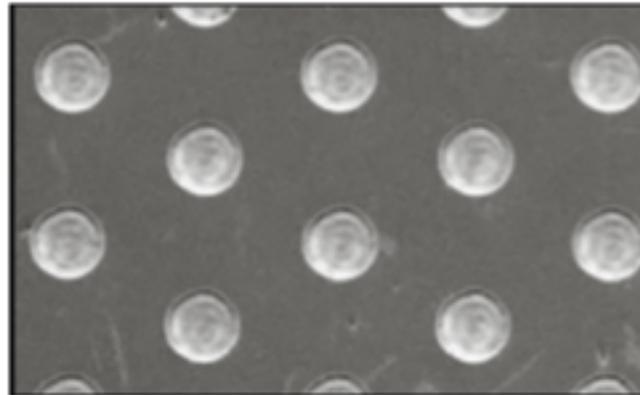


► Exercice 1

La micro texturation de surface est une technologie qui permet d'optimiser la lubrification des pièces métalliques en contact, par exemple dans les moteurs employés dans les sports mécaniques (Formule 1, moto grand prix, etc.).

Cette micro texturation est réalisée sur des matériaux appelés DLC (Diamond Like Carbon) déposés en fines couches sur les pièces à lubrifier.



Grâce à l'utilisation d'un laser à impulsions ultra-brèves, on crée à la surface des pièces mécaniques un réseau de motifs (cavités, rainures, etc.) ayant des dimensions de quelques dizaines de micromètres qui se comportent comme des micros réservoirs d'huile (après lubrification).

**Les lasers pulsés**

A la différence d'un laser conventionnel qui produit un rayonnement continu, les lasers pulsés émettent des flashes lumineux très brefs qu'on appelle des impulsions. La durée  $\tau$  et la cadence (fréquence)  $f$  de ces impulsions sont réglables. Un laser pulsé est dit « femtoseconde » si la durée  $\tau$  est de l'ordre d'une à quelques centaines de femtosecondes. Contrairement aux lasers continus qui produisent un rayonnement monochromatique, les lasers pulsés émettent un rayonnement polychromatique dans une bande de fréquence de largeur  $\Delta\nu$  centrée sur une fréquence  $\nu_0$  (voir schéma). Les énergies des impulsions femtosecondes peuvent paraître faibles (de l'ordre du mJ à  $f = 1$  kHz mais leur brièveté fait que la puissance instantanée du laser durant une impulsion (puissance de crête) peut atteindre plusieurs gigawatts dans le domaine industriel.

TAB. 3 – Comparaison d'un laser « continu » et d'un laser pulsé.

|   | Laser continu  | Laser pulsé<br>de période de répétition T   |
|---|--|---|
| Evolution de la puissance au cours du temps | <p>Graph showing constant power over time for a continuous laser.</p>                            | <p>Graph showing pulsed power over time. The power is zero most of the time, with short pulses of peak power <math>P_{\text{crête}}</math> and duration <math>\tau</math>. The average power is <math>P_{\text{moyenne}}</math>. The period between pulses is <math>T</math>.</p> |
| Spectre en fréquence                        | <p>Graph showing a single sharp line at frequency <math>\nu_0</math> for a continuous laser.</p> | <p>Graph showing a broad frequency band centered at <math>\nu_0</math> with width <math>\Delta\nu</math> for a pulsed laser.</p>  |

TAB. 4 – Caractéristiques techniques d'un laser « femtoseconde » infrarouge.

| Caractéristique                                  | Valeur                      |
|--|-----------------------------|
| Fréquence centrale du rayonnement émis           | $\nu_0 = 375$ terahertz     |
| Largeur de la bande de fréquence d'émission      | $\Delta\nu = 100$ terahertz |
| Cadence (fréquence) des impulsions               | $f = 1,0$ kHz               |
| Durée d'une impulsion                            | $\tau = 150$ fs             |
| Puissance de crête atteinte durant une impulsion | $P_{\text{crête}} = 1,0$ GW |
| Diamètre de la section circulaire du faisceau    | $D = 98 \mu\text{m}$        |

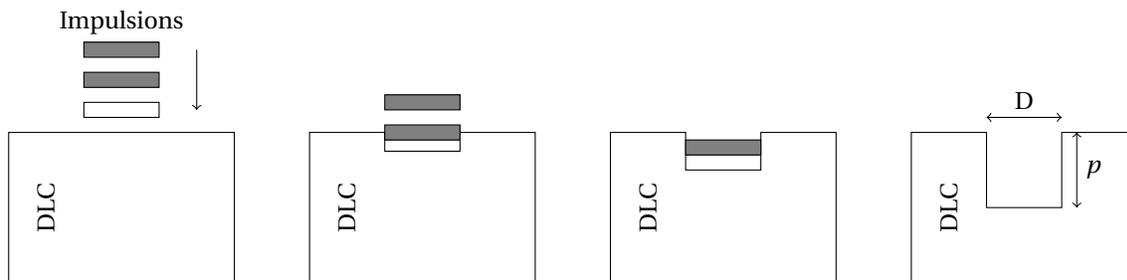
### Cavité de diamètre $D$ et de profondeur $p$ dans une couche de DLC

Lorsqu'on dirige un faisceau laser pulsé femtoseconde vers une surface recouverte de DLC, chaque impulsion laser apporte suffisamment d'énergie pour graver (creuser) une cavité cylindrique dans la couche de DLC. On admet que le diamètre de la cavité gravée correspond au diamètre  $D$  du faisceau laser utilisé.

On a tracé ci-dessous la courbe donnant le taux d'ablation du DLC par impulsion, c'est-à-dire la profondeur de la cavité gravée par une seule impulsion laser, en fonction de la fluence  $F$  du laser utilisé.

La fluence est obtenue en divisant l'énergie d'une impulsion laser (en Joule) par la surface circulaire gravée (en  $\text{cm}^2$ ).

On admettra, comme le montrent les schémas ci-dessous, que la profondeur totale  $p$  de la cavité gravée est proportionnelle au nombre d'impulsions reçues et donc à la durée  $\Delta t$  de la gravure.



### Données

- La valeur de la célérité de la lumière dans le vide (ou dans l'air) doit être connue par le candidat ;
- Constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s.

#### 1. Caractéristiques d'une impulsion du laser femtoseconde

- (a) Montrer que l'énergie transportée par une seule impulsion du laser précédent est égale à 0,15 mJ.
- (b) Evaluer le nombre de photons produits par le laser durant une seule impulsion.

#### 2. Gravure par le laser femtoseconde

On utilise le laser femtoseconde pour graver une cavité dans une couche de DLC.

Déterminer la fluence du laser étudié, puis la durée  $\Delta t$  nécessaire à la gravure d'une cavité circulaire cylindrique de 98  $\mu\text{m}$  de diamètre et de 6  $\mu\text{m}$  de profondeur.

## ► Exercice 2

Rendue possible par la découverte de la nature ondulatoire de la matière par Louis de Broglie en 1924, la microscopie électronique a été inventée en 1931 et sans cesse développée depuis. Alors que les microscopes optiques classiques permettent de voir des détails allant jusqu'au dixième de micromètre, la résolution des meilleurs microscopes électroniques actuels est inférieure au dixième de nanomètre.

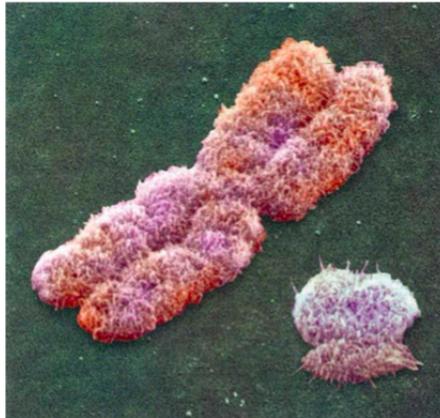


FIGURE 1 – Les chromosomes sexuels humains vus par un microscope électronique

Le principe général de fonctionnement d'un microscope électronique est le même que celui d'un microscope optique : l'objet à analyser est éclairé et des lentilles permettent de grossir son image. Mais au lieu d'éclairer avec de la lumière, le microscope électronique utilise un faisceau d'électrons produit par un canon à électrons. Au lieu de grossir l'image à l'aide de lentilles en verre, il emploie des lentilles magnétiques.

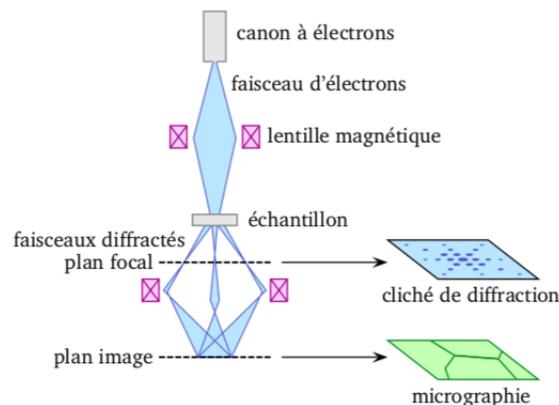


FIGURE 2 – Principe d'un microscope électronique en transmission

### Données

- masse d'un électron :  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  kg ;
- charge élémentaire :  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C ;
- constante de Planck :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s ;
- conversion d'énergie :  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$  J.

#### 1. Etude du canon à électrons

Le canon à électrons comporte une électrode chauffée de laquelle des électrons sont arrachés avec une vitesse initiale nulle, dans une enceinte où règne un vide poussé. Ils sont ensuite accélérés par un champ électrique uniforme régnant entre deux armatures A et B.

- Donner l'expression de l'énergie acquise à la sortie du canon en fonction de  $e$  et de la tension  $U_{AB}$  régnant entre les armatures.
- En déduire que l'énergie cinétique d'un électron à la sortie du canon est  $E_c = eU_{AB}$ .
- Si l'électron n'est pas relativiste, cette énergie cinétique peut se mettre sous la forme  $E_c = \frac{p^2}{2m_e}$ , où  $p$  est la valeur de la quantité de mouvement de l'électron. En déduire l'expression de  $p$  en fonction de  $e$ ,  $m_e$  et  $U_{AB}$ .

## 2. Résolution du microscope

La taille du plus petit détail observable par un microscope optique est proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière utilisée. De même, la résolution d'un microscope électronique dépend de la longueur d'onde des électrons envoyés sur l'objet à observer.

- (a) Donner les valeurs des longueurs d'onde limites du domaine visible.
- (b) Expliquer alors l'intérêt d'utiliser des électrons plutôt que de la lumière visible pour effectuer de la microscopie.
- (c) Rappeler l'expression de la longueur d'onde d'un électron en fonction de  $h$  et de la valeur  $p$  de la quantité de mouvement de l'électron.
- (d) En utilisant la réponse à la question **1.c.**, en déduire que

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e e U_{AB}}}.$$

- (e) Calculer lorsque  $U_{AB} = 1,00 \text{ kV}$ .

## 3. Différents types d'observations

Il existe plusieurs types de microscopes électroniques. Si les objets à analyser ne sont pas trop épais, il est possible de faire de la microscopie électronique en transmission. Deux modes d'observation sont alors possibles : soit la figure de diffraction est observée, soit le faisceau transmis en ligne droite est projetée.

- (a) Lequel de ces deux modes d'observation est analogue à l'observation classique dans un microscope optique ?
- (b) Lequel de ces deux modes d'observation relève du caractère ondulatoire de l'électron ?
- (c) Lors de la traversée de l'échantillon, quel type d'interaction peut survenir entre l'électron et la matière ? Montrer qu'un autre type d'observation est alors possible.

## 4. Vitesse des électrons

L'un des avantages de la microscopie électronique est que la vitesse des électrons, donc leur longueur d'onde, est facilement ajustable.

- (a) Faut-il augmenter ou diminuer  $U_{AB}$  pour diminuer  $\lambda$  ? Justifier.
- (b) Un électron est accéléré par une tension  $U_{AB} = 400 \text{ kV}$ . En utilisant la relation donnée à la question **2.d.**, déterminer sa longueur d'onde.
- (c) Déterminer également la valeur  $p$  de sa quantité de mouvement, puis la valeur  $v$  de sa vitesse.
- (d) Ce dernier résultat vous paraît-il admissible ? Quelle hypothèse faite est ici remise en question ?