

Diffraction et interférences

COURS • P14 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	7
Méthodes et pièges	7
Vers le PASS	8
Exercices	8
Corrigés	10

Ce que tu dois savoir faire

- Caractériser le phénomène de diffraction et préciser les conditions dans lesquelles il est observable, pour une onde mécanique comme pour la lumière.
- Exploiter la relation $\theta = \lambda/a$ pour une fente ou un fil, en précisant la signification de chaque grandeur et l'unité de l'angle.
- Établir la relation $L = 2\lambda D/a$ entre la largeur de la tache centrale et les caractéristiques du montage, puis l'utiliser pour mesurer une longueur d'onde ou une petite dimension.
- Définir des sources cohérentes et expliquer pourquoi deux lampes ordinaires ne donnent pas d'interférences observables.
- Calculer une différence de marche et en déduire si l'interférence en un point est constructive ou destructive.
- Établir l'expression de la différence de marche $\delta = b \cdot x/D$ dans le dispositif des fentes d'Young et en déduire l'interfrange $i = \lambda D/b$.
- Exploiter une figure d'interférences pour déterminer λ , b ou D , et prévoir l'effet de la modification d'un paramètre.
- Interpréter qualitativement les couleurs interférentielles (lumière blanche, bulles de savon, ailes de papillon).
- Évaluer l'incertitude d'une mesure de longueur d'onde réalisée par diffraction ou par interférences.

Cours

1. Le phénomène de diffraction

Lorsqu'une onde rencontre un obstacle ou traverse une ouverture, elle ne se propage pas seulement en ligne droite : elle s'étale au-delà de l'ouverture, dans des directions où l'optique géométrique ne prévoit aucune onde. On appelle **diffraction** cette modification de la direction de propagation d'une onde par une ouverture ou un obstacle de petite dimension.

La diffraction concerne **toutes les ondes** : les vagues qui franchissent l'entrée d'un port s'étalent en arcs de cercle dans le bassin, le son se perçoit derrière un mur, les ondes radio contournent les collines. Elle est donc une signature du caractère ondulatoire. Lorsque Thomas Young puis Augustin Fresnel ont observé la diffraction de la lumière au début du XIX^e siècle, ils ont apporté un argument décisif en faveur du modèle ondulatoire de la lumière.

Condition d'observation. Le phénomène est d'autant plus marqué que la dimension a de l'ouverture (ou de l'obstacle) est petite devant la longueur d'onde λ , ou du même ordre de grandeur. En pratique, la diffraction devient nettement visible dès que a ne dépasse pas quelques centaines de fois λ . Pour la lumière visible (λ entre 400 nm et 800 nm environ), il faut donc des fentes ou des fils de quelques dizaines de micromètres à quelques dixièmes de millimètre. Pour un son de 340 Hz dans l'air ($\lambda = 1,0$ m), une porte ouverte de 0,9 m suffit : c'est pour cela qu'on entend dans le couloir une conversation tenue dans une pièce sans voir les personnes qui parlent.

Ce que la diffraction ne change pas. La fréquence, la longueur d'onde et la célérité de l'onde diffractée sont les mêmes que celles de l'onde incidente : seule la répartition de l'énergie dans l'espace est modifiée.

2. Diffraction par une fente ou par un fil : l'écart angulaire

On éclaire une fente fine de largeur a avec un faisceau laser de longueur d'onde λ et on observe sur un écran placé à la distance D de la fente, avec D très grand devant a . La figure obtenue est une suite de taches alignées **perpendiculairement à la fente** : une tache centrale très lumineuse, deux fois plus large que les autres, encadrée de taches latérales beaucoup moins intenses, séparées par des zones d'extinction.

Diffraction par une fente

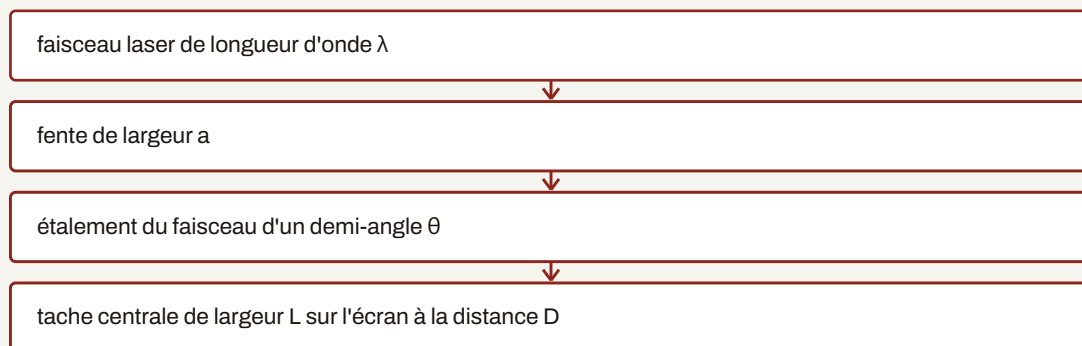


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

On appelle **écart angulaire** θ (ou demi-ouverture angulaire) l'angle entre la direction du centre de la tache centrale et la direction de la première extinction. Pour une fente de largeur a :

$$\theta = \lambda / a$$

avec θ en **radians**, λ et a dans la **même unité** (en général le mètre). Cette relation est valable pour les petits angles, ce qui est toujours le cas dans les montages usuels.

Trois conséquences se lisent directement sur cette formule :

- plus la fente est étroite, plus le faisceau s'étale (θ inversement proportionnel à a) ;

- plus la longueur d'onde est grande, plus l'étalement est important : le rouge est davantage diffracté que le bleu ;
- si a est très grand devant λ , θ tend vers zéro : on retrouve la propagation rectiligne de l'optique géométrique.

Fil et fente : même figure. Un fil de diamètre a donne la même figure de diffraction qu'une fente de largeur a (en dehors de la zone centrale directement éclairée par le faisceau non diffracté). C'est ce qui permet de mesurer le diamètre d'un cheveu ou d'un fil fin avec un simple laser.

Largeur de la tache centrale. Soit L la largeur de la tache centrale sur l'écran, c'est-à-dire la distance entre les deux premières extinctions. Dans le triangle formé par la fente et la demi-tache, on a $\tan \theta = (L/2) / D$. Les angles étant petits, $\tan \theta \approx \theta$ (θ en radians), donc $\theta = L / (2D)$. En égalant les deux expressions de θ :

$$L / (2D) = \lambda / a, \text{ soit } L = 2\lambda D / a$$

La largeur de la tache centrale est proportionnelle à λ et à D , et inversement proportionnelle à a . Tracer L en fonction de $1/a$ donne une droite passant par l'origine, de coefficient directeur $2\lambda D$: c'est la méthode la plus sûre pour exploiter une série de mesures.

Ordre de grandeur de la validité de l'approximation. Pour $\theta = 0,05$ rad, $\tan \theta = 0,0500417$: l'écart relatif est inférieur à 0,1 %. L'approximation est donc excellente tant que θ reste inférieur à quelques centièmes de radian, ce qui correspond à toutes les situations usuelles au lycée.

Ouverture circulaire. Un trou circulaire donne une figure formée d'anneaux concentriques autour d'une tache centrale (la tache d'Airy). L'écart angulaire est du même ordre de grandeur, λ/a , à un facteur numérique proche de 1 près. Cette diffraction limite la finesse des détails que peut séparer tout instrument d'optique, y compris l'œil : deux points très proches donnent deux taches qui se recouvrent et ne sont plus distinguées.

3. Superposition de deux ondes et cohérence

Lorsque deux ondes de même nature se propagent dans le même milieu, elles se superposent : en chaque point, la perturbation résultante est la **somme** des perturbations dues à chacune des ondes. Les ondes se croisent ensuite sans se modifier mutuellement.

Si les deux ondes ont la **même fréquence** et un **déphasage constant dans le temps**, leur superposition produit en chaque point un résultat stable : certaines zones vibrent avec une amplitude maximale, d'autres avec une amplitude minimale. C'est le phénomène d'**interférences**. Deux sources qui vérifient ces conditions sont dites **cohérentes**.

Pourquoi deux lampes ne donnent pas d'interférences. Une lampe ordinaire émet la lumière par trains d'onde très courts, de phase aléatoire. Le déphasage entre deux lampes indépendantes change de façon désordonnée des millions de fois par seconde : les zones claires et sombres se déplacent trop vite pour être perçues, et l'on observe un éclaircissement uniforme. Pour obtenir deux sources lumineuses cohérentes, on les fabrique à partir d'**une même source**, en divisant son faisceau en deux : c'est le rôle des deux fentes d'Young éclairées par un même laser. Pour les ondes sonores ou les ondes à la surface de l'eau, on peut alimenter deux haut-parleurs par le même générateur, ou faire frapper l'eau par deux pointes fixées sur le même vibreur.

4. Interférences constructives et destructives, différence de marche

Considérons deux sources ponctuelles S_1 et S_2 cohérentes et **en phase**, émettant des ondes de longueur d'onde λ dans un milieu où la célérité vaut v . En un point M situé à la distance d_1 de S_1 et d_2 de S_2 , on définit la **différence de marche** :

$$\delta = d_2 - d_1 \text{ (en mètres)}$$

L'onde issue de S_2 arrive en M avec un retard $\Delta t = \delta / v$ par rapport à celle issue de S_1 (en comptant δ positivement). Comparer ce retard à la période T revient à comparer δ à λ , puisque $\lambda = v \cdot T$.

Interférences constructives. Si δ est un multiple entier de la longueur d'onde, les deux ondes arrivent **en phase** en M : leurs maximums coïncident, et l'amplitude résultante est maximale (égale à la somme des amplitudes).

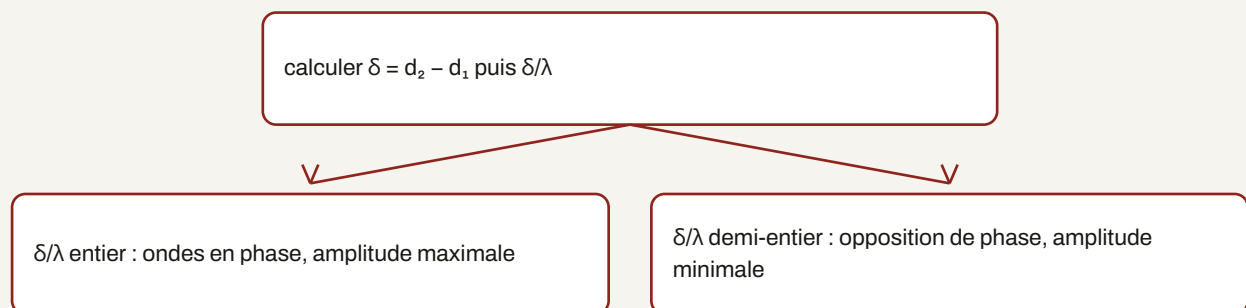
$$\delta = k \cdot \lambda, \text{ avec } k \text{ entier relatif } (\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots)$$

Interférences destructives. Si δ est un multiple impair de la demi-longueur d'onde, les deux ondes arrivent **en opposition de phase** : le maximum de l'une coïncide avec le minimum de l'autre, et l'amplitude résultante est minimale. Elle est nulle si les deux ondes ont la même amplitude en M .

$$\delta = (k + 1/2) \cdot \lambda, \text{ soit } \delta = (2k + 1) \cdot \lambda / 2, \text{ avec } k \text{ entier relatif}$$

Entre ces deux cas extrêmes, l'amplitude prend des valeurs intermédiaires. Le quotient δ/λ (que l'on appelle parfois ordre d'interférence) indique immédiatement la situation : entier, interférence constructive ; demi-entier, interférence destructive.

Nature de l'interférence en M



Deux branches distinctes • ce schéma ne relie pas les deux issues entre elles

Attention. Ces conditions supposent que les sources sont en phase. Si elles sont en opposition de phase (deux haut-parleurs branchés en inversant les fils de l'un d'eux, par exemple), les conditions s'échangent.

Remarque sur l'énergie. Les interférences ne créent ni ne détruisent d'énergie : elles la redistribuent. Ce qui manque dans les zones sombres se retrouve dans les zones brillantes.

5. Le dispositif des fentes d'Young

Deux fentes fines et parallèles F_1 et F_2 , distantes de b (on note aussi cette distance a_2 ou e selon les ouvrages, mais elle ne doit pas être confondue avec la largeur de chaque fente), sont éclairées par un même laser. Chaque fente diffracte la lumière : les deux faisceaux diffractés se recouvrent, et dans cette zone de recouvrement on observe sur un écran situé à la distance D des fentes une alternance régulière de **franges brillantes** et de **franges sombres**, parallèles aux fentes. Sans diffraction, les deux faisceaux ne se rencontreraient pas : la diffraction est la condition de l'interférence dans ce montage.

Fentes d'Young

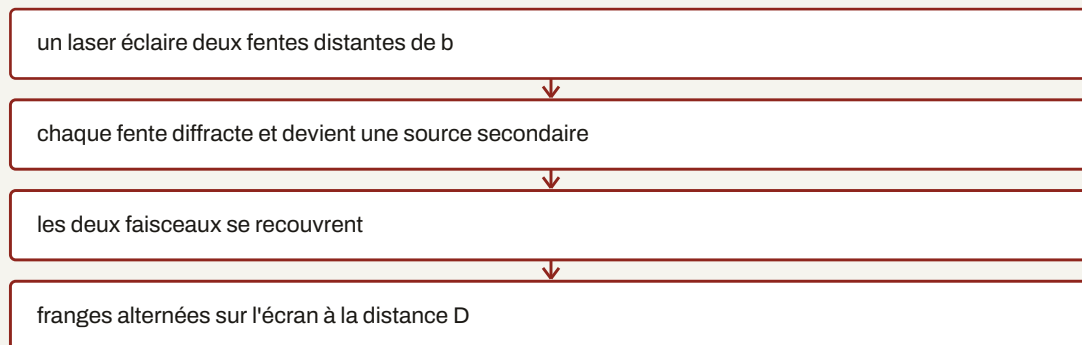


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Différence de marche en un point de l'écran. On repère un point M de l'écran par son abscisse x , comptée à partir du point O situé à égale distance des deux fentes. Les fentes étant en phase (elles sont éclairées par la même onde, à la même distance du laser), on calcule $\delta = F_2M - F_1M$. Avec un repère où F_1 et F_2 ont pour ordonnées $+b/2$ et $-b/2$, et M pour coordonnées $(D ; x)$:

$$F_2M^2 = D^2 + (x + b/2)^2 \text{ et } F_1M^2 = D^2 + (x - b/2)^2$$

$$\text{donc } F_2M^2 - F_1M^2 = (x + b/2)^2 - (x - b/2)^2 = 2 \cdot b \cdot x.$$

Or $F_2M^2 - F_1M^2 = (F_2M - F_1M)(F_2M + F_1M)$. Comme D est très grand devant x et devant b , $F_2M + F_1M \approx 2D$. Il vient $\delta \cdot 2D = 2 \cdot b \cdot x$, soit :

$$\delta = b \cdot x / D$$

Position des franges. Les franges brillantes correspondent à $\delta = k \cdot \lambda$, donc à $x = k \cdot \lambda D / b$. Les franges sombres correspondent à $\delta = (k + 1/2) \cdot \lambda$, donc à $x = (k + 1/2) \cdot \lambda D / b$. Au centre O ($x = 0$), $\delta = 0$: on observe toujours une frange brillante centrale.

Interfrange. L'**interfrange** i est la distance entre les centres de deux franges brillantes consécutives (ou de deux franges sombres consécutives). En passant de k à $k + 1$:

$$i = \lambda \cdot D / b$$

L'interfrange est proportionnel à λ et à D , et inversement proportionnel à la distance b entre les fentes. Des fentes plus proches donnent des franges plus espacées.

Mesure pratique. Une frange a une largeur non nulle et des bords flous : on mesure donc la distance couvrant **plusieurs interfranges** (par exemple 10) et on divise par leur nombre. L'incertitude sur i est ainsi divisée par le même nombre. Attention à compter les intervalles et non les franges : entre la 1^{ère} et la 11^{ème} frange brillante, il y a 10 interfranges.

Figure complète. Sur l'écran, les franges d'interférences ne sont visibles qu'à l'intérieur de la tache de diffraction d'une seule fente. La figure observée combine donc les deux phénomènes : une enveloppe de diffraction, de largeur $2\lambda D/a$ (a étant la largeur de chaque fente), découpée en franges fines d'interfrange $\lambda D/b$. Comme b est plus grand que a , on observe plusieurs franges dans la tache centrale de diffraction.

	Diffraction par une fente	Interférences de deux fentes
Grandeur caractéristique	largeur a de la fente	distance b entre les fentes
Distance mesurée sur l'écran	$L = 2\lambda D/a$ (tache centrale)	$i = \lambda D/b$ (interfrange)
Aspect	tache centrale large, taches latérales faibles	franges régulières de même largeur
Effet d'une augmentation de λ	tache plus large	franges plus espacées

6. Interférences en lumière blanche et couleurs interférentielles

La lumière blanche est un mélange de radiations de longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 800 nm environ. Chaque radiation produit son propre système de franges, d'interfrange proportionnel à λ . Au centre ($x = 0$), $\delta = 0$ pour toutes les longueurs d'onde : la frange centrale est **blanche**. De part et d'autre, les systèmes de franges se décalent : les premières franges sont **irisées** (bordées de bleu côté centre, de rouge côté extérieur), puis les couleurs se mélangent et l'on observe un **blanc d'ordre supérieur**, blanc auquel il manque certaines radiations éteintes. Un spectroscope placé en un tel point révèle des bandes noires, appelées cannelures, aux longueurs d'onde éteintes, c'est-à-dire telles que $\delta = (k + 1/2) \cdot \lambda$.

Couleurs interférentielles. De nombreuses couleurs naturelles ne viennent pas de pigments mais d'interférences : bulles de savon, taches d'huile sur une route mouillée, ailes de certains papillons (morphos), plumes de paon, reflets d'un disque optique. Dans une lame mince (film de savon, couche d'huile), la lumière est réfléchiée par la face avant et par la face arrière : les deux ondes réfléchies, issues de la même onde incidente, sont cohérentes et présentent une différence de marche liée à l'épaisseur du film. Selon l'épaisseur et l'angle d'observation, certaines longueurs d'onde interfèrent de façon constructive, d'autres de façon destructive : la lumière réfléchiée est colorée, et la couleur change quand on incline la tête ou quand l'épaisseur varie. Ces couleurs sont dites **structurales**.

7. Mesures et incertitudes

La diffraction et les interférences fournissent deux méthodes de mesure de longueurs très petites à partir de longueurs facilement mesurables à la règle (L , i , D).

- Mesure de λ par diffraction : $\lambda = a \cdot L / (2D)$, avec une fente calibrée.
- Mesure d'un diamètre de fil : $a = 2\lambda D / L$, avec un laser de longueur d'onde connue.
- Mesure de λ par interférences : $\lambda = i \cdot b / D$, avec des fentes d'écart b connu.

Pour une grandeur obtenue par produit et quotient, comme $\lambda = i \cdot b / D$, les incertitudes relatives se combinent selon :

$$u(\lambda)/\lambda = \sqrt{[(u(i)/i)^2 + (u(b)/b)^2 + (u(D)/D)^2]}$$

La mesure de D (de l'ordre du mètre, à quelques millimètres près) est en général très précise ; la principale source d'incertitude est la mesure de L ou de i , d'où l'intérêt de mesurer plusieurs interfranges ou de répéter les mesures. La méthode graphique (tracé de L en fonction de $1/a$, ou de i en fonction de D) réduit l'influence d'une mesure isolée erronée.

Exemples résolus

Exemple 1 : largeur de la tache centrale

Énoncé. Un laser hélium-néon ($\lambda = 633 \text{ nm}$) éclaire une fente de largeur $a = 100 \text{ }\mu\text{m}$. L'écran est à $D = 2,00 \text{ m}$ de la fente. a) Calculer l'écart angulaire θ . b) En déduire la largeur L de la tache centrale. c) Que devient L si l'on remplace la fente par une fente de $50 \text{ }\mu\text{m}$?

Résolution. a) $\theta = \lambda/a$ avec $\lambda = 633 \times 10^{-9} \text{ m}$ et $a = 100 \times 10^{-6} \text{ m} = 1,00 \times 10^{-4} \text{ m}$: $\theta = 633 \times 10^{-9} / 1,00 \times 10^{-4} = 6,33 \times 10^{-3} \text{ rad}$. L'angle est bien petit, l'approximation $\tan \theta \approx \theta$ est justifiée. b) $\tan \theta \approx \theta = (L/2)/D$, donc $L = 2D\theta = 2 \times 2,00 \times 6,33 \times 10^{-3} = 2,53 \times 10^{-2} \text{ m}$, soit $L = 2,53 \text{ cm}$. c) L est inversement proportionnelle à a : diviser a par 2 multiplie L par 2. $L = 5,06 \text{ cm}$.

Exemple 2 : mesurer le diamètre d'un cheveu

Énoncé. On place un cheveu tendu dans le faisceau d'un laser de longueur d'onde $\lambda = 650 \text{ nm}$. Sur un écran situé à $D = 1,50 \text{ m}$, la tache centrale mesure $L = 3,2 \text{ cm}$. a) Justifier qu'on peut utiliser les relations établies pour une fente. b) Calculer le diamètre a du cheveu.

Résolution. a) Un fil de diamètre a et une fente de largeur a donnent la même figure de diffraction : les relations $\theta = \lambda/a$ et $L = 2\lambda D/a$ s'appliquent. b) De $L = 2\lambda D/a$, on tire $a = 2\lambda D/L$. $a = 2 \times 650 \times 10^{-9} \times 1,50 / 3,2 \times 10^{-2} = 1,95 \times 10^{-6} / 3,2 \times 10^{-2} = 6,1 \times 10^{-5} \text{ m}$. $a \approx 61 \text{ }\mu\text{m}$, valeur cohérente avec le diamètre usuel d'un cheveu (50 à $100 \text{ }\mu\text{m}$). Le résultat a deux chiffres significatifs, comme L .

Exemple 3 : fentes d'Young et nature d'une frange

Énoncé. Un laser vert ($\lambda = 532 \text{ nm}$) éclaire deux fentes distantes de $b = 0,40 \text{ mm}$. L'écran est à $D = 1,60 \text{ m}$. a) Calculer l'interfrange i . b) En un point M d'abscisse $x = 5,32 \text{ mm}$, calculer la différence de marche δ et indiquer la nature de la frange. c) Sur quelle longueur s'étendent 10 interfranges ?

Résolution. a) $i = \lambda D/b = 532 \times 10^{-9} \times 1,60 / 0,40 \times 10^{-3} = 8,512 \times 10^{-7} / 4,0 \times 10^{-4} = 2,13 \times 10^{-3} \text{ m}$. $i \approx 2,1 \text{ mm}$. b) $\delta = b \cdot x/D = 4,0 \times 10^{-4} \times 5,32 \times 10^{-3} / 1,60 = 1,33 \times 10^{-6} \text{ m}$. $\delta/\lambda = 1,33 \times 10^{-6} / 532 \times 10^{-9} = 2,5$. Le quotient est demi-entier : $\delta = (2 + 1/2) \cdot \lambda$, les ondes arrivent en opposition de phase, **M est au centre d'une frange sombre** (la troisième frange sombre à partir du centre). On le vérifie : $x = 2,5 \times i = 2,5 \times 2,128 \text{ mm} = 5,32 \text{ mm}$. c) $10 \times i = 21 \text{ mm}$ environ : c'est cette longueur que l'on mesurerait à la règle pour déterminer i avec une meilleure précision.

Méthodes et pièges

- Méthode type pour une diffraction : écris $\theta = \lambda/a$, puis $\tan \theta = L/(2D) \approx \theta$, et isole la grandeur cherchée. Convertis toutes les longueurs en mètres avant de calculer.
- Pour une interférence en un point, calcule δ , puis le quotient δ/λ : entier, frange brillante ; demi-entier, frange sombre. Ne conclus jamais sans avoir comparé δ à λ .
- Ne confonds pas a (largeur d'une fente, qui fixe la diffraction) et b (distance entre les deux fentes, qui fixe l'interfrange).

- L est la largeur de toute la tache centrale, entre les deux premières extinctions : le facteur 2 de $L = 2\lambda D/a$ vient de là. Si l'énoncé donne la demi-largeur, adapte.
- θ s'exprime en radians dans $\theta = \lambda/a$. Si tu dois donner un angle en degrés, multiplie par $180/\pi$ à la fin seulement.
- Pour mesurer i , compte les intervalles et non les franges : n franges brillantes consécutives délimitent $n - 1$ interfranges.
- La diffraction n'est pas réservée à la lumière : elle concerne aussi le son, les vagues, les ultrasons. La condition porte sur le rapport a/λ , pas sur la taille absolue de l'ouverture.
- Deux sources lumineuses indépendantes ne sont pas cohérentes : sans source commune, pas d'interférences observables.
- Si les sources sont en opposition de phase, les conditions constructive et destructive s'échangent : vérifie toujours l'état de phase des sources.

Vers le PASS

En PASS, la diffraction et les interférences sont reprises dans le cadre plus général des ondes et des oscillations, avec une écriture de l'onde sous la forme d'une fonction sinusoïdale et le calcul de l'intensité résultante. Elles servent à comprendre la limite de résolution des instruments d'optique (microscope optique, œil), la diffraction des rayons X par les cristaux qui a permis de déterminer la structure de l'ADN et des protéines, et certaines techniques d'imagerie. Les QCM de biophysique demandent souvent de manipuler $\theta = \lambda/a$ et $i = \lambda D/b$ avec des conversions d'unités rapides, de prévoir l'effet d'un changement de milieu (la longueur d'onde dans un milieu d'indice n vaut λ_0/n) ou de comparer la diffraction de la lumière et celle des ultrasons.

Suite en PASS : Oscillations, interférences et diffraction

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Une fente de largeur $a = 0,20$ mm est éclairée par une lampe à vapeur de sodium munie d'un filtre ($\lambda = 589$ nm). a) Calculer l'écart angulaire θ en radians. b) Le convertir en degrés.
2. Une fente de largeur $a = 50$ μm est éclairée par un laser bleu de longueur d'onde $\lambda = 450$ nm. L'écran est placé à $D = 1,20$ m. Calculer la largeur L de la tache centrale.
3. Deux pointes frappent en phase la surface d'une cuve à ondes et produisent des ondes de longueur d'onde $\lambda = 2,0$ cm. Pour chacun des points suivants, donner la nature de l'interférence : M ($\delta = 5,0$ cm), N ($\delta = 6,0$ cm), P ($\delta = 3,0$ cm), Q ($\delta = 0$).
4. Des fentes d'Young distantes de $b = 0,50$ mm sont éclairées par un laser de longueur d'onde $\lambda = 633$ nm. L'écran est à $D = 2,00$ m. Calculer l'interfrange i .
5. On observe la diffraction d'un laser par une fente. Indiquer, en justifiant, comment varie la largeur de la tache centrale dans chacun des cas : a) on remplace la fente par une fente plus large ; b) on remplace le laser rouge par un laser vert ; c) on éloigne l'écran.

Niveau 2 : type bac

6. On dispose de fentes calibrées et d'un laser. L'écran est à $D = 2,00$ m. On mesure la largeur L de la tache centrale pour plusieurs fentes :

a (μm)	40	60	80	100	120
L (cm)	6,5	4,3	3,3	2,6	2,2

- a) Montrer que la théorie prévoit $L = 2\lambda D/a$. b) Calculer $1/a$ pour chaque fente, puis vérifier que L est proportionnelle à $1/a$ et estimer le coefficient de proportionnalité k . c) En déduire λ . d) On remplace la fente par un cheveu et l'on mesure $L = 4,0$ cm. Calculer le diamètre du cheveu.
7. Un laser éclaire des fentes d'Young distantes de $b = 0,30$ mm ; l'écran est à $D = 1,50$ m. On mesure une distance de 18,9 mm entre les centres de la 1^{ère} et de la 7^{ème} frange brillante. a) Calculer l'interfrange. b) En déduire la longueur d'onde du laser. c) Que devient l'interfrange si l'on double D ? si l'on divise b par 2 ? d) Calculer l'interfrange obtenu avec un laser vert de longueur d'onde 530 nm, dans le montage initial.
8. Deux haut-parleurs alimentés par le même générateur émettent en phase un son de fréquence $f = 1,70$ kHz. La célérité du son dans l'air vaut $v = 340$ m·s⁻¹. a) Calculer la longueur d'onde. b) Un microphone est placé à $d_1 = 2,00$ m du premier haut-parleur et à $d_2 = 2,30$ m du second. Le signal qu'il reçoit est-il maximal ou minimal ? c) De quelle longueur minimale faut-il augmenter d_2 (en reculant le second haut-parleur) pour que le signal devienne maximal ? d) Pourquoi le signal minimal n'est-il en pratique pas tout à fait nul ?
9. On éclaire successivement une même fente par deux lasers, rouge ($\lambda_1 = 650$ nm) et violet ($\lambda_2 = 405$ nm). Avec le laser rouge, la tache centrale mesure $L_1 = 2,6$ cm. a) Sans connaître a ni D , calculer la largeur L_2 obtenue avec le laser violet. b) L'écran est à $D = 1,00$ m : calculer a . c) Avec le laser rouge, on veut une tache centrale de largeur au moins 5,0 cm sans déplacer l'écran : quelle largeur de fente maximale faut-il choisir ?

Niveau 3 : vers le PASS

10. Pour chaque affirmation, dire si elle est vraie ou fausse en justifiant. a) Une onde diffractée a une longueur d'onde plus grande que l'onde incidente. b) Dans l'expérience d'Young, la frange centrale est toujours brillante si les fentes sont en phase. c) Deux lampes de bureau identiques placées côte à côte donnent des franges d'interférences. d) Diviser par 2 la distance entre les fentes d'Young double l'interfrange. e) Une ouverture de 1 m diffracte plus un son de 100 Hz qu'un son de 10 kHz.
11. Des fentes d'Young distantes de $b = 0,50$ mm sont éclairées en lumière blanche (400 nm à 800 nm). L'écran est à $D = 1,00$ m. a) Justifier que la frange centrale est blanche. b) Au point M d'abscisse $x = 2,0$ mm, calculer la différence de marche. c) Déterminer les longueurs d'onde du visible éteintes en M. d) Quelle allure aurait le spectre de la lumière reçue en M, observé avec un spectroscopie ?
12. Un laser ($\lambda = 633$ nm) émet un faisceau dont le diamètre à la sortie vaut $a = 2,0$ mm. a) En assimilant la sortie du laser à une ouverture de largeur a , estimer l'écart angulaire dû à la diffraction. b) Ce faisceau est envoyé vers la Lune, à $3,84 \times 10^5$ km. Estimer l'ordre de grandeur de la largeur de la tache éclairée sur la Lune. c) Pour réduire cette tache, les observatoires élargissent d'abord le faisceau avec un télescope de 1,5 m de diamètre. Estimer la nouvelle largeur de la tache.

13. On réalise l'expérience des fentes d'Young ($b = 0,50 \text{ mm}$, $D = 2,00 \text{ m}$, laser de longueur d'onde dans l'air $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$) puis on plonge tout le dispositif (fentes, écran, trajet de la lumière) dans l'eau, d'indice $n = 1,33$. a) La fréquence de la lumière change-t-elle en entrant dans l'eau ? b) Exprimer la longueur d'onde dans l'eau en fonction de λ_0 et n , sachant que la célérité de la lumière dans l'eau vaut c/n . c) Calculer l'interfrange dans l'air puis dans l'eau.

Corrigés

1. a) $\theta = \lambda/a$ avec $\lambda = 589 \times 10^{-9} \text{ m}$ et $a = 0,20 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,0 \times 10^{-4} \text{ m}$.

$\theta = 589 \times 10^{-9} / 2,0 \times 10^{-4} = 2,9 \times 10^{-3} \text{ rad}$. $\theta \approx 2,9 \times 10^{-3} \text{ rad}$. b) θ (en degrés) $= 2,945 \times 10^{-3} \times 180/\pi = 0,17^\circ$. $\theta \approx 0,17^\circ$: l'angle est très petit, ce qui justifie l'approximation $\tan \theta \approx \theta$.

2. $\theta = \lambda/a = 450 \times 10^{-9} / 50 \times 10^{-6} = 9,0 \times 10^{-3} \text{ rad}$.

$L = 2D\theta = 2 \times 1,20 \times 9,0 \times 10^{-3} = 2,16 \times 10^{-2} \text{ m}$. $L \approx 2,2 \text{ cm}$.

3. Les sources étant en phase, on calcule δ/λ .

M : $5,0/2,0 = 2,5$, demi-entier : **interférence destructive** (amplitude minimale). N : $6,0/2,0 = 3$, entier : **interférence constructive** (amplitude maximale). P : $3,0/2,0 = 1,5$, demi-entier : **interférence destructive**. Q : $\delta = 0$, donc $k = 0$: **interférence constructive** (tous les points de la médiatrice de S_1S_2 vibrent avec une amplitude maximale).

4. $i = \lambda D/b = 633 \times 10^{-9} \times 2,00 / 0,50 \times 10^{-3} = 1,266 \times 10^{-6} / 5,0 \times 10^{-4} = 2,53 \times 10^{-3} \text{ m}$. $i \approx 2,5 \text{ mm}$.

5. On utilise $L = 2\lambda D/a$.

a) a augmente, donc **L diminue** (L inversement proportionnelle à a) : une fente plus large diffracte moins. b) λ du vert (environ 530 nm) est plus petite que celle du rouge (environ 650 nm), donc **L diminue**. c) D augmente, donc **L augmente** (proportionnalité) : l'écart angulaire θ ne change pas, mais la tache s'étale sur une plus grande distance.

6. a) L'écart angulaire vaut $\theta = \lambda/a$. Sur l'écran, $\tan \theta = (L/2)/D$ et, pour un petit angle, $\tan \theta \approx \theta$. Donc $L/(2D) = \lambda/a$, soit $L = 2\lambda D/a$.

b) $1/a$ en m^{-1} : $2,5 \times 10^4$; $1,67 \times 10^4$; $1,25 \times 10^4$; $1,00 \times 10^4$; $0,833 \times 10^4$. Quotients $L/(1/a) = L \cdot a$: $0,065 \times 40 \times 10^{-6} = 2,60 \times 10^{-6} \text{ m}^2$; $0,043 \times 60 \times 10^{-6} \approx 2,58 \times 10^{-6} \text{ m}^2$; $0,033 \times 80 \times 10^{-6} \approx 2,64 \times 10^{-6} \text{ m}^2$; $0,026 \times 100 \times 10^{-6} = 2,60 \times 10^{-6} \text{ m}^2$; $0,022 \times 120 \times 10^{-6} \approx 2,64 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Le quotient est constant aux erreurs de lecture près : L est proportionnelle à $1/a$, et $k = 2,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ (le graphique de L en fonction de $1/a$ est une droite passant par l'origine). c) $k = 2\lambda D$, donc $\lambda = k/(2D) = 2,6 \times 10^{-6} / (2 \times 2,00) = 6,5 \times 10^{-7} \text{ m}$. $\lambda \approx 650 \text{ nm}$ (laser rouge). d) $a = k/L = 2,6 \times 10^{-6} / 4,0 \times 10^{-2} = 6,5 \times 10^{-5} \text{ m}$. **Diamètre du cheveu $\approx 65 \mu\text{m}$** .

7. a) Entre la 1^{ère} et la 7^{ème} frange brillante, il y a 6 interfranges : $i = 18,9 / 6 = 3,15 \text{ mm}$. **$i = 3,15 \text{ mm}$** .

b) $i = \lambda D/b$, donc $\lambda = i \cdot b/D = 3,15 \times 10^{-3} \times 0,30 \times 10^{-3} / 1,50 = 9,45 \times 10^{-7} / 1,50 = 6,3 \times 10^{-7} \text{ m}$. **$\lambda \approx 630 \text{ nm}$** . c) i est proportionnel à D : si D double, **i double** ($6,30 \text{ mm}$). i est inversement proportionnel à b : si b est divisé par 2, **i double** aussi ($6,30 \text{ mm}$). d) $i' = 530 \times 10^{-9} \times 1,50 / 0,30 \times 10^{-3} = 7,95 \times 10^{-7} / 3,0 \times 10^{-4} = 2,65 \times 10^{-3} \text{ m}$. **$i' \approx 2,7 \text{ mm}$** , plus petit qu'avec le rouge.

8. a) $\lambda = v/f = 340 / 1,70 \times 10^3 = 0,200 \text{ m}$. **$\lambda = 20,0 \text{ cm}$** .

b) $\delta = d_2 - d_1 = 2,30 - 2,00 = 0,30 \text{ m}$. $\delta/\lambda = 0,30/0,200 = 1,5$, demi-entier : les ondes arrivent en opposition de phase, **le signal est minimal**. c) Pour un maximum, il faut δ/λ entier. La valeur entière la plus proche au-dessus de 1,5 est 2, soit $\delta = 0,40 \text{ m}$: il faut augmenter d_2 de **$0,10 \text{ m} = 10 \text{ cm}$** (une demi-longueur d'onde). d) L'amplitude résultante n'est nulle que si les deux ondes ont la même amplitude en M. Or le microphone n'est pas à la même distance des deux haut-parleurs : l'onde la plus

lointaine est plus atténuée. De plus, les réflexions sur les murs ajoutent d'autres ondes. **Le minimum n'est donc pas nul.**

9. a) Pour une même fente et un même écran, L est proportionnelle à λ : $L_2/L_1 = \lambda_2/\lambda_1$. $L_2 = 2,6 \times 405/650 = 1,62$ cm. $L_2 \approx 1,6$ cm.

b) $a = 2\lambda_1 D/L_1 = 2 \times 650 \times 10^{-9} \times 1,00 / 2,6 \times 10^{-2} = 1,3 \times 10^{-6} / 2,6 \times 10^{-2} = 5,0 \times 10^{-5}$ m. **a = 50 μ m.** c) $L \geq 5,0$ cm impose $a \leq 2\lambda_1 D/L = 1,3 \times 10^{-6} / 5,0 \times 10^{-2} = 2,6 \times 10^{-5}$ m. **Il faut une fente de largeur au plus 26 μ m.**

10. a) **Faux** : la diffraction ne modifie ni la fréquence ni la célérité, donc ni la longueur d'onde ; elle modifie seulement la direction de propagation.

b) **Vrai** : en O, $\delta = 0$, multiple entier de λ ($k = 0$), quelle que soit la longueur d'onde. c) **Faux** : deux lampes indépendantes ne sont pas cohérentes, leur déphasage varie aléatoirement ; on observe un éclaircissement uniforme. d) **Vrai** : $i = \lambda D/b$ est inversement proportionnel à b . e) **Vrai** : à 100 Hz, $\lambda = 340/100 = 3,4$ m, supérieure à l'ouverture, donc diffraction très marquée ; à 10 kHz, $\lambda = 3,4$ cm, très petite devant 1 m, donc diffraction faible. C'est pourquoi les sons graves contournent mieux les obstacles.

11. a) Au centre, $\delta = 0$ pour toutes les longueurs d'onde : toutes les radiations y donnent une frange brillante, leur superposition redonne du **blanc**.

b) $\delta = b \cdot x/D = 0,50 \times 10^{-3} \times 2,0 \times 10^{-3} / 1,00 = 1,0 \times 10^{-6}$ m. **$\delta = 1,0 \mu\text{m} = 1\,000$ nm.** c) Une radiation est éteinte si $\delta = (k + 1/2) \cdot \lambda$, soit $\lambda = \delta/(k + 0,5) = 1\,000 \text{ nm} / (k + 0,5)$. $k = 0$: 2 000 nm, hors du visible ; $k = 1$: 667 nm, visible ; $k = 2$: 400 nm, visible (limite) ; $k = 3$: 286 nm, hors du visible. **Radiations éteintes : 667 nm et 400 nm.** d) La lumière en M paraît blanchâtre (blanc d'ordre supérieur) ; au spectroscopie, on voit **un spectre continu traversé de bandes noires** (cannelures) vers 667 nm et en bordure violette vers 400 nm.

12. a) $\theta \approx \lambda/a = 633 \times 10^{-9} / 2,0 \times 10^{-3} = 3,2 \times 10^{-4}$ rad. **$\theta \approx 3 \times 10^{-4}$ rad.**

b) La tache a une largeur $L \approx 2D\theta$ avec $D = 3,84 \times 10^8$ m : $L \approx 2 \times 3,84 \times 10^8 \times 3,17 \times 10^{-4} = 2,4 \times 10^5$ m. **Ordre de grandeur : 2×10^2 km.** Un faisceau laser qui paraît parfaitement parallèle s'élargit donc énormément sur de grandes distances. c) Avec $a = 1,5$ m : $\theta \approx 633 \times 10^{-9} / 1,5 = 4,2 \times 10^{-7}$ rad, et $L \approx 2 \times 3,84 \times 10^8 \times 4,2 \times 10^{-7} = 3,2 \times 10^2$ m. **Tache de l'ordre de 300 m** : élargir le faisceau réduit sa divergence, car θ est inversement proportionnel à a .

13. a) **Non** : la fréquence est fixée par la source et ne change pas lors du passage d'un milieu à un autre.

b) $\lambda = v/f$ avec $v = c/n$, donc $\lambda = c/(n \cdot f) = \lambda_0/n$. $\lambda = \lambda_0/n$. c) Dans l'air : $i_0 = \lambda_0 D/b = 633 \times 10^{-9} \times 2,00 / 0,50 \times 10^{-3} = 2,53 \times 10^{-3}$ m, **$i_0 \approx 2,53$ mm.** Dans l'eau : $\lambda = 633/1,33 = 476$ nm, et $i = \lambda D/b = i_0/n = 2,53/1,33 = 1,90$ mm. **$i \approx 1,90$ mm** : les franges se resserrent.