

Chapitre 5 - Interférences

Manuel pages 89 à 108

Choix pédagogiques

Dans ce chapitre, qui suit le chapitre consacré à la diffraction des ondes, figure une compétence expérimentale : « Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses ». Avant de proposer cette activité à réaliser en séance de TP avec des fentes d'Young et des diodes laser de couleurs rouge et verte, nous proposons trois autres activités pour découvrir le phénomène d'interférence. En effet, même s'il est très facile d'obtenir une figure d'interférence avec des fentes d'Young, le phénomène est assez difficile à comprendre par un élève non préparé. C'est pourquoi nous proposons une approche en trois temps : une activité documentaire « Extraire et exploiter des informations » pour aborder « avec les mains » la notion de phase et d'opposition de phase, une activité de simulation pour visualiser la superposition en un point de deux ondes sinusoïdales, puis, pour finir, une activité expérimentale utilisant des ondes ultrasonores.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Qu'elle est étrange cette photographie d'ouverture sur les interférences ! Elle fait penser à une vague déferlante, à un liquide qui brûle... Heureusement, la légende indique qu'il s'agit d'un film de savon. Tout le monde a déjà vu les couleurs d'une bulle, mais en dehors de la bulle et du savon, où voit-on apparaître des couleurs qui changent lorsque l'on modifie la direction du regard ? Les CD, les taches d'huile sont des réponses fréquentes. Les ailes de papillon, de paons ou de certaines mouches seront certainement moins citées. D'où proviennent toutes ces couleurs et pourquoi changent-elles, contrairement à la couleur de la plupart des objets qui nous entourent ? Ce chapitre va nous apporter la réponse.

Activités

Activité documentaire 1. Les casques antibruit actifs

Commentaires

Réservés il y a quelques années aux personnes travaillant dans un environnement bruyant (chantier, aéroport...), les casques antibruit actifs sont maintenant à la disposition de tous et on trouve actuellement dans le commerce des casques audio qui intègrent une fonction antibruit pour écouter de la musique en sourdine, sans être dérangé par des bruits extérieurs.

Cette activité est le premier contact des élèves avec la notion de déphasage, indispensable à la compréhension des interférences.

Nous avons choisi dans un premier temps de travailler « avec les mains » comme le préconise le préambule du programme, c'est-à-dire sans formules ni calculs, juste en observant des représentations graphiques.

Cette première activité est aussi l'occasion de travailler la compétence « Extraire et exploiter des informations », très présente dans ce nouveau programme.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Les trois éléments d'un casque antibruit actif sont :

- le micro qui permet de capter le bruit intérieur. C'est le bruit extérieur avec une amplitude plus faible car le casque contient de la mousse isolante phonique ;
- le circuit électronique qui analyse le bruit transmis (sous forme de tension) par le micro et génère une « antitension » ;
- le haut-parleur qui diffuse l'antibruit correspondant.

b. La pression de l'air fluctue autour de sa valeur moyenne avec la même fréquence que la vibration de la membrane du haut-parleur. En vibrant, la membrane crée une succession de surpressions et de dépressions.

c. L'émission d'un son en opposition de phase commence par une dépression car les modifications de la pression de l'air provoquée par l'antibruit doivent annuler les variations de la pression provoquée par le bruit lui-même.

Les courbes (1) et (2) sont en « opposition de phase » : quand l'une passe par un maximum, l'autre passe par un minimum. Ainsi, le micro intégré dans le casque provoque une dépression si le bruit extérieur provoque une surpression.

2. Conclure

a. Non, il faut que le bruit reçu au niveau du micro ait la même distance à parcourir jusqu'à l'oreille que l'antibruit créé par le haut-parleur.

Remarque pour le professeur : il n'y a pas de problème dans un casque car la distance qui sépare le micro du haut-parleur est très inférieure à la longueur d'onde des ondes sonores à supprimer.

b. Non, car dans une pièce, le bruit arrive de partout alors que l'antibruit n'est émis que par le haut-parleur. Il y aura des endroits dans la pièce où les deux sons arriveront en opposition de phase et d'autres où ils seront en phase, ce qui augmentera encore le niveau sonore.

c. Même s'il est très rapide, il faut un minimum de temps au circuit électronique pour analyser le bruit. Le son émis par le haut-parleur est donc légèrement en retard et ne correspond pas exactement à l'antibruit. Pour les sons graves (basse fréquence), la différence est plus faible que pour les sons aigus (haute fréquence) dont l'amplitude varie plus rapidement.

Simulation 2. Addition d'ondes

Commentaires

La notion de déphasage ayant été abordée « avec les mains » dans la première activité, nous proposons ici une approche plus « mathématique » en utilisant un tableur. Plus mathématique ne signifie pas qu'on va se lancer dans des calculs qui, de toute façon, ne sont pas au programme de T^{erm} S. Le tableur permet, sans calcul, de visualiser le résultat de la superposition en un point de deux ondes sinusoïdales de même fréquence. C'est donc encore une approche très visuelle que nous proposons. Cette approche n'est pas indispensable pour la suite car les interférences ne font appel qu'à deux situations particulières (phase et opposition de phase) qui se comprennent très bien « avec les mains ».

Réponses

1. Observer

Quand le paramètre φ augmente, la courbe y_2 se déplace horizontalement pas rapport à la courbe y_1 .

2. Interpréter

- Lorsque le déphasage est nul, les courbes sont superposées.
- À chaque fois que φ est un multiple entier de 2π , les deux courbes sont superposées.
- Les courbes sont en phase quand elles passent au même instant par leurs valeurs maximales ou minimales. Elles sont en opposition de phase quand l'une est au maximum alors que l'autre est à son minimum.

3. Interpréter

- L'amplitude de $y(t)$ augmente, passe par un maximum puis diminue avant d'augmenter à nouveau. Suivant l'amplitude de chacune des fonctions, la valeur minimale de l'amplitude peut être nulle ou non.
- L'amplitude est maximale pour $\varphi = 2k\pi$, k étant un entier.
Elle est minimale ou nulle (suivant la valeur des amplitudes) pour :

$$\varphi = (2k + 1)\pi$$

4. Conclure

Les interférences sont constructives lorsque le déphasage est nul ou multiple entier de 2π .
Les interférences sont destructives lorsque le déphasage est un multiple entier impair de π .

Activité expérimentale 3. Interférences avec des ultrasons

Commentaires

Cette étude expérimentale des interférences avec des ultrasons ne peut être proposée aux élèves que si l'une des deux activités précédentes a été faite. En effet, elle nécessite la connaissance du déphasage entre deux signaux. L'intérêt de réaliser des interférences avec des ultrasons réside dans le fait que l'on peut allumer ou éteindre indépendamment les émetteurs et observer ce qui se passe (sur l'écran d'un oscilloscope), manipulation qu'il est impossible de réaliser avec de la lumière.

Sur la photographie d'expérience du manuel, les deux interrupteurs ont été placés juste à côté des émetteurs pour qu'ils figurent sur le cadrage mais il est préférable de les placer assez loin pour pouvoir les manipuler sans perturber le dispositif (réflexion parasite des ondes ultrasonores par exemple).

Dans ces conditions, on vérifie facilement que dans le premier cas, l'amplitude du signal lorsque les deux interrupteurs sont fermés, est égale à la somme des amplitudes des signaux reçus individuellement. De même, et c'est plus surprenant pour les élèves, dans l'étape 2, l'amplitude du signal obtenu avec les deux interrupteurs fermés, est plus petite. On vérifie facilement qu'elle est égale à la différence des amplitudes des signaux reçus individuellement.

Réponses

1. Interpréter

a. Comme nous venons de le voir dans les commentaires, les résultats de la première colonne sont la somme où la différence des résultats des colonnes suivantes.

b. Les signaux arrivent en phase sur le récepteur dans le cas de l'étape 1 et en opposition de phase dans le cas de l'étape 2.

c. Le déphasage ne peut provenir que de la différence des distances entre les émetteurs et le récepteur.

d.
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{40000} = 8,5 \times 10^{-3} \text{ m} = 8,5 \text{ mm}.$$

La différence des distances mesurées dans l'étape 2 est de l'ordre de 4 mm soit $\frac{\lambda}{2}$ aux incertitudes près.

e. Quand la différence des distances est égale à λ , un des signaux arrive avec un retard d'une période par rapport à l'autre. Les deux signaux sont donc en phase. On doit vérifier que l'amplitude résultante est maximale.

f. La longueur d'onde est beaucoup plus grande (de l'ordre du mètre), ce qui nécessite d'éloigner considérablement le micro. Dans ces conditions, les phénomènes de réflexion et de diffraction des ondes sonores cachent le phénomène d'interférence sans parler du bruit généré par neuf binômes travaillant simultanément et se gênant mutuellement.

2. Conclure

Ce qui est vrai pour une différence des distances égale à λ l'est aussi pour une différence égale à 2 ou 3λ . On peut donc conclure que les interférences sont constructives si la différence des distances est un multiple entier de la longueur d'onde.

De même, ce qui est vrai pour $\frac{\lambda}{2}$ l'est aussi pour $\lambda + \frac{\lambda}{2}$, $2\lambda + \frac{\lambda}{2}$, c'est à dire pour $(2k + 1)\frac{\lambda}{2}$.

Les interférences sont alors destructives.

Activité expérimentale 4. Interférences lumineuses

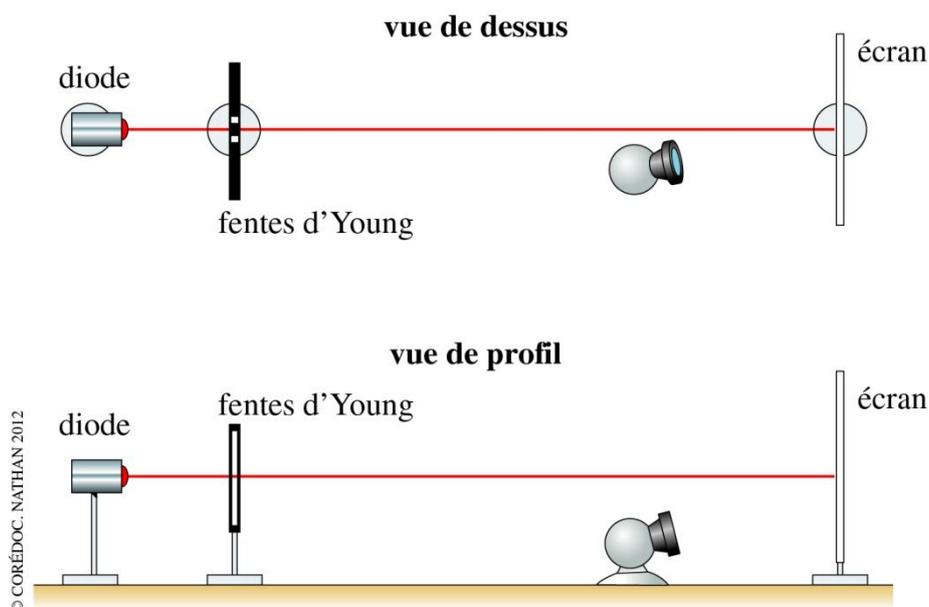
Commentaires

Pour étudier quantitativement le phénomène d'interférences lumineuses (compétence exigible), il faut disposer de diodes laser de couleurs différentes. Tous les lycées sont équipés de diodes laser rouges (650 nm). Il faut donc se procurer des diodes laser vertes et si possible quelques bleues (plus chères). On trouve sur Internet de nombreux sites vendant des diodes laser à très bon prix (prix inférieur à 13 euros par exemple pour une diode laser verte), mais attention, pour utiliser ces diodes en classe en toute légalité, elles doivent avoir une puissance inférieure à 2 mW. Voici par exemple l'adresse d'un site où l'on peut se procurer des diodes laser à bon prix : <http://www.acheterlaser.com/acheter-stylo-laser-vert-1mw.html>

D'autre part, pour vérifier expérimentalement l'expression de l'interfrange, il faut faire des mesures précises, ce qui n'est pas facile car l'interfrange est de l'ordre de quelques millimètres.

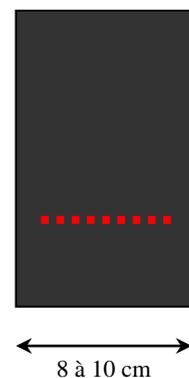
Une solution possible pour améliorer la précision de la mesure consiste à photographier la figure d'interférence à l'aide d'une webcam de bonne qualité (webcam haute définition avec mise au point automatique) ou d'un appareil photo numérique.

Pour cela, placer la webcam dans l'axe du montage mais légèrement au-dessus ou en dessous pour ne pas couper le faisceau laser comme le montre le schéma ci-dessous.



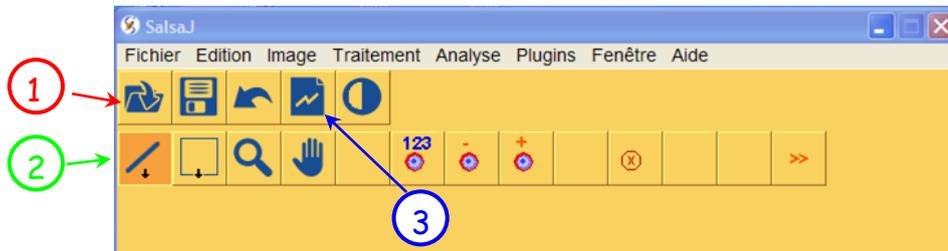
Pour qu'il n'y ait pas saturation de l'image au niveau des franges brillantes de la tache centrale, il faut utiliser un écran noir (type papier Canson[®]). Il n'est pas utile de faire l'obscurité dans la salle.

Découper une bande de papier de 8 à 10 cm de largeur et centrer la figure d'interférence sur cette bande. Prendre une photo en réglant la position (ou le zoom) de la webcam de telle sorte que le champ soit un peu plus large que la bande (il doit y avoir un peu de blanc de chaque côté de l'écran noir pour qu'on puisse étalonner en largeur la figure d'interférence). Ce blanc permet également de faire la mise au point. Il peut être coupé ensuite à l'aide d'un logiciel de retouche d'image mais ce n'est pas indispensable. On peut également tracer deux traits verticaux sur le Canson[®] noir qui serviront de repère. Cette méthode permet d'obtenir une plus grande amplitude pour les franges brillantes lorsque l'on utilise *SalsaJ*.

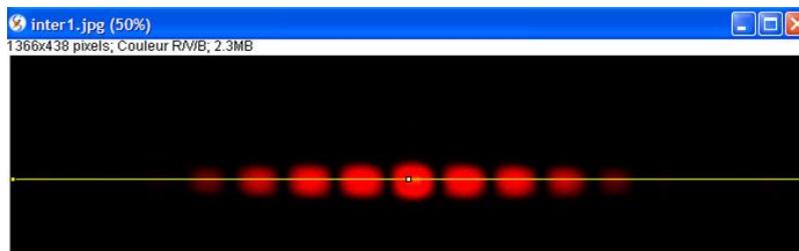


UTILISATION DU LOGICIEL SALSAJ

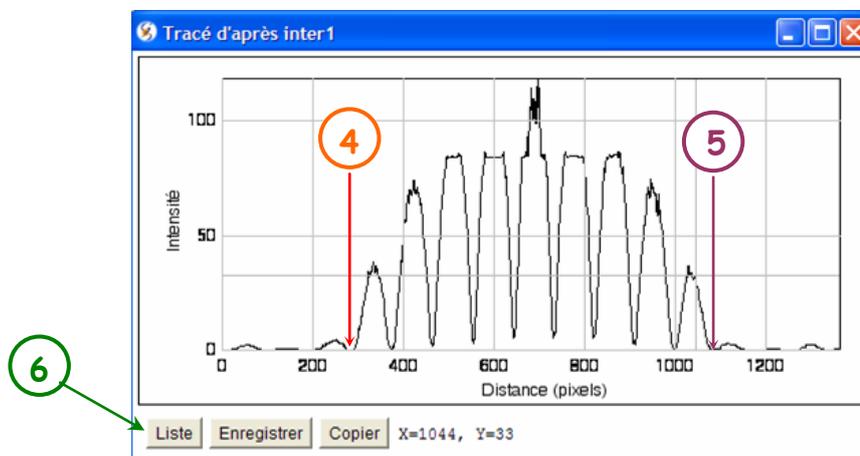
- Ouvrir le logiciel *SalsaJ* en cliquant sur son icône. 
- Ouvrir la photo en cliquant sur la première icône (1).



- Choisir l'outil sélection rectiligne (2) puis tracer un trait horizontal sur toute la largeur de la photo. En appuyant sur la touche shift, la ligne reste horizontale même si on se déplace un peu vers le haut ou le bas.



- Choisir enfin l'outil coupe (3) qui donne l'intensité lumineuse en fonction de la position sur la ligne choisie.



X	Y
1067	7.667
1068	6.333
1069	5.000
1070	4.667
1071	3.333
1072	2.667
1073	2.000
1074	2.000
1075	2.000
1076	1.000
1077	0.333
1078	0.667
1079	0.667
1080	1.000
1081	0.000

- L'axe des abscisses est gradué en pixels mais la largeur de la photo (largeur de la bande noire de papier Canson[®]) étant connue, on peut étalonner cet axe en mm.

Déplacer le réticule avec la souris pour le placer sur la première frange noire de la tache centrale (4). Noter la valeur en pixels écrite en bas puis faire la même chose avec la dernière frange sombre (5). On peut ainsi calculer l'interfrange en pixels puis en mm.

En cliquant sur la liste en bas à gauche de l'écran précédent, on fait apparaître l'intensité lumineuse de tous les pixels. On peut choisir plus facilement celui qui correspond à l'intensité la plus faible.

Réponses

1. Observer

a. Les franges d'interférence sont situées principalement dans la partie commune des taches centrales de diffraction des fentes. On peut observer des franges dans les taches latérales si on photographie la figure d'interférence avec une webcam ou un appareil photo numérique (voir plus haut). L'interfrange dépend de la longueur d'onde de la lumière (il augmente avec la longueur d'onde) et de la distance entre les fentes : l'interfrange est d'autant plus grand que la distance entre les fentes est petite.

b. Voici les résultats obtenus avec les fentes d'Young de Jeulin pour un écran placé à 1,500 m et deux diodes laser : une rouge de longueur d'onde 650 nm et une verte de longueur d'onde 532 nm.

Distance entre les fentes	0,20 mm	0,30 mm	0,50 mm
Laser rouge	4,9 mm	3,3 mm	2,0 mm
Laser vert	4,0 mm	2,7 mm	1,6 mm

2. Interpréter

a. L'interfrange est inversement proportionnel à la distance qui sépare les fentes.

b. L'interfrange est proportionnel à la longueur d'onde.

c. Les mesures effectuées sont en accord avec l'expression proposée, au moins en ce qui concerne λ et a_{1-2} . Pour la distance D , il faudrait faire une série de mesures en modifiant uniquement la distance qui sépare les fentes de l'écran.

d. Plus la distance D est grande, plus l'interfrange est grand, ce qui permet d'avoir une meilleure précision sur la mesure.

3. Formuler des hypothèses et débattre

a. Avec la lumière blanche qui possède une infinité de radiations de couleurs différentes, on peut s'attendre à des hypothèses très diverses !

b. Pour simplifier et lancer le débat, on limite à deux le nombre de radiations : une rouge et une verte. Les élèves, qui viennent de voir que l'interfrange est proportionnel à la longueur d'onde, peuvent imaginer la figure que l'on doit observer.

Il faut pour cela qu'ils se souviennent que l'addition d'une lumière rouge et d'une verte donne une lumière jaune (programme de 1^{re} S, voir corrigé de l'exercice n°16).

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 5. Interférences

5. Expérimenter pour conclure

La figure d'interférence en lumière blanche est assez difficile à réaliser, c'est pourquoi elle n'est pas demandée aux élèves. Le professeur la réalisera au bureau après avoir fait l'obscurité dans la salle.

Remarque : le chapitre 26 offre une occasion de prolonger cette expérience par une étude détaillée d'une figure d'interférence en lumière blanche.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- se modifier
- maximale ; constructives
- opposition ; destructives
- la différence de marche ; constructives
- cohérentes ; déphasage
- interfrange ; d'interférences
- destructives

2. QCM

- De même largeur que les autres franges.
- À n'importe quelle distance des fentes.
- Une seule lampe monochromatique munie d'une fente et un système permettant d'obtenir deux sources secondaires.
- Une frange blanche et des franges irisées.

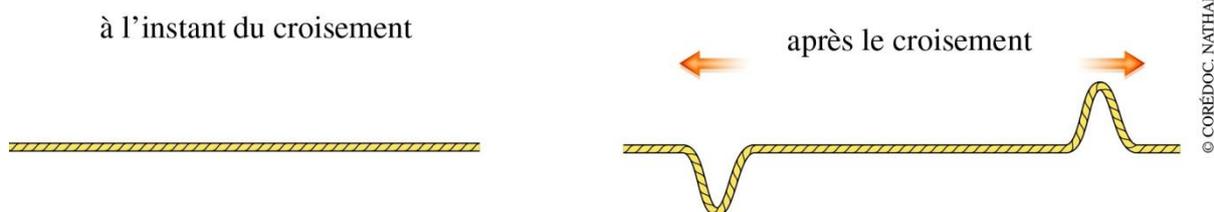
Compétences exigibles

3. a. Les deux perturbations vont se croiser au milieu car la célérité ne dépend pas du sens de propagation.
b. À l'instant où les déformations se croisent, elles ajoutent leurs effets. Elles continuent ensuite sans être modifiées

Premier cas :



Deuxième cas :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 5. Interférences

4. a. $\lambda = vT = \frac{v}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{340}{4,25 \times 10^4} = 8,00 \times 10^{-3} \text{ m} ; \lambda = 8,00 \text{ mm}.$

b. Les deux émetteurs, branchés sur le même GBF, constituent des sources d'ondes cohérentes qui émettent en phase. Dans ces conditions, on peut observer des interférences dans la partie commune aux deux faisceaux.

c. Les sources émettent sans déphasage. Il y a interférences constructives en un point du milieu de propagation si la différence de trajets entre les sources et ce point n'introduit pas de déphasage, c'est-à-dire si $d_2 - d_1 = k\lambda$ (en appelant d_2 la distance entre le point et E_2 et d_1 la distance entre le point et E_1).

Au contraire, si $d_2 - d_1 = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$, les ondes arriveront au point considéré en opposition de phase et les interférences seront destructives.

Points	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>P</i>
Distance à E_1 (en mm)	234	252	312
Distance à E_2 (en mm)	226	256	328
$d_2 - d_1$ (en mm)	-8	4	16

Les interférences sont constructives en *M* et en *P* ($k = -1$ et $k = 2$) et destructives en *N* ($k = 0$ et $d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{2}$).

5. En mesurant dans chaque cas la largeur de 7 interfranges (pour une meilleure précision), on trouve :

$$7i_R = 32,5 \text{ mm} ; 7i_V = 27 \text{ mm}$$

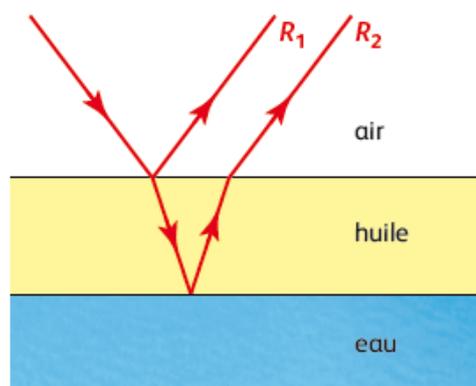
S'il y a proportionnalité entre i et λ , on doit vérifier :

$$\frac{i_R}{i_V} = \frac{\lambda_R}{\lambda_V} \quad \frac{7i_R}{7i_V} = 1,2 \quad \frac{\lambda_R}{\lambda_V} = \frac{650}{532} = 1,18$$

Aux erreurs de mesure près, l'interfrange est proportionnel à la longueur d'onde.

6. a. L'huile ou l'essence qui recouvre la route mouillée forme une fine couche transparente. La lumière se réfléchit à la surface de séparation air-huile et à la surface de séparation huile-eau. Les rayons réfléchis interfèrent. Pour certaines longueurs d'ondes, les interférences sont destructives : la lumière réfléchie n'est plus blanche mais colorée.

b. Quand on baisse ou lève la tête, les rayons qui pénètrent dans l'œil n'ont pas la même inclinaison. La différence de marche entre les deux rayons n'est plus la même (elle est minimale en incidence normale). Les interférences sont destructives pour d'autres longueurs d'onde : les couleurs changent.



7. a. La courbe sur l'écran a une amplitude maximale si les deux ondes ultrasonores arrivent en phase sur le récepteur. Puisqu'elles sont émises en phase, il faut que :

$$D_2 - D_1 = k\lambda$$

b. La plus petite distance entre les deux émetteurs correspond à la plus petite valeur de k non nulle (non nulle car les deux émetteurs ne peuvent pas être au même endroit) donc $k = 1$.

$$D_2 = D_1 + \lambda, \text{ d'une part, et } D_2^2 - D_1^2 = d^2$$

$$(D_1 + \lambda)^2 - D_1^2 = d^2$$

$$\lambda(2D_1 + \lambda) = d^2$$

$$d = \sqrt{\lambda(2D_1 + \lambda)} = \sqrt{8,0 \times (2 \times 200 + 8)} = 57 \text{ mm}$$

c. La courbe sur l'écran a une amplitude minimale si les deux ondes ultrasonores arrivent en opposition de phase sur le récepteur. Puisqu'elles sont émises en phase, il faut que :

$$D_2 - D_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

On peut prendre $k = 0$ si on considère que les émetteurs sont de petites tailles (diamètre de 16 mm).

On obtient alors : $D_2 = D_1 + \frac{\lambda}{2}$.

Il suffit donc de remplacer λ par $\frac{\lambda}{2}$ dans l'expression précédente :

$$d = \sqrt{\frac{\lambda}{2} \left(2D_1 + \frac{\lambda}{2} \right)} = \sqrt{4,0 \times (2 \times 200 + 4)} = 40 \text{ mm}$$

Remarque : dans les deux cas, on peut négliger λ ou $\frac{\lambda}{2}$ devant $2D_1$.

d. Il peut y avoir plusieurs causes expliquant que l'amplitude ne soit pas nulle : l'émetteur 2 est un peu plus loin du récepteur que l'émetteur 1. Le signal est donc un peu plus atténué. D'autre part, il n'est pas tout à fait en face du récepteur et les émetteurs ultrasonores sont assez directifs. Enfin, pour la même fréquence imposée par le GBF, l'amplitude de l'onde émise peut varier d'un émetteur à l'autre.

Compétences générales

8. a. La relation $i = f(D)$ indique que pour une longueur d'onde et une distance entre les fentes données, l'interfrange est proportionnel à la distance D . Le graphe $i = f(D)$ est donc une droite passant par l'origine.

b. Le coefficient directeur de la droite est proportionnel à λ . Il est donc plus petit pour le laser vert (courbe du dessous).

c. Pour $D = 2,20 \text{ m}$, $\frac{i_R}{i_V} = \frac{5}{4} \Rightarrow \frac{\lambda_R}{\lambda_V} = \frac{5}{4} \Rightarrow \lambda_V = \frac{4}{5} \lambda_R = \frac{4}{5} \times 650 = 520 \text{ nm}$

d. La distance entre les deux fentes est donnée par :

$$a_{1-2} = \frac{\lambda D}{i}$$

A.N. : pour $D = 2,20 \text{ m}$, $i_{\text{rouge}} = 5 \text{ mm}$

$$a_{1-2} = \frac{650 \times 10^{-9} \times 2,20}{5 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^{-4} \text{ m soit } 0,3 \text{ mm}$$

9. a. La longueur d'onde d'une radiation rouge est comprise entre 600 et 800 nm soit 10^{-6} m pour l'ordre de grandeur.

b.
$$i = \frac{\lambda D}{a_{1-2}} \Rightarrow a_{1-2} = \frac{\lambda D}{i} = \frac{10^{-6} \times 1}{10^{-3}} = 10^{-3} \text{ m.}$$

c. Avec une distance a_{1-2} 10 fois plus grande, l'interfrange est 10 fois plus petit soit 0,1 mm. Dans ces conditions, il est difficile d'observer le phénomène.

10. L'interfrange est proportionnel au produit λD . Si on diminue λ , il faut augmenter D pour que le produit reste inchangé, la distance entre les fentes n'étant pas modifiée.

11. Si on utilise une diode laser pour réaliser la figure d'interférence, la longueur d'onde est connue avec une très grande précision de l'ordre de 10^{-4} .

La distance D de l'ordre de 2 m peut être mesurée au mm près soit une précision de 5×10^{-4} .

C'est l'interfrange qui limite la précision car même en mesurant plusieurs interfranges, on ne dépasse pas une précision de 10^{-2} dans le meilleur des cas.

Exercices de méthode

12. Exercice résolu.

13. a. La dimension d'une grandeur est son expression en fonction des grandeurs de base du système international.

b. Les trois grandeurs sont des longueurs donc :

$$\dim i = \frac{L \times L}{L} = L$$

L'interfrange est bien une longueur : la relation est homogène.

c. Si la relation est homogène, elle n'est pas forcément juste.

La relation $i = \frac{a_{1-2}D}{\lambda}$ est homogène mais elle est fautive.

Si la relation n'est pas homogène, elle est forcément fautive.

d. On peut utiliser l'expression de l'énergie cinétique :

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Le coefficient $\frac{1}{2}$ est sans dimension :

$$\dim \mathcal{E}_c = ML^2T^{-2}$$

e. $\dim h = \frac{\dim \mathcal{E}}{\dim v} = \frac{ML^2T^{-2}}{T^{-1}} = ML^2T^{-1}$.

14. a. Il y a interférences constructives si $d_2 - d_1 = k\lambda$, avec k entier.

Calculons le rapport $\frac{\delta}{\lambda}$ en exprimant δ en nm :

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{2,60 \times 10^3}{650} = 4$$



On trouve $k = 4$: le point A se trouve au centre d'une frange brillante.

b. Utilisons la même méthode qu'à la question précédente :

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{3,90 \times 10^3}{650} = 6$$

Le point B se trouve donc également au milieu d'une frange brillante.

Dessignons les franges pour déterminer le nombre de franges entre A et B .

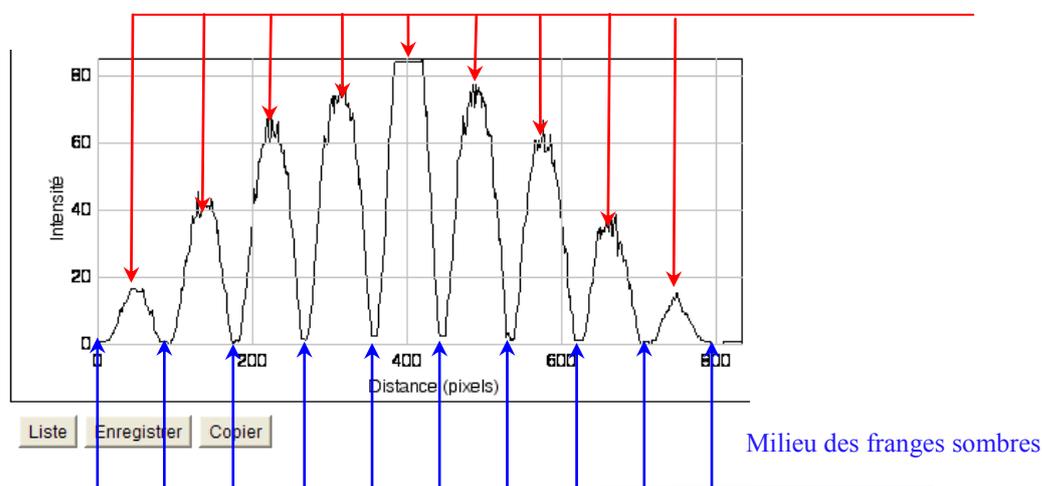
Il n'y a qu'une frange brillante qui correspond à la valeur $k = 5$.

c. Les différences de marche entre S_1 ou S_2 et A ne sont pas modifiées puisque les points A et B sont toujours à la même place. La différence de marche n'introduit pas de déphasage supplémentaire mais comme les sources vibrent maintenant en opposition de phase, les ondes arrivent en opposition de phase en A et B . Ces deux points sont donc maintenant au milieu de franges sombres.

Exercices d'entraînement

15. a.

Milieu des franges brillantes



b. Pour avoir la précision maximale, il faut prendre le plus grand nombre d'interfranges. Sur la totalité de l'image, il y a 9 interfranges pour 800 pixels, ce qui donne :

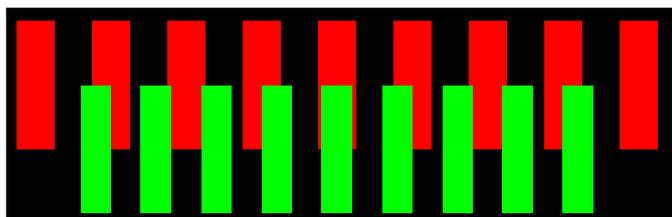
$$\frac{800}{9} = 89 \text{ pixels pour un interfrange}$$

c. 1 000 pixels pour 3 cm

$$89 \text{ pixels pour } x \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{89 \times 3}{1000} = 0,27 \text{ cm}$$

16. Les deux radiations de la source de lumière jaune n'interfèrent pas entre elles car elles sont incohérentes. La figure d'interférence observée est donc la superposition de deux figures d'interférence obtenues avec une source de lumière rouge et une source de lumière verte. Les deux franges centrales, rouge et verte sont superposées et donnent une lumière jaune mais l'interfrange dépendant de la longueur d'onde, il n'en est pas de même pour les autres franges.

Dans le cas présent, le rapport des longueurs d'onde est de $\frac{5}{4}$. On peut donc représenter les deux figures d'interférences comme ci-dessous :



La frange centrale est jaune (en synthèse additive : vert + rouge = jaune) irisée de rouge (les franges vertes sont plus étroites que les franges rouges). Les franges latérales sont jaunes avec une bande verte à l'intérieur et une bande rouge à l'extérieur. Il y a ensuite disparition de l'interfrange noir pour une succession de franges rouges et vertes. L'interfrange noir revenant un peu plus loin si le champ des interférences est assez large.

17. a. La lumière blanche est la superposition d'une infinité de radiations monochromatiques dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 800 nm.

b. La frange centrale est la frange blanche non irisée.

c. Elle est blanche car sa position ne dépend pas de la longueur d'onde. Toutes les radiations de la lumière blanche ont une frange centrale colorée située au même endroit car la position correspond à $d_2 - d_1 = 0$

d. Pour les autres franges, la position dépend de la longueur d'onde ($d_2 - d_1 = k\lambda$), ce qui explique que les franges soient rouges à l'extérieur et bleues à l'intérieur ($\lambda_B < \lambda_R$).

e. Une lumière monochromatique ne permet pas de savoir où se trouve la frange centrale (celle qui correspond à $k = 0$), puisque toutes les franges brillantes sont identiques.

18. a. Le point O étant sur l'axe de symétrie des deux sources, les distances S_1O et S_2O sont égales et n'introduisent pas de déphasage supplémentaire. Les deux sources étant en phase, la frange centrale est une frange brillante.

b. La première frange sombre correspond à $\delta = \frac{\lambda}{2}$. On obtient donc :

$$x = \frac{\lambda D}{2a_{1-2}}$$
$$x = \frac{680 \times 10^{-9} \times 1,20}{2 \times 0,20 \times 10^{-3}} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ m}$$

L'interfrange est deux fois plus grand soit 4,1 mm.

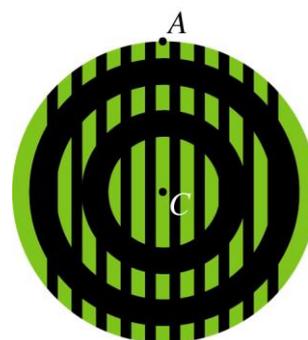
19. a. Les deux trous sont éclairés par la même source de lumière monochromatique. Ils se comportent comme deux sources cohérentes. On peut donc observer une figure d'interférence dans la partie commune des deux faisceaux.

b. Le centre de la figure d'interférence est sur l'axe de symétrie des deux sources. Les distances entre les sources et le point C sont égales. Elles n'introduisent pas de déphasage supplémentaire. La différence de marche est nulle. Comme les sources émettent en phase, le point C est sur une frange brillante.

c. Le point A est dans le plan de symétrie des sources car les sources sont dans un plan horizontal et A dans le plan vertical contenant C . Les distances entre les sources et A sont donc égales et le point A est sur une frange brillante, la même que C puisqu'elle correspond à $\delta = 0$.

d. On peut en déduire que les franges d'interférences sont des droites verticales sur l'étendue de la figure de diffraction.

Remarque : il s'agit en réalité d'arcs d'hyperbole, lieu des points dont la différence des distances à deux points fixes est constante, mais on peut localement les assimiler à des segments de droite.



© COREDOC, NATHAN 2012

20. a. La grandeur qui est connue avec la plus faible précision est l'interfrange car il est de l'ordre de quelques millimètres mesurés au millimètre près. Il est donc connu avec une très faible précision contrairement à la distance D ou à la longueur d'onde de la lumière utilisée.

b. Dans les deux propositions, seule la mesure de l'interfrange est modifiée. La méthode qui donne la meilleure précision sur la distance qui sépare les deux fentes est celle qui donne la meilleure précision sur l'interfrange.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 5. Interférences

Les deux méthodes de mesure sont différentes et l'évaluation des incertitudes également. Dans la première méthode l'incertitude est de type A (incertitude sur une série de mesures) alors que la deuxième méthode, c'est une incertitude de type B (mesure unique).

Le dossier « Mesures et incertitudes » permet de calculer l'incertitude sur la mesure dans chacun des cas.

Dans la première proposition, on réalise une moyenne des N résultats obtenus. C'est mieux que de mesurer un seul interfrange. L'écart type expérimental, σ_{n-1} , est voisin de l'incertitude sur une mesure soit 1 mm. L'incertitude type élargie, avec une dizaine de mesures et un intervalle de confiance de 95 %, est voisin de $\frac{2}{10^{1/2}}$.

Dans le cas d'une mesure unique, l'incertitude est la même que sur chacune des mesures précédentes mais le résultat doit être divisé par 10 puisque l'on mesure la totalité des interfranges. Cette méthode est donc plus précise que la précédente.

21. a. On peut observer un phénomène d'interférence stable à la surface de l'eau car les deux pointes étant solidaires du même vibreur, elles constituent des sources cohérentes.

b. L'axe de symétrie correspond à un maximum d'amplitude car les deux ondes arrivent en phase sur cet axe. En effet, elles ont émises en phase et les distances entre un point de l'axe et les deux pointes étant égales, elles n'introduisent pas de déphasage.

c. Ce sont des arcs d'hyperboles, la constante C notée dans l'énoncé étant un multiple entier de la longueur d'onde.

d. Les distances d_1 et d_2 entre les sources vérifient les deux conditions :

$$d_1 + d_2 = 5\lambda \quad \text{et} \quad d_2 - d_1 = k\lambda$$

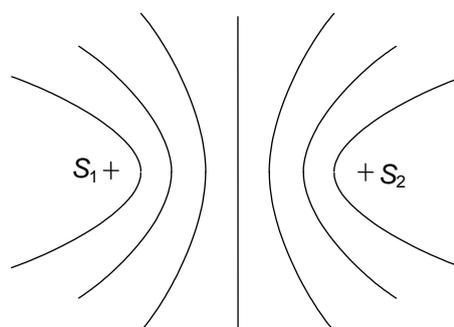
En faisant la somme de ces deux égalités, on obtient :

$$d_2 = (k + 5) \frac{\lambda}{2} \quad \text{avec} \quad d_2 < 5\lambda$$

Il y a donc 9 valeurs possibles de k :

$$-4 ; -3 ; -2 ; -1 ; 0 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4$$

Soit 9 franges d'amplitude maximale.



22. a. Elles émettent en phase car elles sont situées à la même distance de la fente source. Il n'y a donc pas de retard d'une source par rapport à l'autre.

b. Le point O étant situé sur l'axe de symétrie, la différence de marche entre les deux ondes est nulle et les interférences sont constructives.

c.
$$i = \frac{\lambda D}{a_{1-2}} = \frac{650 \times 10^{-9} \times 2,0}{0,20 \times 10^{-3}} = 6,5 \times 10^{-3} \text{ m} = 6,5 \text{ mm}.$$

d. Le point M est au centre d'une frange brillante puisqu'il est situé à une distance du point O égale à deux interfranges.

e. Non, les sources n'émettent plus en phase car la source S_2 est placée plus loin de S que S_1 .

f. La source S_2 est en retard sur S_1 car l'onde émise par S met plus de temps à lui parvenir.

g. Les deux sources émettent maintenant en opposition de phase. Comme la différence de marche entre les deux ondes qui arrivent en O est nulle, les interférences sont destructives car les ondes arrivent en opposition de phase.

h. L'interfrange n'est pas modifié car aucune des trois grandeurs qui interviennent dans son expression n'est modifiée.

Si la source est étendue, chaque point constitue une source incohérente par rapport aux points voisins.

Sur l'écran, les différentes figures d'interférence vont se superposer. Elles ont le même interfrange mais elles sont décalées : les franges vont se brouiller et on n'observera pas de figure d'interférence.

23. a. Pour étudier l'influence de la distance qui sépare les fentes d'Young sur l'interfrange, il faut réaliser une figure d'interférence et mesurer l'interfrange pour différentes fentes, sans changer la distance entre les fentes et l'écran.

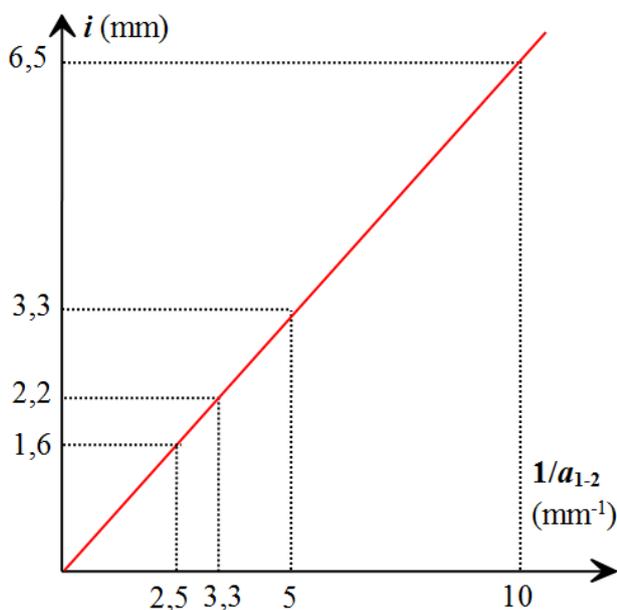
b. Pour obtenir l'interfrange avec le maximum de précision, il faut mesurer la distance qui sépare les franges sombres extrêmes et diviser cette distance par le nombre d'interfranges.

c. Si l'interfrange est inversement proportionnel à la distance qui sépare les fentes, il faut tracer $i = f\left(\frac{1}{a_{1-2}}\right)$.

On doit obtenir une droite qui passe par l'origine.

d. Voir la figure ci-contre. L'interfrange est bien inversement proportionnel à la distance qui sépare les deux fentes.

f. Il faut placer l'écran le plus loin possible car dans ce cas, l'interfrange est le plus grand possible et la précision de la mesure est meilleure.



24. a. $\delta = 2(L_2 - L_1)$ car la lumière fait un aller-retour entre le point B et les miroirs.

b. Si $L_1 = L_2$, la différence de marche est nulle et les deux faisceaux arrivent en phase sur le capteur qui enregistre donc une plage brillante (interférences constructives).

c. La distance L_2 devient $L_2 + d$ et la différence de marche $\delta = 2d$.

d. Si les interférences sont constructives, la différence de marche vérifie la relation $\delta = k\lambda$.

e. Lorsque $\delta = 0$, $k = 0$: c'est la plage brillante de la question **b**.

Pour $\delta = 2d$, $k = 526$ (c'est la 527^e frange brillante puisque l'on a vu défiler 526 franges sombres mais la première correspond à $k = 0$) :

$$\lambda = \frac{2d}{k} = \frac{0,300}{526} = 5,70 \times 10^{-4} \text{ mm} = 570 \text{ nm}$$

Exercices de synthèse

25. a. Oui, les deux HP constituent des ondes cohérentes puisqu'ils sont branchés sur le même GBF. On suppose que les ondes sont émises en phase.

b. Quand l'amplitude de la courbe observée sur l'oscilloscope est maximale, les interférences sont constructives.

On a alors $OS_1 - OS_2 = k\lambda$, avec k entier :

$$(L - \ell) - \ell = k\lambda \quad \text{ou} \quad L - 2\ell = k\lambda \quad (1)$$

c. Soit x la distance dont il faut déplacer le micro pour passer au maximum suivant. Le micro étant déplacé vers la gauche, ℓ devient $\ell + x$ et $L - \ell$ devient $L - (\ell + x)$.

La relation (1) devient : $L - (\ell + x) - (\ell + x) = (k - 1)\lambda$.

(la valeur de k diminue d'une unité lorsque l'on passe au maximum suivant car la différence de marche diminue quand on se rapproche du milieu entre les HP).

$$L - 2\ell - 2x = (k - 1)\lambda = k\lambda - \lambda$$

Comme $L - 2\ell = k\lambda$, on en déduit : $2x = \lambda$ ou $x = \frac{\lambda}{2}$

d. La distance $d = 0,500\text{m}$ correspond à $8x$ d'après l'énoncé, donc : $0,500 = 4\lambda$, ce qui donne :

$$\lambda = 0,125 \text{ m}$$

On en déduit :

$$\lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow v = \lambda f = 0,125 \times 2720 = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

26. Pour obtenir une figure d'interférence stable à la surface de l'eau, il faut que les deux sources soient cohérentes c'est-à-dire qu'elles gardent un déphasage constant dans le temps. Dans le cas de la figure (b), ce déphasage est nul et il le reste obligatoirement puisque les deux pointes sont sur le même vibreur.

Dans le cas de la figure (a), les vibreurs sont indépendants. Ils vibrent à la même fréquence, mais cette fréquence peut fluctuer un peu par rapport à la valeur affichée. Les deux GBF fluctuant de façon aléatoire, le déphasage varie lui aussi de façon aléatoire et la figure d'interférence n'est pas stable.

Remarque : dans le cas de la figure (b), le GBF fluctue aussi mais cela n'a pas de conséquence sur le déphasage.

27. a. Deux trains d'onde émis successivement par le même atome sont incohérents. On ne peut donc faire interférer deux faisceaux que s'ils proviennent du même train d'onde. La figure d'interférence produite par ce train d'onde a une durée de 10^{-11} s d'où le nom de durée de cohérence.

b. Pendant la durée t , la lumière se déplace d'une longueur :

$$d = ct = 3,0 \times 10^8 \times 1,0 \times 10^{-11} = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m} = 3,0 \text{ mm}$$

c. Pour calculer le nombre d'oscillations dans un train d'onde, il faut connaître la période de la radiation jaune du sodium :

$$\lambda = cT \quad \text{soit} \quad T = \frac{\lambda}{c} = \frac{589 \times 10^{-9}}{3,0 \times 10^8} = 2,0 \times 10^{-15} \text{ s}$$

$$n = \frac{\tau}{T} = \frac{10^{-11}}{2,0 \times 10^{-15}} = 5 \times 10^3$$

L'ordre de grandeur du nombre d'oscillations dans un train d'onde est 10^4 .

d. Aux points O et M , les radiations issues des sources S_1 et S_2 proviennent du même train d'onde : les interférences sont visibles. Au point P , le retard de la radiation provenant de la source S_1 est supérieur à la durée de cohérence : les interférences seront brouillées.

e. Chaque train d'onde a sa propre figure d'interférence qui ne dure que 10^{-11} s mais toutes les figures d'interférence sont identiques puisque le déphasage ne dépend que de la position du point sur l'écran. Elles se superposent donc sur l'écran, ce qui rend visible le phénomène qui dure tant que la source est allumée.

f. Pour un même point P , plus les sources sont proches l'une de l'autre, plus le déphasage est petit. On peut donc éloigner davantage le point P du centre O de l'écran sans que la différence de marche soit supérieure à la longueur de cohérence. La largeur de la figure d'interférence sur l'écran est donc plus grande quand les sources sont proches l'une de l'autre.

28. a. Le rayon R_1 subit juste une réflexion. Il a donc une intensité :

$$I_{R1} = 0,02 I$$

Le rayon T_1 subit deux transmissions. Il a donc une intensité :

$$I_{T1} = 0,98 \times 0,98 I = 0,96 I$$

Le rayon R_2 subit deux transmissions et une réflexion. Il a donc une intensité :

$$I_{R2} = 0,98 \times 0,02 \times 0,98 I = 0,019 I$$

Le rayon T_2 subit deux transmissions et deux réflexions. Il a donc une intensité :

$$I_{T2} = 0,98 \times 0,02 \times 0,02 \times 0,98 I = 3,8 \times 10^{-4} I$$

b. C'est entre les rayons transmis que la différence d'intensité est la plus grande. Les rayons réfléchis ont pratiquement la même intensité.

c. Les interférences destructives sont plus marquées lors de la réflexion : l'intensité est pratiquement nulle. On voit donc mieux les couleurs par réflexion. Par transmission, il n'y a pratiquement pas de différence entre les maxima et les minima d'intensité. Les interférences sont très peu contrastées.

29. a. Pour supprimer le reflet, il faut supprimer les rayons réfléchis. Il faut donc des interférences destructives entre les rayons 1 et 2.

b. Pour que l'onde résultante soit nulle, il faut que les deux rayons aient la même intensité.

c. On en déduit : $n = 1,2$.

d. En incidence normale, le rayon 2 a deux fois l'épaisseur de la couche antireflet à traverser et la différence de marche est $\delta = 2ne$.

e. Les interférences doivent être destructives entre les rayons 1 et 2, donc :

$$\delta = 2ne = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$2\sqrt{N}e = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$e = \frac{(2k + 1)}{2\sqrt{N}} \times \frac{\lambda}{2}$$

La plus petite valeur de e correspond à la plus petite valeur de k , soit $k = 0$.

$$e = \frac{\lambda}{4\sqrt{N}}$$

A. N. :
$$e = \frac{650 \times 10^{-9}}{4\sqrt{1,5}} = 1,326 \times 10^{-7} \text{ m}$$

En tenant compte des chiffres significatifs, la plus petite épaisseur est d'environ $0,13 \mu\text{m}$.

30. Proposition de synthèse de documents

Comme nous l'avons vu en classe de 1^{re} S, la couleur d'un objet provient :

- de la composition de la lumière émise par la source ;
- du comportement de l'objet vis-à-vis de la lumière qu'il reçoit ;
- de la synthèse faite par le cerveau de la lumière captée par les cônes.

Si le texte de 25 ou 30 lignes commence par ce rappel, c'est très bien ! Cela montre que certains élèves ont bien retenu les notions d'optique abordées en 1^{re} S. Mais il ne faut pas pénaliser un élève qui n'en parle pas car dans cet exercice de synthèse, seul le deuxième point (comportement de l'objet face à la lumière) intervient.

La synthèse doit clairement faire apparaître qu'il existe deux origines différentes pour les couleurs :

- Une origine pigmentaire : la couleur est due aux pigments qui absorbent une partie de la lumière qu'ils reçoivent et renvoient donc une lumière colorée (complémentaire de celle absorbée). C'est la couleur pigmentaire la plus répandue puisque les pigments sont présents partout (mélanines, ptérides, caroténoïdes...). Cette couleur est d'origine chimique puisque l'absorption dépend des liaisons chimiques dans et entre les molécules. C'est ce que rappelle le document 1.
- Une origine structurale : dans certains cas (ailes de papillons par exemple), à la couleur pigmentaire se superpose une couleur due à la structure externe de la surface qui renvoie la lumière. Cette couleur est d'origine physique puisqu'elle fait intervenir des phénomènes comme :
 - La diffraction : les couleurs observées sur les ailes de certains papillons (type morpho) ont la même origine que celles observées sur les CD.
 - Les interférences : les couleurs de la nacre par exemple ont la même origine que celles des bulles de savon : interférences des rayons lumineux réfléchis par des couches minces transparentes.
 - On peut également parler de la diffusion Rayleigh, diffusion d'une lumière bleutée provoquée par la présence de microparticules (c'est le bleu du ciel).

On peut noter pour finir que la couleur structurale dépend de l'angle d'observation alors que la couleur pigmentaire n'en dépend pas.
