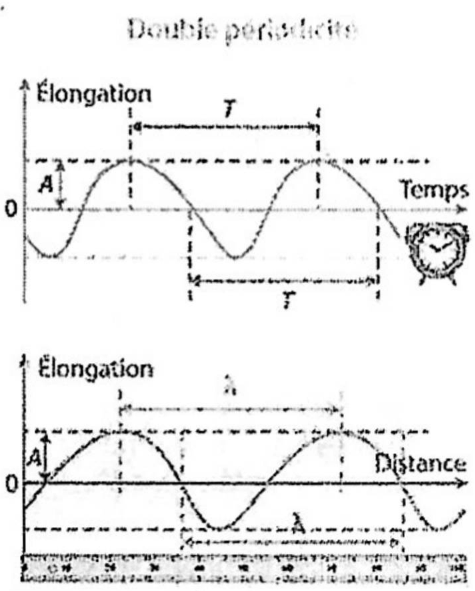
Chapitre 2 : Les phénomènes ondulatoires

Prérequis

Caractéristiques des ondes



Période T (période temporelle) : Plus petite durée au bout de laquelle la perturbation se répète en un point donné du milieu matériel.

Longueur d'onde λ (période spatiale) : Distance parcourue par l'onde pendant la durée T.

intensité sonore *I* : Puissance sonore par unité de surface, exprimée en $W.m^{-2}$

Niveau d'intensité sonore L : Exprimé en décibel (dB) selon une échelle logarithmique.

Fréquence *f*
Nombre de répétitions de la perturbation par seconde.
f en Hz → $f = \frac{1}{T}$ ← *T* en s

Relation entre période *T*, longueur d'onde λ et célérité *v*
v en $m.s^{-1}$ → $v = \frac{\lambda}{T}$ ← λ en m ; ← *T* en s

Test éclair

Indiquer la bonne réponse	A	B	C
1. La fréquence f, la longueur d'onde λ et la célérité v d'une onde sont liées par la relation :	$f = \frac{\lambda}{v}$	$f = \lambda \times v$	$f = \frac{v}{\lambda}$
2. Une onde périodique, de longueur d'onde 30 cm et se propageant dans l'air avec une célérité de 345 $m.s^{-1}$, a une fréquence de l'ordre de :	10^1 Hz	10^2 Hz	10^3 Hz
3. L'intensité sonore I est exprimée en $W.m^{-2}$. Pour une puissance sonore P répartie sur une surface S, I a pour expression :	$I = \frac{P}{S}$	$I = \frac{S}{P}$	$I = P \times S$

Réponses : 1 C ; 2 C ; 3 A

Eléments de programme à maitriser

Savoirs :

- Connaitre la différence entre intensité sonore, intensité sonore de référence et niveau d'intensité sonore.
- d'observation et caractéristiques du phénomène de diffraction d'une onde.
- Connaitre la relation $\theta = \frac{\lambda}{a}$
- Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes (constructives et destructives) et citer les conséquences concrètes.
- Connaitre le phénomène de l'effet Doppler.

Savoir-faire

- Exploiter $L = 10\ log\frac{I}{I_o}$ pour déterminer L ou I.
- Schématiser le phénomène de diffraction.
- Établir et exploiter la relation entre θ et les grandeurs caractéristiques de la diffraction.
- Établir les conditions d'interférences constructives et destructives à partir de la différence de marche.
- Établir et exploiter la relation d'interfrange $i = \frac{\lambda.D}{e}$
- Établir et exploiter l'expression du décalage Doppler dans des cas particuliers.
- Déterminer une vitesse grâce au décalage Doppler.

Capacité expérimentale pour ECE

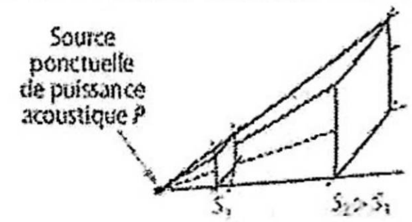
- Mesurer un niveau d'intensité sonore.
- Mettre en œuvre des dispositifs permettant d'étudier les phénomènes de diffraction et d'interférences.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation de sources lumineuses.

I) Propriétés des ondes sonores

L'intensité sonore I est la puissance reçue par unité de surface : elle s'exprime donc en watts par mètre carré

$$I = \frac{P}{S}$$	I Intensité sonore en $W.m^{-2}$ P Puissance en W S Surface en m^2

Le seuil d'audibilité de l'oreille humaine est 10^{-12} $W.m^{-2}$ à la fréquence de 1,0 kHz alors que le seuil de douleur est d'environ 25 $W.m^{-2}$. La sensation auditive dépend donc de l'intensité sonore mais ne lui est pas proportionnelle : si deux sources génèrent deux sons d'intensité I, la sensation auditive ne sera pas le double d'une source seule.



$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0}\right)$$	L Niveau d'intensité sonore en dB (décibel) I Intensité sonore en $W.m^{-2}$ I_0 Intensité sonore de référence :

Le niveau sonore se mesure directement avec un sonomètre.

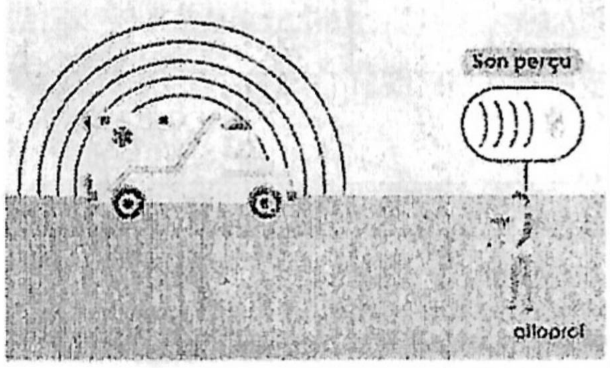
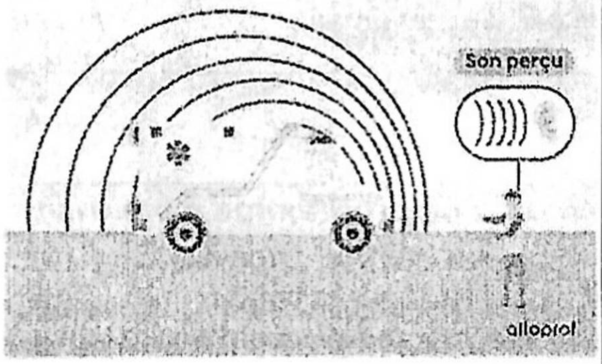
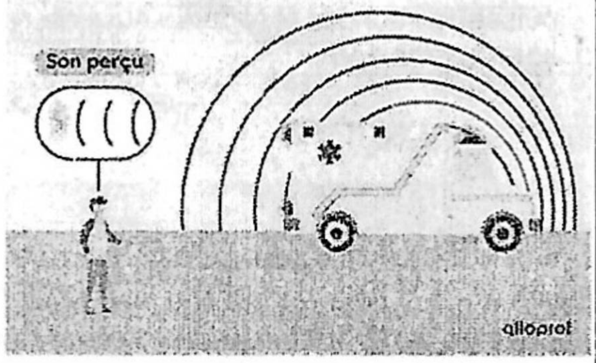
Lorsqu'une onde sonore se propage, il y a un phénomène d'atténuation. Celle-ci peut avoir deux origines différentes :
L'atténuation géométrique : c'est la diminution du niveau d'intensité sonore lorsque la distance avec la source sonore augmente.
L'atténuation par absorption : c'est la diminution du niveau d'intensité sonore lorsque l'onde sonore traverse un matériau.

L'atténuation A d'un son dont le niveau d'intensité sonore passe de L à L' a pour expression :

$$A = L - L' = 10 \log \left(\frac{I}{I'}\right)$$	A Atténuation en dB L, L' Niveau d'intensité sonore en dB (décibel) I, I' Intensité sonore en $W.m^{-2}$

II) L'effet Doppler

L'effet Doppler se manifeste par un changement de fréquence de l'onde perçue par un observateur lorsque celui-ci et la source sont en mouvement relatifs :
- la fréquence perçue augmente s'ils se rapprochent
- la fréquence perçue diminue s'ils s'éloignent

		
La perception du son lorsque la source et l'observateur sont au repos	La perception du son lorsque la source s'approche de l'observateur au repos	La perception du son lorsque la source s'éloigne de l'observateur au repos
Le véhicule est à l'arrêt : L'observateur perçoit un son d'une fréquence $f = f_e$	La voiture s'approche de l'observateur : Les fronts d'onde sont « resserrés ». La fréquence perçue est supérieure à celle émise : $f_R > f_e$. **Le son est perçu plus aigu.**	La voiture s'éloigne de l'observateur : Les fronts d'onde sont « plus écartés ». La fréquence perçue est inférieure à celle émise : $f_R < f_e$. **Le son est perçu plus grave.**

Le décalage Doppler représente la différence de fréquence entre la fréquence perçue par l'observateur et la fréquence émise par le véhicule à l'arrêt. $\Delta f = f_R - f_e$

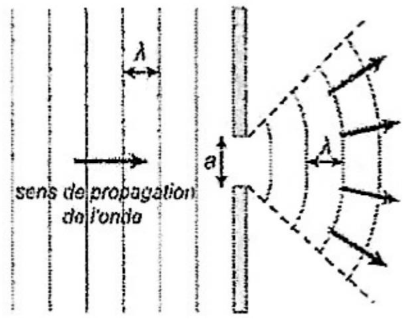
Selon la démonstration notée en classe, on retient l'expression suivante : $\boxed{f_R = f_e \times \left(\frac{v_{onde}}{v_{onde} - v}\right)}$

Si la vitesse de la source est très faible devant la célérité des ondes alors $(v_{onde} - v) \approx v_{onde}$: $\boxed{\Delta f = \frac{f_e \cdot v}{v_{onde}}}$

L'effet Doppler a beaucoup d'applications, c'est notamment une méthode de mesure de vitesses.
- Dans les radars automatiques pour détecter les excès de vitesse
- En médecine, pour mesurer le débit sanguin
- En astrophysique, pour déterminer la vitesse radiale d'une étoile. On utilise alors l'effet Doppler-Fizeau (avec la lumière) : on compare les longueurs d'onde de son spectre d'absorption à celles d'un spectre de référence et on mesure les écarts observés. (Comme l'univers est en expansion, il y a un décalage vers le rouge des radiations lumineuses : redshift).

Décalage vers le rouge (*redshift*) des raies entre le spectre obtenu pour une source et un observateur immobiles (a) et celui obtenu pour un éloignement entre la source et l'observateur (b)

III) Diffraction des ondes

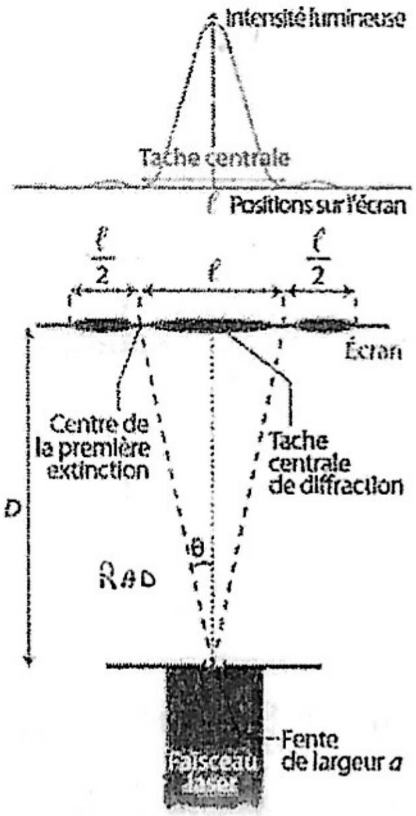


La propagation d'une onde sinusoïdale dans un milieu uniforme est **rectiligne**. Cependant, elle peut être modifiée au voisinage d'un objet de petite dimension : lorsqu'une onde rencontre un obstacle ou une ouverture de petite dimension, sa direction de propagation est modifiée :

C'est le **phénomène de diffraction**.

La diffraction a lieu **sans** changement de fréquence de l'onde et c'est un phénomène caractéristique d'un comportement ondulatoire.

Animations utiles pour se souvenir du phénomène :
https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/cuve_ondes/diffraction.php
https://physique.ostralo.net/diffraction_interference/



Le phénomène de diffraction dépend de la longueur d'onde λ de l'onde incidente et de la dimension a de l'obstacle. Il est d'autant plus marqué que a est du même ordre de grandeur ou inférieur à λ.

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$	θ angle de diffraction (ouverture angulaire) en rad λ longueur d'onde en m a dimension du fil/fente en m

Utiliser le phénomène de diffraction permet, par une mesure de la largeur de la tâche centrale, :
- d'avoir accès à la longueur d'onde du rayonnement
- d'avoir accès à la largeur de la fente utilisée

Dans le cas d'une ouverture circulaire de diamètre d ; θ vérifie l'expression littérale suivante :

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

$\tan(\theta) = \frac{\lambda}{a}$ $\qquad \theta = \frac{L}{2D}$

$L = k \times \frac{1}{a}$

$2D \times \lambda$ $\qquad \frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$

IV) Interférences de deux ondes

1. Conditions d'observation

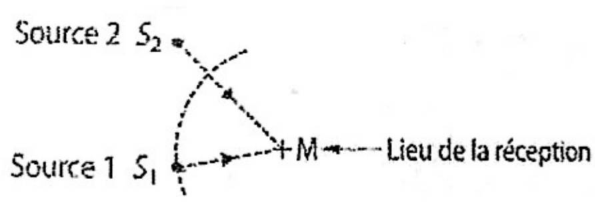
Deux sources vibrent à une fréquence f. Les ondes progressives périodiques circulaires émises par chaque source se superposent et des zones d'amplitude minimale (zones sombres) ou maximale (zones claires) apparaissent : ces zones sont des **franges d'interférences**.

Il y a interférence quand deux ondes de même fréquence se superposent en tout point d'un milieu.

Pour observer des interférences, il faut que les deux ondes respectent certaines conditions :
- Avoir la **même** longueur d'onde ou **fréquence**.
- Avoir un **déphasage constant** l'une par rapport à l'autre.

On parle d'ondes cohérentes.

2. Interférences constructives et destructives.



Les deux ondes qui interfèrent sont émises simultanément par chacune des sources S_1 et S_2, mais doivent parcourir des distances S_1M et S_2M différentes pour parvenir à un endroit donné du milieu. Cette différence de distance est appelée différence de marche, elle est notée δ.

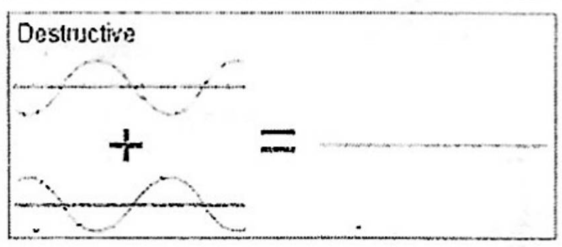
$$\delta = S_2M - S_1M$$

Interférences constructives :

Les deux ondes doivent arriver en phase au point M. La différence de marche est par conséquent un nombre entier relatif de la longueur d'onde du milieu.

$$\delta = k \times \lambda \; avec \; k \in \mathbb{Z}$$

Interférences destructives :

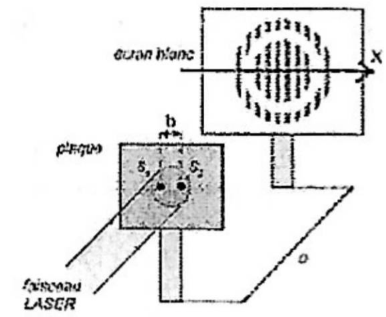


Les deux ondes doivent arriver en opposition de phase au point M. La différence de distance δ est par conséquent un nombre impair de la demi-longueur d'onde du milieu.

$$\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda = (2k+1) \times \frac{\lambda}{2} \; avec \; k \in \mathbb{Z}$$

En **tout autre point** du milieu, on observe des vibrations **d'amplitudes intermédiaires**.

3. Interférences de deux ondes lumineuses monochromatiques.

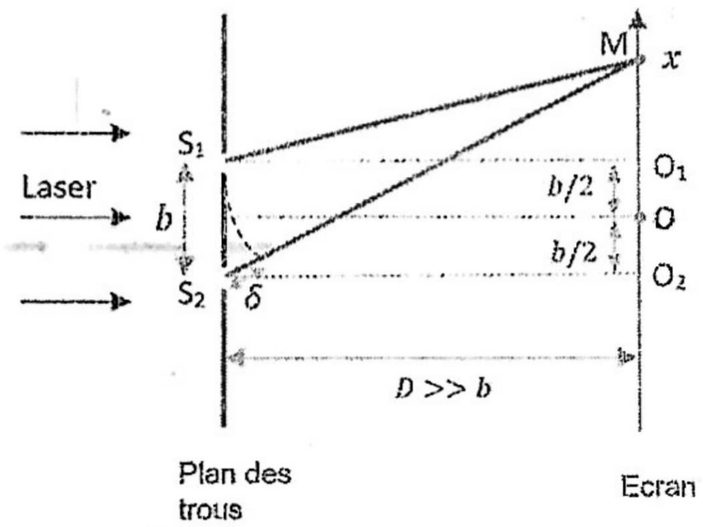


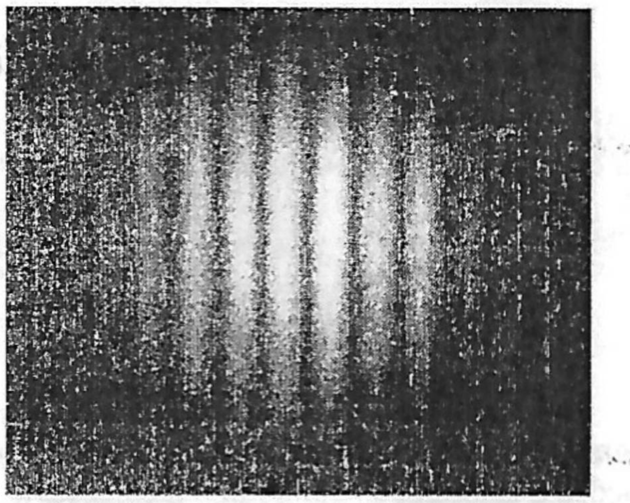
Pour observer une figure d'interférences stable avec de la lumière, on réalise **l'expérience d'Young.** Pour cela, il faut éclairer deux trous (ou deux fentes) avec une unique source lumineuse monochromatique. Ces trous, dits sources secondaires, émettent alors des ondes de même fréquence et de déphasage constant ; ils jouent le rôle de sources ponctuelles en phase.

On définit la différence de chemin optique notée $\delta_{optique}$ entre 2 ondes par :

$$\Delta L = \delta_{optique} = n \times (S_2M - S_1M)$$

avec n l'indice de réfraction du milieu de propagation (dans l'air, n=1)





L'interfrange i est la distance $x_{k+1} - x_k$ k séparant les centres de deux franges brillantes ou sombres consécutives.

La différence de chemin optique ΔL_k en M d'abscisse x_k a pour expression $\Delta L_k = \frac{n \times x_k \times b}{D}$ où b est la distance séparant les sources secondaires et D la distance de ces sources à l'écran (avec D >> b).

L'interfrange $i = x_{k+1} - x_k$ est déterminé en combinant la condition d'interférences constructives ou celle d'interférences destructives avec l'expression fournie de la différence de chemin optique.

<u>Cas de deux franges brillantes consécutives</u>

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\Delta L_{k+1} \times D}{n \times b} - \frac{\Delta L_k \times D}{n \times b}$$

$$i = \frac{(k+1) \times \lambda_0 \times D}{n \times b} - \frac{k \times \lambda_0 \times D}{n \times b}$$

$$i = \frac{\lambda_0 \times D}{n \times b}(k + 1 - k)$$

i en m — $i = \dfrac{\lambda_0 \times D}{n \times b}$ — λ_0 et D en m

sans unité — b en m

<u>Cas de deux franges sombres consécutives</u>

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\Delta L_{k+1} \times D}{n \times b} - \frac{\Delta L_k \times D}{n \times b}$$

$$i = \frac{\left([k+1] + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0 \times D}{n \times b} - \frac{(k + \frac{1}{2}) \times \lambda_0 \times D}{n \times b}$$

$$i = \frac{\lambda_0 \times D}{n \times b}\left(k + 1 + \frac{1}{2} - k - \frac{1}{2}\right)$$

i en m — $i = \dfrac{\lambda_0 \times D}{n \times b}$ — λ_0 et D en m

sans unité — b en m