

# Table des matières

<b>19</b>	<b>Superposition d'ondes lumineuses</b>	<b>2</b>
<b>19.1</b>	<b>Problèmes</b>	<b>2</b>
19.1.1	Figure d'interférence du réseau.....	2
<b>19.2</b>	<b>Oral Banque PT</b>	<b>3</b>
19.2.1	Utilisation d'un goniomètre.....	3
19.2.2	Spectrométrie à réseau.....	3
<b>19.3</b>	<b>Annales</b>	<b>3</b>
19.3.1	Suivi de croissance d'une monocouche par diffraction RHEED.....	3

---

# 19 Superposition d'ondes lumineuses

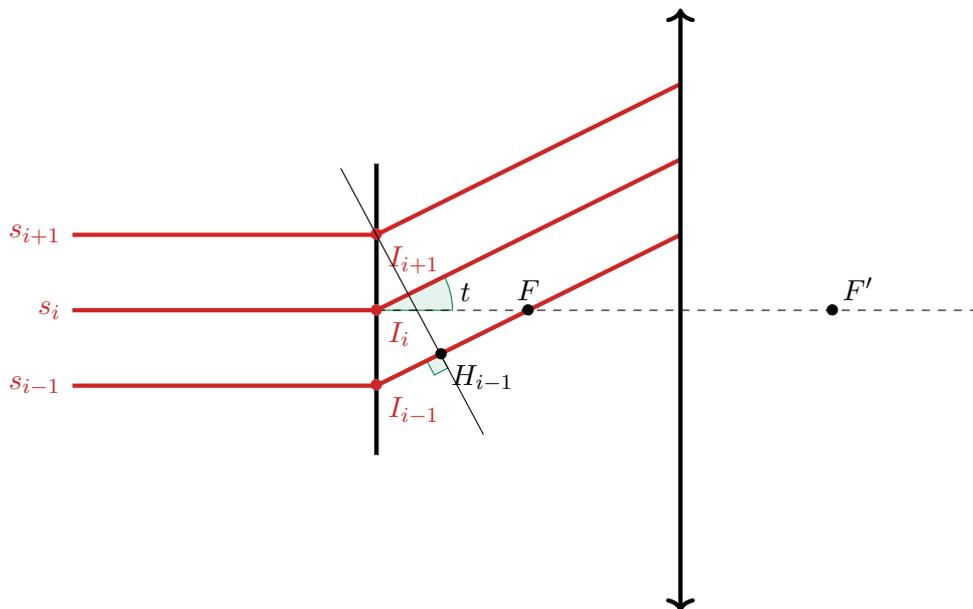
## 19.1 Problèmes

### 19.1.1 Figure d'interférence du réseau

On utilise un réseau de pas  $a$  en incidence normale, c'est-à-dire  $i = 0$ . On place une lentille convergente de distance focale  $f'$  à une distance  $L$  du réseau et un écran au delà de cette lentille. On note

$$\underline{s}_i(M, t) = s_0 e^{j(\omega t - \vec{k}_i \cdot \vec{r}_i + \phi_{0,i})}$$

l'onde complexe transmise par la fente  $i$  du réseau.



1. Compléter le schéma en rajoutant la lentille convergente ainsi que l'écran placé de telle sorte que le lieu des images de chacun des ordres d'interférence  $y$  soit visible. On notera  $M$  un des lieux quelconque d'interférence.
2. Établir la relation entre la différence de marche  $\delta_0 = (SI_{i+1}M) - (SI_iM)$  entre deux sources secondaires successives et l'écran. Exprimer la différence de marche  $\delta_i$  entre la source secondaire  $S_i$  et  $S_0$  en fonction de  $i$  et de  $\delta_0$ .
3. Exprimer l'onde complexe résultante en  $M$  et montrer qu'elle s'écrit

$$\underline{s}(M, t) = \underline{s}_0 \sum_{i=0}^N \left( e^{j \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta_0} \right)^i$$

4. On rappelle que  $\sum_{i=0}^P k^i = \frac{1-k^{P+1}}{1-k}$  si  $|k| \leq 1$ . En déduire que

$$\underline{s}(M, t) = \underline{s}_0 \frac{e^{j \frac{\pi N \delta_0}{\lambda_0}}}{e^{j \frac{\pi \delta_0}{\lambda_0}}} \times \frac{\sin \left( \frac{\pi N \delta_0}{\lambda_0} \right)}{\sin \left( \frac{\pi \delta_0}{\lambda_0} \right)}$$

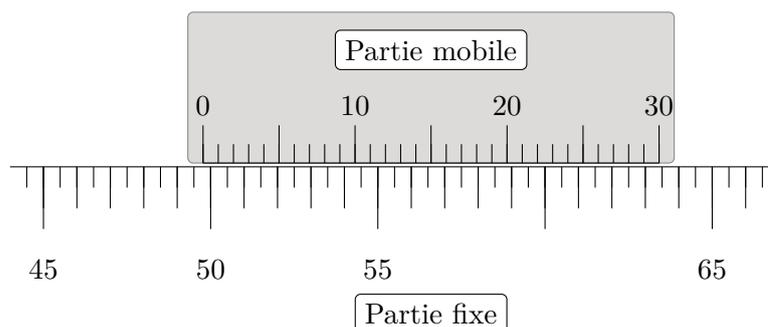
5. En déduire une première expression de l'intensité  $I(M)$ .
6. En se plaçant dans l'approximation des petits angles, montrer alors que  $\delta_0 = \frac{ax}{f'}$  où  $x$  est la coordonnée du point  $M$  dans le plan de l'écran.

7. En déduire une nouvelle expression de l'intensité  $I(M)$ , puis la largeur du pic d'interférence de l'ordre 0.

## 19.2 Oral Banque PT

### 19.2.1 Utilisation d'un goniomètre

1. Expliquer quels sont les phénomènes physiques en jeu dans un réseau par transmission.
2. Représenter le schéma d'un tel réseau et retrouver la formule des réseaux.
3. En déduire l'angle de déviation.
4. La photo ci-dessous représente le système de mesure d'angle d'un goniomètre. Quel est la valeur de l'angle mesuré ?



### 19.2.2 Spectrométrie à réseau

On souhaite déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  de la raie du cadmium avec un réseau comptant  $n = 500$  traits par millimètre.

1. Décrire un montage expérimental simple pour trouver cette longueur d'onde.
2. Établir la formule des réseaux.
3. On se place en incidence normale. On observe l'ordre  $p = -2$  et l'ordre  $p = 2$  séparés d'un angle  $\alpha = 61,15^\circ$ . Déterminer  $\lambda$ .

## 19.3 Annales

### 19.3.1 Suivi de croissance d'une monocouche par diffraction RHEED [2016 Banque PT A]

#### Principe de l'analyse RHEED :

Le contrôle de la croissance d'une monocouche se fait en temps réel au moyen d'une technique appelée diffraction d'électrons de hautes énergies en incidence rasante (en anglais RHEED). Le principe est d'envoyer des électrons d'énergie élevée sur le cristal en formation. Les électrons arrivant en incidence rasante, ils ne pénètrent pas dans le cristal et n'interagissent qu'avec la surface : on obtient donc une information uniquement sur la surface du cristal (ce qu'on cherche!). À la surface, les électrons vont être diffractés par chaque atome de Gallium du réseau cristallin. L'observation de la figure de diffraction (forme et intensité) donne des informations sur la structure de la couche formée et sur l'état d'avancement de la couche.

#### Modèle étudié :

Pour simplifier l'étude, on considèrera une ligne d'atomes de Gallium uniformément répartis et non une surface. On limitera l'étude au plan d'incidence, c'est-à-dire le plan formé par le faisceau unidirectionnel incident d'électrons et la « ligne » d'atomes de Gallium.

Soit un faisceau d'électrons monodirectionnel et monocinétique (tous les électrons ont la même

énergie cinétique) arrivant sur une ligne d'atomes de Gallium avec un angle  $\theta_0$  (angle entre la ligne d'atomes et le faisceau (cf figure 19.1)). Chaque atome agit comme un obstacle qui diffracte le faisceau incident dans toutes les directions de l'espace. On note  $\theta$  l'angle entre la ligne d'atomes et un rayon électronique diffracté.

On place en aval une lentille convergente de distance focale  $f'$  et un écran fluorescent dans le plan focal image de la lentille. Les tâches lumineuses sur l'écran sont proportionnelles à l'intensité du faisceau électronique incident.

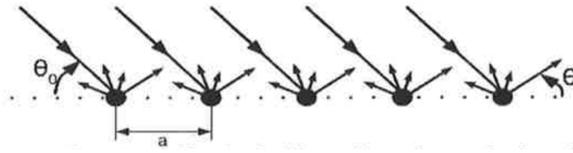


Fig. 19.1 – Diffraction du faisceau électronique sur le réseau d'atomes

Données :

- Distance entre deux atomes de Gallium successifs à la surface :  $a = 0,3 \text{ nm}$
- Ordre de grandeur de la taille d'un atome de Gallium :  $r_{\text{Ga}} \simeq 130 \text{ pm}$
- Énergie cinétique des électrons émis :  $\mathcal{E}_c = 1 \times 10^4 \text{ eV}$  (on prendra  $1 \text{ eV} \simeq 2 \times 10^{-19} \text{ J}$ )
- Distance focale de la lentille :  $f' = 50 \text{ cm}$ .

1. La relation de DE BROGLIE s'écrit  $p = \frac{h}{\lambda}$ . Quel aspect dual de la matière souligne-t-elle ?
2. Justifier qu'un faisceau électronique dit « monocinétique » est aussi un faisceau électronique « monochromatique », c'est-à-dire ne possédant qu'une seule longueur d'onde  $\lambda$ . Déterminer l'expression puis la valeur numérique de  $\lambda$  (on négligera toute considération relativiste, bien qu'en réalité, les vitesses mises en jeu sont très importantes).
3. Dans quel cas le phénomène de diffraction devient-il non négligeable ? Est-on dans cette configuration ici ?

Le traitement du faisceau électronique étant ondulatoire, nous allons étudier la figure obtenue comme s'il s'agissait d'une figure d'interférences obtenue par un faisceau lumineux. On considère donc des ondes planes de longueur d'onde  $\lambda$  arrivant sur les atomes assimilables à des objets ponctuels diffractant. On se limite dans un premier temps à la diffraction par deux atomes de Gallium seulement. On considère deux rayons incidents sur ces deux objets et les deux rayons diffractés dans la direction  $\theta$  issu de ces deux rayons incidents (cf figure 19.2).

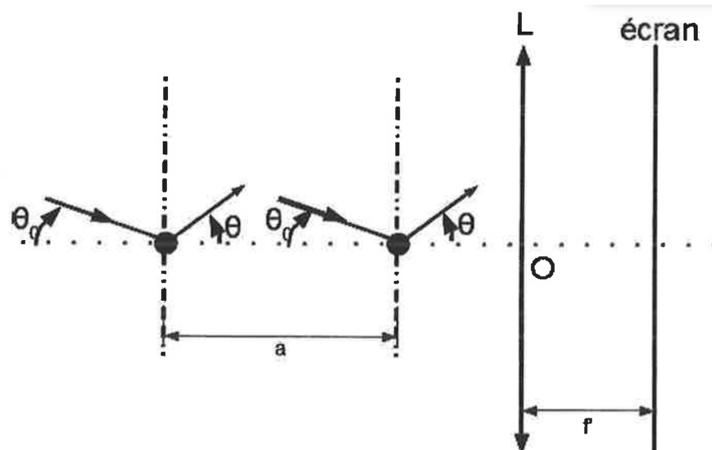


Fig. 19.2

On veut déterminer l'intensité lumineuse sur l'écran. On note  $O$  le centre optique de la lentille. On rap-

pelle que l'écran est placé dans le plan focal image de la lentille.

4. Reprendre le schéma de la figure 19.2 et prolonger le tracé des deux rayons diffractés. En déduire que ces deux rayons vont interférer sur l'écran.
5. Déterminer la différence de marche entre les deux rayons sur l'écran. En déduire que les directions  $\theta$  donnant lieu à des interférences constructives doivent vérifier  $\cos \theta = \cos \theta_0 + m \frac{\lambda}{a}$  avec  $m \in \mathbb{N}$ .

On considère maintenant la ligne composée de  $N$  objets.

6. Justifier soigneusement que les positions des maxima d'intensité sont toujours les positions déterminées par la condition trouvée à la question 5.
7. Déterminer les position  $x_m$  des maxima d'intensité sur l'écran. On se placera dans le cadre de l'approximation de GAUSS. On donne  $\cos \alpha \simeq 1 - \frac{\alpha^2}{2}$  pour  $\alpha \ll 1$  rad
8. Pour obtenir un maximum d'informations, il est préférable d'augmenter le nombre de maxima d'intensité observables. Est-il préférable dans ces conditions d'utiliser des faisceaux de haute ou de basse énergie ?

L'étude précédente peut se généraliser pour une surface et non une ligne d'atomes mais elle n'est valable que si la monocouche est entièrement remplie (pas de « trous » ou de « bosses » d'atomes). Une étude expérimentale a montré que l'intensité d'un point de la figure d'interférence (un maximum par exemple) va osciller lorsque la monocouche se remplit. L'intensité est maximale quand la couche commence à se remplir (la couche inférieure est remplie). Au fur et à mesure que la couche d'atome se remplit, l'intensité sur l'écran diminue jusqu'à ce que la moitié de la surface ait été remplie puis l'intensité augmente à nouveau jusqu'à être maximale quand la couche est fini d'être remplie). On a représenté figure 19.3 la mesure d'intensité d'un pic d'interférence constructive pendant la croissance d'une surface de Gallium.

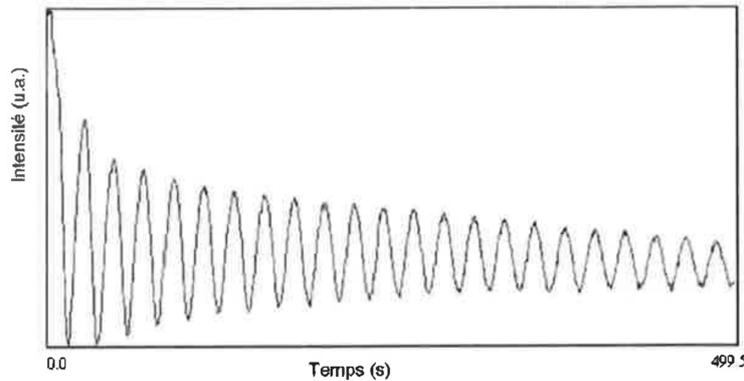


Fig. 19.3

9. Combien de couches ont été formées durant la mesure ?
10. Estimer la vitesse de formation d'une couche.
11. Proposer une explication de la décroissance de l'amplitude des oscillations mesurées au fur et à mesure de la formation.

### Données générales

- Constante de BOLTZMANN :  $k_B = \frac{R}{N_A}$  ;
- Constante de PLANCK :  $h = 6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- Masse d'un électron :  $m_e = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$  ;
- Masse molaire du Gallium :  $M_{\text{Ga}} = 70 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .