Concours Commun INP (CCINP), France

Session 2017, filière TPC

Physique

Durée : 4 heures

Ce que traite le sujet

- Problème 1, partie I : ondes stationnaires sur une corde vibrante
- Problème 1, partie II : particule dans un puits infini
- Problème 2, partie I : interférences d'atomes de néon froid
- Problème 2, partie II : expérience de Davisson et Germer
- Problème 2, partie III : interférences de molécules de fullerène

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/ccinp/tpc/2017/physique

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

CONCOURS COMMUNS POLYTECHNIQUES

EPREUVE SPECIFIQUE - FILIERE TPC

PHYSIQUE

Mercredi 3 mai : 8 h - 12 h

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Les calculatrices sont autorisées

Le sujet comporte deux problèmes indépendants au sein desquels de nombreuses questions sont indépendantes.

Au sein d'une partie, les candidats s'efforceront de répondre aux questions dans l'ordre prescrit.
Les réponses seront systématiquement justifiées.

Les données et quelques formules mathématiques sont fournies après les énoncés.
Les documents pour les deux problèmes sont regroupés dans le livret : « **Annexe documentaire** ».

Les candidats attacheront la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

PROBLÈME 1

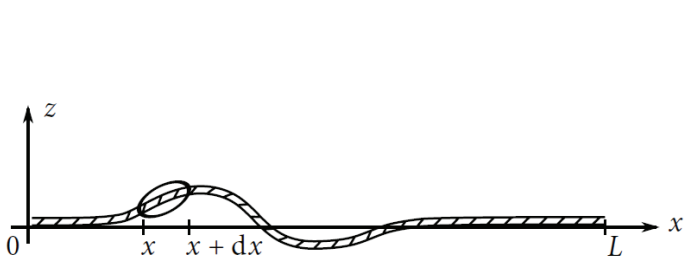
De la guitare à la diode laser

Partie I - Ondes stationnaires le long d'une corde vibrante

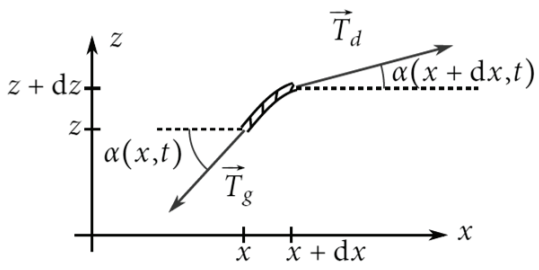
Afin d'étayer quelques affirmations présentées dans le **document 1**, annexe documentaire, page 1, on modélise une corde de guitare par une fine corde homogène, inextensible, de masse linéique μ, de longueur L, tendue horizontalement sous la tension T_0. On se place dans le cadre des hypothèses suivantes :

- (H1) l'action du champ de pesanteur est négligée ;
- (H2) les phénomènes dissipatifs sont négligés ;
- (H3) le déplacement d'un point matériel de la corde est strictement vertical (l'onde est dite transversale) ;
- (H4) les déformations que fait la corde avec l'horizontale sont suffisamment faibles pour que l'on puisse supposer que l'angle que fait la corde avec l'horizontale est un infiniment petit du premier ordre.

On se place dans un repère cartésien $\left(O,x,y,z\right)$ et on s'intéresse aux forces subies par un tronçon infinitésimal de corde de longueur dx et de masse dm.



(a) Corde complète



(b) Tronçon infinitésimal de corde

Figure 1

Soit $\vec{T}_g$ (respectivement $\vec{T}_d$) la tension exercée par la partie gauche (respectivement droite) de la corde sur le tronçon infinitésimal représenté (**figure 1**).

Q1. Expliquer pourquoi l'observation d'une corde de guitare sur l'instrument permet de valider l'hypothèse (H1).

Q2. Exprimer les forces de tension $\vec{T}_g$ et $\vec{T}_d$ en fonction de T_0 et α, d'abord de façon exacte puis, en utilisant l'hypothèse (H4).
En déduire que $\left\|\vec{T}_g\right\| = \left\|\vec{T}_d\right\| = T_0$.

Q3. En appliquant la 2e loi de Newton sur le tronçon infinitésimal de corde compris entre x et $x + dx$, de masse $dm = \mu dx$, montrer que :

$$\mu \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = T_0 \frac{\partial \alpha\left(x,t\right)}{\partial x}.$$

On précisera quelles hypothèses ont été employées et comment.

Q4. En déduire une équation aux dérivées partielles que l'on mettra sous la forme :

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \qquad \textbf{(E1)}$$

Comment se nomme cette équation ? Exprimer la célérité c de l'onde en fonction des données, préciser son sens physique et établir son unité dans le SI.

On cherche des solutions de l'équation **(E1)** sous la forme $z\left(x,t\right) = Z_n \sin\frac{\omega_n x}{c}\cos\left(\omega_n t\right)$ où les amplitudes Z_n et les pulsations ω_n sont des constantes du mode n considéré ($n \in \mathbb{N}^*$).

Q5. Comment se nomme ce type de solution ?

Q6. En précisant les conditions aux limites du problème, établir la quantification des pulsations selon l'équation :

$$\omega_n = n\frac{\pi c}{L}.$$

Q7. Justifier alors les affirmations (I1), (I2) et (I3) du **document 1**.

Q8. À partir du **document 2**, annexe documentaire, page 2, donner, à un même instant, la représentation graphique de l'allure de la corde pour les 3 modes impairs dont l'amplitude est la plus importante.

Q9. Déduire des **documents 1 et 2**, en explicitant votre démarche, quelle corde a été excitée.

Q10. Le **document 1** précise que « la tension de chaque corde représente un poids d'environ cinq à quinze kilogrammes ». Les données permettent-elles de valider cette affirmation ?

Partie II - Particule quantique dans un puits rectangulaire infini

On modélise, en première approximation, une diode laser par un puits quantique rectangulaire infini de largeur L.

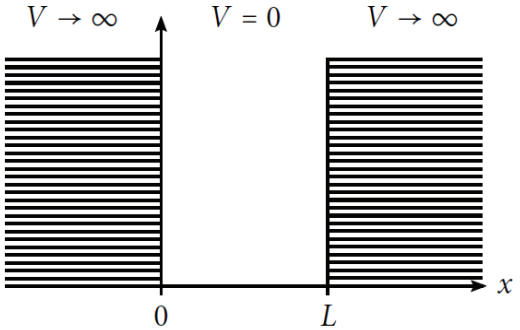


Figure 4 - Modélisation du puits quantique de la diode laser

Une particule quantique de masse m et d'énergie E, décrite par la fonction d'onde spatiale $\varphi\big(x\big)$ et soumise à l'énergie potentielle $V\big(x\big)$, satisfait l'équation de Schrödinger des états stationnaires :

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}\big[E - V\big(x\big)\big]\varphi = 0\,.$$

La modélisation avec un puits quantique de hauteur infinie nous conduit à décrire l'énergie potentielle de la particule par :

$$\begin{cases} V \to \infty & \text{si } x < 0 \text{ ou } x > L \\ V = 0 & si\ 0 \le x \le L \end{cases}.$$

Q11. Écrire l'équation de Schrödinger des états stationnaires dans la zone où le potentiel est nul. En déduire la forme générale de la fonction d'onde spatiale.

Q12. Justifier que $\varphi\big(x = 0\big) = \varphi\big(x = L\big) = 0$ et que $\int_0^L \big|\varphi\big(x\big)\big|^2\, dx = 1\,.$

Q13. En déduire, pour $0 \le x \le L$, que la fonction d'onde spatiale s'écrit :

$$\varphi\big(x\big) = \sqrt{\frac{2}{L}}\sin\left(\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}x\right).$$

Q14. Montrer que la fonction d'onde spatiale est quantifiée. Quel lien peut être fait avec la corde vibrante ?

Q15. Établir la quantification de l'énergie de la particule selon l'expression :

$$E_n = n^2\,\frac{\pi^2\hbar^2}{2mL^2},\ n \in \mathbb{N}^*.$$

Q16. En utilisant la **figure 3(a)**, **document 3**, annexe documentaire, page 3, déterminer la largeur du puits quantique caractéristique de la diode étudiée puis l'énergie du niveau le plus bas, en supposant que la particule quantique placée dans le puits de potentiel est un électron.
Comparer aux valeurs indiquées sur la **figure 3(b)**, **document 3**. Pourquoi le modèle est ici mis en défaut ?

Fin du problème 1

PROBLÈME 2

Dualité onde-corpuscule et onde de matière

En octobre 1874, le jeune Max Planck s'inscrit à l'université de Munich pour y étudier les sciences exactes, il a alors 16 ans. Quelques années plus tard, Max Planck reçoit le prix Nobel de physique en 1918 « pour avoir fondé la mécanique quantique ».
Dans sa thèse de doctorat soutenue en 1924, Louis de Broglie postulait que toute particule de quantité de mouvement p avait des propriétés ondulatoires et que l'on pouvait lui associer une longueur d'onde donnée par la relation qui porte son nom

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

avec h la constante de Planck.

Depuis, plus de 120 prix Nobel ont été attribués pour des découvertes relatives au monde de la physique quantique ; ceci souligne la vitalité et l'importance de ce domaine de la physique.
Les phénomènes quantiques qui apparaissent à l'échelle microscopique sont parfois difficiles à appréhender car ils ne correspondent pas à notre intuition naturelle fondée sur notre expérience du monde macroscopique. À la base de leur compréhension se trouve l'idée de dualité onde-particule et la notion d'onde de matière.
L'objet de ce problème est d'étudier quelques expériences qui ont mis en évidence ces deux notions :

- interférences d'atomes de néon froid en 1992 ;
- expérience de Davisson et Germer, en 1927 ;
- interférences de molécules de fullerènes (molécules composées de 60 atomes de carbone) en 2003.

Partie I - Interférences d'atomes de néon froid

En 1992, une équipe japonaise a réalisé une expérience d'interférences atomiques. Le dispositif expérimental est indiqué sur le **document 4**, annexe documentaire, page 4.

Q17. Comment se manifestent sur l'écran d'observation les caractères corpusculaire d'une part et ondulatoire d'autre part des atomes de néon ?

Q18.

a) Calculer à partir des données de l'**annexe**, page 11, la masse m^* d'un atome de néon.

b) Déterminer l'expression de la vitesse v_f avec laquelle les atomes de néon atteignent les fentes de Young (on supposera leur vitesse initiale négligeable).
Application numérique.

c) En déduire la valeur de la longueur d'onde de de Broglie λ associée aux atomes de néon au niveau des fentes de Young. Pourquoi les atomes de néon doivent-il être traités comme un objet quantique ?

d) Pourquoi est-il plus difficile de réaliser une telle expérience avec des atomes plutôt qu'avec des électrons ? Pourquoi utilise-t-on des atomes « froids » ?

Q19. Estimer la largeur de la tache de diffraction pour un atome diffracté par une des fentes et comparer à la résolution du MPC (**document 4**).

Sur la **figure 6**, S_1 et S_2 représentent les positions des deux fentes dans le plan d'étude perpendiculaire aux fentes supposées infiniment fines. Soit un point M du plan d'observation repéré par son abscisse x.
L'écran est placé loin des fentes à une distance D grande devant a et $|x|$.
On s'intéresse à l'interférence en M des ondes de matière ayant traversé chacune des deux fentes.

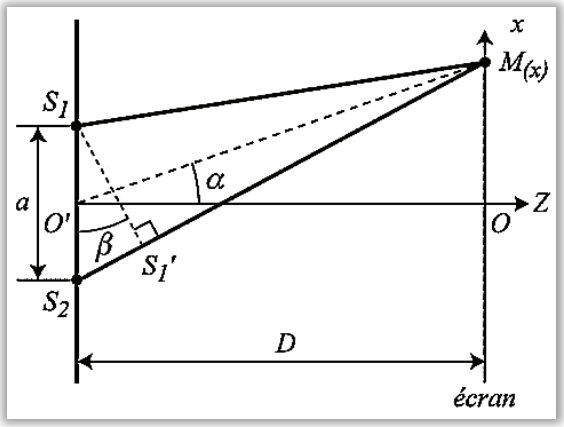


Figure 6 – Schéma simplifié des chemins issus des fentes

Q20.

a) Montrer que $S_1M \simeq D + \dfrac{\left(a-2x\right)^2}{8D}$ et $S_2M \simeq D + \dfrac{\left(a+2x\right)^2}{8D}$ à l'ordre le plus bas non nul en $\dfrac{2x \pm a}{2D}$.

b) On suppose que la longueur d'onde de de Broglie λ des atomes de néon reste constante après la traversée des fentes de Young.
Déterminer en fonction de λ, D, a et x le déphasage $\Delta\varphi$ entre les ondes interférant au point M.

c) Déterminer l'expression de l'interfrange théorique i_{th}.
Application numérique.

d) Estimer la valeur i_{exp} de l'interfrange obtenu expérimentalement à l'aide du **document 5**, annexe documentaire, page 5. Commenter.

Q21. En réalité, le calcul de l'interfrange est beaucoup plus complexe dans les conditions expérimentales citées et une étude plus approfondie donne l'expression suivante pour la même interfrange, notée i'_{th} :

$$i'_{th} = \frac{h}{m^* v_f}\frac{D}{a}2\frac{\sqrt{1+\alpha}-1}{\alpha} \text{ avec } \alpha = \frac{2gD}{v_f^2}.$$

a) Quelle est la dimension du coefficient α ? Quelles grandeurs compare ce coefficient ?

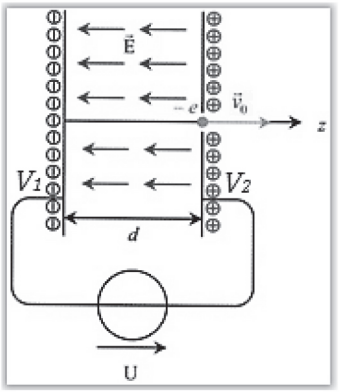
b) Calculer i'_{th} et comparer au résultat expérimental.

c) Montrer que si $\alpha \ll 1$, on retrouve l'expression de la **question Q20.c)**. Commenter une telle approximation et indiquer la raison de la correction de l'interfrange.

Partie II - Expérience de Davisson et Germer : diffraction des électrons

Cette expérience (**document 6**, annexe documentaire, page 6) est historiquement la première de la série qui prouve que les électrons ont un comportement ondulatoire, comme la lumière ou les rayons X. Elle permet aussi de vérifier quantitativement la validité de la relation de de Broglie.

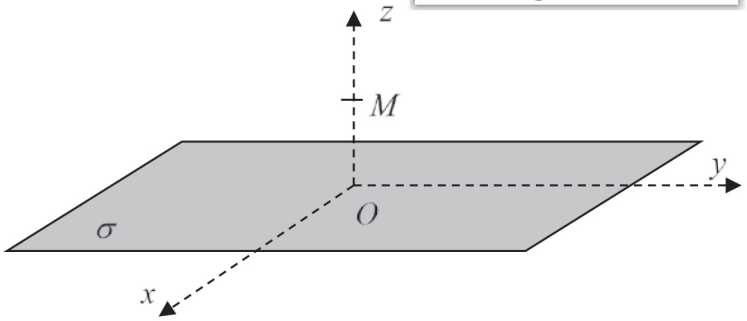
On modélise le canon à électron utilisé dans l'expérience de Davisson et Germer par deux armatures de potentiel V_1 et V_2 soumises à une différence de potentiel $U = V_2 - V_1$ et séparées par une distance d.



On s'intéresse tout d'abord au champ créé par une seule armature assimilée à un plan infini chargé uniformément. Soit σ sa densité surfacique de charge supposée positive et indépendante du temps.

Q22. Déterminer la direction du champ électrostatique $\vec{E}(M)$ au point M. De quelle(s) variable(s) dépend(ent) ce champ ?

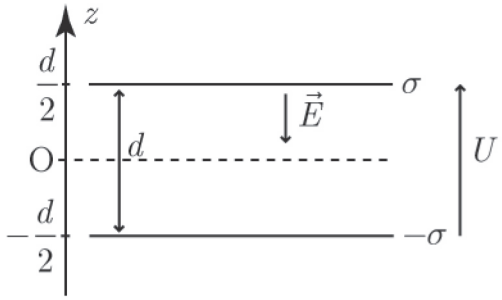
Q23. Quelle relation existe-t-il entre $E_z(z)$ et $E_z(-z)$? Justifier.



Q24. Montrer que le champ électrostatique créé par cette distribution s'écrit :

$$\vec{E} = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}\vec{u}_z & \text{si } z > 0 \\ -\dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}\vec{u}_z & \text{si } z < 0 \end{cases}.$$

Le canon à électron peut ainsi être modélisé par l'association de deux plans infinis de charges opposées $+\sigma$ et $-\sigma$ placés respectivement à la cote $\dfrac{d}{2}$ et $-\dfrac{d}{2}$.



Q25. Déduire du résultat de la question précédente l'expression du champ électrostatique en tout point de l'espace.

Q26. Montrer que l'énergie potentielle électrostatique d'une particule chargée de charge q placée entre les armatures s'écrit : $\mathcal{E}_p = qV(z) + K$, où $V(z)$ est le potentiel électrostatique et K est une constante arbitraire que l'on ne cherchera pas à déterminer.

Un électron de masse m_e de charge $-e$ est placé à l'armature négative de potentiel V_1. On supposera que cet électron est initialement immobile. L'application de la différence de potentiel $U = V_2 - V_1 = 54\ V$ permet d'accélérer cet électron qui atteint une vitesse $\vec{v}_0 = v_0\vec{u}_z$ au niveau de l'armature positive de potentiel V_2. Il est ensuite éjecté à travers un trou percé dans cette dernière.

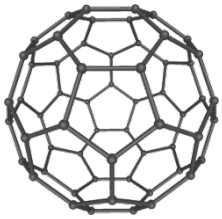
Q27. Déterminer l'expression de la norme v_0 en fonction de U, m et e.
Application numérique.
Doit-on se placer dans le cadre de la mécanique relativiste ?

Q28. Déterminer la valeur numérique de la longueur d'onde de de Broglie associée aux électrons de vitesse v_0. Commenter cette valeur par analogie aux conclusions émises par Max Von Laue décrite dans le **document 7**, annexe documentaire, page 7.

Le faisceau d'électron ainsi éjecté est modélisé par des rayons atteignant la surface du cristal qui les diffracte comme indiqué dans le **document 7**.

Q29. À partir du graphique de la **figure 8**, **document 6**, calculer la distance interatomique a dans le cristal de nickel, sachant que le pic représenté est le seul pic observé d'ordre non nul. Commenter la valeur obtenue.

Partie III - Interférences de molécules de fullerène



En 1999, des chercheurs de l'Université de Vienne montrent que la dualité onde-particule s'applique également à des macromolécules telles que le fullerène C_{60}. La description est donnée dans le **document 8**, annexe documentaire, page 8.
Le réseau utilisé est un réseau de fentes fines dont les caractéristiques sont données par la **figure 10**, **document 8**. On désire retrouver tout d'abord la condition d'interférences constructives, aussi appelée formule des réseaux.
Soit le cas général de rayons lumineux arrivant depuis la source S avec une incidence θ_0 sur le réseau et émergeant avec un angle θ vers un point M de l'écran repéré par son abscisse x. On suppose que le point M est infiniment éloigné et on se place dans un milieu d'indice $n = 1$.

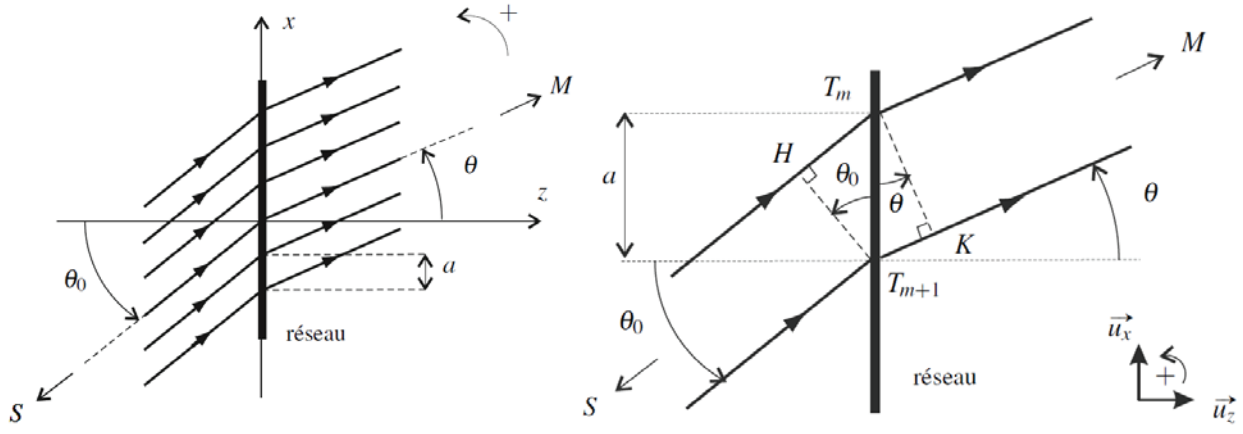


Figure 13 - Diffraction par un réseau (gauche) et calcul de la différence de marche (droite)

Q30. À l'aide de la **figure 13**, déterminer la différence de marche $\delta = \left(ST_{m+1}M\right) - \left(ST_mM\right)$ entre deux ondes passant par deux fentes consécutives T_m et T_{m+1}. En déduire la formule fondamentale des réseaux

$$\sin\theta_k - \sin\theta_0 = k\frac{\lambda}{a}$$

avec k un entier relatif appelé ordre de diffraction.

Pour une onde monochromatique, la représentation de l'intensité relative en fonction de la différence de phase φ entre deux rayons d'un réseau de N fentes est la suivante :

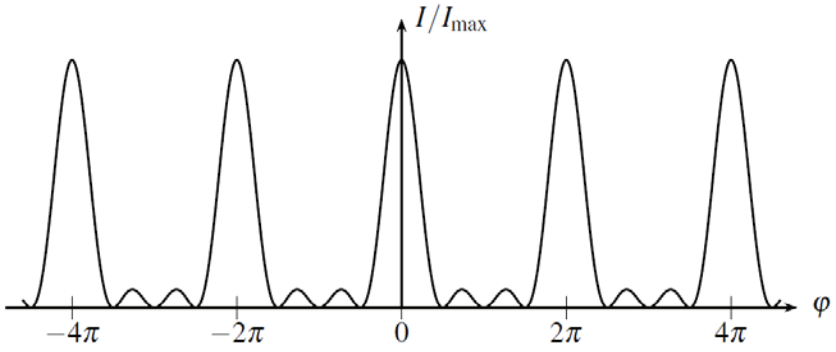


Figure 14 - Représentation de l'intensité relative pour $N = 4$

Q31. Comment évolue cette figure lorsque le nombre de fentes N augmente ?

Q32. Montrer qu'en incidence normale, la distance entre deux pics adjacents d'intensité maximale est donnée par

$$\Delta x = \frac{\lambda D}{a}$$

avec x l'abscisse du détecteur (on supposera $x \ll D$).

Q33. Déterminer la masse des molécules de fullerène puis la longueur d'onde moyenne de de Broglie λ_m d'une molécule à l'aide de la **figure 11**, **document 8**.

Q34. En déduire la valeur de Δx et comparer aux résultats de l'expérience.

La distribution de vitesses donnée en **figure 11** nous incite à modéliser la source S de molécules C_{60} comme une source d'ondes de de Broglie à spectre étendue :

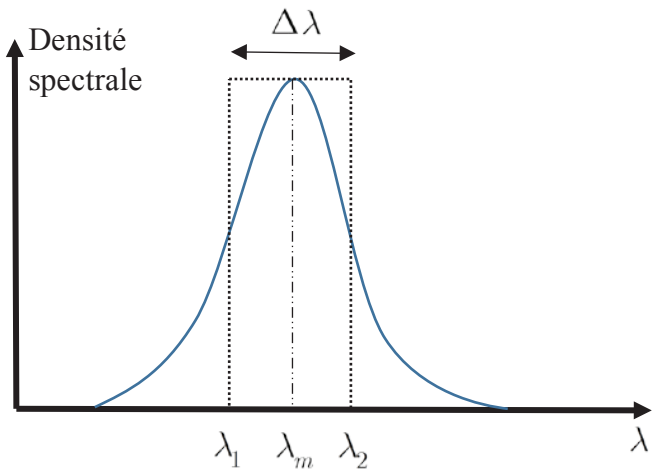


Figure 15 - Modélisation du spectre de la source de molécules de fullerène

On pose $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ la largeur à mi-hauteur et λ_m la longueur d'onde moyenne du spectre de la source.

Q35. Estimer $\Delta\lambda$ à partir de la **figure 11**. Quelle est la conséquence d'un élargissement spectral de la source sur la représentation de l'intensité relative donnée dans la **figure 14.**

Q36. À l'aide d'un critère semi-quantitatif sur l'ordre d'interférences $p\left(M\right)$, montrer que le contraste de la figure reste bon si la différence de marche $\delta\left(M\right)$ obéit à l'inégalité suivante

$$\delta\left(M\right) \leq l_C$$

où l'on exprimera l_C en fonction de λ_m et $\Delta\lambda$. Comment appelle-t-on cette grandeur ?

Q37. En déduire une condition sur la position du détecteur x pour que le contraste reste bon. Evaluer numériquement cette condition et comparer avec la **figure 12**, **document 8**.

Q38. Interpréter la dernière phrase du **document 8** :
« La température du faisceau incident joue un rôle important dans la diffraction. Si elle est trop élevée, les molécules de fullerène perdent leur cohérence : les interférences sont alors détruites ».

Fin du problème 2

Annexe

Données

Constante d'Avogadro : $N_{\mathrm{A}} = 6,02 \times 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$

Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J.s}$

Constante de Planck réduite : $\hbar = \dfrac{h}{2\pi} = 1,1 \times 10^{-34}\ \mathrm{J.s}$

Accélération de la pesanteur : $g = 9,8\ \mathrm{m.s}^{-2}$

Masse d'un électron : $m_e = 9,1.10^{-31}\ kg$

Charge élémentaire : $e = 1,6.10^{-19}\ \mathrm{C}$

Masse molaire du néon : $M\big(Ne\big) = 20\ \mathrm{g.mol}^{-1}$

Masse molaire du carbone : $M\big(C\big) = 12\ \mathrm{g.mol}^{-1}$

Formulaire mathématique

$\big(1+\varepsilon\big)^{\alpha} \simeq 1 + \alpha\varepsilon$ si $\big|\varepsilon\big| \ll 1$

$2\sin^2 x = 1 - \cos\big(2x\big)$

IMPRIMERIE NATIONALE – 17 1198 – D'après documents fournis

ANNEXE DOCUMENTAIRE

Document 1 - La guitare : les grandes idées

Tension

La guitare est un instrument fragile, constituée d'éléments dissemblables dans leur composition (bois, métal, nylon) qui supportent des efforts physiques importants :

- tension qui s'exerce sur les cordes quand elles vibrent
- traction des cordes pour le manche (en accordage standard, la tension de chaque corde représente un poids d'environ cinq à quinze kilogrammes)
- chocs permanents puisque l'instrument est par essence « nomade ».



Accordage

Les guitares à 6 cordes sont généralement accordées (du grave à l'aigu) avec les notes :

Corde	1	2	3	4	5	6
Note	Mi^1	La^1	$Ré^2$	Sol^2	Si^2	Mi^3
Fréquence (Hz)	82,40	110,0	146,8	196,0	246,9	329,6

Cette combinaison de notes est appelée *accordage* standard

Modes de vibration

Considérons une corde maintenue par ses deux extrémités. Dans le mode de vibration le plus simple, dit « fondamental », elle forme à chaque instant un arc et la flèche de cet arc varie de manière périodique (la courbure augmente, puis diminue, puis s'inverse, puis augmente dans l'autre sens…). On peut donc définir une fréquence de vibration et l'on remarque que cette fréquence dépend :

- de la masse linéique de la corde (notée μ et exprimée en kilogrammes par mètre) ;
- de la force avec laquelle on tend cette corde (tension notée T_0 et exprimée en newtons) ;
- de la longueur de la corde (notée L et exprimée en mètres).

Si l'on cherche l'influence de chaque paramètre :

- (I1) plus la corde est légère (μ est faible), plus la fréquence est élevée (c'est la raison pour laquelle les cordes aiguës d'un instrument sont plus fines) ;
- (I2) plus la corde est tendue, plus la fréquence de vibration est élevée (d'un point de vue acoustique, la note s'élève lorsqu'on tend la corde) ;
- (I3) plus la corde est longue, plus la fréquence est basse (et donc, pour un instrument, plus le son est grave).

Sur un instrument, chaque corde a une masse linéique différente et l'on ajuste la tension pour accorder. Pour jouer, on joue sur le choix de la corde et lorsque l'instrument a un manche, sur la longueur de la corde en pinçant la corde contre le manche avec le doigt.

Source 2016 : Wikipédia

Document 2 - La guitare : résultats expérimentaux et données techniques

Le son produit par une seule corde de guitare a été enregistré. On donne sur la **figure 2** le spectre (obtenu par décomposition en série de Fourier) du signal proportionnel à l'amplitude de vibration de la corde :

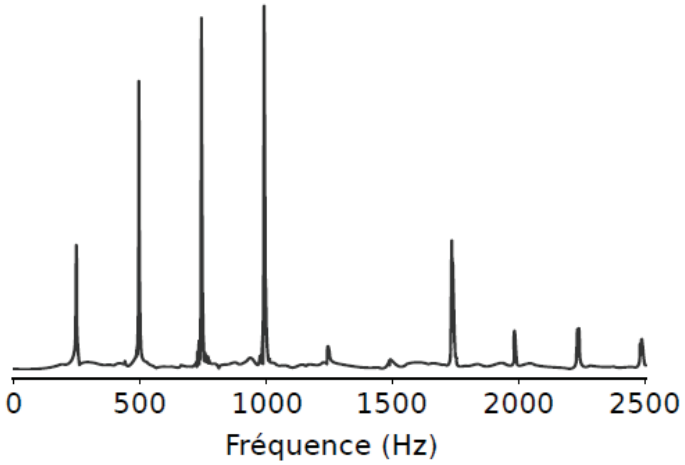


Figure 2 - Spectre du signal électrique proportionnel à l'amplitude de la corde

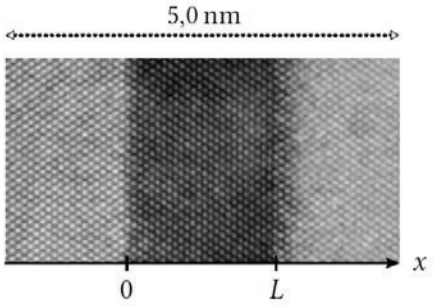
Les cordes sont en nylon de masse volumique 1 140 $kg.m^{-3}$, de mêmes longueurs 63 cm et de diamètres différents reportés dans le tableau ci-dessous :

Corde	1	2	3	4	5	6
Diamètre (mm)	1,07	0,81	0,61	0,41	0,25	0,23

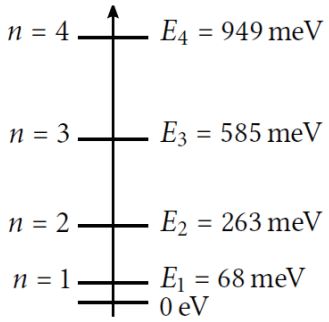
Source 2016 : Wikipédia

Document 3 - La diode laser

Une diode laser est un dispositif optoélectronique qui produit un faisceau de lumière cohérent créé par les phénomènes d'émission stimulée et de recombinaison radiative des porteurs de charge dans la zone active : la lumière confinée au sein de cette zone est amplifié.
Une diode laser est constituée typiquement de trois couches, qui forment un guide d'onde. Les deux couches externes, appelées couches barrières, assurent un confinement électronique et optique de la couche active où l'effet laser se produit. Une image de ces 3 couches est donnée sur la **figure 3(a)**. Les porteurs de charges de cette zone active possèdent alors une énergie qui ne peut être que quantifiée comme le montre la **figure 3(b)** :



(a) Image réelle
à l'échelle atomique des couches



(b) Quantification de l'énergie des porteurs de charge de la couche active (premiers niveaux)

Figure 3 - Données techniques d'une diode laser

Source : Techniques de l'ingénieur

Document 4 - Fentes de Young atomiques

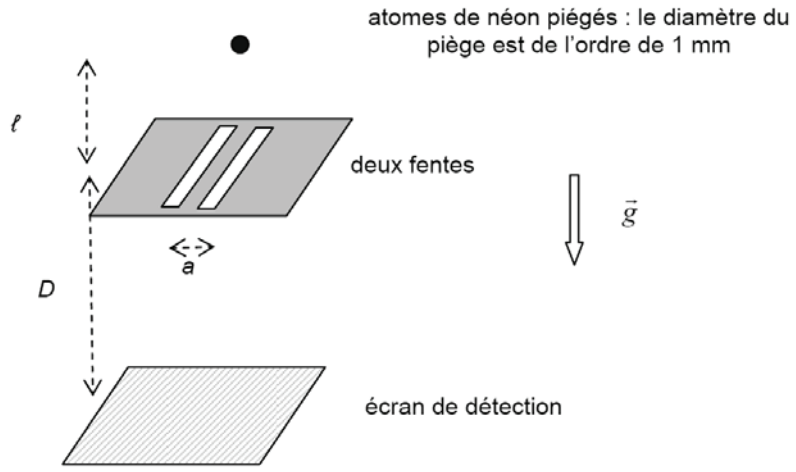


Figure 5 - Schéma du dispositif d'interférences avec des atomes de néon

Ce dispositif utilise des atomes de néon piégés et refroidis par laser à une température de 2,5 mK de manière à minimiser leur agitation thermique moyenne (à température ambiante, des atomes de néon dans l'air possèdent une vitesse typique de l'ordre de 600 $m.s^{-1}$ due à l'agitation thermique). L'utilisation d'atomes légers et refroidis permet de disposer de valeurs de longueur d'onde de de Broglie plus élevées.

Lorsque ces atomes quittent le piège, ils tombent dans le champ de pesanteur et sont alors en chute libre. Le piège est situé à une hauteur ℓ = 76 mm au-dessus de deux fentes d'Young de largeur b = 2,0 μm séparées de la distance a = 6,0 μm.

Un écran MPC (Microchannel Plate Detector) situé à la distance D = 113 mm de la double fente détecte les atomes de néon avec une résolution de l'ordre de 20 μm.

Source : Ministère de l'Éducation Nationale (DGESCO - IGEN)
Dualité onde-particule (Juillet 2012)

Document 5 - Résultats expérimentaux

La figure d'interférences obtenue en libérant les atomes du piège est constituée d'environ 6 000 impacts atomiques. L'allure de la figure obtenue est très similaire à celle obtenue lors des expériences d'interférences photon par photon.

Chaque impact est clairement identifié, attestant du caractère corpusculaire des entités détectées : les atomes ne se « scindent » pas.
L'ensemble des impacts dessine des franges d'interférences, caractéristiques d'un comportement ondulatoire. La prédiction de l'impact est de nature probabiliste, la particule est décrite par une fonction d'onde.

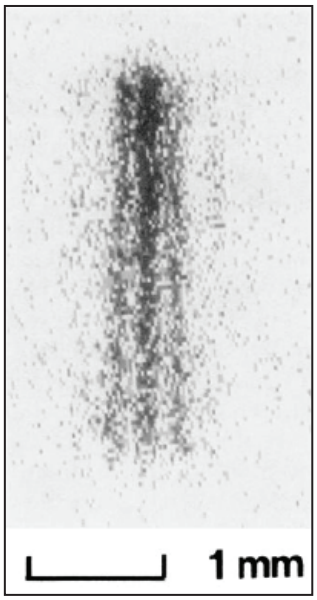


Figure 7 - Figure d'interférences

Source : Fujio Shimizu et al., double-slit interference with ultracold metastahie neon atoms, Physical Review (1992)

Document 6 - Expérience de Davisson et Germer

En 1927, Clinton Davisson et Lester Germer bombardent une cible de nickel monocristallin par des électrons dont ils maîtrisent la vitesse grâce à un canon à électrons utilisant une tension électrique ajustable. Un détecteur mobile permet ensuite d'étudier la dépendance angulaire du faisceau diffracté. Le dispositif expérimental est présenté ci-dessous, ainsi que l'intensité diffractée en coordonnées polaires. On observe que les électrons sont diffractés par la cible principalement dans une direction privilégiée :

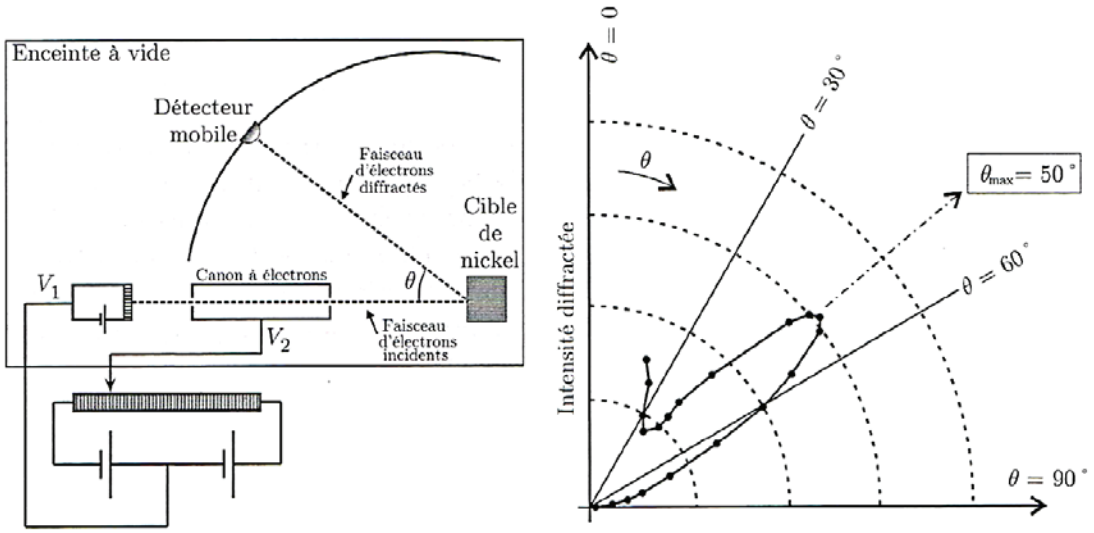


Figure 8 - Expérience de Davisson et Germer

Source : « Physique moderne » Thornton et Rex de Boeck 2009

Document 7 - Diffraction des rayons X par un cristal

En 1912, Max Von Laue avait découvert que les rayons X étaient diffractés par un cristal, de même que la lumière visible est diffractée par un réseau. Cette découverte prouvait à la fois :

- la nature ondulatoire des rayons X : ce sont des ondes comme la lumière visible, ce que l'on ignorait à l'époque
- la structure périodique des cristaux : un cristal se comporte comme un réseau. Les atomes sont alignés régulièrement dans une structure cristalline, chaque atome diffracte les rayons X incidents et l'on observe un pic d'intensité dans les directions où les différentes ondes diffractées interfèrent constructivement.

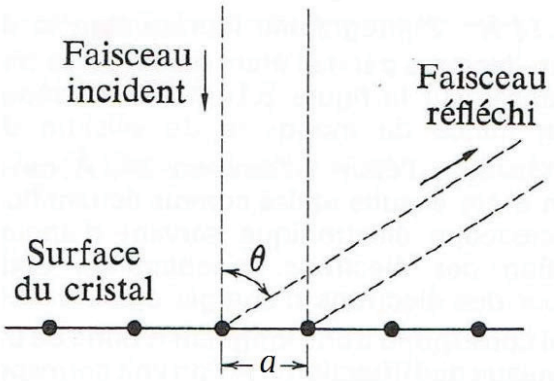


Figure 9 - Diffraction des rayons X par un plan cristallin

Sous incidence normale, la condition d'interférences constructives donne la direction des pics d'intensité

$\boxed{a \sin \theta_k = k\lambda}$ où k est un nombre entier relatif.

La mesure des angles de diffraction θ_k permet donc de connaître la distance entre les atomes du réseau, ou bien la longueur d'onde des rayons X. Von Laue démontra ainsi que les rayons X avaient une longueur d'onde de l'ordre de 0,1 nm comme les distances interatomiques dans un cristal. La diffraction des rayons X est encore de nos jours une technique importante d'exploration des structures cristallines.

Source : Encyclopédie Universalis

Document 8 - Diffraction des molécules de fullerène

La production d'un faisceau incident de C_{60} s'effectue par sublimation à des températures entre 626,85 °C et 726,85 °C.

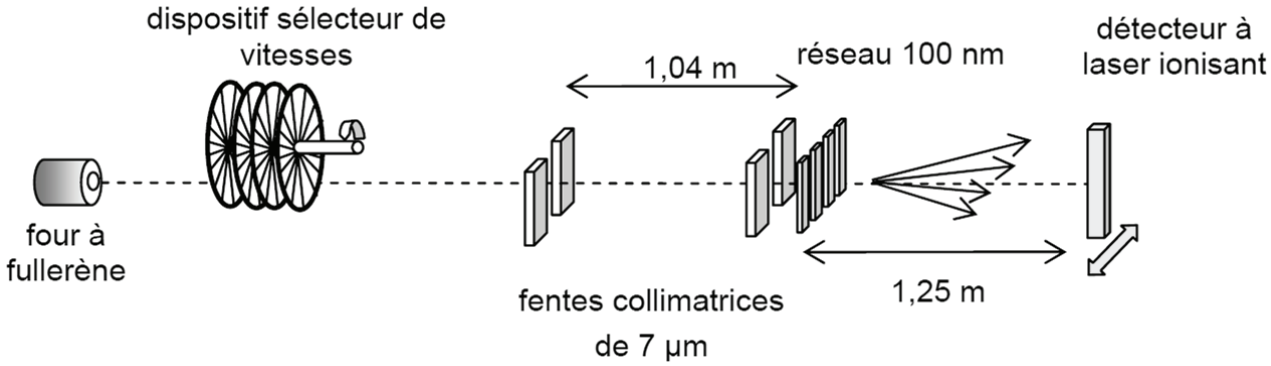


Figure 10 - Dispositif expérimental de la diffraction du fullerène

La distribution de vitesse des molécules de C_{60} en sortie du four est donnée par le graphique ci-contre :

Après diffraction sur le réseau de pas $a = 100\ \mathrm{nm}$ (grille de SiN_x contenant des fentes de 50 nm de large espacés de 100 nm), les molécules de C_{60} se déposent sur un écran bidimensionnel placé à une distance $D = 1{,}25\ \mathrm{m}$.

Leurs distributions spatiale et quantitative s'obtiennent en balayant l'écran avec un faisceau laser visible. L'absorption de la lumière ionise les molécules de C_{60} qui sont alors accélérées par l'application d'une tension électrique vers une électrode, où elles provoquent l'émission d'électrons qui constituent le signal détecté.

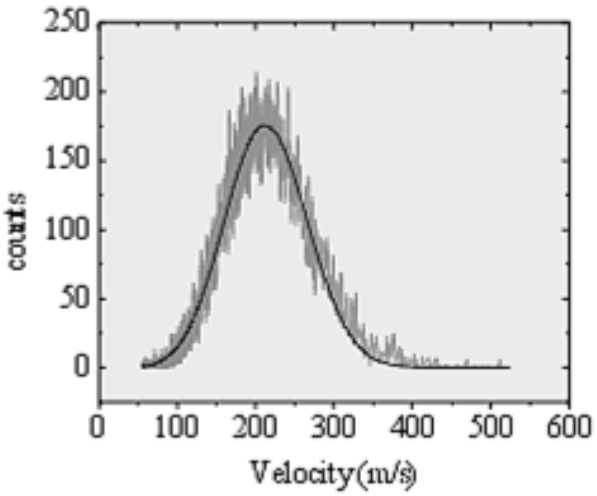


Figure 11 - Distribution des vitesses des molécules de fullerène à la sortie du four

La figure ci-contre montre l'allure de la figure d'interférence observée :

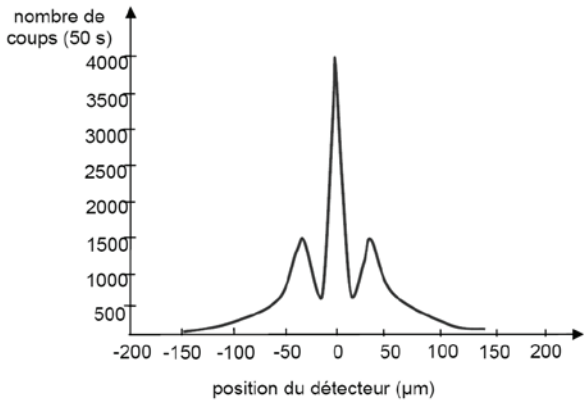


Figure 12 - Figure d'interférences obtenue sur un temps d'acquisition de 50 s

La température du faisceau incident joue un rôle important dans la diffraction. Si elle est trop élevée, les molécules de fullerène perdent leur cohérence : les interférences sont alors détruites.

Source : Am. J. Phys. , Quantum interference experiments with large molecules, avril 2003

FIN

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de TPC chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Propagation d'un signal
- Signaux périodiques et filtrage linéaire
- Superposition d'ondes lumineuses, trous d'Young et réseau
- Modèle scalaire des ondes lumineuses
- Électrostatique : formulation locale et condensateur

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière : **écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/ccinp/tpc