

TD Op2 (et Op1) : Interférences : Michelson et réseaux

EXERCICE 1 : Interféromètre de Michelson en lame d'air

PARTIE A

On considère un interféromètre de Michelson utilisé en lame d'air.

- 1) Quels réglages doit-on faire pour observer la figure d'interférences ?
- 2) On utilise en sortie une lentille convergente de distance focale $f' = 1,0$ m et une lumière monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 569$ nm. On observe alors les trois premiers anneaux de rayons $r_1 = 4,7$ mm, $r_2 = 8,9$ mm et $r_3 = 11,6$ mm. En déduire l'épaisseur de la lame d'air.
- 3) En fait il s'agit d'une source sodium avec filtre jaune. N'y avait-il pas un risque de brouillage ? Vérifiez que les valeurs précédentes sont compatibles avec un bon contraste malgré tout.

PARTIE B

La source est désormais une lampe à vapeur de cadmium (filtrée) qui émet un groupe d'ondes monochromatiques, centré autour d'une fréquence moyenne ν_0 correspondant à la longueur d'onde $\lambda_0 = 643,8$ nm. On désigne par $dE_0/d\nu(\nu)$ la densité spectrale de la source, c'est-à-dire la contribution relative de chaque fréquence à l'intensité de l'onde émise par la source. En 1892, Michelson a déterminé la largeur totale à mi-hauteur $\Delta\nu$ de cette radiation en adoptant un modèle rectangulaire pour $dE_0/d\nu(\nu)$ centré sur la fréquence ν_0 :

$$dE_0/d\nu(\nu) = E_0/\Delta\nu \text{ pour } \nu_0 - \Delta\nu/2 \leq \nu \leq \nu_0 + \Delta\nu/2 \text{ et } dE_0/d\nu(\nu) = 0 \text{ autrement.}$$

- 1) Calculer ν_0 . Quelle est la couleur de cette radiation ?
- 2) Montrer que l'intensité détectée peut se mettre sous la forme :

$$I(\tau) = I(0)/2 [1 + \gamma_t(\tau) \cos(2\pi\nu_0\tau)]$$

$\gamma_t(\tau)$ étant une fonction que l'on déterminera, et $\tau = \frac{2x}{c}$

- 3) En déduire le facteur de visibilité des franges d'interférence, c'est-à-dire la quantité

$$V = (I_M - I_m)/(I_M + I_m)$$

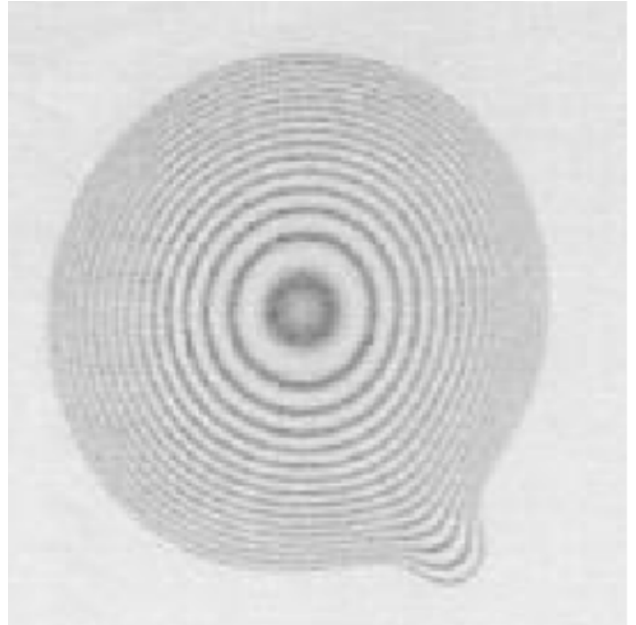
I_M étant l'intensité maximale et I_m l'intensité minimale. Tracer l'allure des graphes $|\gamma_t(\tau)|$ et $I(\tau)$.

- 4) En augmentant x à partir d'une valeur nulle, on obtient une première annulation de V pour $x = 15,9$ cm. Quelle valeur $\Delta\nu$ Michelson a-t-il obtenu ? Calculer $L_t = c / \Delta\nu$ appelée longueur de cohérence temporelle. En déduire, en picomètre, l'écart en longueur d'onde $\Delta\lambda$ correspondant.

EXERCICE 2 : Goutte liquide déposée sur un substrat

Une goutte de liquide d'indice $n = 1,45$ est déposée sur un substrat solide (pastille de silicium) d'indice $N = 3,88$ que l'on suppose parfaitement réfléchissant. La goutte est assimilable à une portion de sphère de centre C .

Dans le plan de contact avec le solide, la goutte a un diamètre $d = 0,45$ mm. L'angle de contact de la goutte est noté θ . La goutte est éclairée par un faisceau cylindrique de lumière monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 546,0$ nm, perpendiculairement au substrat.



1) Les interférences observées sont-elles des franges d'égale inclinaison ou d'égale épaisseur ? Où sont-elles localisées ?

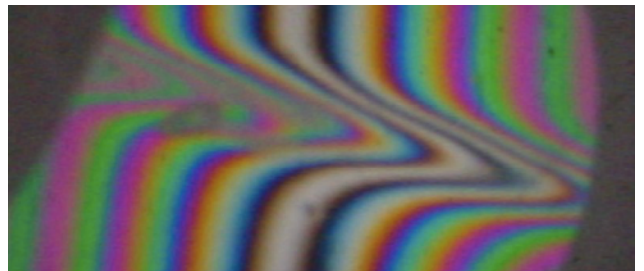
2) Mesurer le rayon des anneaux sombres successifs.

3) Estimer le nombre d'anneaux sombres visibles. Calculer l'ordre d'interférence au centre et au bord de la figure d'interférence. Estimer l'épaisseur de la goutte au centre.

4) Déterminer une estimation du rayon de courbure R de la goutte et de l'angle de contact de la goutte photographiée ici et conclure.

EXERCICE 3 : Mesures au voisinage du contact optique en lumière blanche

1) La figure 1 ci-contre montre les franges obtenues avec un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air, au voisinage de l'arête du coin d'air, avec un écoulement de gaz (de diamètre $d = 5$ mm) sur l'un des trajets de l'interféromètre.



Expliquer l'observation. En déduire une caractéristique de l'écoulement.

2) La figure 2 ci-contre montre les franges obtenues avec un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air, au voisinage de l'arête du coin d'air, en lumière blanche, lorsqu'on a interposé une lame de mica d'épaisseur $e \approx 0,1$ mm sur l'un des trajets de l'interféromètre.



Expliquer l'observation. En déduire une caractéristique de la lame de mica.

EXERCICE 4 : Spectrométrie par transformée de FOURIER

A-Raie « gaussienne »

On éclaire un interféromètre de Michelson monté en lame d'air d'épaisseur e avec une raie quasi-monochromatique, caractérisée par son profil spectral :

$$\frac{dE_0}{d\sigma} = f(\sigma) = C \exp - \left(\frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{a^2} \right)$$

où $\sigma = 1/\lambda$ et où σ_0 , C et $a \ll \sigma_0$ sont des constantes positives. Pour simplifier, on étendra la fonction f aux valeurs négatives de σ , domaine où elle prend des valeurs négligeables.

1. Quelle est la signification de σ_0 ? Calculer la largeur $\Delta\sigma$ du profil à mi-hauteur et interpréter la constante a . Faire un graphique rapide du profil spectral.
2. On réalise un enregistrement de l'éclairement au centre de la figure d'interférences en fonction de l'épaisseur de la lame d'air qu'on fait varier en déplaçant un des miroirs avec l'aide d'un moteur. Établir l'expression de l'éclairement $E(e)$ en fonction de constantes et de la transformée de Fourier du profil spectral définie par :

$$\hat{f}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sigma) \exp(2j\pi\sigma x) d\sigma$$

3. Sachant que $\int_{-\infty}^{\infty} \exp - \frac{u^2}{a^2} \exp(2j\pi ux) du = a\sqrt{\pi} \exp -\pi^2 a^2 x^2$, établir l'expression de $E(e)$ et tracer l'allure de son graphe pour $\Delta\sigma \ll \sigma_0$. Comment évolue la visibilité des franges ? Comment peut-on mesurer $\Delta\sigma$? Quelle valeur de e doit-on pouvoir atteindre ?

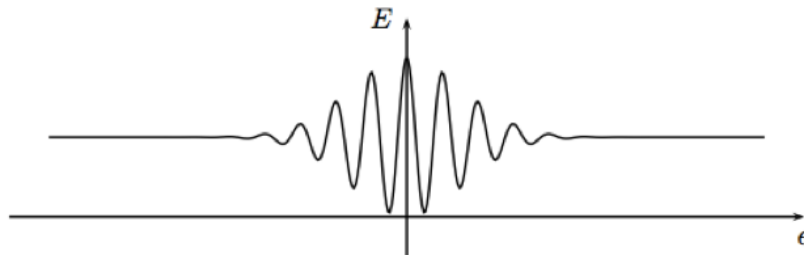


FIGURE 1 – Figure d'interférences à profil spectral en cloche de POISSON

B- Limite de résolution spectrale par la course maximale du Michelson

On considère un interféromètre de MICHELSON réglé en lame d'air. On utilise un détecteur, ponctuel, placé au centre du système d'anneaux dans le plan focal image d'une lentille convergente. Le miroir M_1 est mobile entre $\ell = 0$ et $\ell = L$, ce qui entraîne une variation du chemin optique Δ de $\Delta = 0$ à $\Delta = \Delta_{max}$. Le détecteur mesure l'intensité lumineuse $I(\Delta)$. Le mouvement du miroir est commandé par un système informatique qui enregistre la fonction $I(\Delta)$, appelée *interférogramme*. Ce système calcule ensuite numériquement la transformée $F(\omega)$ de la fonction $I(\Delta)$, définie par l'intégrale :

$$F(\omega) = \int_0^{\Delta_{max}} I(\Delta) \cos \frac{\omega\Delta}{c} d\Delta$$

1. Donner l'expression de la différence de marche Δ .
2. Calculer $F(\omega)$ dans le cas d'une raie monochromatique de pulsation ω_0 et représenter l'allure de $F(\omega)$.
3. En déduire l'allure de la courbe $F(\omega)$ dans le cas de deux ondes de pulsations ω_1 et $\omega_2 > \omega_1$, voisines de la pulsation centrale ω_0 .

4. Montrer que ce dispositif peut être utilisé comme un spectromètre. En définissant par vous-même un critère permettant de définir le plus petit écart spectral qui puisse être observé par ce dispositif, évaluer la résolution $\Delta\omega_R$ du spectromètre. En déduire son pouvoir de résolution $\mathcal{R}$ défini par :

$$\mathcal{R} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_R}$$

5. Montrer que $\mathcal{R}$ est fixé par le nombre N_{max} de maxima d'intensité enregistrés par le détecteur, lors de la course finie de l'interféromètre.
6. On étudie une source lumineuse d'émission centrée sur la pulsation ω_0 et dont le spectre forme une courbe en cloche de largeur à mi-hauteur $\Delta\omega$. À quelle condition sur $\Delta\omega_R$ pourra-t-on dire que le spectromètre permet d'étudier finement le profil de cette raie ?

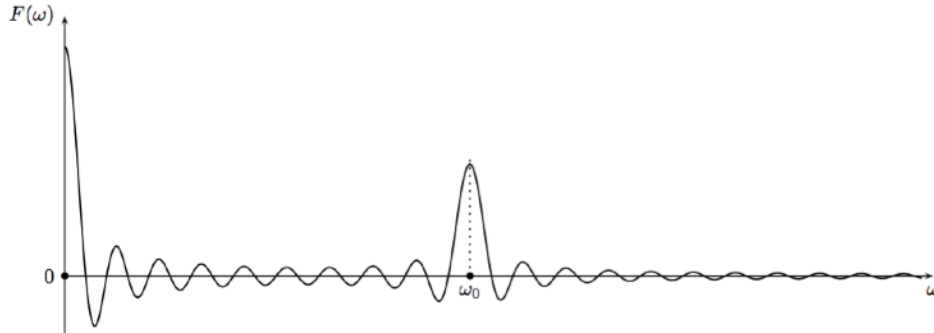


FIGURE 2 – Spectrométrie interférentielle - Principe

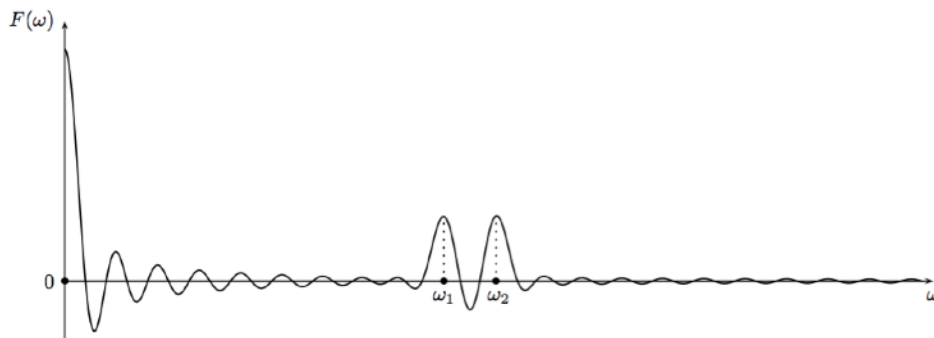
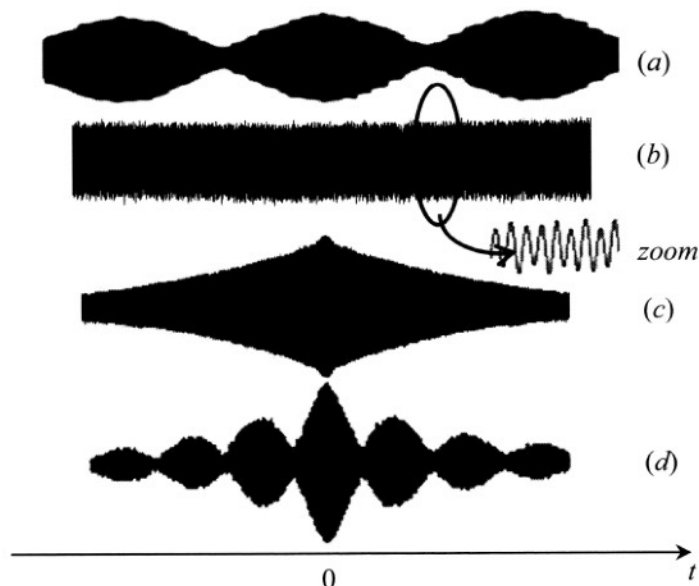


FIGURE 3 – Spectrométrie interférentielle - Séparation de deux raies

C- Identification d'interférogrammes

L'image ci-dessous montre les enregistrements observés avec différentes sources lumineuses: (1) laser, (2) lampe mercure haute pression associée à un filtre isolant la raie verte, (3) lampe sodium basse pression, (4) lampe mercure haute pression associée à un filtre isolant le doublet jaune. Associer, en le justifiant, chaque source (1, 2, 3, 4) à son interférogramme (a, b, c, d). Que pouvez-vous dire à propos de l'écart du doublet jaune du mercure, par rapport à celui du sodium ?



EXERCICE 5 : Mesure de déplacement à 10 nm près

On utilise un interféromètre de Michelson en lame d'air d'épaisseur e avec une source monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 643,84896 \text{ nm}$. On désire, pour une application métrologique, mesurer un déplacement $\Delta e = 51225342 \text{ nm}$ d'un des miroirs à 10 nm près, provoquant une augmentation $\Delta p = p'' - p'$ de l'ordre d'interférences p . On note $E(p)$ l'éclairement et E_{max} sa valeur maximale.

1. Comment mesurer très simplement la partie entière $ENT(p)$ de p ?
2. Montrer que, compte tenu de la précision requise, il faut aussi mesurer la partie fractionnaire $p - ENT(p)$.
Pour cela, on détermine le signe de $\frac{dE}{dp}$ et on mesure $\rho = \frac{E(p)}{E_{max}}$ avec une incertitude absolue égale à 0,01. Quel est le meilleur choix pour l'ordre d'interférences p' avant déplacement du miroir ? La précision est-elle suffisante ?

EXERCICE 6 : Création d'un réseau par interférences d'ondes planes

1. Réalisation d'un réseau

Soient deux ondes planes monochromatiques (k est la norme du vecteur d'onde), de même amplitude, ayant des directions de propagation faisant un angle α entre elles. Ces deux ondes interfèrent.

1. Exprimer l'intensité résultant de l'interférence sur un axe Oy d'orientation $\vec{k}_2 - \vec{k}_1$.
2. En déduire l'expression de l'interfrange.

On veut réaliser un réseau holographique par photographie de la figure d'interférences des deux ondes planes inclinées provenant d'un laser Hélium-Néon ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$). Le pas du réseau doit être de 1000 traits par mm.

3. Quel angle α doivent faire entre elles les directions de propagation des deux ondes ?

EXERCICE 7 : Mesure de longueur d'onde par goniométrie

Un réseau de pas a est éclairé par un faisceau parallèle provenant d'une lampe au mercure. On isole tout d'abord la raie verte de longueur d'onde $\lambda_0 = 0,5461 \text{ }\mu\text{m}$.

Le réseau est placé perpendiculairement au faisceau incident et l'on pointe, pour les différentes valeurs de l'ordre k du spectre.

Le résultat des mesures est indiqué dans le tableau suivant :

	k=1	k=2	k=3
θ	$17^\circ 22'$	$36^\circ 41'$	$63^\circ 37'$
θ'	$17^\circ 24'$	$36^\circ 40'$	$63^\circ 40'$

1. Ces mesures permettent-elles de vérifier que le réseau est bien perpendiculaire au faisceau incident ? Calculer le pas a du réseau puis le nombre de traits par millimètre.
2. On éclaire maintenant le réseau avec une raie bleue assez intense du spectre du mercure, de longueur d'onde inconnue λ_1 . Pour cette raie, dans le spectre du second ordre, $\theta = 32^\circ 31'$ et $\theta' = -32^\circ 34'$. Calculer λ_1 .

EXERCICE 8 : Réseau en réflexion

On considère un réseau d'amplitude par réflexion comportant $n = 500$ lignes par mm. L'angle d'incidence i et l'angle de réflexion θ sont supposés très voisins comme cela est représenté sur la figure 2. Attention à ne pas oublier que le problème ici est envisagé du point de vue de l'optique ondulatoire et non pas de l'optique géométrique pour lequel un tel schéma serait aberrant.

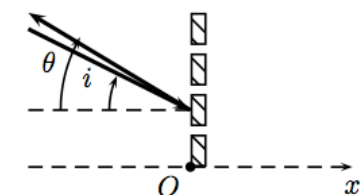


FIG. 2 – Réseau par réflexion

1. Établir l'expression de la différence de marche entre deux rayons consécutifs.
2. Déterminer approximativement les valeurs de $\theta \simeq i$ correspondant aux cinq premiers ordres possibles, pour la raie de longueur d'onde $\lambda = 577$ nm.
3. Le spectre est observé dans le plan focal d'une lentille de distance focale $f = 1$ m. Trouver la distance Δx qui sépare, dans le premier ordre, les deux images de la fente d'entrée relatives aux raies jaunes du doublet du mercure, de longueurs d'ondes 577 nm et 579 nm.

EXERCICE 9 : Série de Balmer d'une lampe à hydrogène

On considère un réseau plan par transmission possédant $n = 500$ traits par mm. Il reçoit, sous une incidence i , une lumière parallèle. On appelle θ_k l'angle correspondant au maximum principal d'ordre k pour la longueur d'onde λ . Tous les angles sont évalués algébriquement par rapport à la normale Ox en référence au sens positif indiqué sur le schéma (ce sens correspond au sens trigonométrique), voir la figure 1.

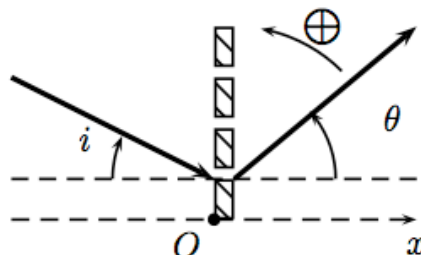


FIG. 1 – Réseau par transmission

1. Quels sont les phénomènes mis en jeu dans le spectroscopie à réseau ?
2. Donner la relation littérale liant θ_k , i , k et les données en justifiant par le raisonnement le plus simple.
3. On appelle déviation l'angle D_k entre le rayon émergent et le rayon incident. Exprimer D_k .
4. On analyse une lumière monochromatique de longueur d'onde λ_0 . Montrer que, pour un ordre k donné, la déviation passe par un minimum D_{km} pour un réglage précis de l'incidence.
5. On mesure $D_{1m} = 17^\circ 30'$ à $1'$ près. Déterminer l'angle d'incidence, faire un schéma résumant la marche des rayons et déterminer λ_0 et son encadrement.

On utilise maintenant une lampe à hydrogène émettant les raies suivantes :

raie	H_α	H_β	H_γ	H_δ
λ (nm)	656,3	486,1	434,0	410,2

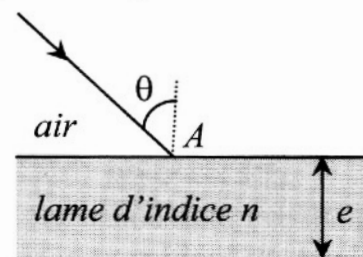
On règle l'incidence à la valeur i_0 de telle sorte que $\theta_1 = 0$ dans l'ordre 1 pour la radiation H_α .

6. Calculer i_0 . Combien d'ordres complets peut-on observer théoriquement ?
7. On place derrière le réseau une lentille mince convergente L de distance focale $f' = 40$ cm et une plaque photographique P portant une graduation centimétrique. La raie H_α tombe sur la graduation 0. Comment doit-on placer P pour avoir le maximum de netteté ? Donner les coordonnées des autres raies du spectre d'ordre 1.

EXERCICE 10 : Couleur des papillons

Certains papillons exotiques ont des couleurs iridescentes, c'est-à-dire changeant avec l'angle sous lequel on les éclaire. Ceci est souvent dû à un phénomène d'interférences se produisant sur une couche mince à la surface de leurs ailes. Ces interférences font que la réflexion de la lumière n'est importante que pour certaines longueurs d'onde particulières dans le spectre de la lumière visible. Ainsi, les ailes du *Papilio Ulysses*, papillon indonésien, passent du bleu-violet quand il est éclairé en incidence rasante à une couleur verte quand il est éclairé en incidence normale. Le but de cet exercice est de proposer une modélisation simple de ce phénomène.

1. Tracer le trajet d'un rayon lumineux arrivant au point A sous incidence θ sur une lame d'indice n et d'épaisseur constante e , entourée d'air, en tenant compte du phénomène de réfraction à l'intérieur de la lame. On notera θ_r l'angle de réfraction, qu'on reliera à l'angle d'incidence θ . Montrer qu'une division d'amplitude sur la face avant, suivie d'une réflexion sur la face arrière, produit deux rayons réfléchis par la lame, parallèles entre eux.



2. Démontrer que la différence de marche à l'infini entre ces deux rayons s'écrit $\delta = 2ne \cos \theta_r$, (sans tenir compte d'éventuels déphasages dus à la réflexion sur la surface de la lame).
3. Expliquer comment les interférences entre ces deux ondes peuvent donner une couleur iridescente. Vérifier qualitativement que ce modèle est compatible avec le changement de couleur observé pour le *Papilio Ulysses*.
4. Le *casside* est un coléoptère de couleur verte (éclairé en incidence normale) qui peut devenir rouge lorsqu'il est effrayé : un fluide pénètre à l'intérieur d'une couche mince à la surface de sa carapace et augmente son épaisseur optique. Vérifier qualitativement que ce changement de couleur peut aussi s'interpréter par le modèle de la lame mince.

EXERCICE 11 : Réseau d'antennes

On considère N antennes centrées en O_i , placées sur une même ligne, et régulièrement espacées de d (Fig. 8). On suppose que des signaux sont émis par une source ponctuelle monochromatique (longueur d'onde λ) située à l'infini. Le signal d'intérêt est la superposition des ondes captées par les N antennes.

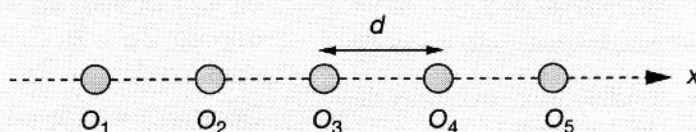


Figure 8

- a) Calculer les directions θ , repérées par rapport à la direction d'alignement des antennes, dans lesquelles ce réseau de N antennes peut recevoir un signal. Combien de directions peut-on sélectionner au minimum, et quelle est alors la condition sur d ?
- b) Quel peut bien être le but de mettre côte à côte des antennes ou des télescopes et de superposer les signaux qu'ils reçoivent ?
- c) On considère une, deux ou quatre antennes séparées de la distance $d = \frac{\lambda}{2}$. Calculer la somme des amplitudes reçues, d'une source ponctuelle à l'infini, dans la direction θ . En déduire l'intensité associée.
- d) À l'aide d'une calculatrice ou d'un logiciel de calcul, tracer dans les trois cas $N = 1$, $N = 2$ ou $N = 4$ la courbe polaire $\rho = I(\theta)$ et la commenter.
- e) Que se passe-t-il si on retarde d'une même durée τ l'onde reçue par la n -ième antenne par rapport à la $(n + 1)$ -ième ? On donnera les directions dans lesquelles on détecte un signal.
- f) On a évoqué les phénomènes pour la réception de signaux. Qu'en est-il de l'émission ?

EXERCICE 12 : Un réseau 3D : Diffraction des rayons X par une poudre d'Ag

III.A – Relation de Bragg

On considère des cristaux métalliques décrits par des mailles cubiques de sommet O , de paramètre de maille a , et dont les arêtes sont parallèles aux vecteurs de la base orthonormée $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$. On souhaite comparer les figures de diffraction des rayons X produites par les structures cubique simple (CS), cubique centrée (CC), et cubique à faces centrées (CFC) dont les mailles sont représentées sur la **figure 2**.

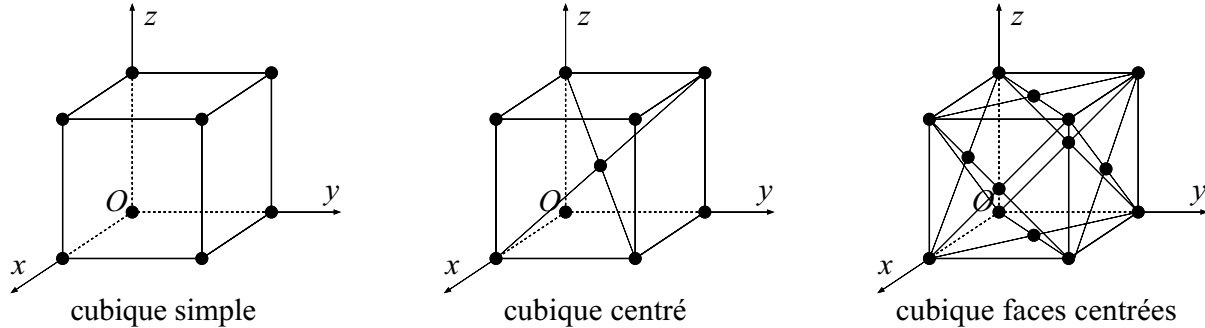


Figure 2

III.A.1) Pour les trois structures (CS), (CC), (CFC), donner le nombre d'atomes dans une maille.

III.A.2) On appelle nœud la position du centre d'un atome. Un plan réticulaire est un plan du cristal comportant au moins trois nœuds non alignés. D'après les propriétés de périodicité du cristal, un plan réticulaire contient une infinité de nœuds. On montre qu'un plan réticulaire quelconque traversant la maille cubique de sommet O est caractérisé par trois entiers $(h, k, l) \neq (0, 0, 0)$ appelés indices de Miller, de sorte que le plan réticulaire coupe les axes (Ox) , (Oy) et (Oz) en trois points de coordonnées $A(a/h, 0, 0)$, $B(0, a/k, 0)$ et $C(0, 0, a/l)$. Dans le cas où l'un des indices de Miller est nul, le point d'intersection correspondant est rejeté à l'infini. La distance séparant le point O du plan réticulaire (h, k, l) vaut $d_{(h,k,l)} = a/\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$.

Pour les trois structures (CS), (CC), (CFC), représenter la disposition des nœuds dans les plans réticulaires $(1,0,0)$ et $(1,1,0)$.

III.A.3) On fait parvenir sur le cristal une onde électromagnétique plane monochromatique de longueur d'onde λ . En quelques lignes et sans calcul, expliquer pourquoi les atomes du cristal émettent une onde électromagnétique de même fréquence que l'onde incidente.

III.A.4) Soient deux atomes occupant les positions O_1 et O_2 (**figure 3**). On note $\vec{u}$ et $\vec{u}'$ les vecteurs unitaires dirigeant respectivement l'onde incidente et l'onde émise à l'infini par les atomes. Exprimer la différence de marche $\delta_{2/1}$ entre les rayons parallèles passant par O_1 et O_2 en fonction des vecteurs $\vec{u}$, $\vec{u}'$, $\overrightarrow{O_1O_2}$.

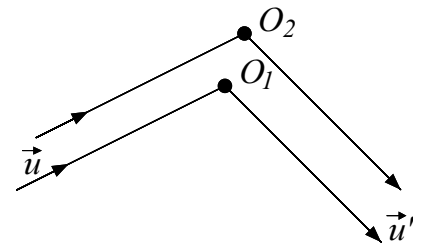


Figure 3

III.A.5) On considère les atomes d'un même plan réticulaire et on note θ et θ' les angles respectifs entre les vecteurs $\vec{u}$, $\vec{u}'$ et ce plan (**figure 4**). Expliquer pourquoi le rayonnement résultant de l'émission par les atomes de ce plan est particulièrement intense dans la direction $\theta' = -\theta$.

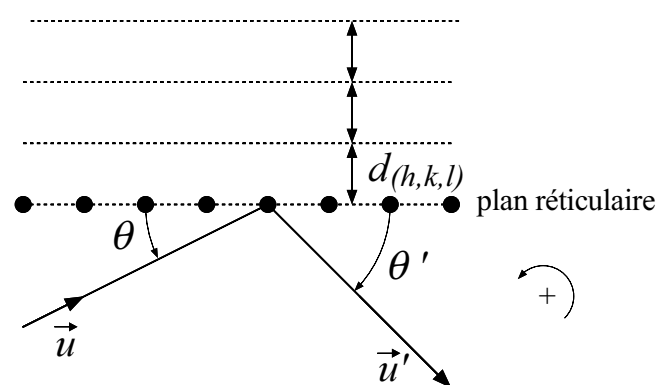


Figure 4

III.A.6) On considère à présent la famille de plans réticulaires parallèles au plan (h, k, l) régulièrement écartés de la distance $d_{(h,k,l)}$ (**figure 4**). Montrer que le rayonnement diffracté par ces plans est intense pour un angle d'incidence θ vérifiant la relation de Bragg $\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d_{(h,k,l)}}$ où m est un entier.

Par la suite, on se restreindra à l'ordre $m = 1$ et on posera :

$$\sin \theta_{(h,k,l)} = \frac{\lambda}{2d_{(h,k,l)}} = \frac{\lambda\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2a}$$

III.A.7) Expliquer pourquoi on ne peut pas utiliser la lumière visible pour étudier la structure d'un cristal d'après son rayonnement diffracté.

III.A.8) La présence de la famille de plans réticulaires (h, k, l) est une condition nécessaire mais pas suffisante pour que le cristal présente un maximum d'émission pour l'angle d'incidence $\theta_{(h,k,l)}$. Ainsi, le réseau (CS) donne bien un maximum d'émission pour l'angle $\theta_{(1,0,0)}$, mais pas les réseaux (CC) et (CFC). Expliquer ce phénomène en examinant le rayonnement émis par les nœuds éventuellement présents dans le plan défini par les indices de Miller $(2, 0, 0)$.

III.A.9) De la même façon, prévoir si les réseaux (CS), (CC) et (CFC) produisent un maximum d'émission pour l'angle d'incidence $\theta_{(1,1,0)}$.

III.B – Chambre de Debye-Scherrer

Afin de déterminer la structure cristalline d'un solide, un échantillon est divisé en un grand nombre de micro-cristaux aléatoirement orientés. La poudre ainsi obtenue est placée dans un capillaire, sur le trajet d'un faisceau parallèle et monochromatique de rayons X. Le rayonnement diffracté est analysé par un détecteur pouvant tourner autour d'une monture circulaire sur l'échantillon (chambre de Debye-Scherrer). Le signal reçu présente un ensemble de raies repérées par l'angle D (non orienté) par rapport à la direction incidente du faisceau, réparties symétriquement.

III.B.1) Quel est l'intérêt d'utiliser une poudre ?

III.B.2) Quelle est la relation entre l'angle D d'une raie et les indices de Miller (h, k, l) caractérisant les plans réticulaires responsables de ce maximum d'émission ?

III.B.3) L'argent cristallise selon une maille cubique. La raie correspondant aux indices de Miller $(1,1,1)$ est obtenue en $D = 17,3^\circ$ pour un faisceau de longueur d'onde $\lambda = 71,0$ pm. Quel est le paramètre de maille ?

III.B.4) Pour l'argent, il n'y a pas de raies correspondant aux indices de Miller $(1, 0, 0)$ et $(1, 1, 0)$. Quel est le réseau correspondant ? En déduire le rayon métallique de l'argent.

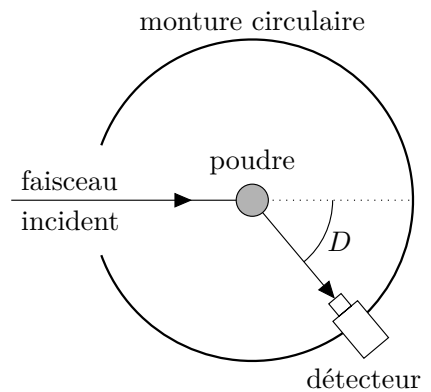


Figure 5



EXERCICE 13 : Trouveras-tu le personnage caché dans ce coloriage magique ?

Le choix des couleurs est libre. (le code couleur des résistances n'est pas obligatoire)