$

□ **Q19** – Calculer  $a'_{\min}$  pour le microscope étudié ici. Indiquer si ce microscope photonique permet de voir des détails de globules rouges.

□ **Q20** – Proposer un moyen d'améliorer le pouvoir de résolution.

### 3 Microscope électronique

Dans un microscope électronique à balayage (MEB), on remplace les photons par des électrons.

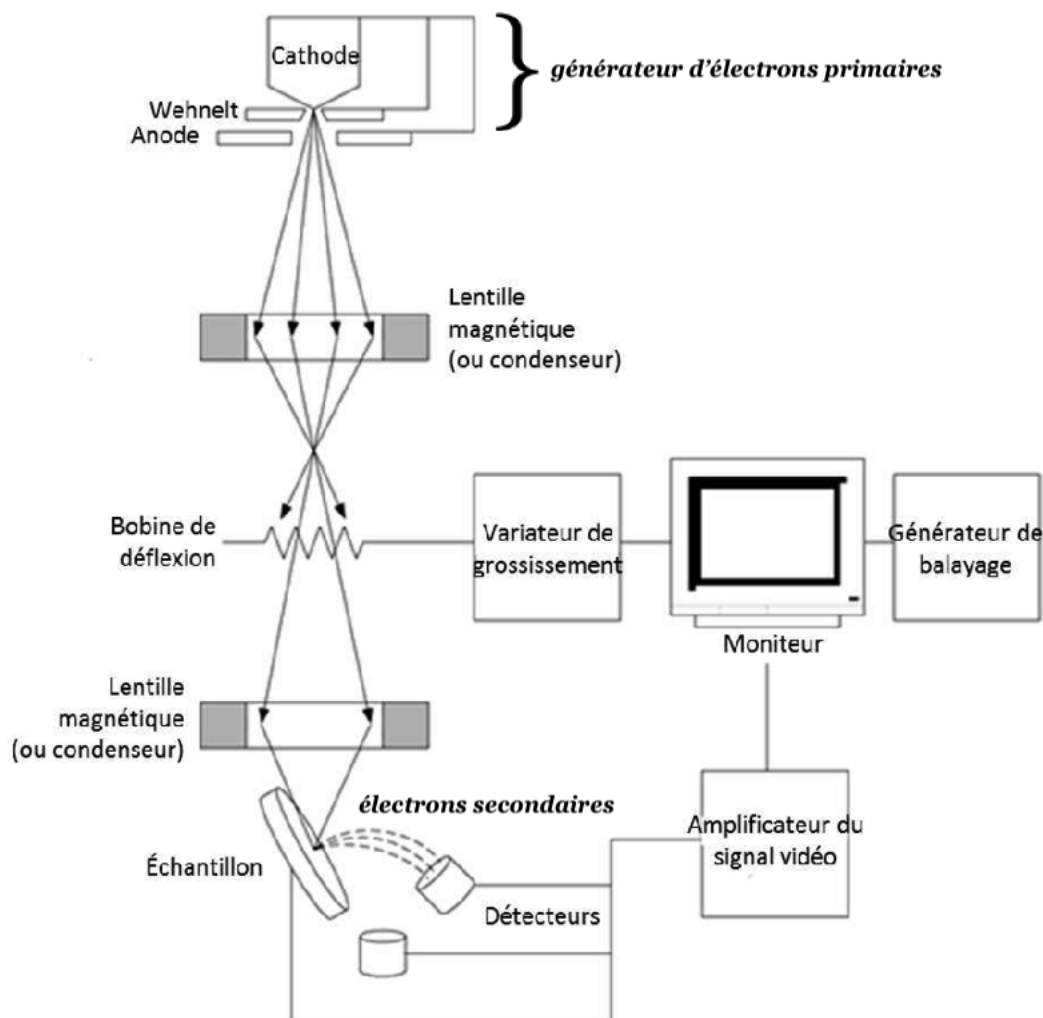


FIGURE 8 – Schéma du microscope électronique à balayage (Source Encyclopaedia Universalis)

Le principe de fonctionnement d'un microscope électronique à balayage est similaire à celui d'un microscope optique. Il est constitué de trois parties principales : un « **canon à électrons** », des **lentilles électromagnétiques** entre lesquelles est placé l'échantillon, et la **chambre d'observation** (voir figure 8). Le canon

produit et accélère les électrons (dits *électrons primaires*), les lentilles convergentes (*condenseurs*) focalisent le faisceau d'électrons, l'amenant vers l'échantillon dans des conditions déterminées. Ces électrons sont les vecteurs d'information sur l'objet étudié, tout comme les photons le sont dans le cas du microscope optique. Le détecteur permet ensuite de reconstituer l'image de l'échantillon en analysant les propriétés des électrons (dits *secondaires*) émis lors de l'interaction entre l'objet et les électrons primaires. Le tout est plongé dans un vide poussé (pression inférieure à  $10^{-3}$  Pa).

Dans cette partie, on étudie certains aspects de ce microscope : la méthode d'accélération des électrons primaires dans le canon à électrons, puis les propriétés du faisceau d'électrons avec l'étude du principe de lentille magnétique. On laissera de côté l'étude des interactions entre les électrons primaires et l'échantillon, ainsi que les techniques d'obtention d'images contrastées.

### 3.1 Génération du faisceau d'électrons et pouvoir de résolution

\*□ Q21 – Rappeler la relation de Louis de Broglie reliant la longueur d'onde  $\lambda_{dB}$  de l'onde de matière associée à une particule de quantité de mouvement  $\vec{p}$ , de norme  $p$ .

On modélise la partie « canon à électrons » par un système de deux plaques métalliques planes, parallèles, de dimensions très grandes devant leur distance mutuelle. La cathode est portée à un potentiel nul et l'anode à un potentiel  $V_a$ . La cathode émet des électrons par effet thermoïonique : les électrons de conduction quittent la surface du métal chauffée, lorsque l'agitation thermique est suffisante pour les en arracher.

\*□ Q22 – Exprimer la force de Lorentz  $\vec{F}_L$  exercée sur une charge ponctuelle  $q$ , de vitesse  $\vec{v}$  dans le référentiel d'étude, placée dans un champ électromagnétique  $(\vec{E}, \vec{B})$ .

\*□ Q23 – Définir le potentiel scalaire  $V$  de l'électrostatique. En déduire l'expression de l'énergie potentielle électrostatique  $E_{pe}$  d'une charge ponctuelle  $q$  plongée dans un champ électrostatique  $\vec{E}$ .

Indiquer, en le justifiant, le signe de  $V_a$  pour que la vitesse des électrons augmente. On pourra accompagner le raisonnement d'un schéma.

□ Q24 – En faisant l'hypothèse que les électrons primaires ne sont pas relativistes, exprimer la norme  $v_f$  de la vitesse acquise par les électrons lorsqu'ils atteignent l'anode, en supposant qu'ils sont émis par la cathode à vitesse négligeable devant  $v_f$ . On exprimera  $v_f$  en fonction de  $V_a$  et des constantes fondamentales.

□ Q25 – Calculer la vitesse des électrons pour les cas  $|V_a| = 10$  kV (cas 1) et  $|V_a| = 10^3$  kV (cas 2). Commenter la validité de l'hypothèse faite à la question précédente.

□ Q26 – On prend  $|V_a| = 10$  kV. Calculer la valeur de  $\lambda_{dB}$ . En admettant que l'on puisse utiliser la même expression que celle vue pour le microscope photonique (relation (1) avec  $w_0 = 0,65$ ), au moins en ordre de grandeur, calculer la distance minimale entre deux objets ponctuels distinguables par un MEB. Indiquer si l'étude de la matière à l'échelle atomique est possible avec un MEB dans cette hypothèse.

En réalité, le calcul du pouvoir de résolution ne peut pas être fait à partir de la relation (1).

### 3.2 Lentille magnétique

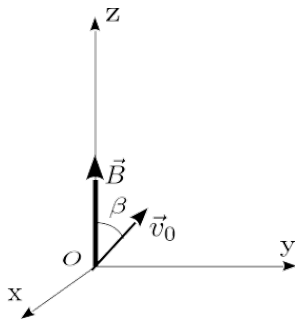
Dans cette partie, on étudie d'abord le principe de la déflexion par champ magnétique, avant de voir comment cette déflexion est utilisée pour élaborer une lentille magnétique.

#### 3.2.1 Déflexion magnétique

Le rôle d'un défecteur magnétique est de dévier le faisceau d'électrons provenant du générateur d'électrons primaires (voir figure 8).

\*□ Q27 – Donner l'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre et indiquer son origine physique.

\*□ Q28 – Montrer que la vitesse d'un électron dans la zone du défecteur magnétique garde une norme constante.



On suppose qu'un électron de masse  $m_e$ , de vitesse  $\vec{v}_0$  arrive dans une zone où règne un champ magnétique uniforme  $\vec{B} = B\vec{u}_z$  (voir figure 9). Le vecteur vitesse initiale de l'électron est situé dans le plan  $(yOz)$  et  $\vec{v}_0$  fait un angle  $\beta$  avec  $\vec{B}$  (on prendra  $\beta \in [0; \pi/2]$ ). On représente l'électron par un point matériel  $M$  de coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$ , de vitesse  $(v_x, v_y, v_z)$  dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen.

FIGURE 9 – Conditions initiales de l'électron

\*□ Q29 – Écrire les équations du mouvement de l'électron en coordonnées cartésiennes, sous forme de trois équations différentielles d'ordre 1 portant sur  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$  et  $v_z(t)$ . Indiquer la condition sur  $\beta$  pour que la trajectoire soit rectiligne.

\*□ Q30 – On pose  $\omega_c = \frac{eB}{m_e}$ . Montrer que  $\omega_c$  est homogène à une pulsation. Indiquer le nom donné à cette pulsation.

\*□ Q31 – Résoudre l'équation différentielle en  $v_z(t)$ , puis donner l'expression de  $z(t)$ , en supposant que l'électron entre dans la zone de champ magnétique au point  $O$  origine des coordonnées.

Pour résoudre les équations du mouvement selon les axes  $(Ox)$  et  $(Oy)$ , on pose  $Z = v_x + iv_y$ .

\*□ Q32 – Montrer que  $Z$  obéit à l'équation différentielle :

$$\frac{dZ(t)}{dt} = i\omega_c Z(t)$$

Expliciter complètement  $v_x(t)$  et  $v_y(t)$ , en utilisant  $\omega_c$ .

\*□ Q33 – En déduire les expressions de  $x(t)$  et  $y(t)$ , coordonnées de l'électron à un instant  $t$  pour un angle  $\beta$  quelconque.

\*□ Q34 – Dans le cas où  $\beta = \pi/2$ , décrire la trajectoire de l'électron et la tracer sur un schéma, en faisant clairement apparaître les vecteurs  $\vec{v}_0$ ,  $\vec{B}$  et le sens de parcours de l'électron sur sa trajectoire. On exprimera en particulier le rayon de la trajectoire  $r_C$  de l'électron en fonction de  $m_e$ ,  $e$ ,  $B$  et  $v_0$ .

### 3.2.2 Lentille magnétique

Une lentille magnétique sert à assurer la focalisation du faisceau d'électrons primaires dans le microscope (voir figure 8). Le champ magnétique est créé par un bobinage de  $N$  spires circulaires, parcouru par un courant stationnaire d'intensité  $I$  (voir figure 10(a)). On modélise ce bobinage par une seule spire circulaire de rayon  $a = (R_1 + R_2)/2$ , parcourue par un courant d'intensité  $NI$ . La figure 10(b) représente l'allure des lignes de champ magnétique.

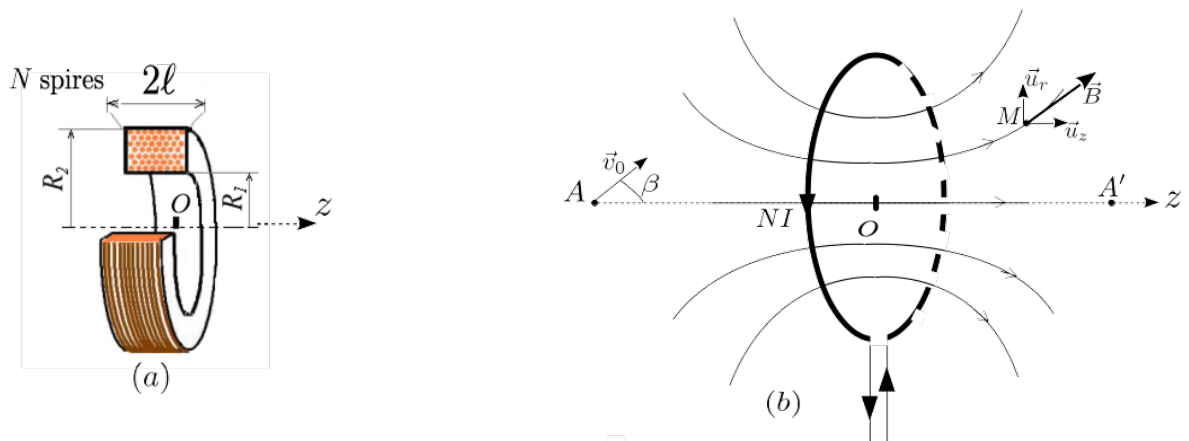


FIGURE 10 – (a) Bobinage des  $N$  spires - (b) Modélisation par une spire unique et allure des lignes de champ

Tournez la page S.V.P.

La position de l'électron est repérée par le point  $M$  de coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$ , l'axe  $Oz$  étant l'axe de symétrie de la bobine centrée en  $O$ .

\*□ **Q35** – Montrer que la norme  $B(M)$  du champ magnétique en  $M$  ne dépend pas de la coordonnée  $\theta$  du point  $M$ .

\*□ **Q36** – Montrer que le champ magnétique en  $M$  n'a pas de composante orthoradiale ( $B_\theta = 0$ ) et s'écrit donc :

$$\vec{B}(M) = B_r(r, z)\vec{u}_r + B_z(r, z)\vec{u}_z \quad (2)$$

\*□ **Q37** – Montrer que, pour un point  $P$  situé sur l'axe  $Oz$ ,  $\vec{B}(P)$  est de la forme  $\vec{B}(P) = B_a(z)\vec{u}_z$ .

Les électrons parviennent dans le champ magnétique de la bobine en formant un faisceau quasi-parallèle à l'axe  $Oz$ , de faible étendue radiale (diamètre du faisceau petit devant le rayon  $a$  de la bobine).

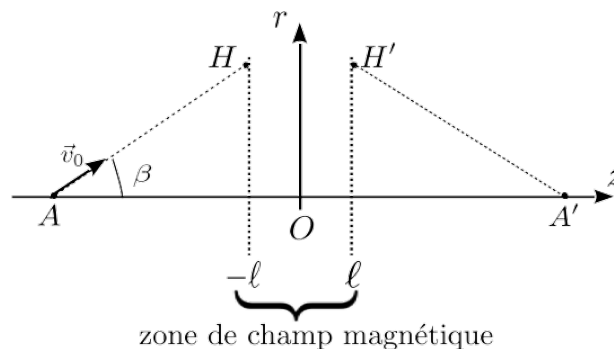


FIGURE 11 – Modélisation de la zone d'espace contenant la trajectoire de l'électron

□ **Q38** – Décrire, sans calcul, la trajectoire d'un électron de vitesse initiale  $\vec{v}_0$  rigoureusement parallèle à  $Oz$ , et arrivant en  $A$  tel que  $z_A < -\ell$ .

Pour simplifier, dans la question suivante, on suppose que la largeur de la zone d'influence du bobinage est de l'ordre de l'épaisseur de celui-ci : les électrons ne subissent le champ magnétique que lorsque  $z \in [-\ell; \ell]$  (voir figure 11).

Un électron part du point  $A$  sur l'axe  $Oz$ , avec une vitesse  $\vec{v}_0$  faisant un angle  $\beta$  faible avec  $Oz$  et se dirige vers la bobine. On appelle  $A'$  le point d'intersection avec l'axe  $Oz$  de la trajectoire de l'électron à la sortie de la bobine. On appelle  $H$  (respectivement  $H'$ ) les points d'entrée (respectivement de sortie) de l'électron de la zone de champ magnétique.

\*□ **Q39** – Indiquer à quoi correspondraient, en optique géométrique, les hypothèses de faible étendue radiale du faisceau et d'angle  $\beta$  faible.

On donne l'expression du champ magnétique créé par une spire circulaire de centre  $O$ , d'axe  $(Oz)$ , de rayon  $a$ , parcourue par un courant d'intensité  $NI$ , en un point  $P$  d'abscisse  $z$ , situé sur l'axe  $Oz$  :

$$B_a(z) = \frac{B_0}{\left(1 + \frac{z^2}{a^2}\right)^{3/2}} \quad \text{où} \quad B_0 = \frac{\mu_0 NI}{2a} \quad \text{et} \quad z = \overline{OP} \quad (3)$$

□ **Q40** – Tracer l'allure de la courbe  $B_a(z)$  pour  $z \in \mathbb{R}$ . Déterminer, en fonction de  $a$ , la distance à  $O$  pour laquelle le champ  $B_a$  vaut la moitié de sa valeur maximale  $B_0$ . Cette distance sera celle choisie pour définir  $\ell$  dans la modélisation à une seule spire.

□ **Q41** – On prend  $I = 4,0$  A,  $a = 4,0$  cm et  $N = 600$  spires. Calculer  $B_0$  et le comparer au champ magnétique terrestre. Conclure.

□ **Q42** – Montrer que le poids de l'électron est négligeable dans ces conditions. On prendra  $v_0 = 6 \times 10^7$  m·s<sup>-1</sup>.

Dans les questions suivantes, on cherche l'équation du mouvement d'un électron, sous la forme d'une relation entre ses coordonnées  $r$  et  $z$ , lorsqu'il traverse la zone de champ magnétique  $B_a(z)$  créé par la bobine. Il part

de  $A$  avec la vitesse  $\vec{v}_0$  faisant un angle  $\beta$  non nul avec  $Oz$  et se dirige vers la bobine. On adopte les hypothèses suivantes :

- hypothèse (H1) : l'électron n'est pas relativiste ;
- hypothèse (H2) : l'angle  $\beta$  est faible ;
- hypothèse (H3) : la vitesse initiale  $\vec{v}_0$  appartient au plan méridien  $\theta = 0$  ;
- hypothèse (H4) : la trajectoire de l'électron reste dans un domaine  $r \ll a$  ;
- hypothèse (H5) : on néglige l'effet de la pesanteur et du champ magnétique terrestre.

Le principe fondamental de la dynamique donne les équations du mouvement de l'électron. Une intégration partielle de ces équations conduit, compte-tenu des hypothèses (H1) à (H5), à l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2r}{dz^2} = -\frac{e^2}{4m_e^2v_0^2} r B_a^2(z) \quad (4)$$

Le script Python ci-après permet de résoudre l'équation différentielle (4) et de tracer l'allure de la trajectoire  $r(z)$  entre les points  $H$  et  $H'$  pour plusieurs valeurs de  $\beta$ . Le tracé de ces trajectoires est donné ci-dessous, figure 12.

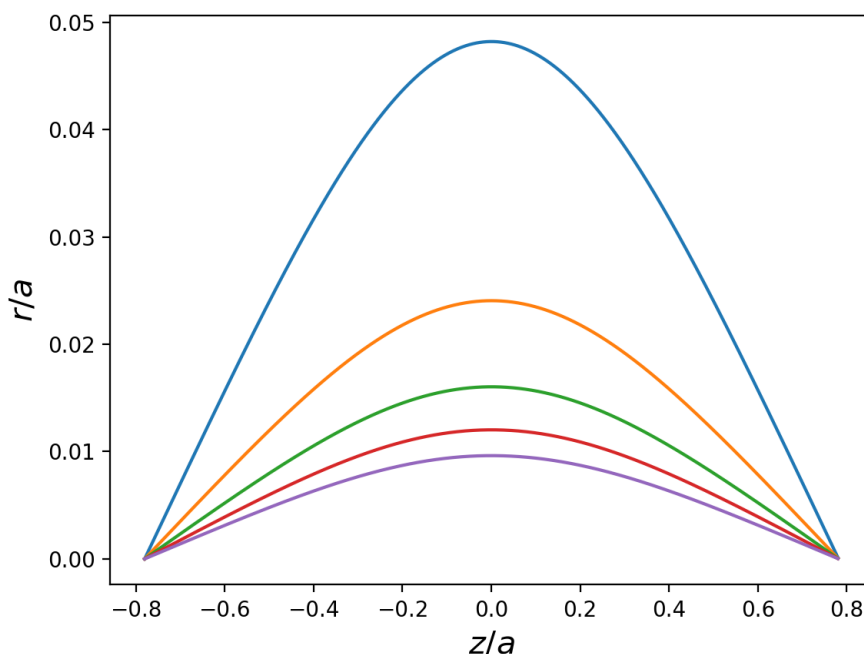


FIGURE 12 – Trajectoires de l'électron dans la zone de champ magnétique, pour différentes valeurs  $\beta$  allant de  $1^\circ$  à  $5^\circ$

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.integrate import odeint
4
5
6 """
7 DOCUMENTATION :
8 odeint(f,Y0,z) résout l'équation différentielle dY/dz=f(Y,z) où Y0 est la condition
   initiale et z un tableau contenant les valeurs de la variable z choisies pour la ré
   solution.
9 """
10
11 # valeurs des coefficients de l'équation différentielle en unités SI
12 e = 1.6e-19
13 m = 9.1e-31
14 v0 = 6e7
15 a = 4e-2
16 mu0 = 4*np.pi*1e-7
17 N = 600
18 I = 4
19 B0 = ..... # ligne à compléter
20
21 A = (B0*e/(2*m*v0))**2*a
22
23 # conditions initiales de la trajectoire
24 # angle maximal entre la vitesse initiale et l'axe Oz
25 beta = ..... # ligne à compléter
26
27 # valeur initiale de z (point H : zH = - z0)
28 z0 = 0.8*a
29
30 z = np.linspace(-z0,z0,1000)
31
32 # Résolution de l'équation différentielle (10) en r(z), pour diverses valeurs de beta
33 def f(Y,z):
34     [r,rprime]=Y
35     return([rprime,.....]) # ligne à compléter
36
37 for i in range(5):
38     rprime0i = np.tan(beta/(i+1))
39     Y0i=[0,rprime0i]
40     Sol_i=odeint(f,Y0i,z)
41
42     # Tracé de la trajectoire en coordonnées réduites r/a en fonction z/a
43     plt.figure(0)
44     plt.plot(z/a,Sol_i[:,0]/a)
45 plt.ylabel(u'$r/a$', fontsize=10, rotation=90)
46 plt.xlabel(u'$z/a$', fontsize=10)
47 plt.show()

```

- Q43 – Recopier et compléter les lignes 19 et 35 du script.
- Q44 – Recopier et compléter également la ligne 25, pour que la plus grande valeur de  $\beta$  (correspondant au tracé de la courbe la plus haute sur la figure 12) soit de  $5^\circ$ .
- Q45 – Vérifier que cette résolution numérique satisfait aux conditions des hypothèses (H2) et (H4).

Compte-tenu des résultats précédents et de l'allure des trajectoires observées, le dispositif magnétique décrit ici joue, vis-à-vis des électrons, le même rôle qu'une lentille mince (d'épaisseur  $2\ell$ ) vis-à-vis de rayons lumineux, dans l'approximation de Gauss (voir figure 13). On note  $r_0$  la valeur de  $r$  aux points  $H$  et  $H'$ .

Par des considérations géométriques, on montre que :

$$\left(\frac{dr}{dz}\right)_{z=-\ell} \approx -\frac{r_0}{OA}$$

et

$$\left(\frac{dr}{dz}\right)_{z=\ell} \approx = -\frac{r_0}{OA'}$$

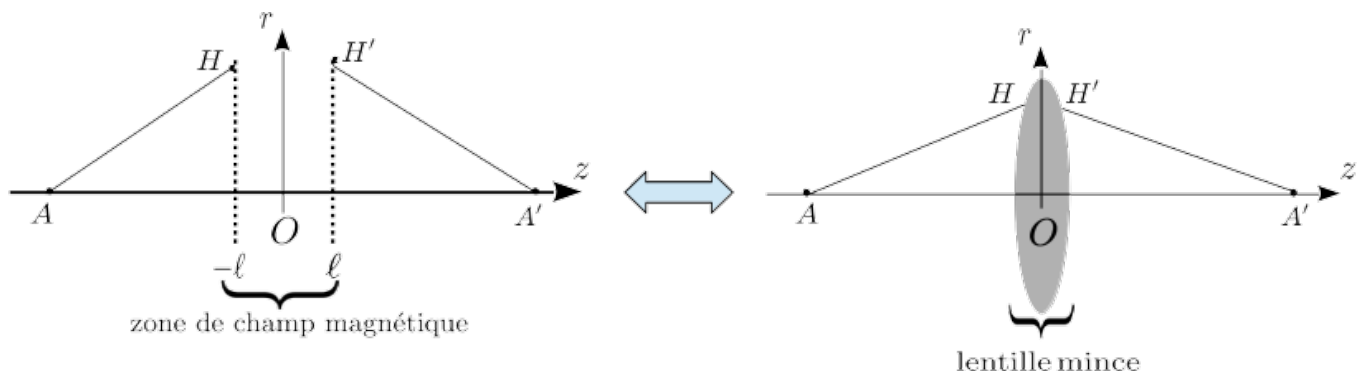


FIGURE 13 – Analogie entre la lentille magnétique et une lentille mince optique

□ **Q46** – Représenter la situation sur un schéma en faisant apparaître la trajectoire de l'électron dans cette modélisation, depuis le point  $A$  jusqu'au point  $A'$ , en faisant clairement apparaître la zone  $z \in [-\ell; \ell]$ . Dédurre de l'équation (4) que  $OA$  et  $OA'$  sont reliées par une relation analogue à la relation de conjugaison d'une lentille mince dont on exprimera la distance focale image  $f'$  en fonction de  $e$ ,  $m_e$ ,  $v_0$  et de l'intégrale :

$$\Gamma = \int_{-\ell}^{\ell} B_a^2(z) dz \quad (5)$$

On ne demande pas de calculer  $\Gamma$ .

On désire focaliser davantage le faisceau, c'est-à-dire rapprocher l'image  $A'$  de l'objet  $A$ .

□ **Q47** – Pour une tension accélératrice  $U$  donnée, indiquer sur quel(s) paramètre(s) on peut agir pour que  $A'$  se rapproche de  $A$ .

Une valeur approchée de  $\Gamma$  permet d'obtenir l'expression suivante de  $f'$  :

$$f' = \frac{32}{3\pi a} \left( \frac{m_e v_0}{e B_0} \right)^2$$

□ **Q48** – Calculer la valeur de  $f'$  et commenter.

On prendra  $a = 4,0$  cm,  $B_0 = 40$  mT et  $v_0 = 6,0 \times 10^7$  m · s<sup>-1</sup>.

## 4 Microscopie à effet tunnel : « voir » les atomes ?

Dans les microscopies traditionnelles décrites dans les parties précédentes, les distances séparant l'objet et le détecteur sont grandes par rapport à la longueur d'onde du rayonnement : on est en régime de propagation ou de champ lointain. Beaucoup plus récente, la **microscopie de champ proche** s'est rapidement développée à partir des succès du microscope par effet tunnel dans les années 1980. Ici, l'information est saisie à la source même de sa production. La distance objet-détecteur (souvent quelques distances atomiques ou quelques nanomètres) est faible par rapport à la longueur d'onde du rayonnement, ou par rapport à la portée de l'interaction entre détecteur et objet. La propagation n'intervient donc pas, ce qui élimine les problèmes d'optique de transmission et les limitations de performance qu'ils entraînent. L'image possède donc une résolution exceptionnelle fixée par la taille utile du détecteur.

On se propose dans cette dernière partie d'étudier le principe d'un microscope de champ proche particulier, le microscope à effet tunnel. **On se reportera au document en fin d'énoncé**, qui décrit le principe physique à l'origine de la microscopie par effet tunnel.

## 4.1 L'effet tunnel

\*□ Q49 – Donner une interprétation probabiliste de la fonction d'onde associée à une particule quantique.

On étudie dans toute la suite un électron évoluant dans un potentiel unidimensionnel et indépendant du temps :  $V(M, t) = V(z)$ .

On rappelle qu'un état stationnaire, pour une particule dans un potentiel  $V(z)$  indépendant du temps, est décrit par une fonction d'onde  $\Psi_S(z, t)$  de la forme :

$$\Psi_S(z, t) = \phi(z) e^{-iEt/\hbar} \quad \text{où } E \in \mathbb{R} \quad \text{est une constante} \quad (6)$$

\*□ Q50 – Donner, en la justifiant, la dimension de  $E$  et expliquer la dénomination d'état stationnaire.

\*□ Q51 – En utilisant l'équation de Schrödinger rappelée dans le formulaire, établir l'équation différentielle à laquelle satisfait la partie spatiale  $\phi$  de la fonction d'onde  $\Psi_S$ .

Dans notre étude, on modélise le profil du potentiel auquel est soumis un électron du substrat en interaction avec la pointe par un profil constant par morceaux. Le potentiel auquel est soumis l'électron dans le substrat (échantillon) est choisi comme origine des potentiels ( $V = 0$  pour un électron dans le substrat). L'allure du profil de potentiel est donnée figure 14(b).

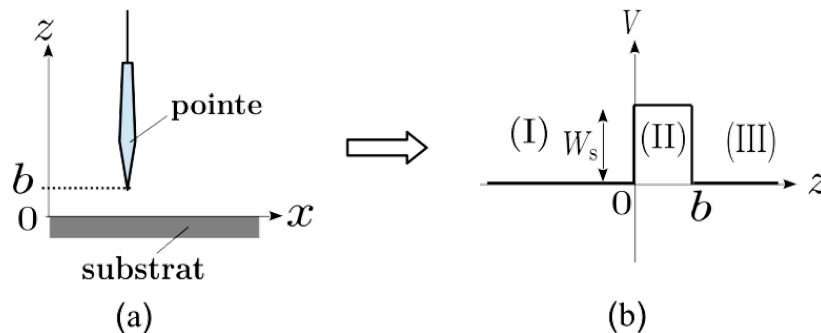


FIGURE 14 – Modélisation de l'interaction pointe-substrat : (a) géométrie simplifiée du dispositif - (b) profil modélisé du potentiel  $V(z)$  dans lequel évolue un électron

La région (I) représente l'intérieur du substrat, la région (II) le vide entre l'échantillon et la pointe et la région (III) le métal de la pointe.  $W_s$  est le travail d'extraction du substrat. Dans la suite, on prendra  $W_s = 4,5$  eV.

L'électron arraché au substrat possède une énergie  $E$  inférieure à  $W_s$  et traverse la barrière de potentiel que constitue le vide de la région (II) par effet tunnel.

\*□ Q52 – Écrire l'équation différentielle à laquelle satisfait la partie spatiale de la fonction d'onde dans chacune des trois régions et en donner les solutions générales, que l'on notera  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  et  $\phi_3$ . On ne cherchera pas à expliciter les différentes constantes qui apparaîtront dans ces solutions. On exprimera ces solutions en fonction des deux paramètres :

$$k = \frac{\sqrt{2m_e E}}{\hbar} \in \mathbb{R}^+ \quad (7)$$

$$q = \frac{\sqrt{2m_e (W_s - E)}}{\hbar} \in \mathbb{R}^+ \quad (8)$$

\*□ Q53 – Indiquer les conditions aux limites imposées à la fonction d'onde  $\phi$  et à sa dérivée spatiale  $\frac{d\phi}{dz}$  en  $z = 0$  et  $z = b$ .

\*□ Q54 – Commenter la forme de la fonction d'onde dans la région (II), et nommer ce type d'ondes.

\*□ Q55 – Indiquer un autre domaine de la physique où l'on rencontre ce type d'ondes (on donnera un

contexte précis). Donner la dimension et la signification physique de la grandeur  $1/q$ .

On admet que pour un électron représenté par un état stationnaire sous forme d'une onde plane progressive harmonique  $\Psi(z, t) = A e^{i(kz - \frac{E}{\hbar}t)}$ , le vecteur densité de courant de probabilité s'écrit :

$$\vec{J} = |\Psi|^2 \frac{\hbar k}{m_e} \vec{u}_z$$

\*□ **Q56** – Donner l'interprétation probabiliste de  $\vec{J}$  en utilisant une analogie avec un autre domaine de la physique que l'on explicitera.

On définit le coefficient de transmission  $T$  à travers la barrière par la relation :

$$T = \frac{||\vec{J}_{\text{trans}}||}{||\vec{J}_{\text{inc}}||} \in [0; 1]$$

où  $\vec{J}_{\text{trans}}$  est le vecteur densité de courant de probabilité pour l'onde transmise dans la région (III) et  $\vec{J}_{\text{inc}}$  celui pour l'onde incidente dans la région (I).

\*□ **Q57** – Donner une interprétation probabiliste de  $T$ . Justifier alors la dénomination d'« effet tunnel ».

La résolution du système d'équations obtenu à partir de la forme des solutions et des conditions aux limites permet d'exprimer  $T$  sous la forme :

$$T = \frac{1}{1 + \gamma \sinh^2(qb)} \quad \text{où} \quad \gamma = \frac{W_s^2}{4E(W_s - E)}$$

□ **Q58** – On se place l'approximation de la barrière épaisse. Définir cette approximation et montrer que l'on obtient alors une expression simplifiée du coefficient  $T$  :

$$T \approx 16 \frac{E}{W_s} \left(1 - \frac{E}{W_s}\right) e^{-2qb} \quad \text{avec, pour rappel,} \quad q = \frac{\sqrt{2m_e(W_s - E)}}{\hbar}$$

## 4.2 Pouvoir de résolution du microscope à effet tunnel

□ **Q59** – En prenant un électron d'énergie  $E$  telle que  $W_s - E = 1 \text{ eV}$ , évaluer la valeur  $T_1$  du coefficient de transmission pour une barrière de largeur  $b_1 = 0,5 \text{ nm}$ , puis sa valeur  $T_2$  pour  $b_2 = 0,6 \text{ nm}$ . Commenter.

□ **Q60** – En se référant au document en fin d'énoncé, calculer la valeur du paramètre  $k_0$  pour  $W_s = 4,5 \text{ eV}$  et évaluer la résolution verticale  $\Delta z_{\text{min}}$  d'un tel microscope à la distance  $z = 0,1 \text{ nm}$  du substrat, si on admet que la sensibilité sur l'intensité du courant tunnel est de 2 %.

□ **Q61** – Un modèle théorique, adapté à un certain nombre de situations, montre que la résolution latérale du microscope à effet tunnel est de l'ordre de  $\Delta x_{\text{min}} = \sqrt{\frac{2z'}{k_0}}$  où  $z'$  est la distance entre la surface de l'échantillon et le centre de l'atome à l'extrémité de la pointe. Évaluer l'ordre de grandeur de la résolution latérale  $\Delta x_{\text{min}}$  dans le cas présenté ici.

□ **Q62** – Indiquer pour quelle(s) raison(s) on peut conclure que le microscope à effet tunnel permet de « voir » les atomes.

On forme l'image de la surface d'un échantillon de graphite, dont la structure cristalline est donnée figure 15(b). On enregistre l'intensité du courant tunnel le long de la ligne de balayage indiquée par un trait noir sur la figure 15(a). L'enregistrement de ce courant tunnel  $I_t$  est restitué figure 16.

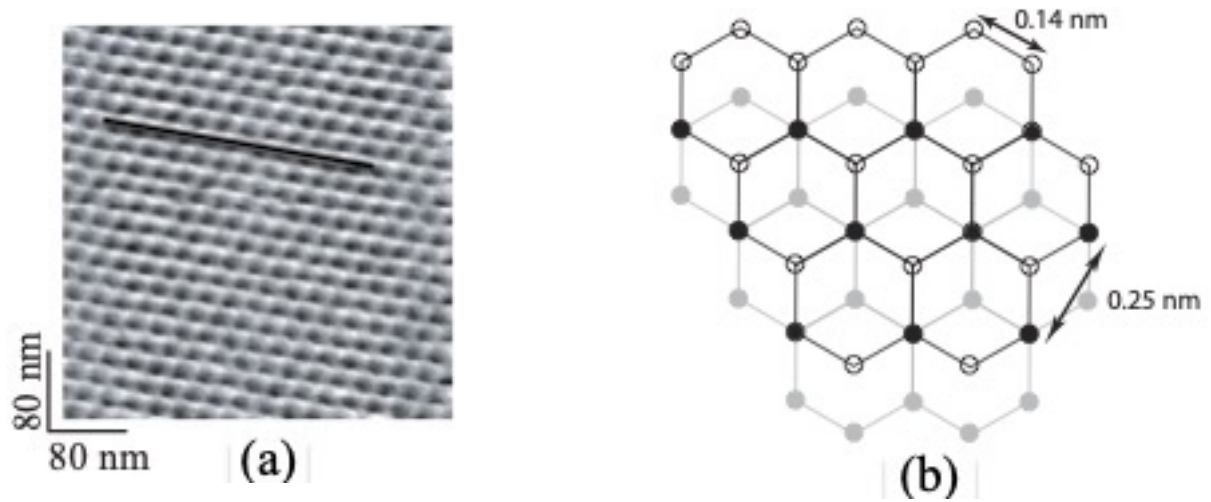


FIGURE 15 – (a) Vue de la surface de l'échantillon au STM - (b) Structure des différentes couches de carbone dans le cristal : en noir ou blanc la couche A et en gris la couche B. Source : Article ENS Paris Saclay N.Witkowski-F.Moulin (énoncé de travaux pratiques)

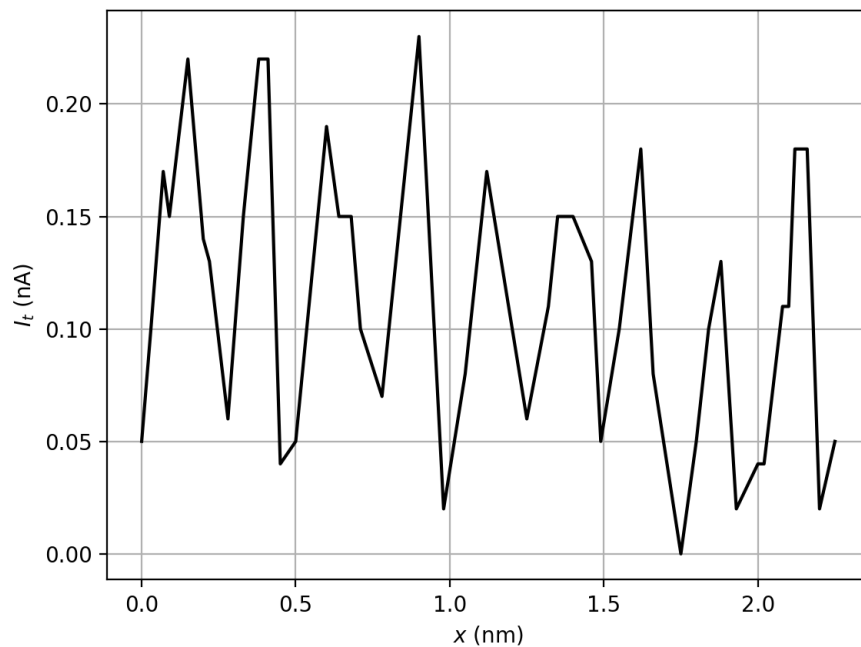


FIGURE 16 – Profil du courant tunnel  $I_t$  en fonction de l'abscisse  $x$  mesurée le long de la ligne de balayage indiquée figure 15(a). Source : Article ENS Paris Saclay N.Witkowski-F.Moulin (énoncé de travaux pratiques)

□ **Q63** – En exploitant le graphe de la figure 16, déterminer la distance entre maxima de  $I_t$ . Comparer à la valeur de la distance entre atomes de carbone donnée figure 15(b). Sachant que  $I_t$  est très sensible à la densité électronique dans le substrat, expliquer l'éventuelle incompatibilité entre les deux valeurs. **Cette question n'est pas guidée et nécessite de prendre des initiatives.**

En outre, la pointe du STM peut être utilisée pour déplacer des atomes et construire des structures atomiques particulières. Par exemple, les laboratoires d'IBM ont construit un « nano-enclos » circulaire de rayon 7,13 nm, constitué de 48 atomes de fer à la surface d'un nano-échantillon de cuivre (voir figures 17 et 18).

□ **Q64** – Indiquer à quoi correspondent les « vaguelettes » concentriques aperçues figure 18. On justifiera la réponse en calculant d'ordre de grandeur de la longueur d'onde de de Broglie  $\lambda_{dB}$  de l'électron piégé. **Cette question n'est pas guidée et nécessite de prendre des initiatives, en particulier sur les valeurs numériques.**

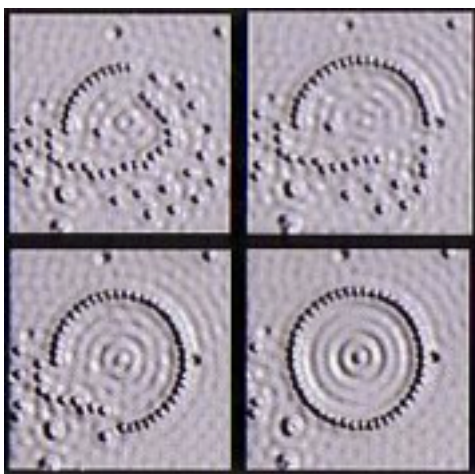


FIGURE 17 – Étapes de la réalisation du « nano-enclos ». Sur la dernière, on repère l'électron piégé dans cet « enclos » de largeur 7,13 nm. Source IBM Almaden [www.research.ibm.com](http://www.research.ibm.com) et article Pour la Science décembre 2006

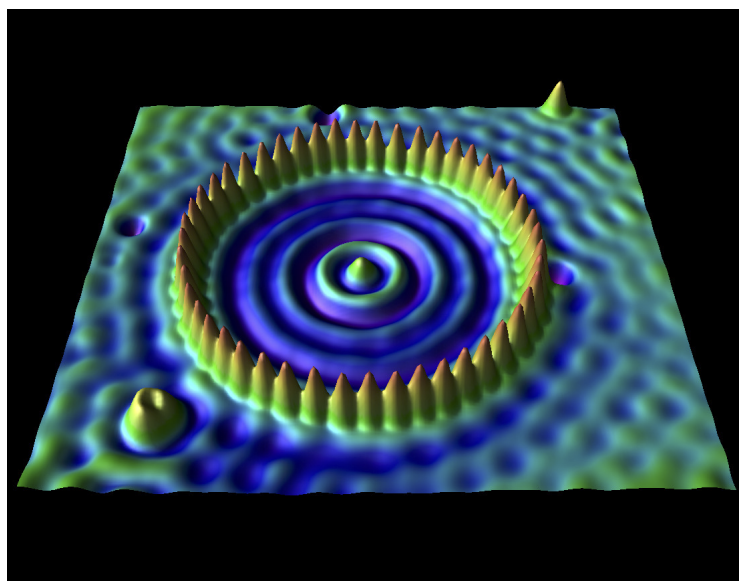


FIGURE 18 – Le « nano-enclos » imagé par le STM. Source IBM Almaden [www.research.ibm.com](http://www.research.ibm.com)

## Document - Microscope à effet tunnel

Le microscope à effet tunnel (« **Scanning Tunneling Microscope** » ou **STM**) a été mis au point par deux chercheurs d'IBM, **Gerd Binnig** et **Heinrich Rohrer**, en 1981 (prix Nobel en 1986) et repose sur un phénomène quantique découvert en 1928 : l'effet tunnel.

Si on approche une **pointe** métallique à une distance suffisamment faible d'un échantillon (appelé **substrat**) conducteur ou semi-conducteur, et si on applique une différence de potentiel entre cette pointe (anode) et l'échantillon (cathode), un courant électronique d'intensité mesurable peut s'établir entre les deux par effet tunnel (voir figure 19).

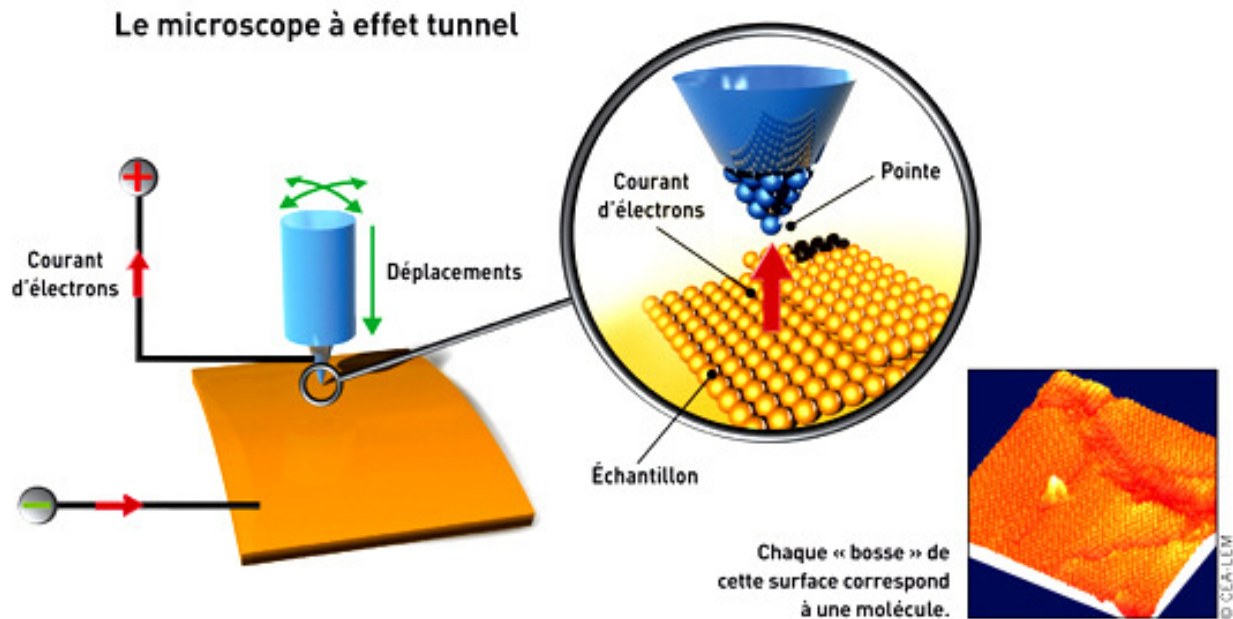


FIGURE 19 – Principe d'imagerie par STM. Source : <https://complexe.jimdofree.com>

Lorsque la pointe parcourt la surface de l'échantillon, à environ un nanomètre de distance, les électrons attirés par la pointe traversent la séparation par effet tunnel. Le principe du STM réside dans le fait que la valeur du courant tunnel varie fortement avec la distance de séparation. L'intensité de ce courant tunnel peut être aussi faible que quelques pA, et une variation de la séparation de seulement 0,4 nm peut provoquer une variation d'un facteur  $10^4$  de cette intensité.

On peut démontrer (avec un modèle simplifié) que l'intensité du courant tunnel mesuré varie avec la distance  $z$  (quelques angströms) entre pointe et échantillon selon :

$$I_{\text{tunnel}} = C \cdot U_t \frac{k_0}{z} e^{-2k_0 z} \quad \text{avec} \quad k_0 = \frac{\sqrt{2m_e W_s}}{\hbar}$$

$U_t$  est la différence de potentiel appliquée (valeur typique 100 mV) et  $W_s$  est la travail d'extraction d'un électron de masse  $m_e$ .

**La constante  $C$  ne dépend pas de  $z$  mais dépend fortement de la densité électronique locale dans le substrat.**

En pratique, un mécanisme de rétroaction très sensible règle la position de la pointe pour maintenir un courant électronique stable. Ce mécanisme contrôle le mouvement de la pointe selon trois directions de l'espace

par trois céramiques piézoélectriques (voir figure 20).

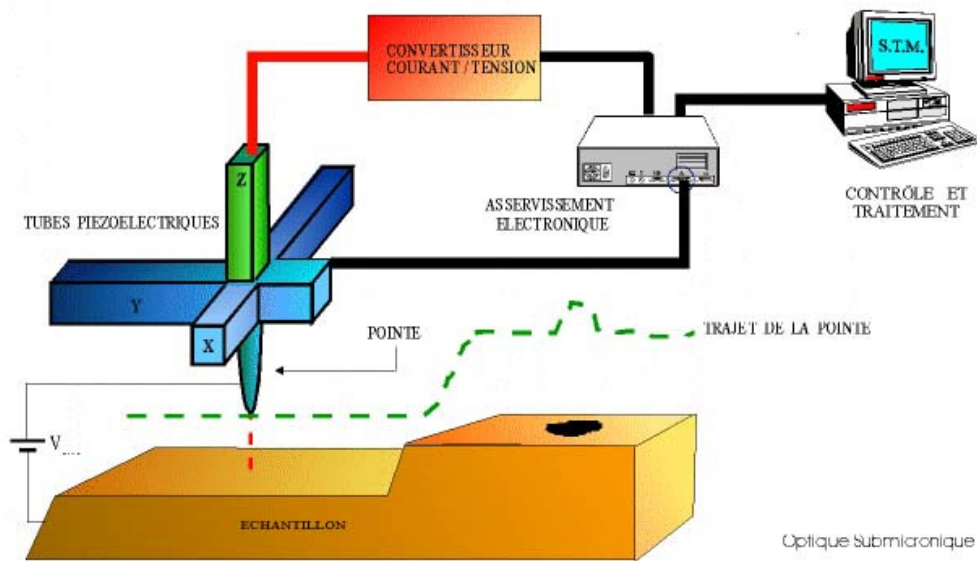


FIGURE 20 – Asservissement et pilotage de la pointe par céramiques piézoélectriques. Source : <https://complexe.jimdofree.com>

Pour former l'image d'une surface, on utilise un asservissement du courant tunnel. Le mouvement de la pointe perpendiculairement à la surface qui assure une valeur constante de  $I_{\text{tunnel}}$  permet de reproduire les contours des atomes de l'échantillon, produisant une carte topographique de la surface : on enregistre les variations de  $z$  en fonction de la position en  $x$  et  $y$  de la pointe (voir figure 20). On peut ainsi explorer des zones de largeur en  $(x, y)$  de l'ordre de  $100 \times 100 \text{ nm}^2$ .

Les pointes doivent être constituées d'un seul atome à leur extrémité, pour obtenir une résolution latérale maximale.



**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**

**Annexe à rendre avec la copie**

Schéma à compléter relatif à la question Q13

