Caractériser les phénomènes ondulatoires

« Celui qui trouve sans chercher est celui qui a longtemps cherché sans trouver. » - Bachelard

1 Ondes

A. *Définitions*

Une **onde progressive** est la propagation, de proche en proche, d'une **perturbation locale d'une grandeur physique** (par exemple : la hauteur de l'eau, la pression d'un gaz, un champ électrique ou un champ magnétique).

Si la grandeur physique qui varie concerne un **milieu matériel** (gaz, liquide ou solide), on parle alors d'**onde mécanique**.

👉 Autrement dit, une onde mécanique a besoin d'un **support matériel** pour se propager.

Qu'est-ce qui se propage dans une onde progressive ? Ce n'est pas la matière qui se déplace, mais une perturbation locale : autrement dit, **de l'énergie se transmet de proche en proche, sans transport de matière**.

🌊 Application 1 : Ondes progressives mécaniques et non mécaniques

1 – Indiquer le type d'énergie transportée par chacune des ondes suivantes :

- Une vague à la surface de l'eau
- Une onde sonore
- Une onde lumineuse

2 - Donner un ou plusieurs exemples d'onde mécanique et d'onde non mécanique

B. *Onde périodique*

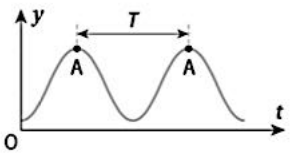
Une onde est dite **périodique** lorsque la perturbation qui se propage se répète à intervalles de temps réguliers.

👉 Exemple : des gouttes d'eau qui tombent régulièrement dans une bassine créent une onde progressive périodique à la surface de l'eau.

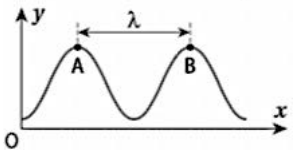
Une onde périodique se répète à la fois dans le **temps** et dans l'**espace**. (double périodicité)

- Dans le temps, la perturbation recommence identique après chaque **période T**.
- Dans l'espace, la forme de l'onde se répète après chaque longueur d'**onde λ**.

Période *T*
= plus petite durée
séparant deux perturbations
identiques d'un même point
du milieu



Longueur d'onde λ
= plus petite distance
séparant deux points
du milieu en phase (dans
le même état vibratoire)



C. *Onde périodique sinusoïdale*

Une onde périodique est dite sinusoïdale lorsqu'elle peut être représentée par une fonction mathématique de type sinus ou cosinus, en fonction du temps ou de la position dans l'espace.



〰 Application 2 : Longueur d'onde, fréquence et période

Une onde sonore est émise par un diapason qui vibre régulièrement. L'onde se propage dans l'air avec une vitesse v = 340 m·s^{-1}.

1- Calculer la période T d'un son de fréquence f = 440 Hz (note « la » du diapason).

2- Calculer la longueur d'onde λ du son de fréquence f = 440 Hz.

3- Un élève se place à d = 1,7 m d'un mur et émet ce son. Il entend un écho.

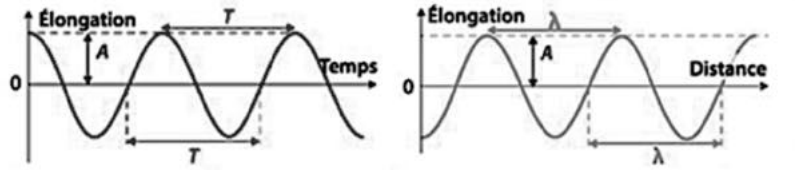
a) Calculer le temps que met le son pour revenir à l'élève.

b) Comparer ce temps avec la période T. Que remarque-t-on ?

👉 Voir l'exercice 1 qui permet d'approfondir, à l'aide d'une modélisation par une fonction sinus, les notions suivantes pour une onde périodique :

- **Amplitude** (A) : la « hauteur » maximale de l'onde par rapport à sa position moyenne.
  - 👉 C'est comme la hauteur d'une vague.
- **Longueur d'onde** (λ) : la distance entre deux crêtes successives (ou deux points identiques de l'onde).
  - 👉 C'est l'écart entre deux vagues.
- **Période** (T) : le temps nécessaire pour qu'un cycle complet de l'onde se reproduise.
  - 👉 C'est le temps entre deux vagues qui arrivent au même point.
- **Phase** (Φ) : l'« avance » ou le « retard » d'une onde par rapport à une autre.
  - 👉 Comme deux danseurs : s'ils bougent en même temps, ils sont en phase ; si l'un commence en retard, ils sont déphasés.

$$y(t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}\times t + \Phi\right) \qquad y(x) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\times x + \Phi'\right)$$



A est l'amplitude, T est la période, λ est la longueur d'onde, ϕ et ϕ' sont les phases à l'origine.

2 Propagation d'une onde

La **célérité d'une onde** est la vitesse à laquelle l'onde se propage dans un milieu. La célérité d'une onde dépend :

- du type d'onde (mécanique ou électromagnétique),
- des caractéristiques du milieu traversé : nature du matériau, densité, température, pression…

Exemples :

🔊 Le son va plus vite dans l'eau (~1500 m.s^{-1}) que dans l'air (~**340 m.s^{-1}**), car l'eau est plus dense et transmet mieux les vibrations.

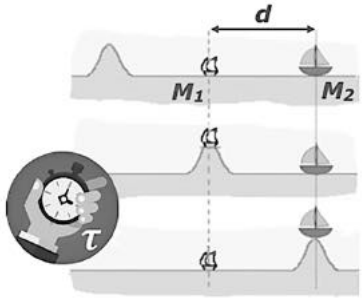
💡 La lumière se déplace plus lentement dans le verre (~2,0 × 10^8 m.s^{-1}) que dans le vide (~**3,0 × 10^8 m.s^{-1}**).

T(°C)	v(m·s^{-1})
-10	325,4
-5	328,5
0	331,5
5	334,5
10	337,5
15	340,5
20	343,4
25	346,3
30	349,2

Matériaux	v (m·s^{-1})
Air	340
Eau	1 480
Glace	3 200
Verre	5 300
Acier	5700
Plomb	1 200
Titane	4 950
PVC (souple)	2 000
PVC (rigide)	2 400
Béton	3 100
Hêtre	3 300
Granite	6 200
Péridotite	7 700
Sable sec	10 à 300

Célérité de l'onde sonore

Le **retard d'onde** τ_{21} correspond au temps que met l'onde pour passer d'un point M_1, plus proche de la source, à un point M_2, plus éloigné de la source.



⏱ Application 3 : Retard d'onde sonore entre deux points d'une salle

On place deux micros M_1 et M_2 dans une salle. Le point M_2 est plus éloigné de la source sonore S que M_1. Une impulsion sonore est émise à l'instant t = 0.

On enregistre les instants de passage de l'onde : $t_1 = 8{,}50$ ms en M_1 *et* $t_2 = 13{,}00$ ms en M_2.

1- En supposant la vitesse du son v = 340 m·s^{-1}, calculer le retard τ_{21}.

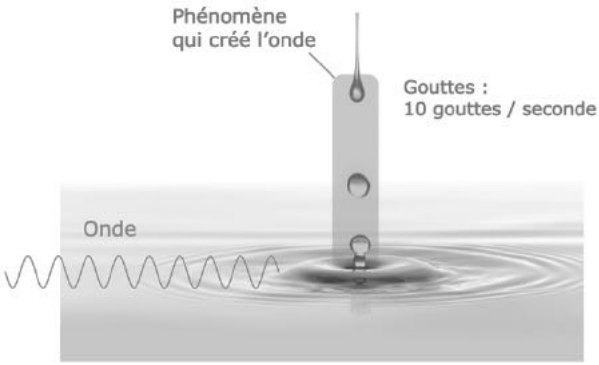
2- En déduire la distance d entre M_1 et M_2.

3- Si l'on place M_2 à d = 3,00 m de M_1, calculer le retard attendu τ_{21}

4 - Dans l'eau, la vitesse des ondes ultrasonores vaut $v_{eau} = 1500$ m·s^{-1} . Pour la même distance d = 3,00 m, calculer le nouveau retard.

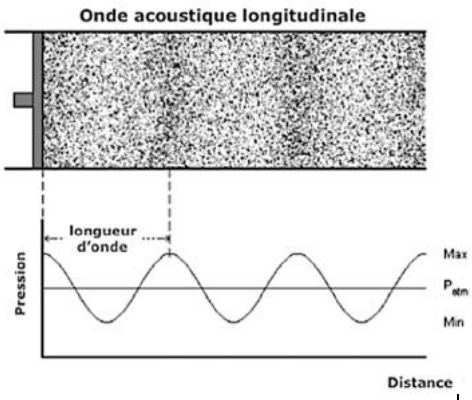
➡ Application 4 : Changement de milieu de propagation

Lorsqu'on change le milieu de propagation d'une onde, quelles sont les grandeurs qui varient et celles qui ne varient pas parmi les suivantes : f, T, λ, c ? On peut prendre l'exemple de gouttes d'eau tombant régulièrement dans une bassine — par exemple 10 gouttes par seconde — et créant ainsi une onde progressive périodique à la surface du liquide. Si l'on remplace l'eau par du glycérol, un milieu plus visqueux et plus dense, le comportement de l'onde change.



3 Onde sonore

A. *Définition et caractéristiques*

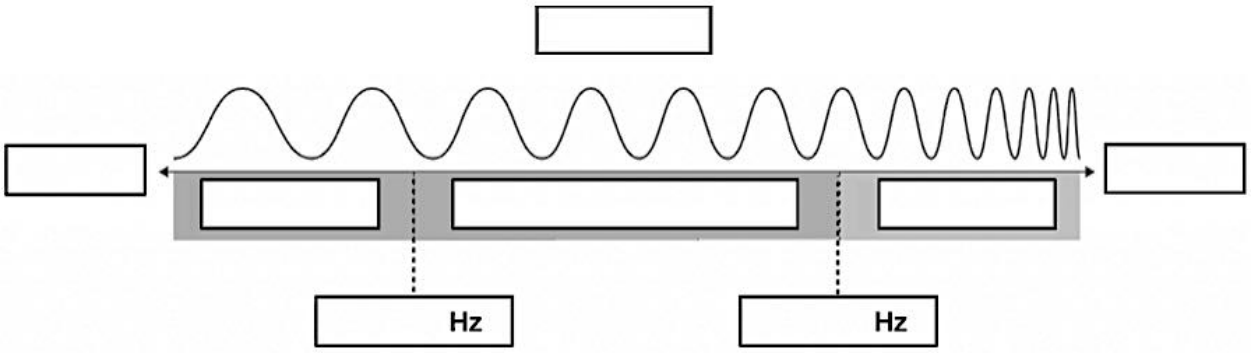


Une onde sonore, ou acoustique, est une perturbation mécanique résultant de successions de compressions et de dilatations de couches de fluide (liquide ou solide).

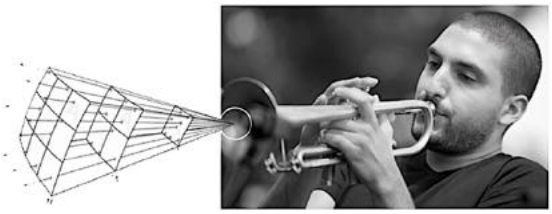
La vitesse de propagation d'une onde sonore dans l'air, à température ambiante, est d'environ 340 $m \cdot s^{-1}$.

Application 5 : Son audible

Compléter le schéma ci-dessous avec les mots suivants : son audible pour l'homme, ultrason, infrason, grave, aigu et fréquence.



B. *Intensité sonore (liée à la source de l'onde sonore)*



L'intensité sonore, notée I, correspond à l'énergie transportée par une onde sonore par unité de surface et de temps. Elle s'exprime en watts par mètre carré ($W.m^{-2}$). C'est donc une puissance (énergie par unité de temps) rapportée à une surface.

$$I = \frac{P}{S}$$

P : puissance sonore (énergie par unité de temps) en watt W ;

S : surface en m^2 ;

I : intensité sonore en $W.m^{-2}$

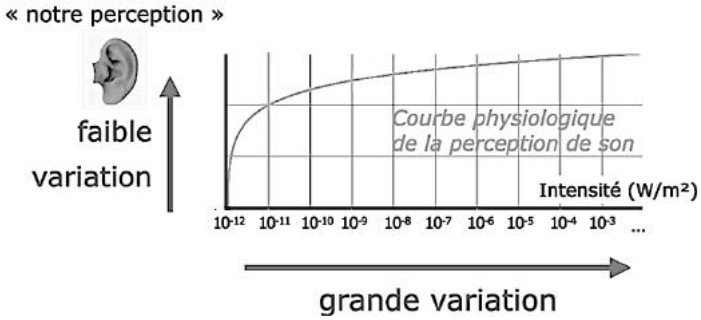
Pour une fréquence f = 100 Hz, le seuil d'audibilité de l'oreille humaine est $I_0 = 10^{-12}$ $W.m^{-2}$ et le seuil de douleur est 10 $W.m^{-2}$. Cette vaste plage d'audition (10 000 milliards !) est nécessaire pour nous adapter à notre environnement.

C. *Niveau sonore (perçu par l'oreille humaine)*

Physiologie de l'oreille humaine :

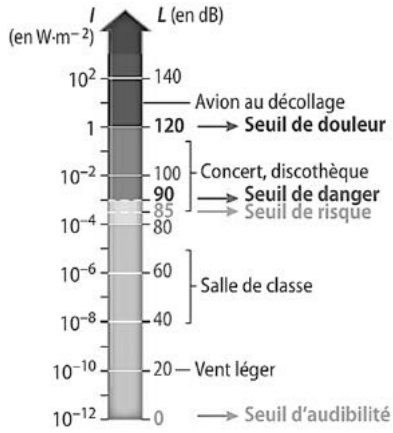
• L'oreille humaine est sensible uniquement aux fluctuations de pression, et non à une valeur absolue de pression.

• Une intensité deux fois plus élevée ne correspond pas à une sensation de son deux fois plus fort. La perception du volume sonore n'est donc pas proportionnelle à l'intensité (cf. la courbe physiologique ci-contre).



• Pour de fortes intensités sonores, d'importantes variations d'intensité provoquent de faibles différences dans les sensations perçues (effet tampon qui protège notre audition).

Il est nécessaire d'adopter une échelle de mesure adaptée à notre perception auditive. Pour cela, on utilise la fonction logarithme décimal (log) pour définir le niveau sonore, noté L, exprimé en décibels (dB). En effet, log(x) croît lentement même lorsque x augmente fortement (comme notre perception sonore lorsque l'intensité augmente)



Le niveau sonore L (pour « Level » en Anglais) est lié à l'intensité sonore I :

$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

I : intensité sonore en $W.m^{-2}$

I_0 : intensité sonore de référence $I_0 = 10^{-12}$ $W.m^{-2}$. I_0 correspond au son le plus faible qu'une oreille normale peut entendre

L niveau sonore en décibel (dB)

Application 6 : Superposition de deux sources sonores

La vuvuzela, appelée lepatata en setswana et parfois francisée en vouvouzela, est une corne d'environ 70 centimètres de long, popularisée par les supporters des deux clubs de football de Soweto en Afrique du Sud.

Le niveau sonore d'une vuvuzela est de L = 123 dB. L'intensité sonore de référence est $I_0 = 10^{-12}$ $W.m^{-2}$.

1- Quelle est l'intensité sonore d'une vuvuzela ?

2- Quel est le niveau sonore de deux vuvuzelas ?

3 - Avec deux vuvuzelas, atteint-on le seuil de douleur fixé à 1,0 $W \cdot m^{-2}$?



MaThs

- $\log(1) = 0$
- Pour a et b réels strictement positifs :

$$\log(a \times b) = \log(a) + \log(b)$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$$

- $y = \log(x) \iff x = 10^y$

D. Atténuation

On entend moins bien un son lorsqu'on s'éloigne de sa source ou lorsqu'un obstacle se trouve entre la source et l'oreille.

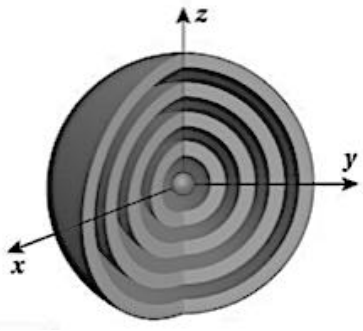
L'atténuation d'un son, dont le niveau sonore passe de L_1 (proche) à L_2 (loin), est donnée par : $A = L_1 - L_2$

i. Atténuation géométrique

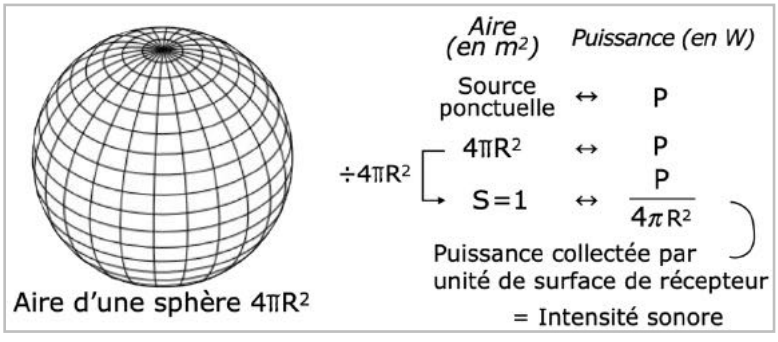
Une source sonore placée en O émet un son de puissance P dans toutes les directions de l'espace.

En posant les hypothèses suivantes :

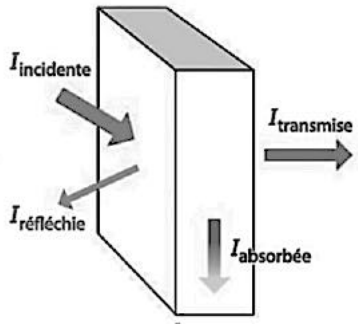
- l'onde sonore se répartit sur des sphères concentriques à partir d'une source ponctuelle ; la puissance P se dilue donc sur des sphères de plus en plus grandes à mesure que l'on s'éloigne de la source,
- la répartition des molécules de l'air est homogène,
- la puissance sonore P est conservée lors de la propagation (hypothèse simplificatrice),



et en utilisant la définition de l'intensité sonore $I = \frac{P}{S}$ avec la surface d'une sphère de rayon R égale à $4\pi R^2$, on obtient que l'intensité sonore en un point M situé sur une sphère de centre O et de rayon R vaut : $I = \frac{P}{4\pi R^2}$



ii. Atténuation d'absorption



L'onde sonore peut être atténuée par absorption lorsqu'elle interagit avec un matériau.

L'onde sonore de départ (onde incidente) va être en partie réfléchie, en partie absorbée par le matériau et en partie transmise.

L'atténuation sonore compare le niveau sonore incident au niveau sonore transmis : $\boxed{A = L_{incident} - L_{transmis}}$

Application 7 : Atténuation géométrique

1 - Exprimer l'atténuation A en fonction des intensités sonores I_1 et I_2 mesurées aux points 1 (proche de la source) et 2 (loin de la source).

2 - Un diapason ponctuel émet un son de puissance P = 2 W, qui se propage dans toutes les directions de l'espace. Calculer l'intensité sonore à une distance R = 1 m, puis à R = 2 m du diapason.

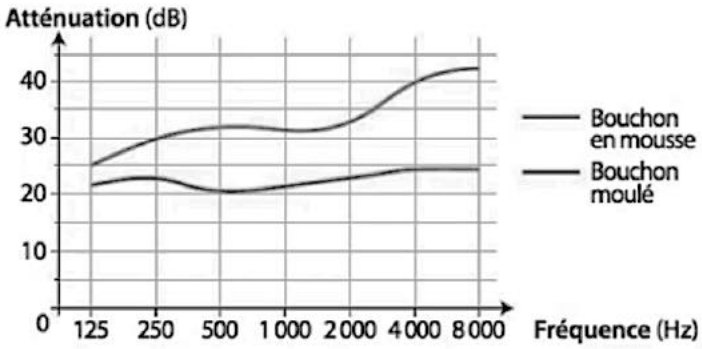
3 - Le seuil de douleur correspond à une intensité sonore de 1,0 W·m^{-2}.

a. Ce seuil est atteint à une distance d = 10 m d'un émetteur ponctuel. Quelle est la puissance P émise ?

b. Si la puissance émise est P' = 50 W, à quelle distance minimale de l'émetteur faut-il se placer pour ne pas dépasser ce seuil ?

Application 8 : Atténuation d'absorption

La figure ci-contre représente l'atténuation acoustique à différentes fréquences pour des bouchons d'oreille en mousse et des bouchons moulés.



1- Quelle est la différence d'atténuation entre ces deux types de bouchons à 1000 Hz ?

2- En déduire le rapport de la puissance acoustique reçue avec un bouchon en mousse sur la puissance acoustique reçue avec un bouchon moulé pour un son de fréquence 1000 Hz.

3- Quel type de bouchon faut-il utiliser sur un chantier de bâtiment ? Lors d'un concert ?

Faire l'exercice 2, issu d'un sujet de Bac, pour mieux comprendre les notions d'intensité sonore ainsi que les deux types d'atténuation :

- l'atténuation géométrique (le son se répartit sur une surface de plus en plus grande quand on s'éloigne de la source),
- l'atténuation par absorption (le son est en partie absorbé par le milieu qu'il traverse).

4 Effet Doppler pour un émetteur d'onde mobile et un observateur fixe

L'effet Doppler est la modification de la fréquence et de la longueur d'onde perçues par un observateur lorsque la source d'ondes et l'observateur sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre.

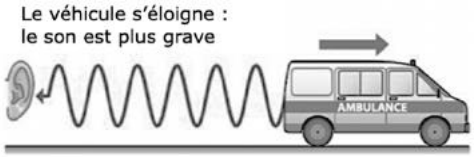
Ce phénomène est observable pour toute onde, qu'elle soit mécanique ou électromagnétique.

Exemple avec le son (onde mécanique) :

Si l'on écoute la sirène d'une ambulance (onde sonore périodique) alors qu'on est immobile dans une rue, on perçoit un son différent lorsqu'elle s'approche et lorsqu'elle s'éloigne.



Lorsqu'une ambulance s'approche, les ondes sonores se "resserrent" : la fréquence perçue augmente et le son paraît plus aigu. Quand elle s'éloigne, les ondes se "dilatent" : la fréquence diminue et le son paraît plus grave.



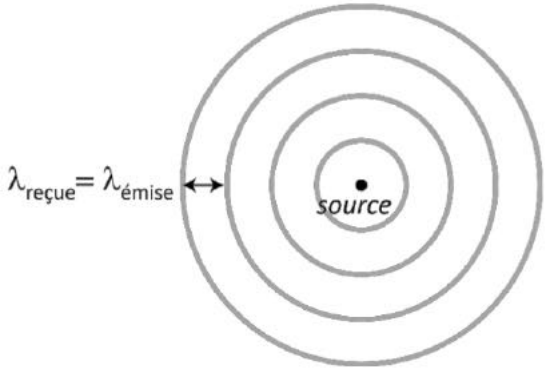
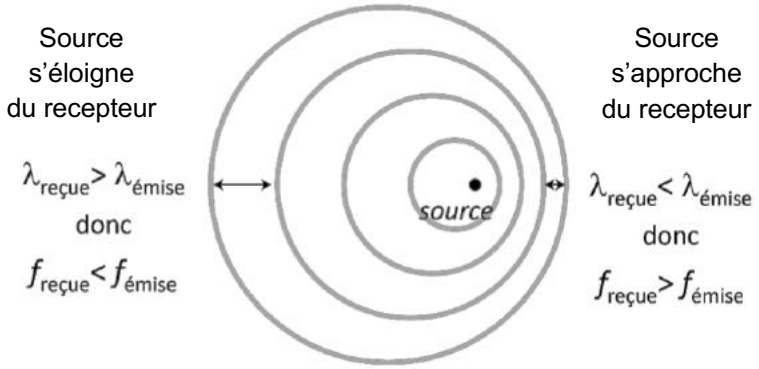
Regardez la vidéo ci-dessous avec des exemples d'utilisation de l'effet Doppler.

https://www.youtube.com/watch?v=V2cyYa07j4I

A. *Origine physique de l'effet Doppler*

Considérons une source émettant une onde périodique. Les cercles grisées autour de la source sur les schémas ci-dessous représentent les points de l'espace atteints simultanément par la crête de la même perturbation périodique : ce sont les « surfaces d'onde ».

Utilisez l'animation suivante https://physique.ostralo.net/doppler/

Cas où la source est immobile par rapport au récepteur	**Cas où la source est en mouvement (ici, vers la droite)**
	
La longueur d'onde (et donc la fréquence) de l'onde reçue $\lambda_{reçue}$ est identique à la longueur de l'onde émise $\lambda_{émise}$ quelque soit la position du récepteur.	Si la source s'éloigne du récepteur placé à gauche, alors $\lambda_{reçue} > \lambda_{émise}$ et $f_{reçue} < f_{émise}$. • Conséquence pour une onde sonore : Réception d'un son **plus grave** • Conséquence pour une onde lumineuse : Réception d'une lumière **décalée vers le rouge** : « Redshift ».
	Si la source se rapproche du récepteur placé à droite, alors $f_{reçue} > f_{émise}$ et $\lambda_{reçue} < \lambda_{émise}$. • Conséquence pour une onde sonore : Réception d'un son **plus aigu** • Conséquence pour une onde lumineuse : Réception d'une lumière **décalée vers le bleu** : « Blueshift ».

B. *Le décalage Doppler*

On appelle « décalage Doppler », noté Δf, la différence en valeur absolue entre la fréquence de l'onde émise f_e par une source en mouvement et la fréquence reçue par un récepteur immobile f_r : $\Delta f = |f_r - f_e|$

C. *Expression du décalage Doppler en fonction de la vitesse du mobile (A savoir refaire)*

On considère une source émettrice, une chauve-souris (CS), qui émet une onde sonore de fréquence f_e et de période T_e liées par $f_e = \frac{1}{T_e}$.

L'onde sonore se propage dans l'air à la vitesse c (≈ 340 m·s^{-1} dans l'air).

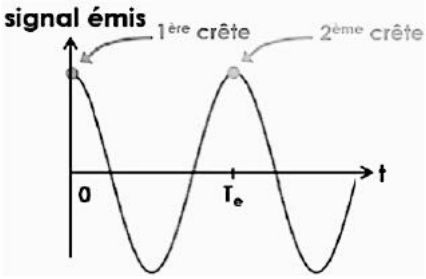
La chauve-souris se déplace vers un papillon immobile (P), avec une vitesse v.

Le papillon joue le rôle de récepteur. Il capte l'onde avec une fréquence reçue f_r et une longueur d'onde perçue λ.

Le **décalage Doppler** est la différence entre la fréquence reçue et la fréquence émise : $\Delta f = |f_r - f_e|$.

Notre objectif est d'exprimer Δf en fonction de la vitesse v de la chauve-souris.

1. Position des crêtes d'onde

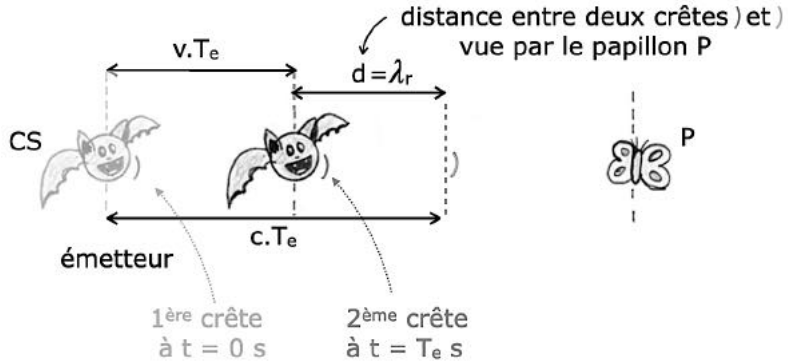


• À t = 0, la crête 1 est émise.

• À t = T_e, la crête 2 est émise.

Durant la durée T_e :

- La chauve-souris s'est rapprochée du papillon d'une distance v. T_e ,
- La crête 1 a parcouru c.T dans l'air.



L'écart entre deux crêtes successives est donc : d = c.T_e - v. T_e = T_e . (c - v)

Cette distance correspond à la longueur d'onde perçue par le papillon : $\lambda_r = T_e . (c - v)$ ①

2. Relation entre longueur d'onde et fréquence reçue par le papillon

La célérité d'une onde est donnée par : $c = \frac{\lambda_r}{T_r} = \lambda_r \times f_r \Rightarrow f_r = \frac{c}{\lambda_r}$ ②

3. Remplacement de λ

En utilisant ① et $T_e = \frac{1}{f_e}$: $\lambda_r = \frac{c-v}{f_e}$ ③

En remplacant ③ dans ② , on obtient : $f_r = \frac{c}{\frac{c-v}{f_e}} = \frac{c f_e}{c-v} = f_e \times \frac{c}{c-v}$ ④

4. Décalage Doppler

On calcule en utilisant ④ : $\Delta f = |f_r - f_e| = \left|\frac{c f_e}{c-v} - f_e\right|$.

Simplifions : $\Delta f = f_e \left(\frac{c}{c-v} - 1\right) = f_e \frac{v}{c-v}$

5. Approximation pour v << c

Si la vitesse de la chauve-souris est très faible devant celle du son (v << c) : $\Delta f \approx f_e \frac{v}{c}$.

👉 Résultat : la fréquence reçue est plus grande que la fréquence émise lorsque la source se rapproche, et le décalage Doppler est proportionnel à la vitesse relative.

Démonstration : https://www.youtube.com/watch?v=tln8JV4vwnA

✅ À retenir : Le rapprochement de la source réduit la distance entre deux crêtes d'onde ; la fréquence reçue augmente donc. Cette approche géométrique illustre comment on déduit une vitesse à partir de la variation de fréquence perçue.

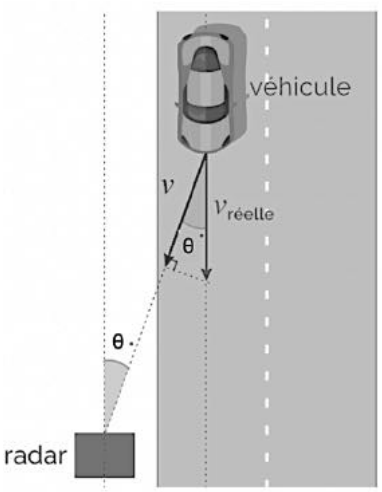
Conclusions

Soit un émetteur d'ondes de fréquence f_e et de célérité c, et un récepteur immobile qui reçoit cette onde à une fréquence f_r .

- Si l'émetteur est immobile par rapport au récepteur : $\boxed{f_r = f_e}$

- Si l'émetteur se rapproche du récepteur avec la vitesse v : $\boxed{f_r = f_e \times \frac{c}{c - v}}$
- Si l'émetteur s'éloigne avec du récepteur une vitesse v : $\boxed{f_r = f_e \times \frac{c}{c + v}}$

D. La vélocimétrie par effet Doppler



Le décalage Doppler se produit lorsqu'une source d'onde et un récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre.

Si la source s'approche du récepteur, l'onde reçue a une fréquence plus élevée (son plus aigu ou lumière plus bleue) ; si elle s'éloigne, la fréquence diminue (son plus grave ou lumière plus rouge).

Cette variation de fréquence dépend uniquement de la vitesse relative entre la source et le récepteur.

On peut donc exploiter cet effet pour mesurer des vitesses, par exemple celles d'une étoile, d'un véhicule ou du sang dans une artère.

Quelques exemples concrets :

- en médecine, pour mesurer le débit du sang avec des ultrasons ;
- sur les routes, avec les radars qui mesurent la vitesse des voitures ;
- en astronomie, pour mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers grâce au décalage spectral (red shift) de la lumière ;
- pour la détection d'exoplanètes, en observant les variations de spectre des étoiles.

Application 9 : L'effet Doppler et la mesure des vitesses

Une ambulance équipée d'une sirène émet un son de fréquence $f_e = 850\,\text{Hz}$.

La vitesse du son dans l'air est $c = 340\,\text{m·s}^{-1}$.

L'ambulance roule à la vitesse $v = 30\,\text{m·s}^{-1}$ (environ 108 km.h^{-1}).

1 - Rappelez la relation entre la fréquence f_e et la période T_e d'une onde. Calculez la période T_e associée au son émis par la sirène.

Un observateur immobile est placé sur le bord de la route, en face de l'ambulance qui s'approche.

2 - Calculez la fréquence f_r reçue par cet observateur.

3 – Lorque l'ambulance d'éloigne à la même vitesse, calculez la nouvelle fréquence f_r' perçue par l'observateur.

En temps normal, le sang circule à une vitesse moyenne $v_0 = 0{,}20\,\text{m·s}^{-1}$. En cas de rétrécissement d'un vaisseau (thrombose), la vitesse locale peut atteindre $v_1 = 0{,}80\,\text{m·s}^{-1}$. Ce phénomène s'explique par le principe de Bernoulli, qui sera étudié dans le chapitre 17 - Mécanique des fluides.

On utilise une onde ultrasonore de fréquence $f = 2{,}0\,\text{MHz}$ dans les tissus, où la célérité est $c = 1500\ \text{m·s}^{-1}$. On remarque que v_0 et v_1 sont très petits devant c

4 - Calculez le décalage Doppler Δf_0 pour le vaisseau sain (v_0).

5 - Calculez Δf_1 dans la zone sténosée.

6 - Concluez : comment l'échographie Doppler permet-elle de révéler la présence d'une thrombose ?

Application 10 : Détermination de la vitesse d'un avion A312 en phase d'atterrissage

Au voisinage de l'aéroport, un observateur enregistre le son du moteur de l'avion passant au-dessus de lui lors de sa phase d'atterrissage. L'observateur est supposé immobile lors de l'enregistrement.

L'analyse du signal sonore permet de déterminer les fréquences des signaux reçus par l'observateur. Lorsque l'avion se rapproche de l'observateur, la fréquence mesurée est $f_A = 2{,}2\,\text{kHz}$. Lorsqu'il s'éloigne, la fréquence est $f_E = 1{,}5\,\text{kHz}$.

On note f_0 la fréquence du signal émis par la source au repos, c la vitesse du son dans l'air dans les conditions de l'expérience et v la vitesse de l'avion par rapport au sol. On donne $c = 345\ m{\cdot}s^{-1}$.

1. Parmi les propositions A, B, C et D suivantes, choisir la proposition correcte. Expliquer pourquoi les autres propositions sont à écarter.

A	B	C	D
$f_A = \frac{c}{c-v}$ $f_E = \frac{c}{c+v}$	$f_A = f_0 \cdot \frac{c}{c-v}$ $f_E = f_0 \cdot \frac{c}{c+v}$	$f_A = f_0 \cdot \frac{c}{c+v}$ $f_E = f_0 \cdot \frac{c}{c-v}$	$f_A = f_0 \cdot \frac{c}{c-2v}$ $f_E = f_0 \cdot \frac{c}{c+v}$

2. Déterminer la vitesse v de l'avion, exprimée en $km \cdot h^{-1}$, lors de cet atterrissage. Commenter.

Faire l'exercice 3 , issu d'un sujet de Bac, pour mieux comprendre les notions de décalage Doppler et ses applications en Astronomie.

5 Diffraction des ondes

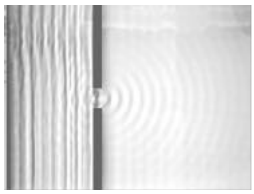
A. *Définition*

La **diffraction** est une propriété des ondes qui se traduit par un étalement de la direction de propagation de l'onde lorsqu'elles traversent une ouverture ou contournent un obstacle.

Exemple : la houle qui pénètre dans un port par une ouverture étroite se propage ensuite dans toutes les directions à l'intérieur du bassin (voir schéma ci-contre).



Expérience avec un bac à ondes :



Dans un **bac à ondes**, on crée des vagues régulières à la surface de l'eau. Quand elles passent par une ouverture étroite, elles s'écartent dans toutes les directions : c'est la **diffraction**.

🔹 Remarque : L'onde diffractée conserve la même longueur d'onde que l'onde incidente.

B. *Conditions d'observation de la diffraction*

La diffraction est d'autant plus marquée que la dimension a de l'obstacle ou de l'ouverture est petite par rapport à la longueur d'onde λ :

Nature de l'onde	Onde mécanique	Onde électromagnétique
Critère d'observation de la diffraction	$\boxed{\frac{a}{\lambda} \lesssim 1}$	$\boxed{\frac{a}{\lambda} \lesssim 100}$

🔉 Exemple d'un son grave.

Le son est une onde mécanique qui présente un phénomène de diffraction lorsque $\frac{a}{\lambda} \lesssim 1$

La vitesse de son dans l'air est $v \approx 340\ m.s^{-1}$. Pour un son grave de fréquence $f = 340$ Hz ; $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{340} = 1$ m .

Ce son traverse une porte de largeur a = 1 m. Ainsi $\frac{a}{\lambda} = 1$: le son est bien diffracté.

📡 Exemple d'une lumière visible

Pour une lumière visible de longueur d'onde $\lambda \approx 500$ nm, la diffraction devient marquée seulement lorsque : $\frac{a}{\lambda} \lesssim 100$

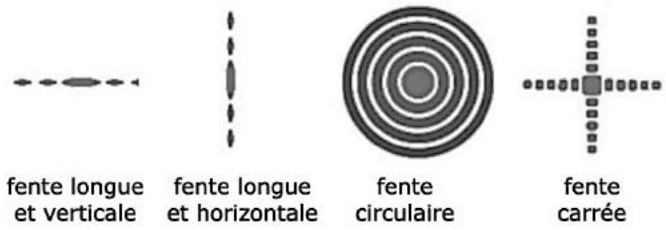
Une fente de 50 µm (soit environ 100 λ) provoque un étalement visible du faisceau lumineux.

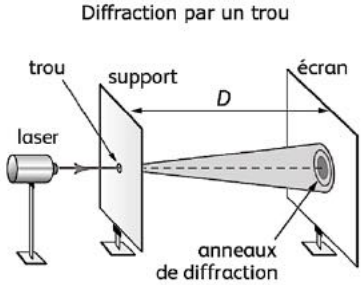
Application 11 : Diffraction des ondes

1- Quelles ondes sonores (c'est-à dire quelles fréquences) sont diffractées à travers une porte de largeur a = 0,90 m ?

2- Une onde électromagnetique de longueur d'onde λ = 1,0 µm est-elle diffractée à travers la même porte (a = 0,90 m) ?

Quelques exemples de figures de diffraction :





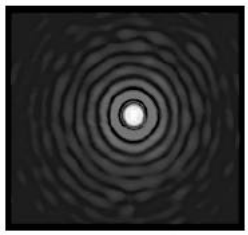
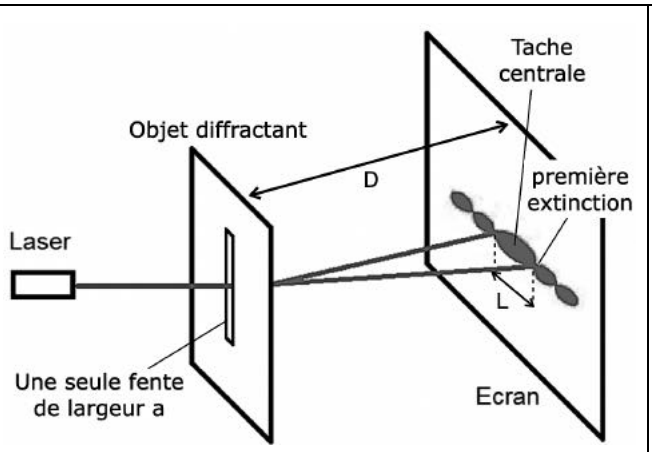


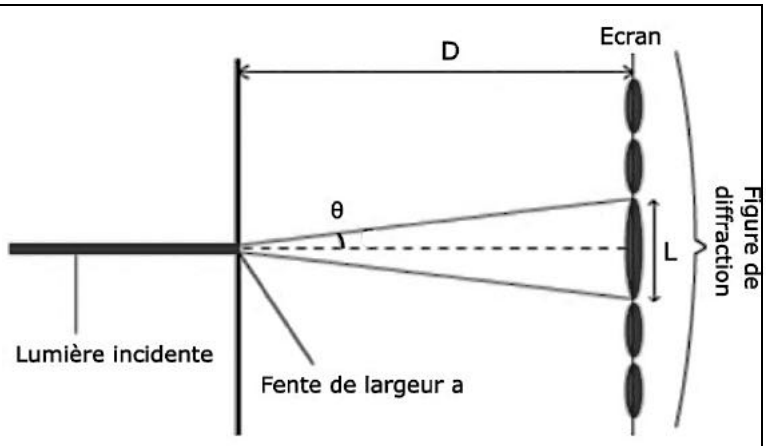
Figure de diffraction obtenue par un trou circulaire

C. *Montage expérimental de diffraction*

i. Exemple d'une diffraction par une fente verticale



Montage expérimental de diffraction avec une source lumineuse monochromatique, **vu de profil**



Montage expérimental de diffraction **vu de dessus**

La figure de diffraction obtenue avec une fente se compose d'une large tache centrale de largeur L entourée de taches latérales plus petites et moins lumineuses. Ces taches s'étalent **perpendiculairement** à la fente.

La fente, de largeur a, est placée à une distance D de l'écran.

L'importance du phénomène est caractérisée par **l'angle de diffraction** θ, qui correspond à l'angle entre la direction initiale de propagation de l'onde (sans diffraction) et la **direction du premier minimum d'intensité**.

Pour une onde monochromatique de longueur d'onde λ, diffractée par une fente de largeur a (ou par un fil de diamètre a), l'angle de diffraction θ est donné par :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

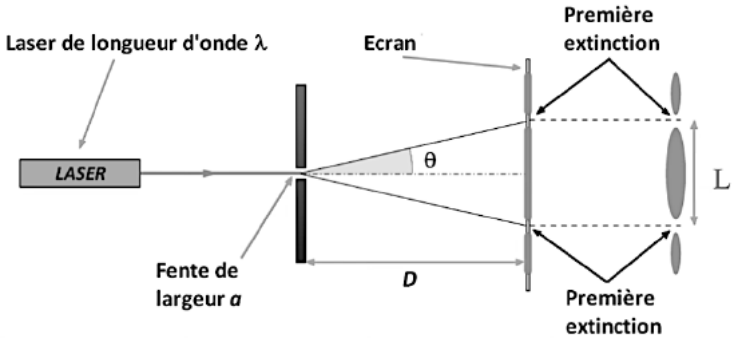
λ longueur d'onde en mètres (m)

a largeur de la fente ou diamètre du fil en mètres (m)

θ angle de diffraction en radian (rad)

Lorsque D ≫ L, l'angle θ est petit. On peut alors utiliser l'approximation des petits angles : $\tan\theta \simeq \theta$

🌈 Application 12 : Diffraction du faisceau d'un laser de longueur d'onde λ par une fente de largeur a



1- Exprimer l'angle de diffraction θ en fonction de la largeur L de la tache centrale observée sur un écran situé à une distance D de la fente (approximation des petits angles : $\tan\theta \simeq \theta$)

2- En déduire l'expression de la longueur d'onde λ en fonction de a, L et D

ii. Diffraction par un trou circulaire

La figure de diffraction obtenue avec un trou circulaire se compose d'une large tache centrale (appelée disque d'Airy) entourée d'anneaux sombres et lumineux concentriques, de plus en plus faibles en intensité.

Le trou circulaire, de diamètre a, est placé à une distance D de l'écran.

L'importance du phénomène est caractérisée par l'angle de diffraction θ, défini entre la direction initiale de propagation (sans diffraction) et la direction du premier minimum d'intensité.

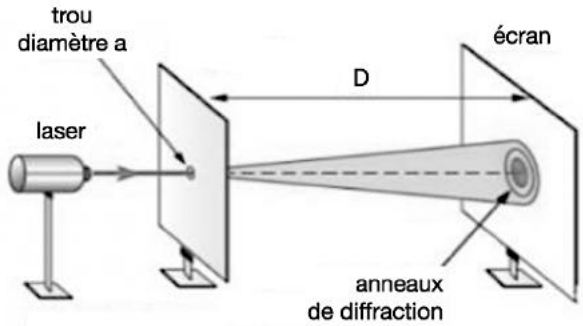
Pour une onde monochromatique de longueur d'onde λ, diffractée par un trou circulaire de diamètre a, l'angle θ du premier minimum (bord du disque d'Airy) est donné par :

$$\theta = 1{,}22 \times \frac{\lambda}{a}$$

λ longueur d'onde en mètres (m)

a diamètre du trou circulaire en mètres (m)

θ angle de diffraction en radian (rad)



Application 13 : Diffraction et pouvoir séparateur d'un téléscope

On considère un télescope dont l'objectif est une ouverture circulaire de diamètre a = 4,0 m.

On observe de la lumière verte (λ = 550 nm).

On rappelle qu'un petit angle vérifie $\tan\theta \simeq \theta$.

La distance Terre–Lune sera prise égale à $D = 3{,}84 \times 10^8$m.

1. Rappeler l'expression de l'angle θ correspondant au premier minimum du disque d'Airy pour une ouverture circulaire de diamètre a et longueur d'onde λ.
2. Calculer θ (en radians puis en arcsecondes) pour a=4,0 m et λ = 550 nm
3. En déduire la distance minimale s_{min} entre deux points lunaires que ce télescope peut distinguer (en mètres).
4. Au vu du résultat précédent, peut-on séparer deux objets lunaires distants de :

   a) 30 m b) 65 m c) 120 m
5. Si on observe en bleu λ = 450 nm que deviennent θ et s_{min} ? Conclure sur l'intérêt d'observer à plus courte longueur d'onde.

6 Interférence des ondes

A. *Superposition de deux ondes et interférence*

La perturbation résultante de la superposition de deux ondes est appelée une **interférence**. Ce phénomène est caractéristique de toutes les ondes, qu'elles soient mécaniques (ondes sonores, houle, vibrations d'une corde) ou électromagnétiques (ondes lumineuses, ondes radio, micro-onde).

🏊 Application 14 – Identification d'une zone d'interférences

Identifiez la zone d'interférence, c'est-à-dire l'endroit où les vagues de la houle se superposent et interagissent, sur cette photo aérienne du port de Saint-Jean-de-Luz (France).



Pour que l'interférence soit stable et observable, il faut que les ondes qui interagissent soient :

- **Synchrones** : elles ont la même fréquence et oscillent *au même rythme*.
- **Cohérentes :** leur déphasage reste constant dans le temps. → L'écart entre leurs oscillations ne varie pas : elles « battent » toujours avec le même retard ou la même avance.

Dans la suite, on considérera uniquement des ondes de même nature, synchrones et cohérentes, avec un déphasage nul au moment de leur émission.

B. *Interférences constructive et destructive*

Pour illustrer le phénomène d'interférences constructives et destructives, on considère la rencontre, en un point M, de deux ondes de même amplitude se propageant le long d'une corde, mais dans des sens opposés. On s'intéresse aux deux configurations schématisées ci-dessous.

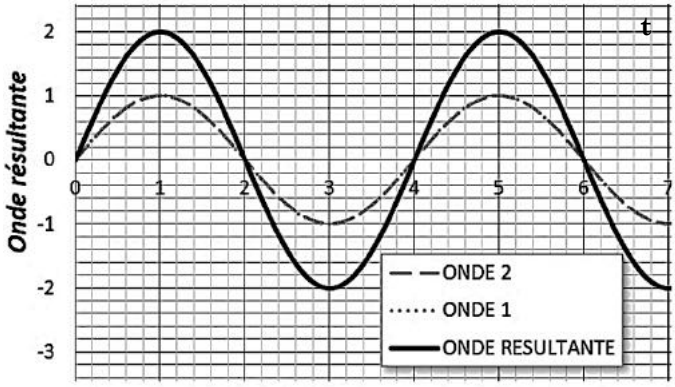


🔀 Application 15 : Croisement de deux ondes progressives sur une corde

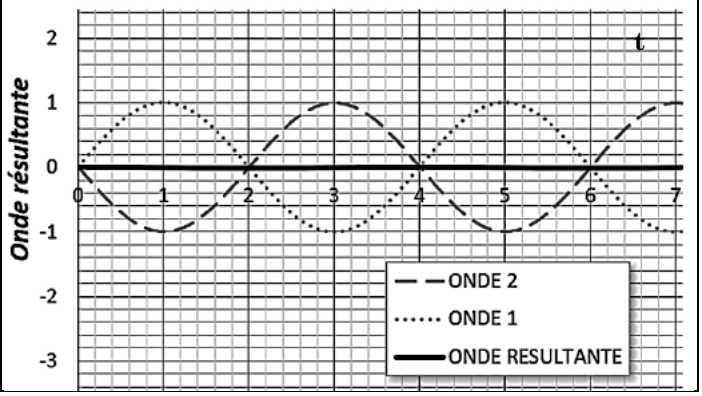
A l'aide de l'animation suivante https://physique.ostralo.net/croisement_ondes/, testez les différentes configurations : impulsion vers le haut, vers le bas et pas d'impulsion. Que se passe-t-il lorsque deux ondes identiques se croisent ? Et lorsqu'elles arrivent inversées au point de croisement ?

Regarder le film de l'url ci-dessous entre 4:33 et 5:40 (Anglais, sous titré) pour comprendre le phénomène de l'interférence. https://www.youtube.com/watch?v=Iuv6hY6zsd0

L'interférence de deux ondes de même amplitude est dite CONSTRUCTIVE au point M lorsque les deux ondes sont en phase, c'est-à-dire qu'elles présentent le même état vibratoire en ce point.

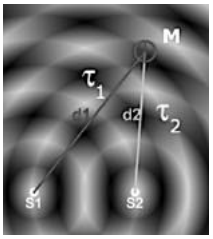


L'interférence de deux ondes de même amplitude est dite DESTRUCTIVE en un point M lorsque les deux ondes sont en opposition de phase, c'est-à-dire qu'elles présentent des états vibratoires opposés en ce point. 👉 Les effets des deux ondes s'annulent alors.



C. Conditions d'interférences sur le retard relatif et la période

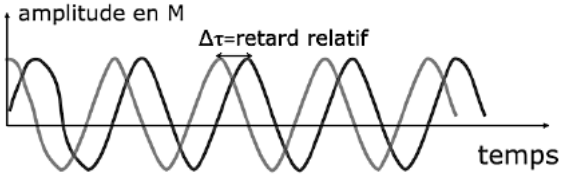
Soient deux sources d'onde cohérentes et synchrones S_1 et S_2 émettant des ondes sinusoïdales de période T. Le point M ,où l'on observe les interférences, est situé à une distance d_1 de la source S_1 et d_2 de la source S_2 avec, en général $d_1 \neq d_2$.



Au point M :

- La vibration issue de la source S_1 arrive avec un retard de $\boldsymbol{\tau}_{S1M} = \boldsymbol{\tau}_1$ et
- Celle issue de le source S_2 avec un retard de $\boldsymbol{\tau}_{S2M} = \boldsymbol{\tau}_2$

Cette **différence de temps de parcours** des ondes, liée aux distances d_1 et d_2 provoque un **décalage temporel** entre deux ondes au point M.



👉 En interférences, on s'intéresse donc au **retard relatif** entre les deux ondes qui se superposent :

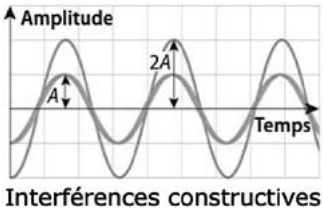
$$\Delta\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_1 - \boldsymbol{\tau}_2$$

⚙️ Application 16 – Conditions d'interférences par rapport au retard relatif Δτ

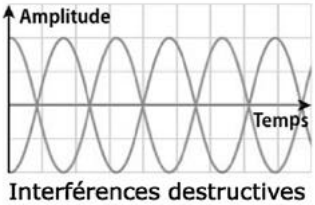
Exprimez les conditions pour qu'il y ait :

- des interférences constructives,
- et des interférences destructives,

au point M, en fonction de la période T et du retard relatif Δτ.



Interférences constructives



Interférences destructives

D. Conditions d'interférences sur la différence de marche et la longueur d'onde

La **différence de marche** (ou différence de chemin optique) entre deux ondes qui interfèrent en un point M, notée ***δ***, est la différence de distances parcourues par chacune des ondes depuis leurs sources respectives jusqu'au point M.

$\delta = d_1 - d_2 = S_1M - S_2M$

Application 17 – Interférences de vagues circulaires

Utilisez l'animation suivante qui représente un nageur (cercle rouge) se trouvant à la surface de l'eau dans une piscine à remous. :

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/cuve_ondes/interference_ondes_circulaires.php

Le nageur est situé à une distance d_1 de la source rouge S_1 et à une distance d_2 de la source verte S_2.

Ces deux sources créent des vagues périodiques de même fréquence.

Faites bouger le nageur dans la cuve et observez les variations de l'élongation résultante, c'est-à-dire la superposition des deux ondes (rouge et verte).

Questions

1. Comment doivent se présenter les ondes rouge et verte au niveau du nageur pour que l'amplitude soit maximale ?
2. Comment doivent se présenter les ondes rouge et verte pour que la surface de l'eau reste immobile ?
3. Quelle est la condition sur la différence de marche δ pour que le nageur se trouve dans une zone d'interférences constructives ? Exprimez-la en fonction de la longueur d'onde λ.
4. Quelle est la condition sur la différence de marche δ pour que le nageur se trouve dans une zone d'interférences destructives ? Exprimez-la en fonction de la longueur d'onde λ.

Conclusion

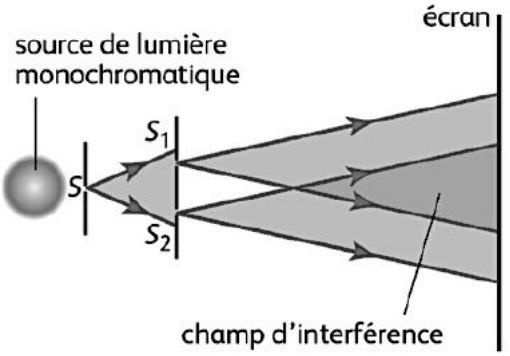
INTERFENCE CONSTRUCTIVE	INTERFENCE DESTRUCTIVE
Les deux ondes arrivent **en phase** au point M : les crêtes de l'une coïncident avec les crêtes de l'autre, ainsi que leurs creux.	Les deux ondes arrivent **en opposition de phase** au point M : les crêtes de l'une coïncident avec les creux de l'autre.
Deux ondes périodiques de période T interfèrent de manière constructive au point M si le retard relatif entre les deux d'onde en ce point est égal à : $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = n \times T$ avec $n \in \mathbb{Z}$	Deux ondes périodiques de période T interfèrent de manière destructive au point M si le retard relatif entre les deux d'onde en ce point est égal à : $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \left(n + \frac{1}{2}\right) \times T$ avec $n \in \mathbb{Z}$
Deux ondes périodiques dans l'espace de période λ interfèrent de manière constructive en un point M si la différence de marche entre les deux ondes en ce point est égale à : $\delta = n \times \lambda$ avec $n \in \mathbb{Z}$	Deux ondes périodiques dans l'espace de période λ interfèrent de manière destructive en un point M si la différence de marche entre les deux ondes en ce point est égale à : $\delta = \left(n + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$ avec $n \in \mathbb{Z}$

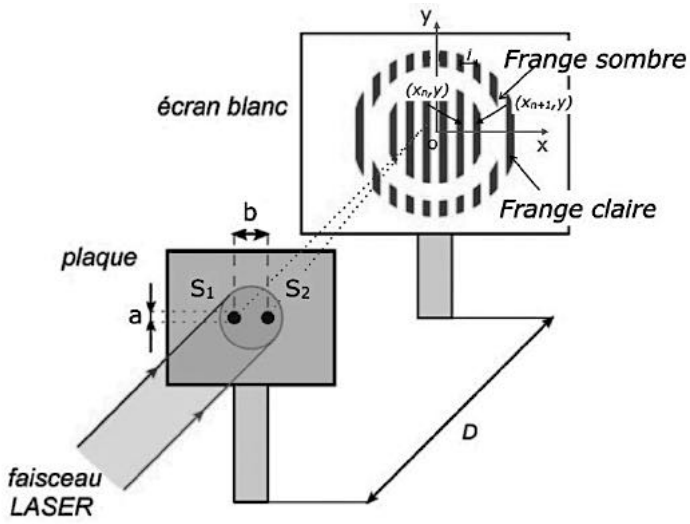
E. Conditions d'obtention de sources cohérentes – Dispositif des fentes ou de trous de Young

Pour obtenir deux sources *lumineuses cohérentes*, il faut les créer à partir d'une même source unique primaire. Ainsi, les deux sources sécondaires émettent des ondes synchrones et en phase.

C'est le principe qui est utilisé dans l'expériences des fentes de Young : deux fentes fines (ou trous) sont éclairées par une même source lumineuse. Chacune se comporte alors comme une source secondaire cohérente.

Dans le dispositif à double fente de Young, on place un écran à une distance D des fentes. Les ondes lumineuses issues de S_1 et de S_2 ne parcourent pas exactement le même chemin optique. Elles arrivent donc avec un certain déphasage au point M de l'écran. Ce qui produit une figure d'interférences : alternance régulière de franges brillantes et sombres sur l'écran.

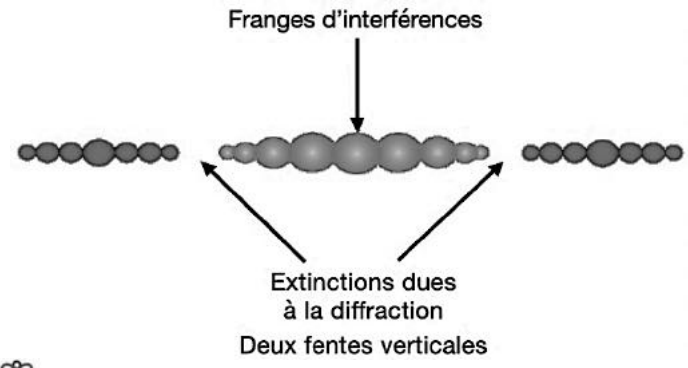


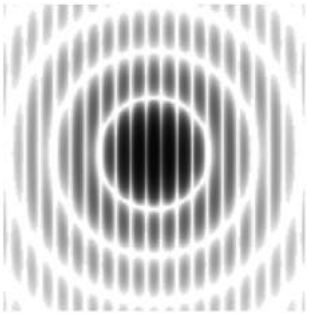


La distance entre les deux fentes (ou trous de Young) est notée b.

L'**interfrange**, notée i, correspond à la distance séparant les milieux de deux franges claires successives (ou de deux franges sombres).

Quelques exemples de figures d'interférences :




Avec deux trous

Pour mesurer expérimentalement l'interfrange i avec plus de précision, on mesure la largeur totale correspondant à plusieurs interfranges visibles, puis on divise cette largeur par le nombre d'interfranges mesurées.

F. Expression de l'interfrange

Application 18 – L'interfrange i ; de quoi dépend-elle ?

Regardez la vidéo suivante sur les interférences lumineuses réalisées avec des diodes laser de différentes couleurs : https://www.youtube.com/watch?v=9D8cPrEAGyc

Utilisez l'animation interactive suivante pour comprendre de quels paramètres dépendent les interférences lumineuses : http://physique.ostralo.net/diffraction_interference/

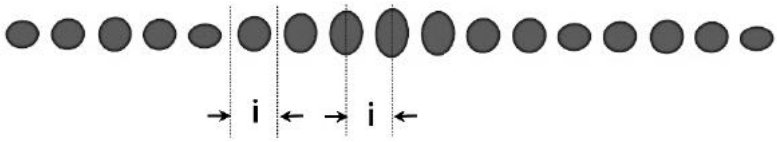
Observations à réaliser

- Observez la diffraction produite par une seule fente.
- Puis, avec deux fentes, observez la figure d'interférences obtenue successivement avec :
  - la diode laser rouge ($\lambda = 650$ nm)
  - la diode laser jaune ($\lambda = 580$ nm)
  - la diode laser verte ($\lambda = 520$ nm)

Faites varier la distance b entre les deux fentes et observez les modifications de la figure.

Analyse

La figure d'interférences est caractérisée par l'interfrange i, c'est-à-dire la distance entre deux franges brillantes (ou sombres) consécutives sur l'écran.



À partir de vos observations précédentes, choisissez l'expression correcte de l'interfrange i dans l'expérience des bifentes de Young parmi les six propositions suivantes :

ⓐ $i = \lambda \times \frac{b}{D}$ ⓑ $i = \lambda \times \frac{D}{b}$ ⓒ $i = \frac{b}{D}$ ⓓ $i = \frac{\lambda}{D}$ ⓔ $i = \frac{D}{b}$ ⓕ $i = \lambda \times D \times b$

On peut montrer que dans l'approximation des petits angles, l'interfrange *i* est donnée par la relation :

$$i = \frac{\lambda \times D}{b}$$

i : interfrange (m)

λ : la longueur d'onde de la lumière monocrhomatique utilisée (en m)

D : distance entre les fentes et l'écran (en m)

b : distance entre les deux fentes (en m)

Interprétation physique

- Plus la longueur d'onde λ est grande (lumière rouge, par exemple), plus les franges sont espacées.
- Plus la distance à l'écran D augmente, plus les franges s'écartent.
- À l'inverse, si les fentes sont plus rapprochées (b plus petit), l'interfrange augmente.

Il ne faut pas confondre l'interfrange et la longueur d'onde : $i \neq \lambda$.

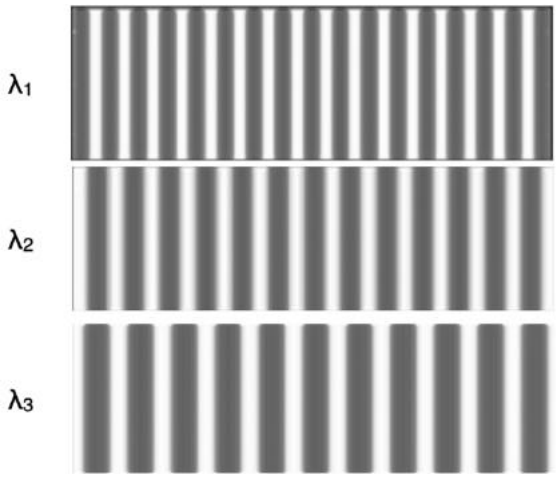
L'œil humain peut distinguer un interfrange lumineux de l'ordre du millimètre, voire du centimètre, alors qu'il est incapable de percevoir directement une longueur d'onde de la lumière visible, qui est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres (< 1 µm).

Cependant, l'interfrange dépend de la longueur d'onde.

Application 19 – Couleur et interfranges

Ci-contre sont présentées trois figures d'interférences obtenues en éclairant deux fentes à l'aide de faisceaux laser de couleurs différentes : rouge, vert et bleu.

Pour chaque figure, indiquez la couleur du laser utilisé



Application 20 – Étude du dispositif des fentes d'Young - positions des franges brillantes et sombres
Regarder ci-contre le schéma du dispositif de Young (vu de dessus).

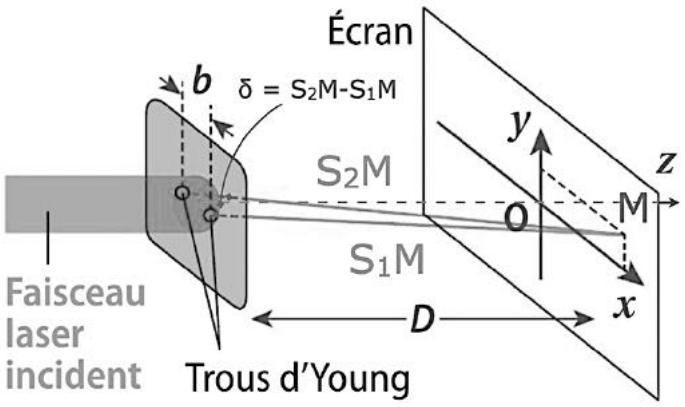
Les deux fentes S_1 et S_2 sont éclairées par un même faisceau laser, ce qui permet d'obtenir deux sources cohérentes.

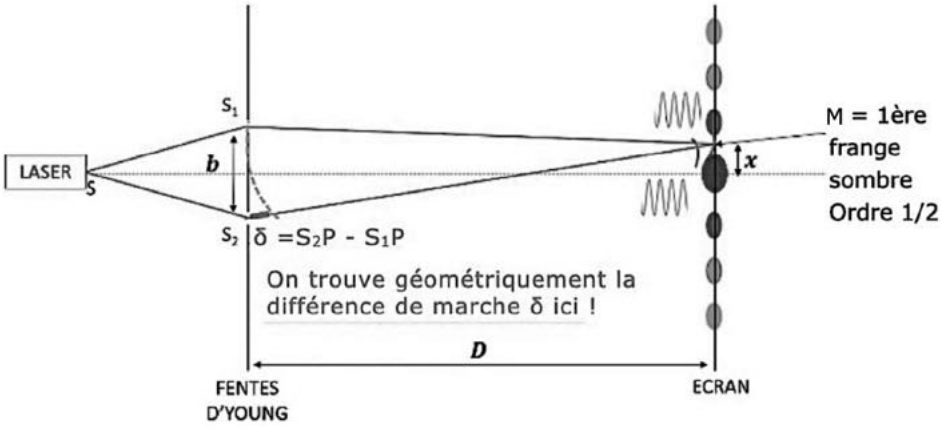
Les ondes issues de S_1 et S_2 se superposent sur l'écran en un point P et produisent une figure d'interférences : une alternance régulière de franges brillantes et franges sombres.

Notations : b : distance entre les fentes S_1 et S_2.
D : distance fentes- écran

La position du point P est repérée le long d'un axe horizontal Ox tracé sur l'écran.

L'origine O de cet axe correspond à la frange brillante centrale, située au milieu de la figure d'interférences et à égale distance des deux fentes.





1. Pourquoi la frange centrale est-elle brillante dans le dispositif des fentes de Young ? On pourra raisonner sur la différence de marche $\delta = S_2P - S_1P$.
2. Quelle est la condition sur δ pour que les deux ondes arrivent en phase au point P et donc d'avoir une frange brillante ?
3. Quelle est la condition sur δ pour que les deux ondes arrivent en opposition de phase au point P et donc d'avoir une frange sombre ?

Dans le dispositif de Young, pour un écran éloigné (D >>b) la différence de marche peut s'écrire $\delta \simeq \frac{b \times x}{D}$ ⓐ
(cette égalité n'est pas à savoir par cœur, elle vous sera donnée si vous en avez besoin)

4. Soit k ∈ Z et x_k la position de la $\boldsymbol{k-i\grave{e}me}$ frange brillante. En utilisant le résultat de la question 2 et la relation ⓐ donner la relation qui exprime x_k en fonction de k, λ ,b et D.
5. Soit k ∈ Z et $x_{k+1/2}$ la position de la $\boldsymbol{k+1-i\grave{e}me}$ frange sombre. En utilisant le résultat de la question 3 et la relation ⓐ donner la relation qui exprime $x_{k+1/2}$ en fonction de k, λ ,b et D.
6. En utilisant ces formules, où se situe la 1re frange brillante ? Et la 1re frange sombre ?

Détermination de l'interfrange.

7. On appelle interfrange *i* la distance deux franges brillantes (sombres) consécutives. Grâce aux résultats précédents, déterminer la relation donnait i en fonction de D, b et λ.
8. Quelle grandeur expérimentale faut-il augmenter pour agrandir les franges ?
9. Quelle couleur de lumière (rouge, verte, bleue) donnera l'interfrange le plus grand ?

G. *Interférence en lumière polychromatique*

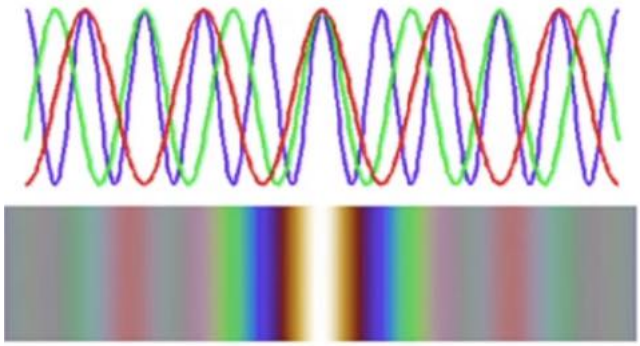
🌈 Interférences et lumière blanche

La lumière blanche est constituée d'une infinité de radiations monochromatiques, chacune correspondant à une couleur différente.

Chaque radiation produit sa propre figure d'interférences, mais les radiations de fréquences différentes n'interfèrent pas entre elles.

La figure observée est donc la superposition de toutes les figures d'interférences associées à ces radiations.

🎨 Conséquence : l'irisation



L'interfrange dépend de la longueur d'onde λ selon la relation : $i = \frac{\lambda D}{b}$

Ainsi, comme λ varie selon la couleur, les interfranges ne coïncident pas exactement : la figure devient colorée.

C'est le phénomène d'irisation.

🌿 Exemples d'irisations naturelles ou artificielles

Les taches d'huile, les CD/DVD, les bulles de savon ou les ailes d'insectes éclairées par une lumière blanche présentent des couleurs changeantes.

👉 Ces couleurs résultent d'interférences sur des couches minces : les ondes lumineuses réfléchies sur les parois internes et externes de la couche se superposent et interfèrent.







Plan de travail

QCM : hatier-clic.fr/pct473

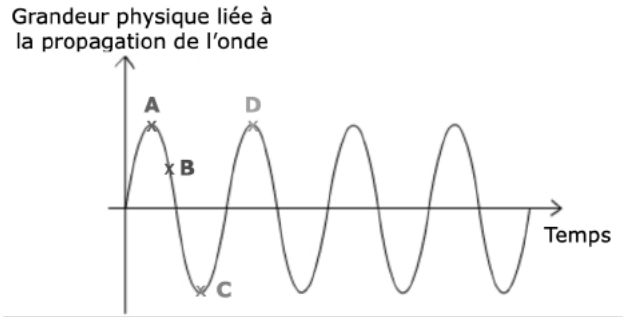
Exigences et capacités exigibles du Chapitre 6 : Caractériser les phénomènes ondulatoires	Exercices + TP	Exercices Hatier [1]
Utiliser les grandeurs caractéristiques de l'onde périodique : période, fréquence, longueur d'onde	Exercice 1	Révisions p.458 et 459
Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal. Atténuation acoustique (en dB)	Exercice 2	QCM p.473 12,13 et 14 58 p.482 65 p.484 41 p.479
Savoir caractériser le phénomène de diffraction. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.	TP1	QCM p.473 15,16 et 17 44 p.479 49 et 51 p.480 64 p.483
Savoir caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes. Prévoir les lieux d'interférences constructives et destructives dans le cas des fentes d'Young Établir l'expression de l'interfrange.	TP2 Exercice 4 Exercice 5	QCM p.473 18,19, 20 et 21 51 p.480 61 p.482 64 p.483 66 p.485 68 p.486
Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension. Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.	TP4 Exercice 3 Exercice 6	QCM p.473 22,23 et 24 52 p.480 56 p. 481 67 p.485

[1] Les exercices ne seront pas tous corrigés en classe, mais des corrections seront mises sur Google Classroom.

Exercice 1 : phase et déphasage et modélisation d'une onde périodique dans le temps

De manière générale, on peut modéliser une fonction périodique quelconque à partir de sommes de fonctions de sinus (ou de cosinus). C'est la décomposition en séries de Fourier.

1. Préciser par rapport au point A ci-contre les points en phase, en opposition de phase et en déphasage.



Sur votre calculatrice, définir le radian comme l'unité des angles. Tracer les fonctions $f(x) = 3\sin(x)$ puis $g(x) = 2\sin(2x)$

2. Quelles sont les amplitudes de ces fonctions ? Quelles sont les périodes de ces fonctions en fonction de π ?

Tracer les fonctions suivantes avec Geogebra (https://www.geogebra.org/)

- $f(x) = A.\sin(\omega.x)$
- $g(x) = A.\sin(\omega.x + \Phi)$ avec A, ω et Φ trois paramètres modifiables (curseurs dans Géogebra), x étant la abscisse.

3. Trouver les conditions sur Φ pour lesquelles f(x) et g(x) sont en phases.

Tracer la fonction $h(x) = f(x) + g(x)$

4. Trouver les valeurs de Φ pour lesquelles h est la fonction constante égale à zéro. Que peut-on dire de f et de g dans ces cas ?

On modélise une onde périodique dans le temps par une fonction sinusoïdale du temps t, et une onde périodique dans l'espace par une fonction sinusoïdale de la position x :

$$y(t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{T} \times t + \Phi\right) \qquad y(x) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \times x + \Phi'\right)$$

5. Montrer que la fonction y(t) est périodique de période T et que la fonction y(x) est périodique de période spatiale λ

Exercice 2 : Nos oreilles on y tient ! *Bac Polynésie 2022*

Le niveau d'intensité sonore est exprimé en décibels. L'échelle va de 0 à 120 dB. La limite de nocivité est située à 85 dB. Au-dessous, aucun risque auditif. Au-dessus, la nocivité augmente avec le niveau. On trouve des valeurs supérieures à 90 dB dans la vie professionnelle, les activités de loisirs (fêtes, sports mécaniques) et la musique.

On peut lire dans un guide d'information de la journée nationale de l'audition l'affirmation suivante : « vous êtes exposé à 85dB et plus si, dans une file de voiture, votre voisin entend votre autoradio toutes vitres fermées. »

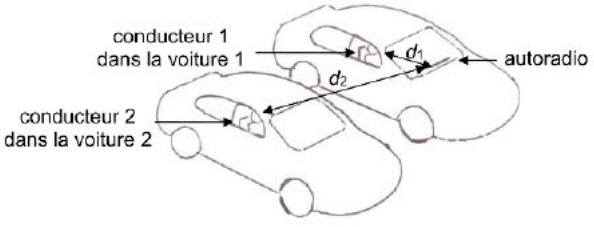
L'objectif de cet exercice est de vérifier l'affirmation du guide d'information.

Donnée : Le niveau d'intensité sonore L est lié à l'intensité sonore I par la relation : $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ avec I_0 l'intensité sonore de référence en watt par mètre carré, L en décibels et I en watt par mètre carré.

Étude du son perçu par les conducteurs de deux voitures ayant les fenêtres baissées.

Dans la voiture 1, le conducteur 1 allume son autoradio. L'oreille du conducteur 1 est située à une distance d_1 égale à 1,0 m de l'autoradio. Les fenêtres de la voiture sont baissées.

Dans la voiture 2, les fenêtres sont également baissées. L'oreille du conducteur 2 est située à une distance d_2 égale à 3,1 m de l'autoradio de la première voiture.



Dans cette première partie, on considérera que l'atténuation de l'onde sonore ne dépend que de la distance entre la source et le récepteur et que la source est ponctuelle.

Donnée : Dans le modèle de l'atténuation géométrique et pour une source ponctuelle, l'intensité sonore I perçue à une distance d de la source est reliée à la puissance sonore P de cette source par la relation :

$I = \frac{P}{4\pi d^2}$ avec P la puissance de l'onde sonore en watt et d la distance à la source en mètre.

1. Exprimer l'intensité sonore I_1 reçue par le conducteur 1 en fonction de la puissance sonore P et de d_1 puis exprimer l'intensité sonore I_2 reçue par le conducteur 2 en fonction de P et de d_2.

2. À l'aide des données, montrer que l'atténuation géométrique $A_{géo}$ du conducteur 1 au conducteur 2 en décibels peut s'exprimer sous la forme : $A_{géo} = 10 \times \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$

3. Vérifier que l'atténuation $A_{géo}$ est égale à 9,8 dB.

Dans la suite, la valeur de l'atténuation $A_{géo}$ sera arrondie à 10 dB.

En plaçant son smartphone près de son oreille et en utilisant une application sonomètre, le conducteur 1 mesure un niveau d'intensité sonore L_1 = (80±3) dB. Le conducteur 2 fait de même et mesure un niveau d'intensité sonore L_2 = (68±3) dB.

4. À l'aide des mesures précédentes, calculer la valeur expérimentale A_{mesure} de l'atténuation géométrique.

Données :
L'incertitude-type $u(A_{mesure})$ sur la grandeur A_{mesure} peut se calculer à partir de la relation :

$u(A_{mesure}) = \sqrt{\left(u(L_1)\right)^2 + \left(u(L_2)\right)^2}$ avec u(x) désigne l'incertitude-type associée à la grandeur x
Le z-score noté z, correspond à l'écart entre le résultat de la mesure x et la valeur de référence x_{ref} évalué en nombre d'incertitude-type.

$z = \frac{|x - x_{ref}|}{u(x)}$. Si le z-score z est inférieur à 2 alors x et x_{ref} sont considérés compatibles.

5. Calculer l'incertitude-type de l'atténuation A_{mesure}.

6. Comparer, en utilisant le z-score, l'atténuation $A_{géo}$ et l'atténuation mesurée A_{mesure} et conclure sur la compatibilité de ces deux valeurs.

Étude du son perçu par les conducteurs de deux voitures ayant les fenêtres fermées.

Dans cette partie, les deux conducteurs ferment entièrement leurs fenêtres et le conducteur 1 monte le volume de l'autoradio jusqu'à ce qu'il soit audible par le conducteur 2.

7. À l'atténuation géométrique $A_{géo}$ s'ajoute l'atténuation due à la fermeture des deux fenêtres $A_{fenêtres}$. Choisir la nature de cette nouvelle atténuation parmi les deux propositions suivantes :
- atténuation géométrique
- atténuation par absorption

Données :
$A_{fenêtres}$ = 18 dB (pour les deux fenêtres)
Le conducteur 2 mesure maintenant un niveau d'intensité sonore L_2' égal à 63 dB.

8. Déterminer si le conducteur 1 est exposé à un niveau d'intensité sonore supérieur à la limite de nocivité.

Exercice 3 : Effet Doppler et astrophysique *Bac Polynésie 2013*

L'effet Doppler constitue un moyen d'investigation utilisé en astrophysique Il permet de déterminer la vitesse des astres à partir de l'analyse spectrale de la lumière que ceux-ci émettent.

Cet exercice s'intéresse à deux applications distinctes, à savoir le modèle d'Univers en expansion et la détection d'une étoile double « spectroscopique ».

Les documents utiles à la résolution sont rassemblés en fin d'exercice.

Donnée : 1 Å = 0,1 nm

1. Preuve de l'expansion de l'Univers

1.1. En utilisant le document 3, déterminer la longueur d'onde médiane du doublet de Ca^{2+} dans le spectre de la galaxie nommée : NGC 691.

Sachant que la longueur d'onde médiane λ_0 de ce doublet mesurée sur Terre pour une source au repos est de 5268 Å, calculer le « redshift » z caractérisant le décalage vers le rouge de cette galaxie, défini dans le document 1.

1.2. Calculer la vitesse d'éloignement de la galaxie NGC 691 par rapport à la Terre.

1.3. À l'aide des documents 1 et 2, établir dans le cas non relativiste, la relation entre la vitesse d'éloignement V de la galaxie et sa distance d à la Terre, montrant que V est proportionnelle à d.

1.4. À partir des valeurs du nombre z données dans le document 2, montrer que l'expression utilisée pour calculer la vitesse d'éloignement des galaxies donnée dans le document 1 n'est pas applicable dans tous les cas.

2. Détection d'une étoile double « spectroscopique ».

On appelle « étoile double » un système stellaire composé de deux étoiles proches en orbite autour du même point (ce point étant le centre d'inertie G du système). Une étoile double « spectroscopique » est constituée de deux astres trop proches pour être séparés par un télescope optique et ne peut être détectée que par l'étude de son spectre à haute résolution. Le mouvement des deux étoiles provoque en effet un léger déplacement des raies d'absorption du spectre par effet Doppler.

Dans les questions suivantes, on suppose que les deux étoiles A et B décrivent des orbites circulaires de même rayon R, avec la même vitesse $V = V_A = V_B$.

La période de rotation commune aux deux étoiles A et B est notée T : c'est la période de l'étoile double.

2.1. Expliquer pourquoi, dans la situation décrite sur le document 4, on $\lambda_A > \lambda_B$.

2.2. Sachant que l'effet Doppler ne se manifeste pas lorsque le vecteur vitesse de la source est perpendiculaire à la direction de visée, compléter en justifiant le tableau de l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**. Schématiser sans souci d'échelle le spectre correspondant à chaque configuration et montrer que l'évolution temporelle de ces spectres est périodique de période T/2.

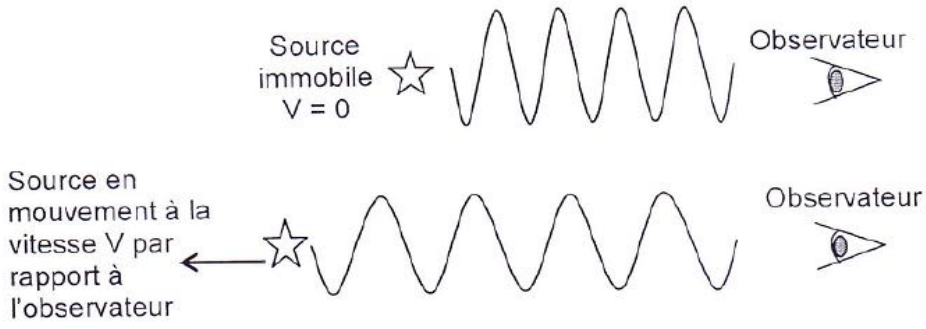
2.3. En utilisant les spectres du document 5 qui montrent l'évolution temporelle de la position de la raie Hα dans le spectre de l'étoile double HD 80715, vérifier que la période T de celle-ci est voisine de 3,8 jours.

Documents :

Document 1 : principe de l'effet Doppler

On note λ_0 la longueur d'onde de référence de la raie étudiée dans le spectre (source immobile par rapport à l'observateur) et λ la longueur d'onde de la radiation émise par la source en mouvement.

Lorsqu'une étoile s'éloigne de la Terre, on observe un décalage vers les grandes longueurs d'onde appelé « redshift » et caractérisé par le nombre $z = \dfrac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$



La formule de Doppler donne la vitesse d'éloignement V de la source lumineuse par rapport à l'observateur terrestre dans le cas non relativiste : $V = c\,\dfrac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$

c est la célérité de la lumière dans le vide ($c = 2{,}99792 \times 10^8$ m.s^{-1})

Document 2 : Décalage vers le rouge

En 1930, Edwin HUBBLE avait constaté expérimentalement que plus les galaxies étaient lointaines, plus leur spectre présentait un décalage vers le rouge important.

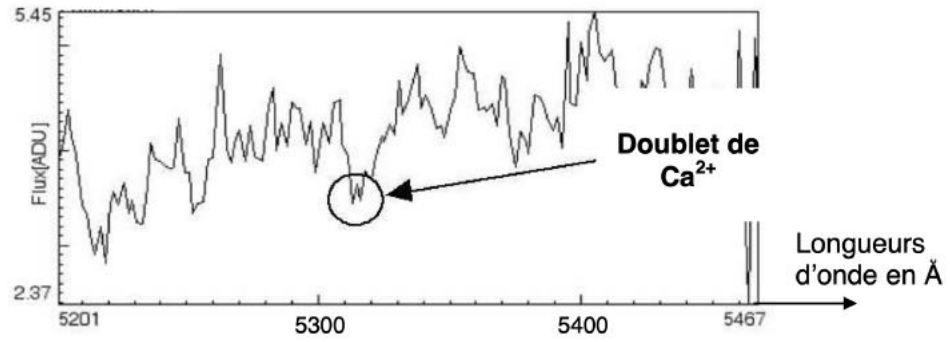
Le « décalage vers le rouge », qui sera appelé « redshift » apparaît, quand il est petit, comme proportionnel à la distance : $z = \frac{H_0 d}{c}$ où H_0 est une constante appelée constante de Hubble.

Ce décalage est traditionnellement interprété comme étant dû à la vitesse d'éloignement des galaxies. Cette interprétation, si elle est vraie pour les « redshifts » petits est en fait fondamentalement erronée dans une perspective de relativité générale. Les « redshifts » observés vont d'une fraction de l'unité pour la plupart des galaxies, à 4 ou 5 pour les objets plus lointains, quasars, ou certaines autres galaxies.

D'après « Cosmologie : Des fondements théoriques aux observations »

Francis Bernardeau (CNRS Éditions – EDP sciences)

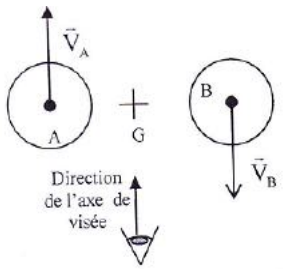
Document 3 : Extrait du spectre NGC 691



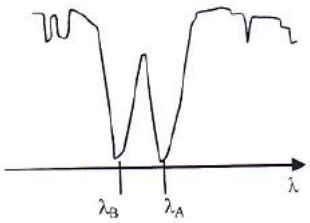
Source : observatoire de Haute Provence, logiciel libre SalsaJ.

Document 4 : Effet du mouvement des deux composantes d'une étoile double sur une raie d'absorption si l'axe reliant les deux étoiles est perpendiculaire à l'axe de visée.

a) Configuration :

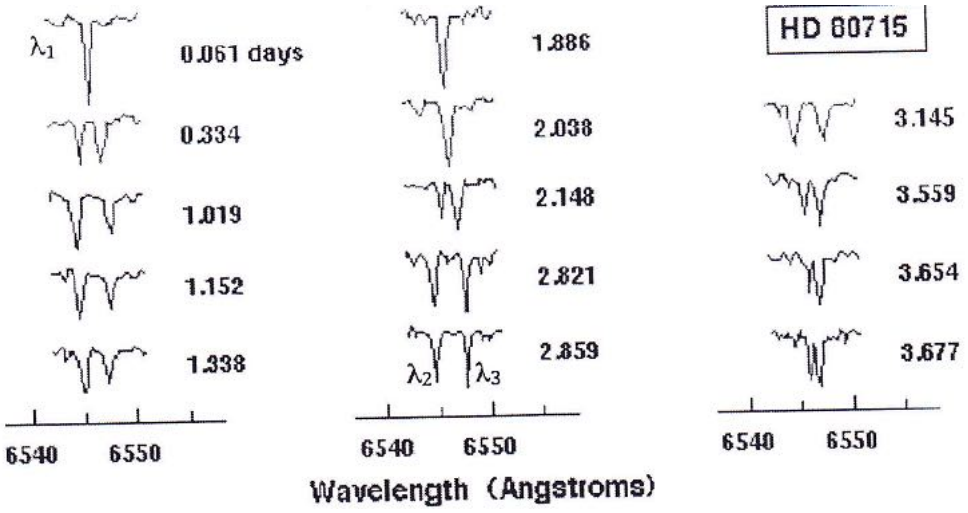


b) Spectre observé (extrait) :



On note : λ_A la longueur d'onde de la raie provenant du spectre de l'étoile A et λ_B la longueur d'onde de la raie provenant du spectre de l'étoile B.

Document 5 : Évolution temporelle de la position de la raie Hα dans le spectre de l'étoile HD 80715.

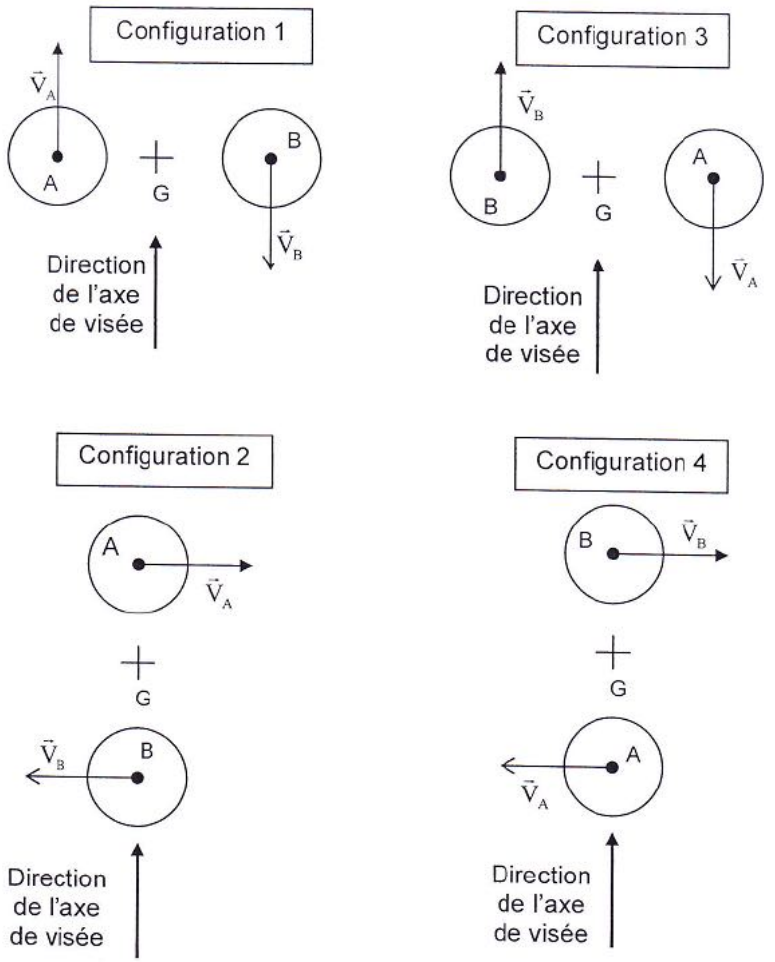


ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

Question 2.2.

Pour chaque proposition, indiquer la (les) configurations correcte(s).

Relation entre λ_A et λ_B	$\lambda_A = \lambda_B$	$\lambda_A > \lambda_B$	$\lambda_A < \lambda_B$
Configuration(s)			



Sur ces schémas, l'observateur n'est pas représenté car il est à une très grande distance.

Exercice 4 : Camouflage optique du papillon *(Antilles 2018 exo 1)*

L'iridescence est la propriété de certaines surfaces qui semblent changer de couleur selon l'angle de vue et d'éclairage. Elle est bien visible sur les ailes de mouches, de libellules et certains papillons. Ce phénomène provient d'une couche mince recouvrant ces ailes et produisant des couleurs interférentielles. Dans le cas des papillons, les ailes contiennent des écailles de fond et des écailles de recouvrement, disposées à la manière des tuiles d'un toit. La structure de ces écailles et les pigments qu'elles contiennent jouent un rôle dans la couleur observée. (…)

D'après un site internet (cnrs.fr)

Le phénomène qui permet à ces papillons de se protéger des prédateurs est modélisé de façon simplifiée. Dans ce modèle élémentaire, schématisé sur la figure 4, on considère que :

- les écailles de l'aile de papillon sont assimilables à des couches minces à face parallèles d'épaisseur constante e ;
- les ondes issues des chemins ① et ② interfèrent au niveau de la rétine de l'observateur ;
- l'aile du papillon est éclairée par de la lumière.

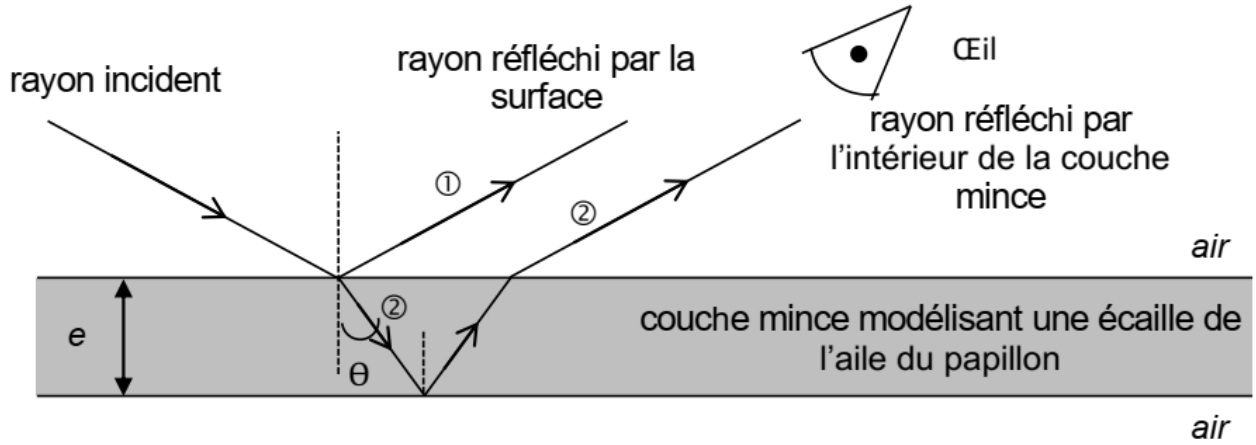


Schéma du trajet d'un rayon lumineux arrivant sur une écaille de l'aile de papillon.

Données :

- la vitesse de la lumière dans l'air est notée c et sa valeur est supposée connue.
- épaisseur des couches minces modélisant les écailles de l'aile du papillon : e = 100 nm ;
- indice optique des couches minces principalement composée de chitine : n = 1,5 ; on admet que cet indice ne dépend pas de la longueur d'onde.
- une onde lumineuse monochromatique est caractérisée par une période temporelle T et une longueur d'onde λ ;
- domaines de longueurs d'ondes de la lumière visible :

Couleur	Violet	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Domaine de longueurs d'ondes (nm)	380-446	446-520	520-565	565-590	590-625	625-780

On note τ le retard de l'onde lumineuse qui a suivi le trajet ② par rapport à l'onde qui a suivi le trajet ①.

1- Pour une onde lumineuse monochromatique de période temporelle T, justifier qu'il y a des interférences constructives pour $\tau = k \times T$ et interférences destructives pour $\tau = (k + \frac{1}{2}) \times T$ où k est un nombre entier.

Lorsque la lumière blanche arrive perpendiculairement à la surface de l'aile, le retard τ peut s'écrire :

$$\tau = \frac{2.n.e}{c} + \frac{T}{2}$$

2 - Quelles ondes monochromatiques peuvent conduire à des interférences constructives ?

3 - En déduire la couleur qui sera principalement perçue par l'observateur.

Lorsque la lumière blanche n'arrive pas perpendiculairement à la surface de l'aile, le retard a pour expression :

$$\tau = \frac{2.n.e.\cos(\theta)}{c} + \frac{T}{2}$$

4- Expliquer pourquoi la couleur de l'aile du papillon perçue par l'observateur sera différente s'il la regarde sous un autre angle.

Exercice 5 : Etude d'un films de savon *(Métropole Sujet 2 2021)*

Le phénomène d'interférences peut être utilisé pour déterminer l'épaisseur d'un matériau transparent. Dans cet exercice, l'objectif est de déterminer l'épaisseur d'un film de savon en réalisant une expérience simple.

Un cadre de forme rectangulaire est plongé dans de l'eau savonneuse pour former un film de savon à l'intérieur du cadre. L'épaisseur du film n'est pas la même partout : elle est plus importante en bas du dispositif du fait de l'action de la gravité. On éclaire le film de savon avec de la lumière blanche, et sous un angle approprié, on observe une figure d'interférences.

Le rayon 1 arrive sur le film de savon. La lumière est en partie réfléchie (rayon 2) et elle pénètre en partie dans le film de savon. Le rayon issu de la réflexion sur l'autre côté du film en ressort ensuite (rayon 3) conformément au schéma de la figure 2. Les rayons lumineux 2 et 3 interfèrent alors. Ces interférences sont visibles sur le film de savon.

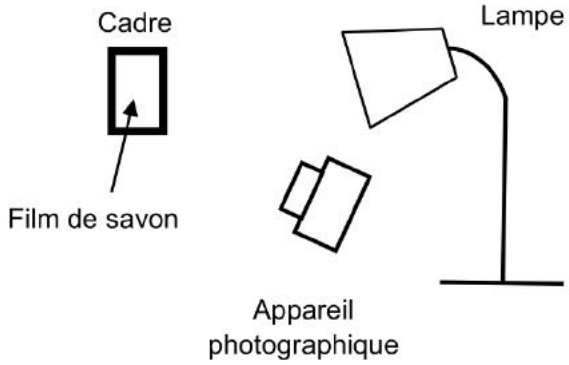


Figure 1. Schéma du montage expérimental

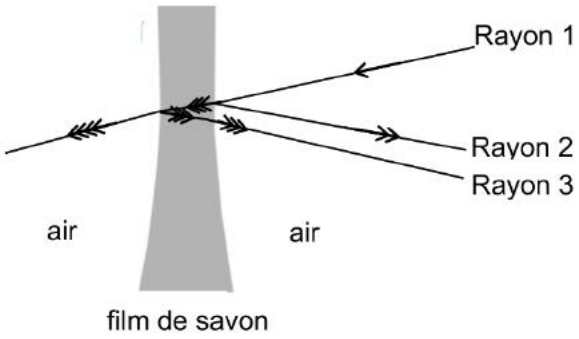


Figure 2. Coupe du film de savon avec la représentation du trajet de la lumière au niveau du film

Données :

- la valeur de la célérité c de la lumière dans le vide et dans l'air est supposée connue du candidat ;
- la valeur de l'indice de réfraction à l'intérieur du film de savon est n = 1,34 pour toutes les longueurs d'onde.

1. Le phénomène d'interférences

Le film de savon éclairé en lumière blanche est photographié. L'image est traitée par un logiciel qui permet de sélectionner une couleur correspondant à la longueur d'onde λ dans l'air égale à 600 nm. Le résultat est présenté en figure 3.

1.1. En utilisant la figure 3, expliquer comment distinguer les zones où les interférences sont constructives de celles où les interférences sont destructives.

1.2. Donner qualitativement la condition d'interférences constructives et celle d'interférences destructives.



Figure 3. Interférences sur le film de savon

1.3. Sur la figure 4, on représente le film de savon dans le cas où la lumière arrive perpendiculairement à sa surface. Au voisinage du point M, on considère que les deux faces du film de savon sont parallèles et que l'épaisseur du film *e* est égale à 900 nm.

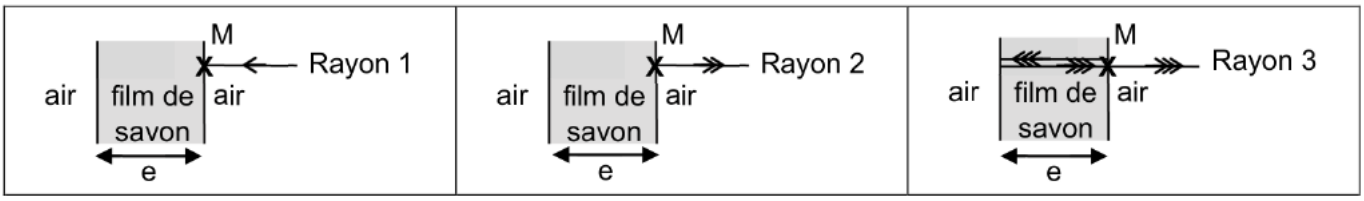


Figure 4. Représentation du trajet des rayons 1, 2 et 3 tels que définis en introduction

Dans les conditions d'éclairage et d'épaisseur de film précédentes, on admet que la différence de chemin optique δ(M) au point M entre les rayons 3 et 2 a pour expression :

$$\delta(\mathrm{M}) = 2\,n \cdot e - \frac{\lambda}{2}$$

Déterminer à l'aide d'un calcul si les interférences au point M sont destructives ou constructives.

2. Comparaison du phénomène d'interférences suivant la longueur d'onde étudiée

La photo de l'expérience est traitée à l'aide d'un logiciel pour réaliser l'étude du phénomène en lumière bleue (λ_{bleu} = 458 nm) et en lumière rouge-orangée (λ_{rouge} = 600 nm).

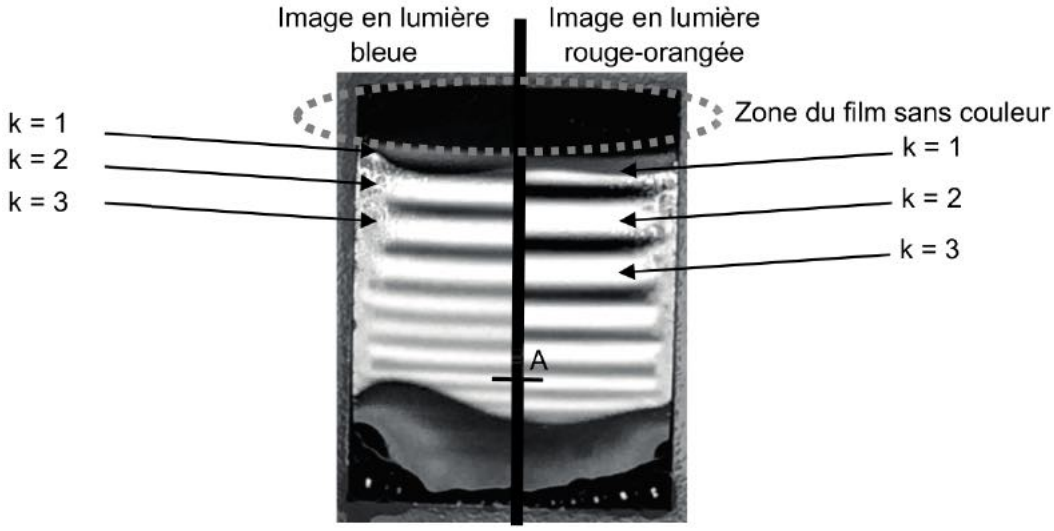


Figure 5. Montage photo des résultats des deux expériences

En raison des phénomènes de réflexion des rayons, les interférences constructives apparaissent pour différentes épaisseurs du film de savon.

2.1. Montrer que les épaisseurs correspondant à des interférences constructives sont données par la relation suivante :

$$e_k = \left(\frac{2\,\mathrm{k}+1}{4}\right) \times \frac{\lambda}{n}$$

avec n l'indice de réfraction du milieu, e_k l'épaisseur du film, k un nombre entier avec k ≥ 0 et λ la longueur d'onde dans l'air sélectionnée par le traitement de l'image.

2.2. Calculer l'épaisseur minimale pour que des interférences constructives en lumière bleue apparaissent.

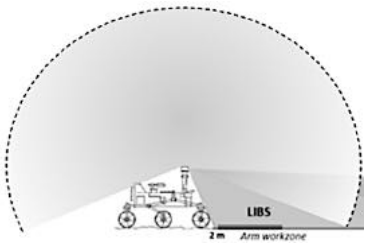
2.3. La zone sans couleur de la figure 5 en haut du support correspond à une épaisseur de film très faible. On obtient alors des interférences destructives. On observe qu'au cours du temps la surface de cette zone s'étend vers le bas. Proposer une explication.

2.4. Sur la photo de la figure 5, au niveau du point A, on observe des interférences constructives à la fois en lumière bleue et en lumière rouge-orangée. Déterminer l'épaisseur du film de savon au point A afin de rendre compte de ces observations.

Exercice 6 : Observation de la surface de Mars avec SuperCam *(inspiration : Polynésie Septembre 2019)*

SuperCam est l'un des sept instruments scientifiques équipant l'astromobile américain Perseverance qui depuis début 2021 explore la surface de la planète Mars. L'objectif principal de cette mission est d'analyser chimiquement et physiquement le sol de Mars. SuperCam comporte notamment la technique d'analyse spectroscopique induite par ablation laser (LIBS) et un microphone.

Le laser de puissance tire sur une cible au sol, ce qui provoque la fusion de la matière en surface et l'apparition d'un plasma que l'on analyse à distance en spectroscopie UV-visible. Le microphone enregistre le son de claquage des étincelles des plasmas produits par le laser qui permettent d'en déduire différents paramètres physiques (dureté, densité) venant ainsi améliorer l'analyse des spectres LIBS. Ces sons, sont audibles par le microphone jusqu'à une distance de 4 mètres.

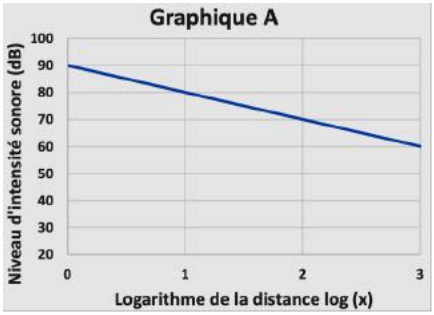


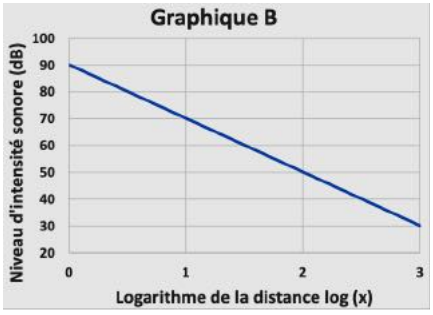
Données :

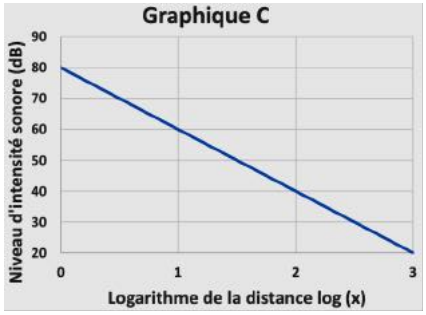
- *Dans le modèle de l'atténuation géométrique et pour une source ponctuelle, l'intensité sonore I perçue à une distance x de la source est reliée à la puissance sonore P de cette source par la relation :* $\mathrm{I} = \frac{\mathrm{P}}{4\pi.\mathrm{x}^2}$
- $\mathrm{L} = 10 \times \log\left(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I}_0}\right)$ avec $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W.m^{-2}$, *intensité sonore de référence.*
- *La puissance sonore du claquage des étincelles vaut* $13\ mW$.

1 - Dans le modèle de l'atténuation géométrique, exprimer l'expression littérale du niveau sonore *L* sous la forme : $\mathrm{L} = \mathrm{a} + \mathrm{b} \times \log(\mathrm{x})$. Il faudra expliciter les expressions de a et b.

2 - Déterminer parmi les propositions graphiques ci-dessous celle qui correspond à la représentation graphique de l'expression littérale précédente. Justifier.







3 - Calculer le niveau d'intensité sonore à une distance de 4,0 m.

Données :

- *Caractéristiques du vent martien* : le vent souffle en moyenne entre 3,5 $m.s^{-1}$ (soit un son de l'ordre de 53 dB) et 10 $m.s^{-1}$ (soit un son de l'ordre de 74 dB).
- *Détectabilité d'un son sur Mars par le microphone de SuperCam* : pour que le microphone de SuperCam puisse détecter le son de claquage malgré le bruit du vent martien, il est nécessaire que le niveau d'intensité sonore du son soit supérieur de 10 dB à celui du bruit du vent.
- *Dans le cas de la propagation d'un son sur Mars, il faut aussi tenir compte de l'absorption due à l'atmosphère martienne. L'atténuation par absorption atmosphérique A (en dB) est donnée par la relation :*

$$A = \frac{-20 \times \beta}{ln\ (10)}.x - 12{,}2$$

Où x est la distance à la source sonore et β le coefficient d'absorption atmosphérique pris égal à $7{,}5.10^{-2}\ dB.m^{-1}$.

4 - Justifier que les sons de claquage des étincelles ne sont pas audibles par le microphone de Supercam au-delà d'une distance de 4,0 m.