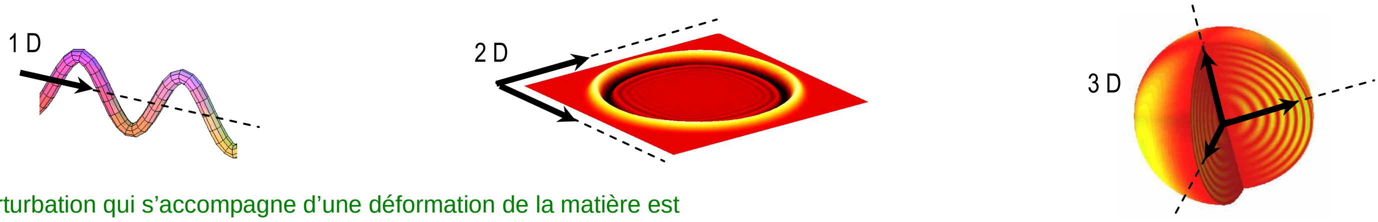
Ch. 16 : Propriétés des ondes

1. Relations générales
2. Onde sonore
3. La lumière
4. Diffraction d'une onde
5. Les Interférences
6. L'Effet Doppler

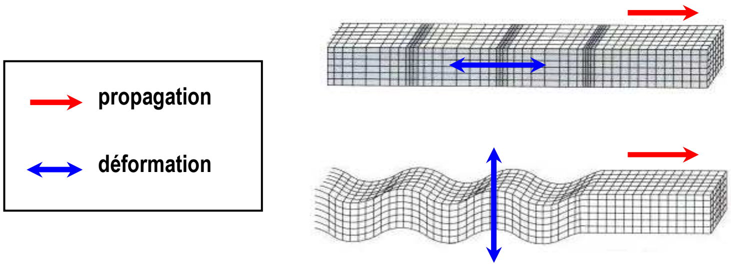
1. Relations générales

Lorsqu'on jette une pierre sur un plan d'eau, on créé localement une perturbation qui se traduit par une déformation de la surface de l'eau qui se propage.
Une onde progressive est une perturbation qui se propage de proche en proche dans un milieu. Une onde ne transporte pas de matière, mais uniquement de l'énergie.

Une onde se propage dans toutes les directions qui lui sont offertes. Néanmoins, si le milieu ne permet que la propagation dans une direction donnée, on parle d'onde à une dimension.



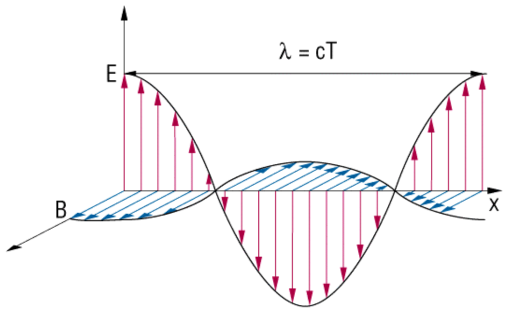
Une perturbation qui s'accompagne d'une déformation de la matière est appelée onde mécanique (ex : son, vague, onde sismique, …).



Si la déformation du milieu est parallèle au déplacement de l'onde, on parle d'onde longitudinale.

Si la déformation du milieu est perpendiculaire au déplacement de l'onde, on parle d'onde transversale.

La lumière est une onde progressive qui n'est pas mécanique car elle ne déforme par la matière qu'elle traverse. C'est une perturbation d'un champ électrique conjugué à un champ magnétique qui se propage.



Représentation d'une onde électromagnétique

A retenir :

- Un phénomène est dit périodique s'il se répète identique à lui-même **ET** à intervalle de temps régulier appelé période et noté T.
- La fréquence f associée est définie par la relation : $\boxed{f = 1 / T}$ | f en hertz (Hz), T en s
- Une onde progressive sinusoïdale est la propagation d'une perturbation décrite par une fonction sinusoïdale du temps :

$$\boxed{y = Y_{max} \cos(\omega t + \varphi)}$$

avec : Y_{max} l'amplitude de l'onde
ω la pulsation
φ le déphasage

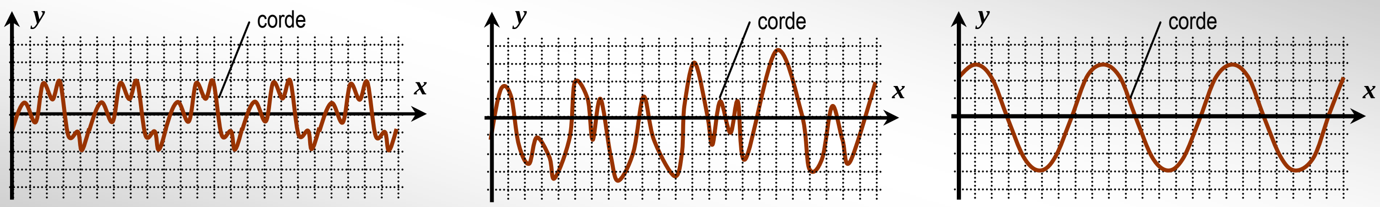
- La longueur d'onde λ d'une onde progressive est la longueur que parcourt cette onde durant une durée égale à sa période T.
  Ainsi, toute onde progressive périodique est caractérisée par la relation :

$$\boxed{v = \frac{\lambda}{T}} \quad \text{ou} \quad \boxed{v = \lambda f}$$

λ en m, f en Hz, T en s, v en $m{\cdot}s^{-1}$

Exercice 1 :

On considère trois cordes tendue et excité chacune par une onde progressive de célérité 4,0 m/s. A un instant t quelconque, on prend une photo pour visualiser l'état de ces trois cordes (voir ci-dessous).



Echelle horizontale et verticale : 2,0 m / div

1. Ces ondes sont-elles transversales ou longitudinales ?
2. Parmi les ondes ci-dessus, déterminer la ou les ondes périodiques et calculer leur période T.
3. Quelle est l'onde que l'on peut qualifier d'onde périodique sinusoïdale ? Déterminer sa fréquence f et son amplitude maximale Y_{max}.

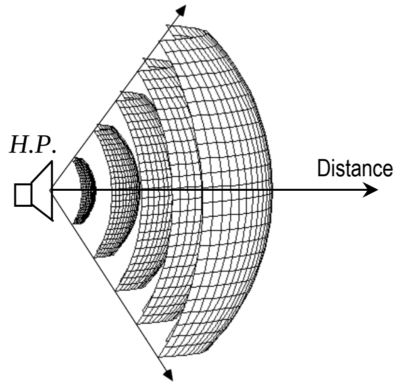
2. Onde sonore

2.1. Intensité sonore

L'intensité sonore I est la puissance P de la vibration sonore reçue par unité de surface S :

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

P en W
I en $W{\cdot}m^{-2}$
S en m^2



Plus on s'éloigne de la source sonore plus l'intensité diminue car l'énergie produite par la source se répartit sur une surface plus grande.

La perception d'un son de fréquence 1000 Hz pour l'oreille humaine est telle que :

- Le seuil d'audibilité est : $I_0 = 10^{-12}\ W.m^{-2}$
- Le seuil de douleur est : $I_M = 1\ W.m^{-2}$

Exercice 2 : *Donnée* : surface d'une sphère de rayon R : $S = 4 \times \pi \times R^2$

L'explosion d'un petit pétard engendre à 50 cm de la source de l'explosion une intensité sonore égale au seuil de douleur.

1. Calculer la puissance sonore de cette explosion.
2. En supposant que cette puissance reste constante, déterminer la distance à laquelle l'intensité sonore est divisée par 2.

2.2. Niveau sonore

On détermine alors une échelle permettant d'exprimer la sensation auditive : c'est le niveau sonore ou niveau d'intensité sonore. Le niveau sonore L exprime donc la sensation perçue par l'oreille.

Pour une intensité sonore I donnée, le niveau sonore L exprimé en décibels acoustiques (dB ou dBA) est déterminé par la formule :

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

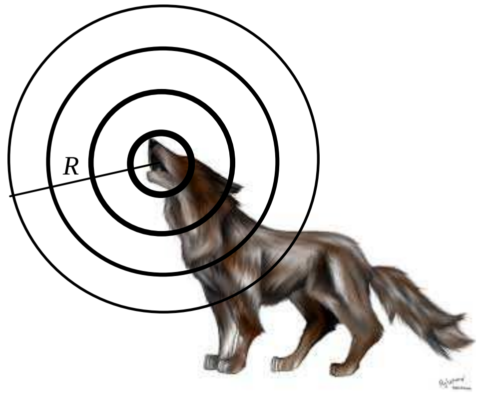
L sans dim (dB)
I et I_0 en $W.m^{-2}$

Exercice 3 : *Donnée* : surface d'une sphère : $S = 4 \times \pi \times R^2$

1. Calculer le niveau sonore pour une intensité I à 1000 Hz égale à I_0.
2. Même question pour une intensité égale au seuil de douleur I_M.
3. Déterminer l'intensité perçue pour un son de puissance 1,50 W réparti sur une surface de 30 m^2.

Un loup hurle avec une puissance sonore d'environ $5{,}0{\cdot}10^{-2}$ W. Le son du hurlement se propage de manière sphérique dans l'air. On considère que la puissance reste constante au cours de sa propagation.

4. Donner l'expression de l'intensité sonore perçue à une distance R du loup.
5. En déduire l'expression du niveau sonore L à cette distance R.
6. Peut-on entendre le cri du loup à une distance de 1 km ? 10 km ?



2.3. Atténuation

Un son est atténué lorsqu'on s'éloigne de la source ou lorsqu'on place entre la source et l'observateur un obstacle.

Soit L le niveau sonore de référence et L' le niveau sonore atténué. L'atténuation sonore A se calcule alors avec la relation :

$$\boxed{A = L - L'} \quad ❶ \qquad \text{ou} \qquad \boxed{A = 10 \times \log\left(\frac{I}{I'}\right)} \quad ❷$$

A et L sans dim (dB)
I en $W.m^{-2}$

Exercice 4 :

Une machine dans un atelier a un niveau sonore L_1 = 72 dB pour un observateur placé à 5,0 m de distance.

1. Déterminer l'intensité sonore I_1 correspondante.
2. Calculer le nouveau niveau sonore L_2 perçu si une deuxième machine identique se met en marche à la même distance.
3. En fermant alors la porte entre l'observateur et les deux machines en marche, la nouvelle intensité sonore perçue par l'observateur n'est plus que de $2{,}0{\cdot}10^{-6}$ $W.m^{-2}$. En déduire la valeur de l'atténuation du son.
4. Retrouver l'expression ❷ donnée ci-dessus en partant de l'expression ❶.

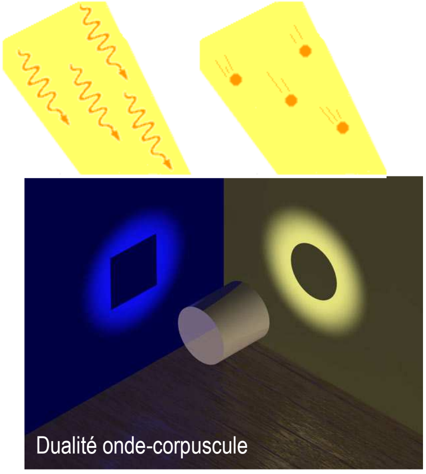
A noter :

- L'atténuation géométrique correspond à une diminution de l'intensité sonore quand on s'éloigne de la source car l'aire de la surface sur laquelle la puissance est répartie augmente.
- L'atténuation par absorption correspond à une diminution de l'intensité sonore quand le son traverse un milieu matériel dans lequel une partie de la puissance sonore est absorbée.

3. La lumière

1677 : *C. Huygens* montre que la lumière doit avoir une nature ondulatoire pour rendre compte des lois de Snell-Descartes
1704 : *I. Newton* publie son *Opticks* dans lequel il considère la lumière comme composée de corpuscules.
1861 : *J. C. Maxwell*, en s'appuyant sur les travaux de *M. Faraday*, interprète la lumière comme une onde électromagnétique.
1905 : *A. Einstein* donne naissance au concept de dualité onde-corpuscule pour la lumière.

L'énergie de la lumière est transportée par des photons qui présentent un aspect particulaire ou ondulatoire selon l'expérience.


Dualité onde-corpuscule

Le photon n'est ni une onde ni une particule. C'est un quantum d'énergie ayant :
- une masse nulle
- une charge nulle
- une vitesse égale à c dans le vide avec c = 299 792 458 m/s

L'énergie E d'un photon est donnée par la relation :

$$\boxed{E = h\upsilon} \Leftrightarrow \boxed{E = \frac{h \cdot c}{\lambda}}$$

h = 6,63·10^{-34} $J{\cdot}s$

E en J
h (Cste de Planck) en $J{\cdot}s$
c en $m{\cdot}s^{-1}$
λ (longueur d'onde) en m
υ (fréquence) en Hz

4. Diffraction d'une onde

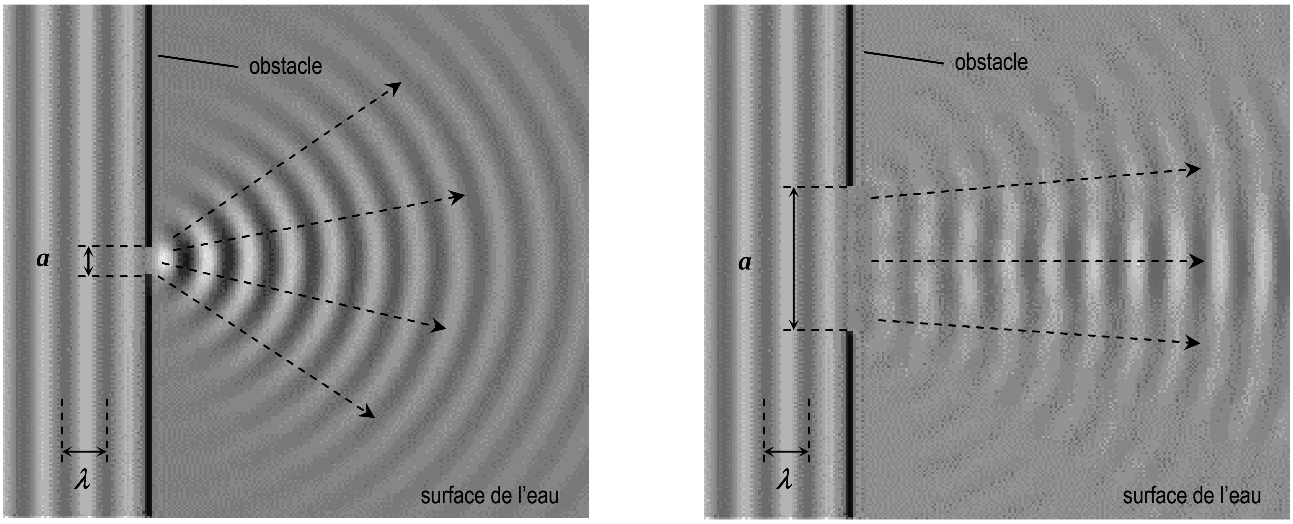
4.1. Mise en évidence

Pour mettre en évidence certaines propriétés des ondes mécaniques, on peut utiliser une cuve à onde. Dans cette cuve, une faible épaisseur d'eau se trouve placée sur une vitre horizontale. Un système peut alors exciter la surface de l'eau à intervalle de temps régulier créant ainsi des vaguelettes, soit de forme circulaire, soit de forme rectiligne.
Ces vaguelettes sont rendues visibles sur un écran opaque vertical à l'aide d'une lampe placée au-dessus de la surface de l'eau et d'un miroir incliné à 45° dans la cuve.

Dans un premier temps, on créé une houle rectiligne qu'on cherche à faire passer à travers une ouverture dont on fera varier la dimension a.


Cuve à onde

Figures de diffraction sur une cuve à onde



On remarque que pour une ouverture a petite, l'onde rectiligne incidente génère une onde circulaire. L'onde diffractée ne se propage plus uniquement dans la direction initiale. C'est le phénomène de diffraction

La diffraction est nettement observée si la taille a de l'ouverture est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ ($\lambda < a < 100\ \lambda$).

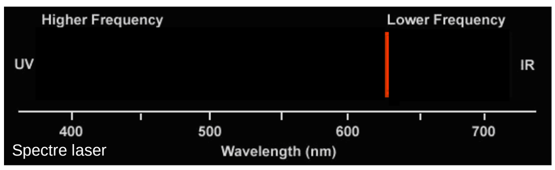
Toute onde, électromagnétique ou mécanique, subit le phénomène de diffraction.
La diffraction est une signature de la nature ondulatoire d'un phénomène.

4.2. Figures de diffractions

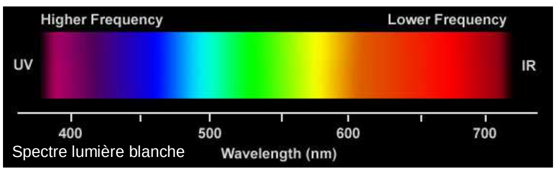
A noter :

Une lumière est dite monochromatique si elle est constituée de rayons de même longueur d'onde. On peut citer en exemple le laser.

Une lumière est dite polychromatique si elle contient au moins deux longueurs d'onde différentes. Par exemple, la lumière blanche d'une source incandescente contient toutes les longueurs d'onde du visible.

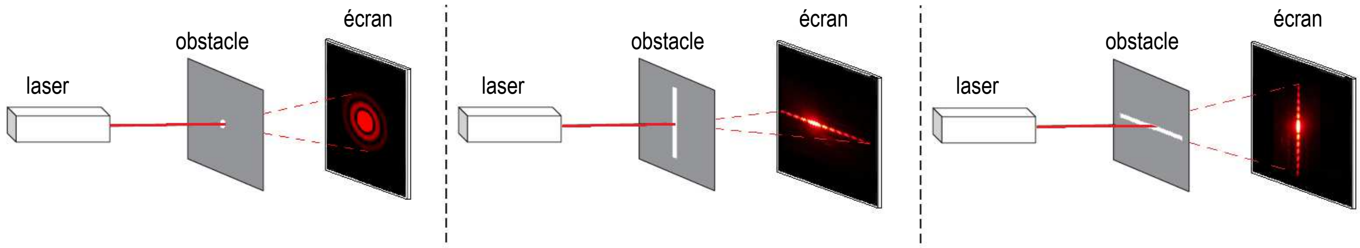


Spectre laser



Spectre lumière blanche

Figures de diffraction d'un laser



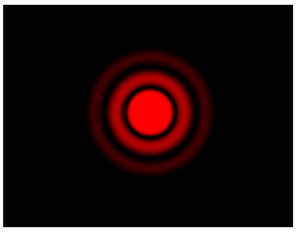


Image 1

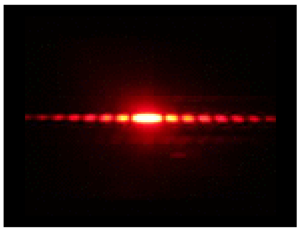


Image 2

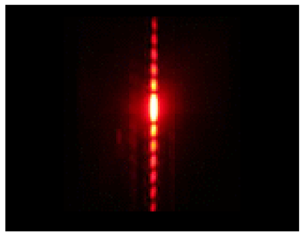
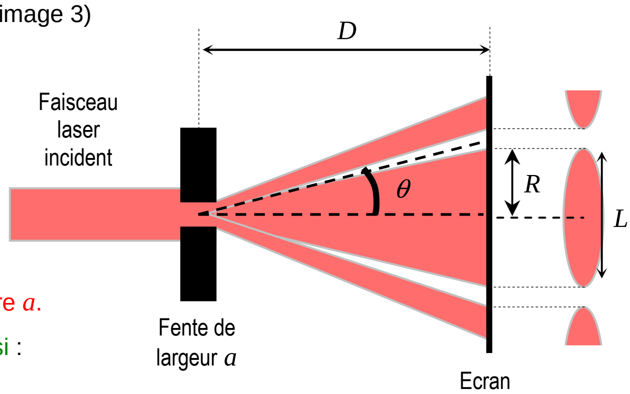


Image 3

La figure de diffraction dépend de l'obstacle :

- Pour un trou circulaire, on observe une tache circulaire avec des anneaux concentriques (image 1)
- Pour une fente verticale, on observe un étalement horizontal de taches (image 2)
- Pour une fente horizontale, on observe un étalement vertical de taches (image 3)



Dans le cas de la diffraction d'un laser de longueur d'onde λ par une fente de largeur a l'écart angulaire de diffraction θ a pour expression :

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

θ en radians (rad)
λ en m
a en m

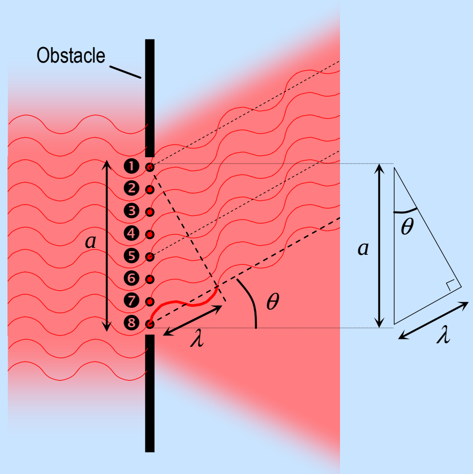
Le principe de Babinet stipule que la figure de diffraction d'un obstacle est la même que celle d'un obstacle de forme géométrique complémentaire.
Ainsi, un fil de largeur a aura la même figure de diffraction qu'une fente d'ouverture a.

D'après cette expression, on voit que la longueur de la tache centrale augmente si :

- La longueur d'onde du laser incident augmente.
- L'ouverture a de la fente diminue.

Pour aller plus loin…

La figure de diffraction est liée au phénomène d'interférence. D'après le principe de Huygens, lorsqu'un front d'onde arrive sur une fente, on peut remplacer chaque point de l'ouverture a de la fente par une source ponctuelle de même longueur d'onde que l'onde incidente. Le nouveau front d'onde après la fente correspond alors à la contribution dans toutes les directions de chacune des ondelettes qui sortent de la fente.



Ici, on prend arbitrairement 8 sources ponctuelles (numérotées de ❶ à ❽) pour décrire ce qui va se passer après la fente d'ouverture a.

Si l'on considère la direction faisant un angle θ avec la normale à l'obstacle, et qui pointe donc vers la première zone sombre au dessus de la tâche centrale sur l'écran, on observe alors que la différence de marche entre le rayon venant de ❶ et celui venant de ❽ correspond à une longueur d'onde λ.

On voit alors que le rayon issu de ❶ et le rayon issu de ❺ sont en opposition de phase.
Dans cette direction θ, ces deux rayons interfèrent donc de manière destructive. Il en va de même pour les rayons issus de ❷ et ❻, les rayons issus de ❸ et ❼ et les rayons issus de ❹ et ❽.

Le point de l'écran dans cette direction est donc sombre et, d'après la figure ci-contre, on a donc :

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{a} \quad \Leftrightarrow \quad \theta = \frac{\lambda}{a}$$ car θ est très petit et en radians.

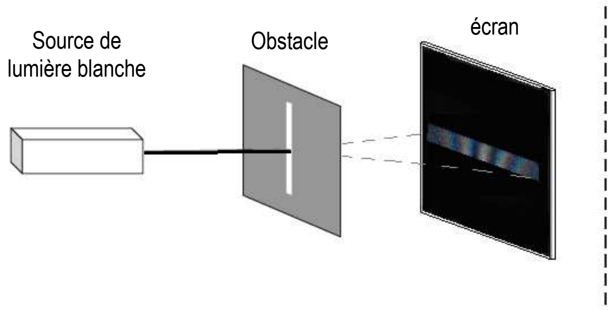
Toutes les tâches sombres de part et d'autre de la tâche centrale correspondent à une différence de marche δ entre les rayons extrémaux de la fente égale à $k \cdot \lambda$ avec $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3$, etc.

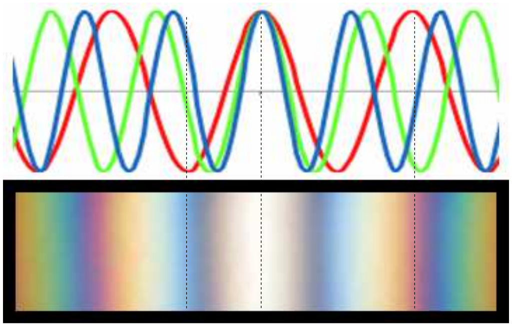
Exercice 5 :

1. D'après la figure ci-dessus, exprimer la longueur L en fonction de R.
2. Montrer que l'on a alors : $\theta = \frac{L}{2D}$
3. Quelle est alors la longueur L de la tache centrale observée sur l'écran pour un laser de longueur d'onde 633 nm traversant une fente de largeur 0,50 mm placée à une distance de 1,5 m de cet écran ?

A noter :

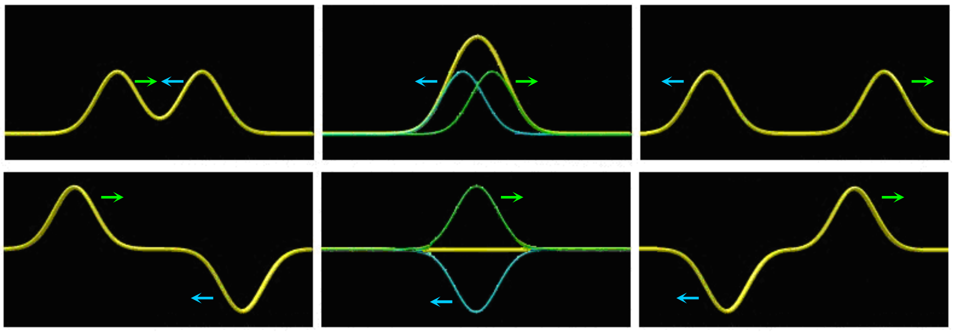
Lorsqu'on effectue une diffraction en lumière blanche, on obtient des irisations :





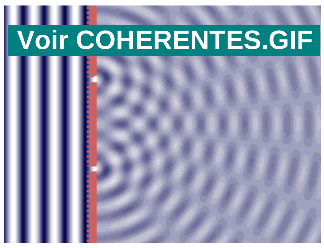
5. Les interférences

5.1. Principe



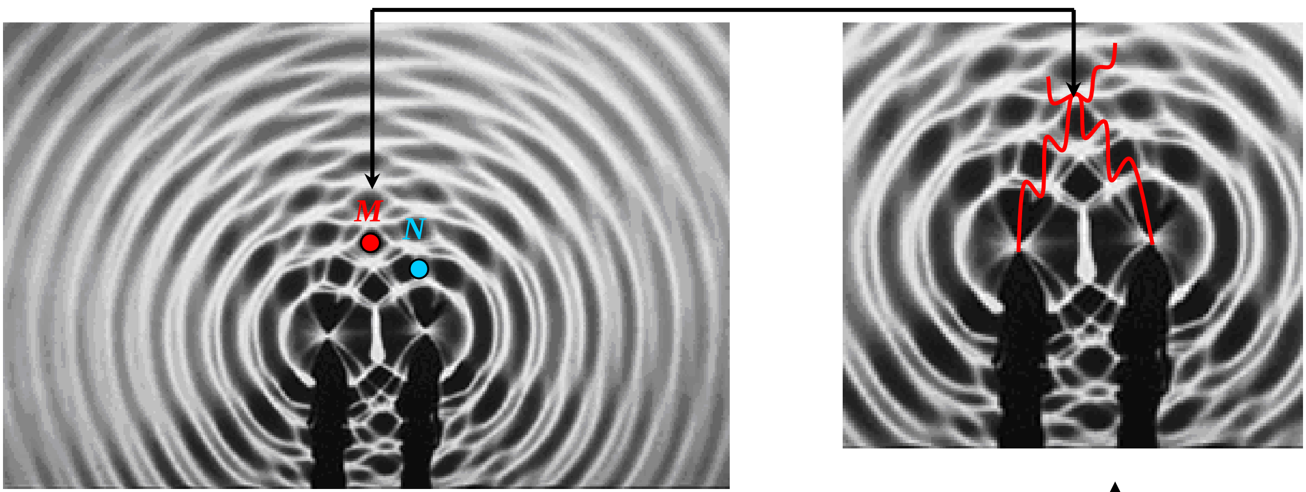
Lorsque deux ondes se croisent, leurs amplitudes s'additionnent algébriquement.

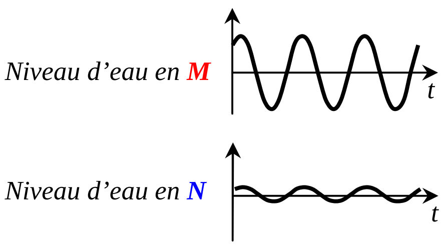
Après s'être croisées, les deux perturbations continuent sur leur lancée sans être modifiées.



Deux ondes de même fréquence qui se superposent peuvent interférer. On observe alors une figure d'interférence. Cette figure d'interférence est stable si les sources sont cohérentes.
Deux sources sont cohérentes si elles émettent des ondes sinusoïdales de même fréquence et si le retard de l'une par rapport à l'autre ne varie pas : elles gardent alors un déphasage constant.

L'élongation résultante en un point est la somme des élongations des deux ondes en ce point.

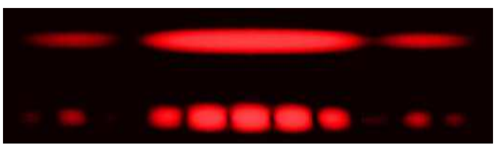




Lorsque les deux ondes arrivent en phase en un point, les interférences sont constructives (point ***M***).

Lorsque les deux ondes arrivent en opposition de phase en un point, les interférences sont destructives (point ***N***).

Interférence et diffraction

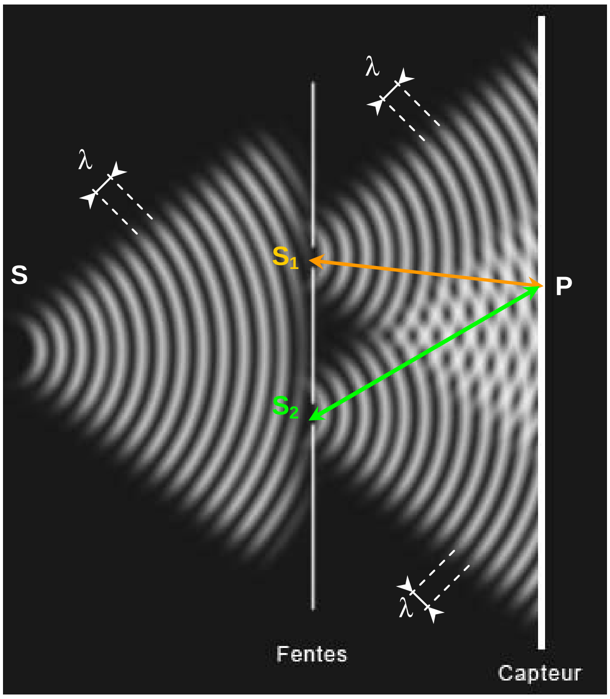


Lorsqu'on fait passer une lumière monochromatique par une fente étroite, on observe une figure de diffraction.

Si l'on fait passer cette lumière par deux fentes, on observe une figure d'interférence.

5.2. Conditions d'interférences constructives et destructives

La source S éclaire deux fentes S_1 et S_2. Ces fentes diffractent la lumière et se comportent comme deux sources divergentes cohérentes.

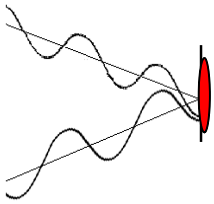


Pour chaque point P du capteur ou de l'écran, la différence de marche δ des deux ondes incidentes s'écrit :

$$\boxed{\delta = S_2P - S_1P}$$

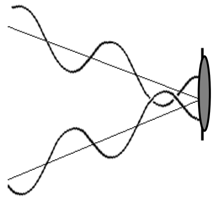
- si δ est tel que : $\boxed{\delta = k\lambda}$ avec k un entier relatif,

  alors au point P l'interférence est constructive car les deux ondes arrivent en phase. Le point P est donc lumineux.

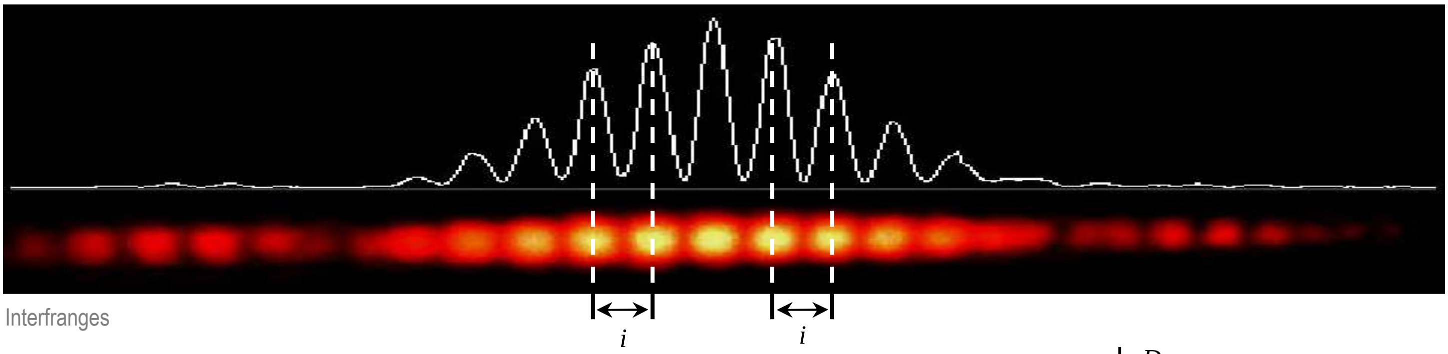


- si δ est tel que : $\boxed{\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda}$

  alors au point P l'interférence est destructive car les deux ondes arrivent en opposition de phase. Le point P est donc sombre.



Ainsi on observe sur l'écran une succession de franges équidistantes alternativement sombres et brillantes.



Interfranges

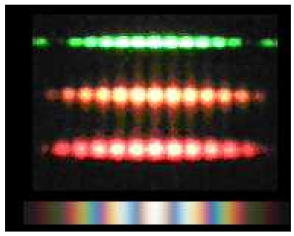
L'interfrange i est la distance séparant deux franges brillantes consécutives ou deux franges sombres consécutives. La valeur de l'interfrange est donnée par la relation : $i = \dfrac{\lambda D}{S_1S_2}$

D en m
S_1S_2 en m
λ en m
i en m

A noter :

Avec une lumière polychromatique, chaque radiation forme une figure d'interférence, mais des radiations de fréquences différentes n'interfèrent pas entre elles.
La figure d'interférence observée est donc l'addition des figures d'interférence de toutes les radiations.

De plus, comme l'interfrange i dépend de la longueur d'onde, il change en fonction de la couleur du rayon. Ainsi, la figure d'interférence observée à l'écran pour une lumière polychromatique présente alors une tache centrale blanche, et des franges brillantes irisées de part et d'autre.

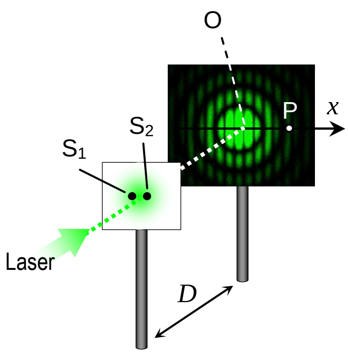


5.3. Interférences des trous d'Young

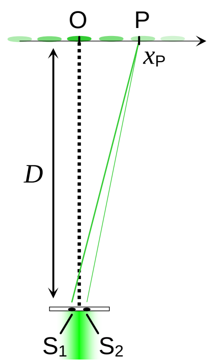
Le dispositif des trous d'Young est formé d'une plaque opaque percée de deux trous S_1 et S_2 très petits et très proches tels que la distance $S_1S_2 = a$. On éclaire ce dispositif avec un laser de longueur d'onde λ et l'on place un écran à une distance D très grande devant a. Le faisceau laser est alors diffracté par chaque trou. Ces deux trous vont alors se comporter comme deux sources synchrones S_1 et S_2.

Soit O le point centrale de la figure d'interférence et soit (Ox) l'axe parallèle au segment [S_1S_2]. Pour tout point P de coordonnées (x_P, y_P), la différence de marche $\delta = S_1P - S_2P$ peut aussi s'écrire :

$$\boxed{\delta = \frac{n \times a}{D} \times x_P}$$ $\forall y_P$ et avec n l'indice de réfraction du milieu considéré.



Expérience des trous d'Young



Exercice 6 :

On considère deux sources S_1 et S_2 monochromatiques cohérentes de longueur d'onde 0,70 mm. Ces deux sources sont distantes de 5,0 mm. L'écran sur lequel on observe la figure d'interférence est placé à 1,30 cm du plan de ces deux sources.

1. Sachant que le point P de l'écran se trouve à une distance de 1,54 cm de la source S_1 et à une distance de 1,33 cm de la source S_2, ce point apparait-il lumineux ou sombre ?
2. Déterminer la taille de l'interfrange observé sur l'écran.

Exercice 7 :

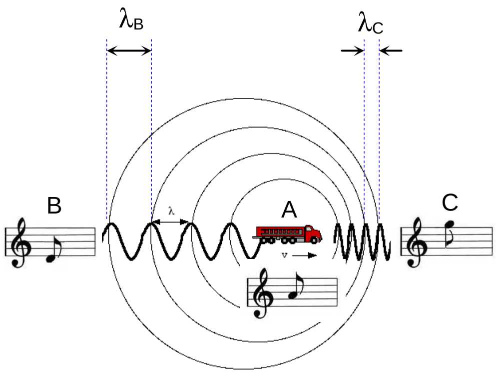
On considère l'expérience des trous d'Young dans un milieu transparent d'indice n. L'expression de la différence de marche δ pour un point P d'abscisse x de l'écran est donnée ci-contre (en posant $a = S_1S_2$) :

$$\delta = \frac{n \cdot a}{D} \times x$$

1. Rappeler la condition nécessaire que doit vérifier la différence de marche en un point pour qu'il soit un minimum d'intensité lumineuse.
2. En déduire la relation mathématique en fonction de a, n, D et λ que son abscisse x doit vérifier.
3. A partir de l'expression trouvée à la question précédente, déterminer l'expression de la distance d qui sépare deux minima d'intensité lumineuse successifs ayant une même ordonnée y.
4. Simplifier l'écriture de cette expression sachant que l'expérience est faite dans l'air.
   Que remarque-t-on ?

6. L'effet Doppler

6.1. Définition



Un véhicule roule à vitesse constante. L'observateur A est le pilote.
L'observateur B est immobile et voit le véhicule s'éloigner de lui.
L'observateur C est immobile et voit venir le véhicule vers lui.

Comme la hauteur d'un son dépend de sa fréquence, les observateurs A, B et C ne perçoivent pas la même note.

B perçoit une note plus grave que A car la fréquence du signal sonore qu'il reçoit est inférieure à la fréquence de la source : $f_B < f_A$

A l'inverse, C capte un son plus aigu que le son de la source car $f_C > f_A$.

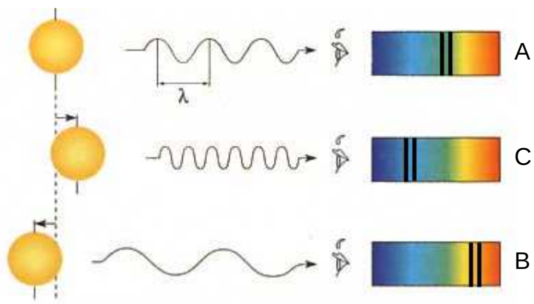
A retenir :

- L'effet Doppler correspond à un décalage de la fréquence d'un son perçu par un récepteur lorsque l'émetteur et le récepteur sont en déplacement relatif.
- Plus la vitesse relative est grande, plus le décalage en fréquence est important.

6.2. Application à l'Astronomie

En appliquant les travaux de Christian DOPPLER à la lumière,
Hippolyte FIZEAU a postulé que :

- si une étoile s'approche d'un observateur C, les raies d'absorption de son spectre doivent apparaître décalées vers les hautes fréquences (blueshift).
- Inversement, si l'étoile s'éloigne de l'observateur B, les raies d'absorption de son spectre doivent apparaître décalées vers les basses fréquences (redshift).
- Plus la vitesse de l'étoile est grande par rapport à la Terre, plus le décalage observé est important.



A : Etoile immobile par rapport à l'observateur
B : Etoile qui s'approche de l'observateur
C : Etoile qui s'éloigne de l'observateur

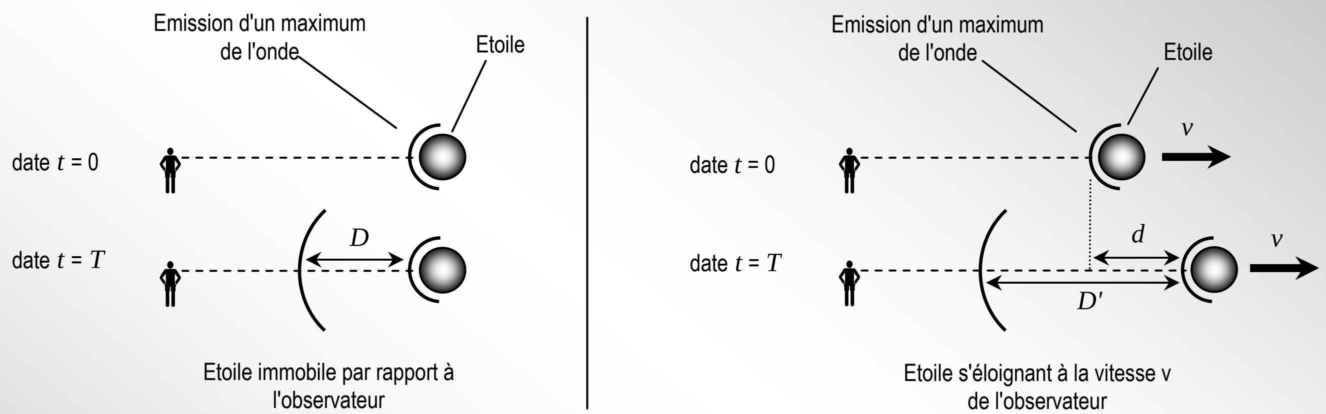
	Décalage vers basses fréquences	Décalage vers hautes fréquences
son	Son plus grave	Son plus aigu
lumière	Lumière plus rouge	Lumière plus bleutée

6.3. Calcul du décalage en fréquence

Exercice 8 :

On considère une même radiation de lumière émise par deux étoiles lointaines, l'une fixe par rapport à la Terre, l'autre s'éloignant d'un mouvement rectiligne uniforme de vitesse v.

La radiation de longueur d'onde λ, de fréquence f et de période T se déplace à la vitesse c dans le vide de l'espace de chaque étoile jusqu'à l'observateur placé sur Terre.
Le schéma de gauche montre l'étoile fixe par rapport à l'observateur.
Le schéma de droite montre l'étoile qui s'éloigne de l'observateur à une vitesse v supposée constante.



1. Pour l'étoile immobile, quelle grandeur caractéristique de la radiation de lumière est représentée par la distance D sur le schéma de gauche ?
2. Exprimer cette distance en fonction de c et T.
3. Pour l'étoile en mouvement, que représente la distance D' pour l'observateur terrestre ?
4. Exprimer la distance d parcourue par cette étoile en fonction de v et T.
5. En déduire l'expression de la distance D' en fonction de v, c et T.
6. Soit T' la période séparant l'arrivée de deux maxima de l'onde venant de l'étoile mobile pour l'observateur terrestre.
   Exprimer T' en fonction de v, c et T.
7. Montrer que l'on peut alors écrire : $T' = T\left(\frac{c+v}{c}\right)$
8. En renommant la fréquence de l'onde perçue par un observateur placé à la surface de l'étoile mobile f_E pour fréquence émise et la fréquence de l'onde perçue par l'observateur terrestre f_R pour fréquence reçue, déduire la relation liant f_E à f_R.
9. A l'aide de la formule établie à la question précédente, montrer que dans ce cas : $f_R < f_E$.
   Montrer ainsi que la lumière reçue par l'observateur est alors décalée vers le rouge. Comment se nomme ce phénomène ?

Pour une source de fréquence f_E et de célérité c (sonore ou lumineuse) en mouvement relatif par rapport à un observateur, la fréquence f_R perçue par l'observateur est telle que :

- si l'observateur et la source s'éloigne à la vitesse v : $$f_R = f_E \times \left(\frac{c}{c+v}\right)$$
- si l'observateur et la source se rapproche à la vitesse v : $$f_R = f_E \times \left(\frac{c}{c-v}\right)$$

Exercice 9 :

Le klaxon d'une voiture a pour fréquence sonore 520 Hz. La vitesse du son dans l'air à 20°C est d'environ 340 m/s.

1. Déterminer la fréquence perçue par un observateur voyant arriver vers lui la voiture klaxonnant à 110 km/h.
2. Même question pour un observateur voyant la voiture s'éloigner de lui à cette même vitesse.
3. Quelle est la fréquence que percevra le chauffeur du véhicule à cette vitesse ?

A noter :

Edwin Hubble remarque en 1929 que plus une galaxie est distante de nous, plus son spectre apparaît décalé vers le rouge.
Il en conclut que plus une galaxie est distante plus elle s'éloigne vite. Cette observation est historiquement la première à étayer la théorie du Big Bang selon laquelle l'Univers aurait connu dans son passé lointain une époque où il était extrêmement chaud et dense.