

Chapitre 6

■ Optique physique ■

Les ordres de grandeur utiles

La lumière

vitesse de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
constante de Planck	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
longueur d'onde (visible)	$400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$
fréquence (visible)	$4 \cdot 10^{14} \text{ Hz} < \nu = c/\lambda < 8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
énergie du photon (visible)	$1,5 \text{ eV} < E = h\nu < 3 \text{ eV}$

Les couleurs du spectre visible (λ en nm)

violet	390 – 455	≈ 425
bleu	455 – 492	≈ 475
vert	492 – 577	≈ 525
jaune	577 – 597	≈ 575
orange	597 – 622	≈ 625
rouge	622 – 780	≈ 675

Indices de réfraction

vide ; air	$n = 1 ; n = 1,00029 (n - 1 \approx 3 \cdot 10^{-4})$
eau ; verre ordinaire (crown) ; flint	$n = 1,33 ; n \approx 1,5 ; n \approx 1,8$

Les longueurs d'onde dans l'air des doublets jaunes

doublet jaune du sodium	$\lambda_1 = 589,0 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$ $\Delta\lambda = 0,6 \text{ nm}$
doublet jaune du mercure	$\lambda_1 = 577,0 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 579,1 \text{ nm}$ $\Delta\lambda = 2,1 \text{ nm}$

Largeur spectrale, temps et longueur de cohérence (en ordres de grandeur)

	$\Delta\nu$	$\Delta\lambda$	τ_0	$L_c = c\tau_0$
lumière blanche	$4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	400 nm	$2 \cdot 10^{-15} \text{ s}$	1 μm
doublet jaune Na	$5 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$	0,6 nm	$2 \cdot 10^{-12} \text{ s}$	0,5 mm
raie de lampe spectrale (Doppler)	10^{11} Hz	0,1 nm	0,01 ns	3 mm
laser TP	10^{10} Hz	0,01 nm	0,1 ns	3 cm
laser monomode	10^9 Hz	1 pm	1 ns	30 cm

L'œil

pouvoir séparateur	$\varepsilon \approx 1' \approx 3.10^{-4}$ rad (soit 1 mm à 3 m de distance)
temps de réponse	$\approx 0,1$ s

Laser He-Ne de TP

longueur d'onde ; longueur de cohérence	$\lambda = 632,8$ nm ; > 1 m
diamètre ; divergence angulaire	$d \approx 1$ mm ; $\alpha \approx \lambda/d \approx 10^{-3}$ rad (diffract.)
puissance ; puissance surfacique	$P \approx 1$ mW ; $R \approx P/d^2 \approx 10^3$ W.m ⁻²
champ électrique ; magnétique	$E \approx \sqrt{\frac{2R}{\varepsilon_0 c}} \approx 10^3$ V.m ⁻¹ ; $B \approx \frac{E}{c} \approx 10^{-6}$ T

en TP

précision du goniomètre	1 minute d'arc = $2,9.10^{-4}$ rad
précision du palmer du Michelson	1 centième de millimètre = 10 μ m

Le cours d'abord

■ Modèle scalaire des ondes lumineuses ; sources et récepteurs

1. En quoi consiste l'approximation scalaire de la grandeur lumineuse ?
2. À partir de la phase d'une onde plane $e^{i(\omega t - k z)}$ (ou sphérique $e^{i(\omega t - k r)}$) se propageant dans un milieu d'indice n entre A (en z_A) et B (en $z_B > z_A$), relier le retard de phase φ au chemin optique (AB) et à la longueur d'onde λ_0 dans le vide. Comment s'exprime simplement le chemin optique entre les deux points A et B ?
3. Comment est définie une surface d'onde à partir d'un point source ? Que peut-on dire du chemin optique entre deux surfaces d'onde ? Que dit le théorème de Malus ? L'illustrer dans le cas d'une onde plane et d'une onde sphérique. Comment peut-on alors interpréter en termes d'ondes la convergence au foyer image F' d'un faisceau de lumière parallèle à l'axe d'une lentille convergente ?
4. Un système optique stigmatique donne d'un point objet A une image A' ; comment s'exprime la notion de stigmatisme en termes de chemin optique (AA') sur les rayons ? Exemple.
5. Qu'appelle-t-on temps de cohérence et longueur de cohérence d'une source lumineuse ? Donner quelques ordres de grandeurs. Comment le temps de cohérence est-il relié à la largeur spectrale ?
6. À quoi sont sensibles les récepteurs usuels ? Quels sont leurs temps de réponse ? Justifier l'obtention de l'intensité I (ou éclairement E) à partir de l'amplitude complexe \underline{A} (ou vibration \underline{s}).

■ Rappels de quelques résultats sur la diffraction

7. Quelle inégalité faut-il respecter pour être dans le cadre de l'optique géométrique ? Est-elle vérifiée dans le cas des systèmes optiques usuels ?
De manière générale quand dit-on qu'il y a diffraction ? Comment peut-on comprendre qualitativement ce phénomène sur la base d'une description ondulatoire (prendre l'exemple d'une fente fine) ?
8. L'ouverture est une fente rectangulaire de centre C (une fente fine de TP) de largeur $a \approx 0,1$ mm suivant l'axe CX et de hauteur $b \approx 2$ cm suivant l'axe CY , éclairée sous incidence nulle par un pinceau lumineux de longueur d'onde $\lambda \approx 0,5$ μm . Faire un dessin et décrire le phénomène observé suivant l'axe Ox de l'écran E placé en arrière (et parallèle à CX).
Donner l'expression du demi-angle θ_0 au sommet du cône dans lequel est essentiellement envoyée la lumière. Quelle est alors la largeur de la tache de diffraction sur l'écran placé à une distance $D = 1$ m du plan de la fente ?
9. L'ouverture est circulaire de diamètre d . Donner l'ordre de grandeur de d pour une diffraction perceptible. Qu'observe-t-on ? Dans quelle ouverture angulaire θ_0 est essentiellement envoyée la lumière ? Quelle est l'importance pratique des ouvertures circulaires ?
10. Redessiner le montage des questions précédentes (pour une ouverture quelconque) sous la forme d'un montage de Fraunhofer (qui est aussi celui du goniomètre) avec une lentille convergente d'entrée L_1 (pour le collimateur) et une lentille convergente de sortie L_2 (pour l'objectif de la lunette) et l'expliquer.
11. Pourquoi la diffraction est-elle présente dans tout montage d'optique géométrique (même aussi simple que objet – lentille convergente – image) ? L'image d'un point étant une tache d'Airy (lorsque les aberrations géométriques et chromatiques ont été réduites), énoncer le critère de Rayleigh fixant la limite du pouvoir séparateur des instruments d'optique.

■ Conditions d'interférences

12. À quelles conditions sur la fréquence et la polarisation la superposition de deux vibrations lumineuses peut-elle donner des interférences ?
13. S_1 et S_2 sont deux sources ponctuelles et monochromatiques d'amplitudes a_1 et a_2 , et vérifiant les hypothèses de la question 12.. Pourquoi la différence de phase $\varphi(M, t)$ entre les deux ondes arrivant en un point d'observation M fixe dépend-elle de M ? Pourquoi dépend-elle du temps t ? Déduire alors l'intensité $I(M)$ en fonction des intensités I_1 et I_2 de chaque onde prise séparément et de la moyenne temporelle $\langle \cos \varphi \rangle$; commentaire.

14. Que vaut en général $\langle \cos \varphi \rangle$? Quand dit-on que deux sources sont cohérentes ?
Qu'en déduit-on expérimentalement sur les sources S_1 et S_2 ?
Quand doit-on additionner les amplitudes complexes ? Quand peut-on sommer les intensités ?

■ La formule des interférences

15. Comment établir le plus simplement la formule des interférences donnant l'intensité résultante $I(M)$ en un point M entre deux sources ponctuelles S_1 et S_2 , monochromatiques et cohérentes entre elles, en prenant les deux ondes de même intensité I_0 ?
Comment s'y exprime la différence de phase φ en fonction de la différence de marche δ ? Définir l'ordre d'interférence p en un point.
Expliquer qualitativement les extrema de l'intensité résultante I au point M .
16. Interpréter par une phrase le phénomène d'interférence, d'abord en termes d'intensité, puis en termes de phase.
Quel commentaire peut-on faire sur la phase de l'onde résultante en M ?

■ Des trous d'Young aux fentes d'Young

17. Décrire le dispositif des trous d'Young ; de quand date-t-il ? Pourquoi les franges sont-elles dites « non localisées » ?
Établir l'expression de la différence de marche δ en fonction de $a = S_1 S_2$, D la distance des trous à l'écran E et x l'abscisse du point M d'observation par rapport à l'axe médiateur. Décrire le système de franges.
18. Quelle est l'expression de l'interfrange i ? Réécrire la formule des interférences à l'aide de i , tracer la courbe donnant $I(x)$ et la commenter.
Les franges sont facilement observables à l'œil nu dès que $i \geq 1$ mm ; en déduire une inégalité sur a sachant que $D = 1$ m et $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$; commentaire.
Qu'appelle-t-on frange centrale, et que peut-on en dire ?
19. Pour quelle raison dans un montage réel choisit-on de remplacer les trous par des fentes ? Comment est modifiée la figure d'interférences ? Faire une figure avec des lentilles convergentes L_1 en entrée et L_2 en sortie et expliquer leur rôle ; comment cette dernière modifie-t-elle la différence de marche δ ?
20. Dans l'expérience des fentes d'Young, on place sur le trajet issu de S_1 une lame à faces parallèles d'épaisseur e et d'indice n ; que se passe-t-il ? Établir l'expression de la variation induite Δp de l'ordre d'interférence en un point quelconque de l'écran, en faisant l'approximation que les rayons sont normaux à la lame.
Faire l'application numérique de l'épaisseur e de la lame et de la translation Δx sur l'écran sachant que $|\Delta p| = 4$, $a = S_1 S_2 = 0,5$ mm, $D = 1$ m, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ et $n = 1,5$.

■ Notions de cohérence spatiale et temporelle

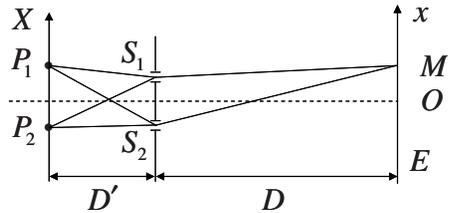
21. Qu'appelle-t-on visibilité des franges ? Comment est défini le contraste ? Comment évolue la courbe d'interférences $I(x)$ lorsque le contraste diminue ?

Quelles sont physiquement les deux causes d'affaiblissement du contraste ?

Dans les questions 22. à 25., les sous-questions b) sont en marge du programme et peuvent être traitées comme des exercices.

22. Cas de deux sources quasi ponctuelles

Avec le dispositif des trous d'Young, la source est à présent formée de deux sources primaires (c'est-à-dire lumineuses par elles-mêmes) quasi ponctuelles P_1 et P_2 , d'abscisses X_1 et X_2 , sur un axe parallèle à celui de S_1S_2 à une distance D' .



a) Expliquer qualitativement la situation et montrer d'abord sans grand calcul que le contraste est périodique en fonction de la distance P_1P_2 .

b) Comment confirmer ce résultat par un calcul d'intensité ? Tracer le graphe du contraste $C(P_1P_2)$ avec $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, $a = S_1S_2 = 0,5 \text{ mm}$ et $D' = 1 \text{ m}$.

23. Cas d'une fente source (étendue spatiale)

La source est une fente unique de largeur l et de hauteur h placée à une distance D' des fentes d'Young.

a) Reprendre la question précédente avec la source P_1 désaxée de X_1 . À quelle variation Δp de l'ordre d'interférence cela correspond-il par rapport à la source sur l'axe ? Transposer ce résultat à une source étendue de largeur $l = 2X_1$, énoncer un critère semi-quantitatif du brouillage des franges et indiquer la valeur minimale de l , soit l_{\min} en fonction de λ , D' et a pour laquelle il se produit.

b) Proposer un calcul d'intensité sur la fente conduisant à la variation du contraste avec la largeur l . Comparer à la question a).

Proposer une application numérique définissant une fente source « fine ».

24. Cas d'un doublet jaune

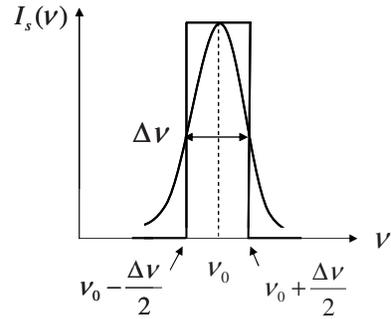
La source quasi ponctuelle est à présent constituée de deux raies, par exemple le doublet jaune du sodium de longueurs d'onde $\lambda_1 = 589,0 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$ dans l'air.

a) Expliquer qualitativement la situation et évaluer d'abord sans grand calcul l'abscisse x_0 où se produit le premier brouillage de franges ; à combien de franges depuis $x = 0$ cela correspond-il ? Est-ce observable avec un système de type fentes d'Young ? Quel dispositif permet de le voir facilement ?

b) Comment confirmer ce résultat par un calcul ? Que vaut le contraste ? Tracer le graphe de $I(x)$.

25. Cas d'une raie (étendue spectrale)

Une raie n'est jamais parfaitement monochromatique car un atome qui émet un train d'onde pendant un temps τ_0 au voisinage de la fréquence centrale ν_0 donne lieu à une raie de largeur à mi-hauteur $\Delta\nu \approx 1/\tau_0$.



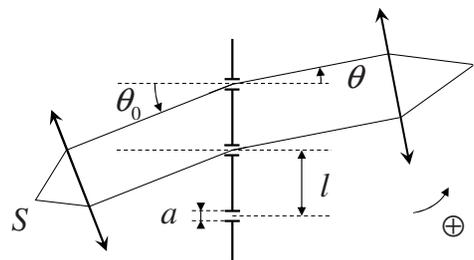
On modélise l'intensité spectrale $I_s(\nu)$ de la raie par un profil rectangulaire comme sur le graphe ci-contre, avec une intensité spectrale uniforme I_s entre $\nu_0 \pm \Delta\nu/2$ et nulle en dehors de cet intervalle.

- a) S'inspirer de la question précédente. Indiquer si, en un point de l'écran, la différence de marche varie lorsque la longueur d'onde change ; en déduire la variation Δp de l'ordre d'interférences en ce point lorsque la fréquence ν_0 varie de $\Delta\nu/2$. Transposer ce résultat à présent à la source de largeur spectrale $\Delta\nu$, donner un critère semi-quantitatif du brouillage des franges et indiquer la valeur de $\Delta\nu_{min}$ en fonction de c et $\delta(x)$, puis celle de $\Delta\lambda_{min}$ pour laquelle il se produit.
- b) Comment confirmer ce résultat par un calcul (garder la variable ν) ? Déterminer le contraste observé (il est conseillé de noter $\tau(M) = \delta(M)/c$). Commentaires. Tracer le graphe de l'intensité $I(\tau)$. Comparer à la question a).
Pourquoi avec la raie verte du mercure une diminution notable du contraste n'est-elle pas observable avec un système de type fentes d'Young ? Quel dispositif permet de le voir facilement ?
- c) Faire un dessin, toujours sur la base de l'expérience des trous d'Young, et faire comprendre qualitativement la notion de cohérence temporelle à partir de la longueur des trains d'onde. Commentaire.

■ Le réseau ou interférences à N ondes

26. Qu'est-ce qu'un réseau plan ?

S'appuyer sur la figure ci-contre pour obtenir (*sans calcul*) la formule du réseau donnant θ_k , l'angle d'émergence dans la direction pour laquelle est obtenu le maximum de lumière d'ordre K pour la longueur d'onde λ .



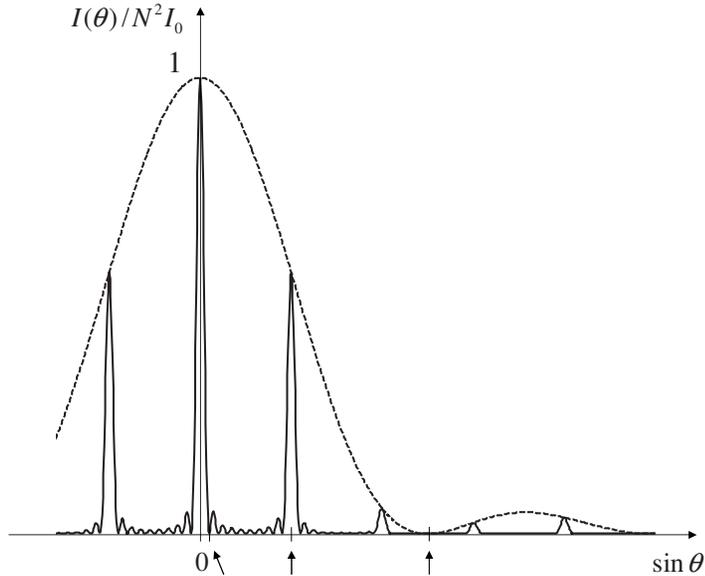
Un réseau de $n = 600$ traits/mm est éclairé sous incidence nulle avec $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$; combien peut-on voir d'ordres ?

27. Principe des interférences à N ondes

Un faisceau collimaté éclaire une partie d'un réseau comme celui de la question précédente et cela concerne N fentes. Donner un ordre de grandeur de N en TP.

On note $\varphi = 2\pi\delta/\lambda$ la différence de phase entre les ondes issues de deux fentes successives. Utiliser la représentation de Fresnel pour retrouver la condition d'interférences constructives et pour estimer la demi-largeur à la base des franges brillantes. En déduire l'intérêt des interférences à N ondes sur les interférences à 2 ondes.

28. La courbe qui donne l'intensité relative $I(\theta)/N^2I_0$ en fonction de $\sin\theta$ (on a pris ici $\theta_0 = 0$) est donnée par le graphe ci-dessous (I_0 est l'intensité d'une onde seule).



Commenter cette courbe et en particulier donner les 3 abscisses indiquées par des flèches ; en déduire l'importance de chacune des trois longueurs a , l et $L = Nl$.

29. Pourquoi le réseau est-il un appareil disperseur ? Pourquoi se pose-t-il un problème de résolution ? Estimer en fonction de K , N et λ , la plus petite différence $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \ll \lambda$ de deux longueurs d'onde voisines justes séparées d'après le critère de Rayleigh. Proposer une application numérique et la commenter.

■ L'interféromètre de Michelson

30. Décrire sommairement l'interféromètre de Michelson. Faire le schéma lors d'une utilisation en « lame d'air » d'épaisseur e et en donner les caractéristiques (on note i l'angle que fait le rayon incident avec l'axe du miroir translatable M_1).

Quelle est dans ce cas la différence de marche $\delta(i)$? Quelle est la forme des franges ? Quel lien existe-t-il entre la taille de la source et la localisation des franges ?

31. Déterminer le rayon r_k du $k^{\text{ième}}$ anneau brillant compté à partir du centre (que l'on

suppose brillant aussi) en fonction de k , λ , e , et f' , la distance focale de la lentille de projection, et commenter le résultat.

32. Faire le schéma de l'interféromètre de Michelson lors d'une utilisation en « coin d'air » d'angle α éclairé par une source quasi ponctuelle. Quelle est dans ce cas la différence de marche $\delta(x)$ où x est l'abscisse par rapport à l'arête des deux miroirs ? Quelle est la forme des franges ? Quel lien existe-t-il entre la taille de la source et la localisation des franges ?

Conseils à suivre Erreurs à éviter

- Même si historiquement la théorie ondulatoire de la lumière s'est développée au début du XIXe siècle (les trous d'Young datent de 1807), donc bien avant l'électromagnétisme des régimes variables (les équations de Maxwell datent de 1864 et la production d'ondes électromagnétiques de 1887), il ne faut pas oublier le caractère vectoriel de la lumière en optique ondulatoire. L'introduction des photons et la quantification de l'énergie émise par les atomes datent du début du XXe siècle.
- Autre point à ne pas oublier : les phénomènes décrits par l'optique ondulatoire sont vus à travers des yeux humains dont les caractéristiques physiologiques (un peu comme les oreilles en acoustique) agissent comme un filtre, sont sensibles à l'intensité (et pas au champ) et présentent un temps de réponse de $\approx 0,1$ s sur lequel ils moyennent les informations ; ils donnent une perception partielle et altérée de la réalité physique.
- Se rappeler que la période T (et la fréquence $\nu = 1/T$) sont caractéristiques de l'onde (donc indépendantes du milieu), alors que la longueur d'onde $\lambda = \nu T$ dépend du milieu par $\nu = c/n$ (c'est pour cette raison que l'on préfère raisonner sur la longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = cT$ soit $\lambda = \lambda_0/n$).
- Les spectres émis par les atomes excités lors des transitions entre niveaux électroniques quantifiés sont des spectres de raies. En TP d'optique sur le goniomètre, les lampes spectrales Na ou Hg donnent sur fond noir un ensemble discret de raies de couleurs différentes. C'est également le cas avec un laser qui donne une seule raie très monochromatique (lumière cohérente). Alors que le spectre émis par un corps chaud (par exemple une lampe à incandescence ou le Soleil) est un spectre continu.
- Il est important de se rendre compte qu'il n'est pas facile d'obtenir des interférences entre deux ondes ou de faire diffracter la lumière autour de l'image géométrique car les conditions d'obtention sont strictes. Par ailleurs il est capital de se familiariser rapidement avec les ordres de grandeur si spécifiques de l'optique ondulatoire.