CH P1 – Propriétés des ondes

Programme officiel :

Thème 4 : Ondes et signaux

1. Caractériser les phénomènes ondulatoires

Notions et contenus	Capacités exigibles Activités expérimentales support de la formation
Intensité sonore, intensité sonore de référence, niveau d'intensité sonore. Atténuation (en dB).	Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal. *Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.* **Capacités mathématiques :** Utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque.
Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques. Angle caractéristique de diffraction.	Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. *Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées.* *Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.*
Interférences de deux ondes, conditions d'observation. Interférences constructives, Interférences destructives.	Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène. *Tester les conditions d'interférences constructives ou destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase.*
Interférences de deux ondes lumineuses, différence de chemin optique, conditions d'interférences constructives ou destructives.	Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. Établir l'expression de l'interfrange. *Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.* **Capacité numérique :** Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase à l'origine de l'un des deux.
Effet Doppler. Décalage Doppler.	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 dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. *Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.*

CH P1 – Propriétés des ondes

1. Rappels sur les ondes

En seconde et en première nous avons vu qu'une onde est la propagation d'une perturbation et qu'il en existe deux types :

- les **ondes électromagnétiques** (*ondes radio – micro-ondes – infra-rouges – lumière visible – UV – rayons X – rayons gamma*) qui peuvent se propager dans le vide ;
- les **ondes mécaniques** (*sons – vagues – séismes ...*) qui ont besoin de matière pour se propager.

Si l'onde se propage de proche en proche elle est dite **progressive**, si elle se répète identiquement à elle-même à intervalle de temps régulier elle est dite **périodique**, si elle est en forme de vague elle est dite **sinusoïdale**.

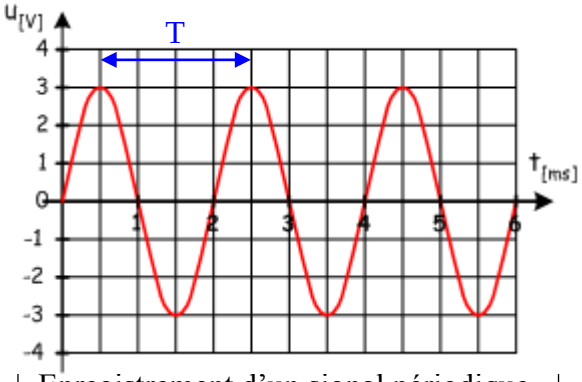
Plusieurs caractéristiques définissent une onde :

- **T** : **période** en s ;
- **f** : **fréquence** en Hz ;
- $\mathbf{c_{onde}}$: **célérité** (vitesse) de l'onde en $m.s^{-1}$;
- **λ** : **longueur d'onde** en m.

$$f = \frac{1}{T} \qquad \lambda = c_{onde} T = \frac{c_{onde}}{f}$$

La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde au bout d'une période T.

Remarque : La longueur d'onde dépend de la célérité qui dépend du milieu de propagation. Une modification du milieu peut donc modifier c_{onde} et λ mais pas T et f.



Enregistrement d'un signal périodique

2. Les ondes sonores

2.1. Rappels

Un son est une onde mécanique et a donc besoin d'un milieu matériel. Les sons audibles par un humain se situent entre 20 Hz et 20 000 Hz. En dessous de 20 Hz on parle d'infrasons et au-delà de 20 000 Hz d'ultrasons.

Un **son pur** correspond à un signal sinusoïdal et ne présente donc qu'une seule fréquence appelée la **fréquence fondamentale**.
Un **son composé** correspond à une somme de plusieurs signaux et présente donc plusieurs fréquences appelées harmoniques.

Plus un son est grave, plus sa fréquence est basse. Plus un son est aigu, plus sa fréquence est élevée.

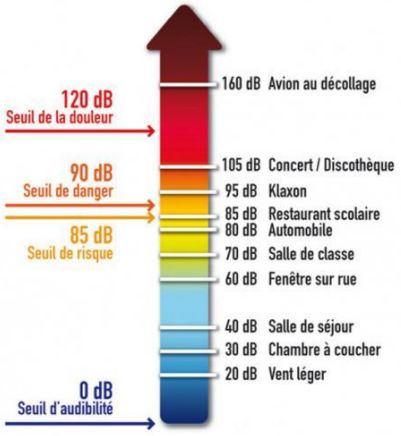
2.2. Niveau d'intensité sonore

L'intensité sonore I est liée à l'amplitude de la vibration sonore perçue. C'est la puissance sonore par unité de surface :

$$I = \frac{P}{S} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} P : \text{puissance (en W)} \\ S : \text{surface (en m}^2\text{)} \\ I : \text{intensité sonore (en W.m}^{-2}\text{)} \end{cases}$$

Le niveau sonore L se mesure avec un sonomètre et s'exprime en décibel (dB) :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} I : \text{intensité sonore (en W.m}^{-2}\text{)} \\ I_0 : \text{intensité sonore minimale } (10^{-12}\ \text{W.m}^{-2}) \\ L : \text{niveau sonore (en dB)} \end{cases}$$



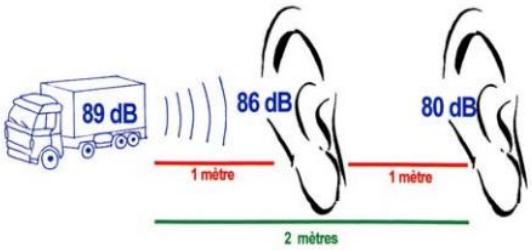
I_0 est considérée comme la limite de sensibilité de l'oreille. Lorsque l'intensité sonore est multipliée par 2, le niveau sonore est augmenté de 3 dB. La valeur de 90 dB est considérée comme le seuil de danger.

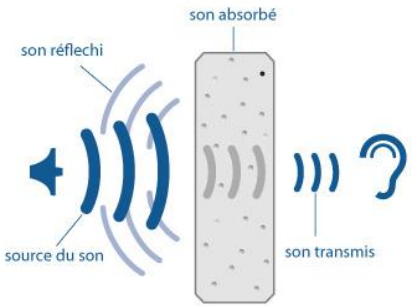
2.3. Atténuation

On définit l'**atténuation A** par la différence de niveau sonore perçue entre 2 points :

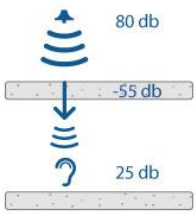
$$A = L_1 - L_2$$

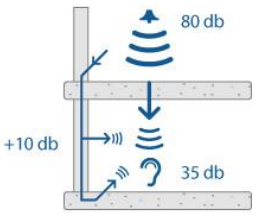
Plus on s'éloigne d'une source plus le son est faible : c'est l'**atténuation géométrique**.
En effet, la puissance P émise se répartit sur une portion de sphère dont la surface augmente avec l'éloignement de la source sonore (S d'une sphère = $4\pi R^2$) : l'intensité sonore I (et donc son niveau sonore) s'affaiblit donc avec la distance du récepteur à la source.





Si on intercale un objet entre la source et le récepteur le son est également plus faible car une partie a été absorbée : c'est l'**atténuation par absorption**.
Ce principe est utilisé par exemple pour les casques anti-bruit ou l'isolation phonique des bâtiments.





3. La diffraction

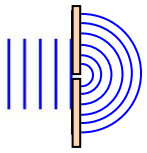
3.1. Phénomène

Quand une onde rencontre un **obstacle** ou une **ouverture**, on observe dans certains cas un changement de direction de propagation. Ce phénomène est appelé **diffraction**.
La diffraction s'observe avec la lumière, mais également avec le son et les vagues. L'onde diffractée a la même fréquence et la même longueur d'onde que l'onde incidente.

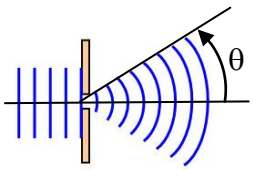
3.2. Cas des ondes mécaniques

Dans le cas des ondes mécaniques, la diffraction s'observe si l'obstacle ou l'ouverture a une dimension **a** proche ou faible devant la longueur d'onde **λ** de l'onde incidente.

- Si a ≤ λ, l'objet diffractant se comporte comme une nouvelle source (ponctuelle) de l'onde qui occupe tout l'espace offert.



- Si a > λ, l'onde diffractée occupe une partie de l'espace avec une ouverture angulaire θ donnée par :

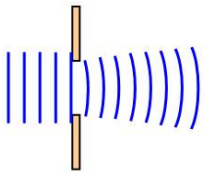


$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

θ en rad
λ en m
a en m

Rappel : π rad = 180°

- Si a >> λ, alors l'onde incidente est peu perturbée, sauf près des bords. L'ouverture agit comme un diaphragme.

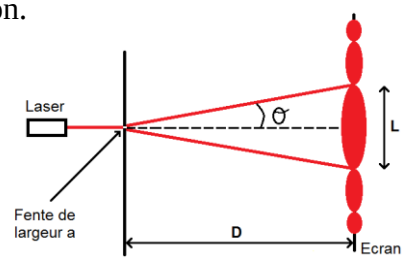


3.3. Cas des ondes lumineuses

Dans le cas des ondes lumineuses, les objets diffractants sont de petite taille (un fil par exemple) mais quasiment toujours de grande taille devant la longueur d'onde (**a** >> **λ**).
On observe alors des taches lumineuses caractéristiques de la diffraction.

L'ouverture angulaire correspondant à la tache centrale est donnée par : $\theta = \frac{\lambda}{a}$

θ en rad
λ en m
a en m



En considérant la largeur **L** de la tache centrale et la distance **D** de l'obstacle à l'écran, par trigonométrie on en déduit que : $\theta = \frac{L}{2D}$

θ en rad
L en m
D en m

Ainsi, ces deux relations permettent de calculer soit λ soit a par des mesures expérimentales.

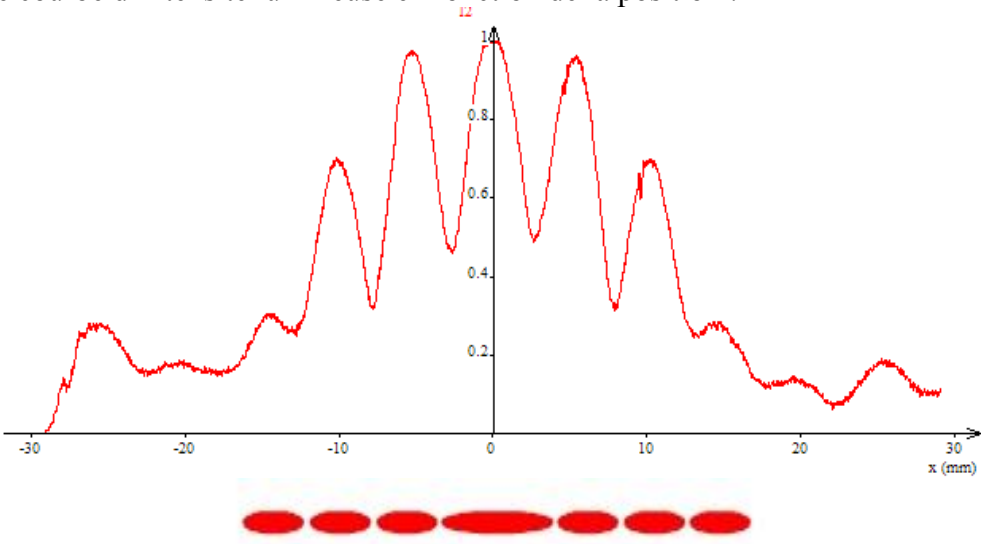
Remarques :
La figure de diffraction sera la même qu'il s'agisse d'un obstacle ou d'une ouverture. C'est-à-dire qu'un fil ou une fente donnent la même figure de diffraction.

Par contre la figure dépend de la forme de l'obstacle ou de l'ouverture :

Exemple de figure de diffraction obtenue par une fente :

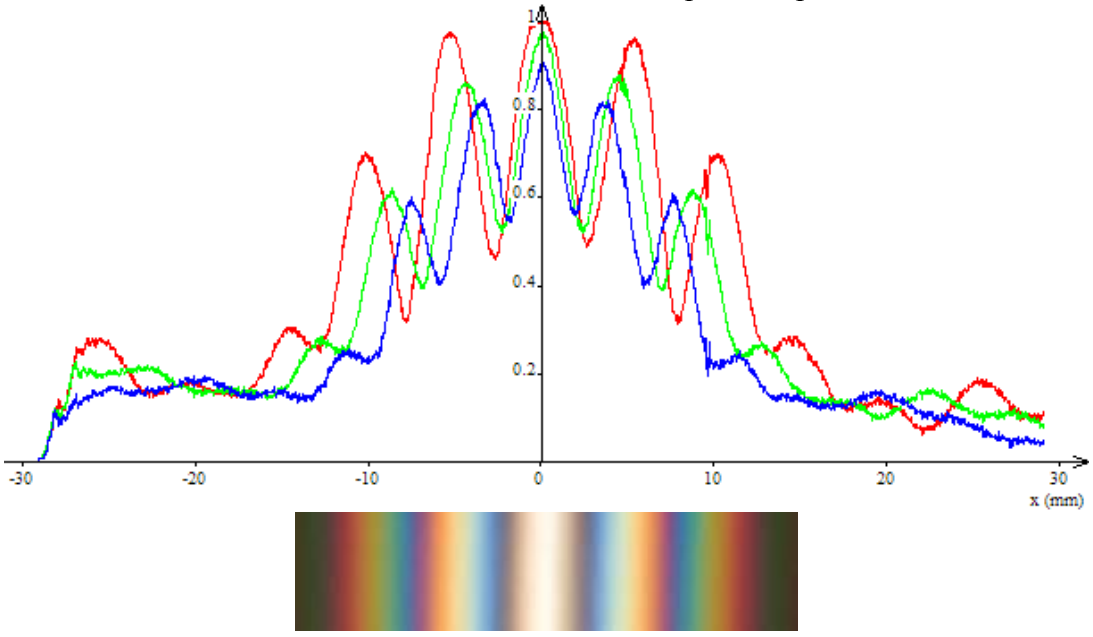
Exemple de figure de diffraction obtenue par une ouverture circulaire :
Cette figure est aussi appelée **tache d'Airy** et est très importante en astronomie car les télescopes présentent une ouverture circulaire.

Par ailleurs, l'intensité lumineuse décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la tache centrale :
Exemple de courbe d'intensité lumineuse en fonction de la position :



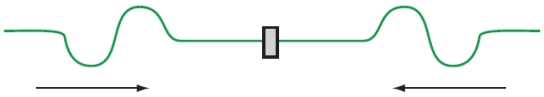
Enfin, puisque les taches dépendent de la longueur d'onde, dans le cas d'une lumière polychromatique on aura alors une séparation progressive des différentes lumières colorées. C'est ce principe qui est utilisé par les **réseaux** pour observer le spectre d'une lumière.

Exemple de courbes d'intensité lumineuse en fonction de la position pour une lumière blanche :



4. Les interférences

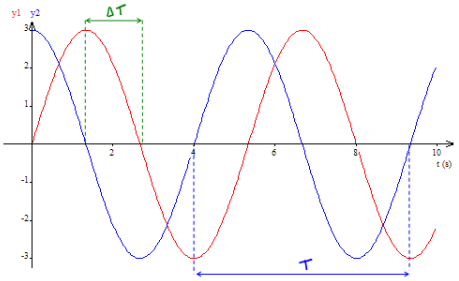
4.1. Principe

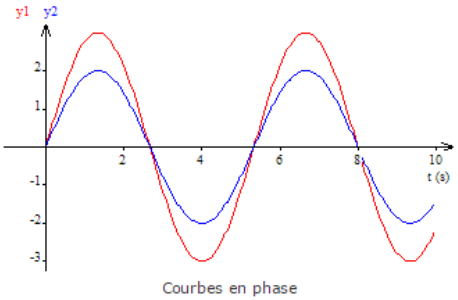


Imaginons un bouchon à la surface de l'eau et deux vagues identiques qui se croisent au niveau du bouchon.
Suivant l'endroit où l'on place le bouchon, il peut s'élever plus haut ou ne pas bouger du tout.
Quand deux ondes identiques se rencontrent, elles peuvent donc se renforcer mais aussi s'annuler : c'est le principe des **interférences**.

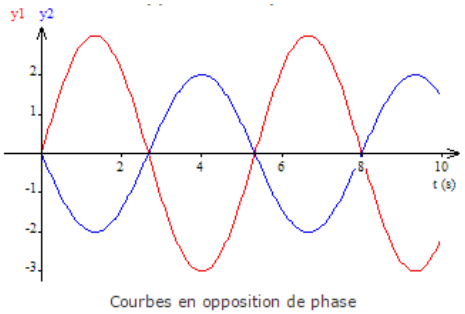
4.2. Conditions

Il faut que les deux ondes soient **cohérentes** c'est-à-dire qu'elles émettent des **ondes sinusoïdales** de **même fréquence** et si le retard de l'une par rapport à l'autre ne varie pas au cours du temps elles gardent alors un **déphasage constant**.





Courbes en phase



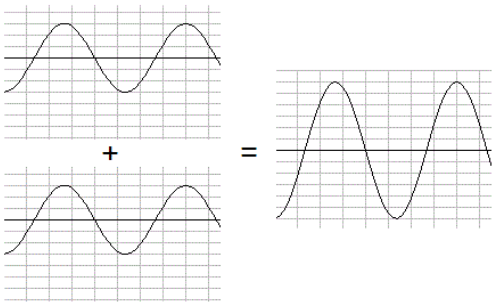
Courbes en opposition de phase

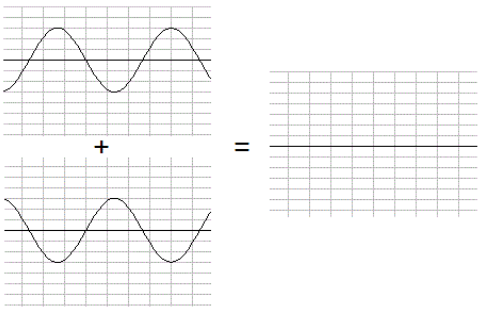
Courbes déphasées

Dans la zone de rencontre, les deux ondes vont se superposer mais l'effet sera différent suivant le déphasage :

- Si au point de rencontre les deux ondes sont en phase alors l'amplitude de l'onde résultante sera maximale, on parle d'**interférences constructives**.

- Si au point de rencontre les deux ondes sont en opposition de phase alors l'amplitude de l'onde résultante sera minimale (voire nulle si les deux ondes ont la même amplitude), on parle d'**interférences destructives**.



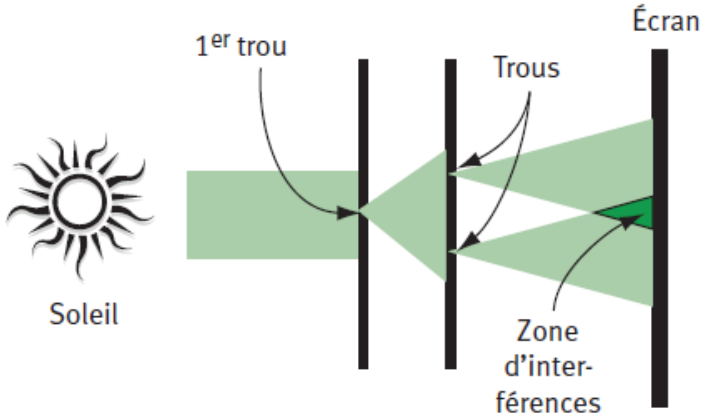


Ainsi, si l'on considère deux ondes cohérentes et de même amplitude on peut avoir au point de rencontre :

Exemple d'onde	Interférence constructive	Interférence destructive
Vague	Vague 2 fois plus haute	Pas de vague
Son	Son 2 fois plus intense	Silence
Lumière	Lumière 2 fois plus intense	Obscurité

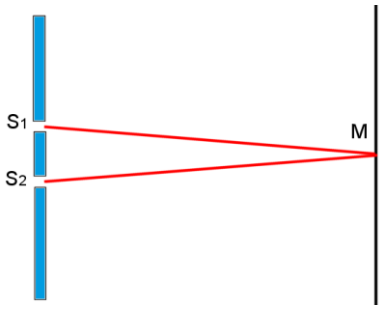
4.3. Cas des ondes lumineuses

C'est en 1801 que Thomas Young réalisa l'expérience suivante en utilisant la lumière du Soleil :



En effet, pour avoir une zone d'interférences il nous faut deux sources cohérentes. Pour ce faire, les deux sources doivent provenir d'une source unique. Un système de deux fentes (ou trous) très proches le permet par diffraction. Depuis, ce dispositif se nomme les **fentes d'Young**.

Lorsque les ondes issues des sources S_1 et S_2 interfèrent en un point M situé au milieu de l'écran. Les deux ondes parcourent le même chemin puisque $S_1M = S_2M$ donc si elles sont en phase en S_1 et S_2 elles le seront aussi en M, on aura des interférences constructives.

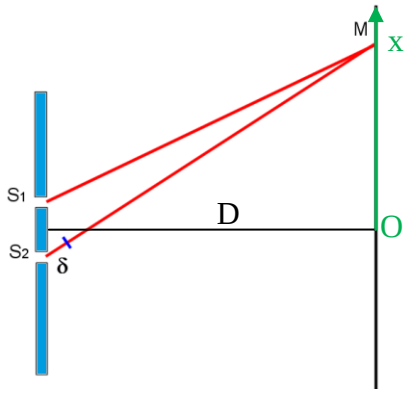


Dans les autres cas, on appelle **différence de marche** en M, entre 2 sources S_1 et S_2 d'un système de fentes d'Young, la distance : $\boldsymbol{\delta = S_1M - S_2M}$

Avec quelques approximations et en considérant que D (distance entre les fentes et l'écran) est très grand devant S_1S_2, on peut montrer que la différence de marche δ est liée à la position x du point M sur l'écran par la relation :

$$\delta = \frac{x \times S_1S_2}{D}$$

C'est l'expression linéarisée de la différence de chemin optique.



Savoir faire les démonstrations

Les interférences sont **constructives** si les ondes arrivent en phase, autrement dit si la différence de marche δ est un multiple de la longueur d'onde λ : $\boldsymbol{\delta = k\,\lambda}$.
Ainsi les positions des points M pour lesquels on obtient des franges brillantes sont données par :

$$x = \frac{k \times \lambda \times D}{S_1S_2}$$

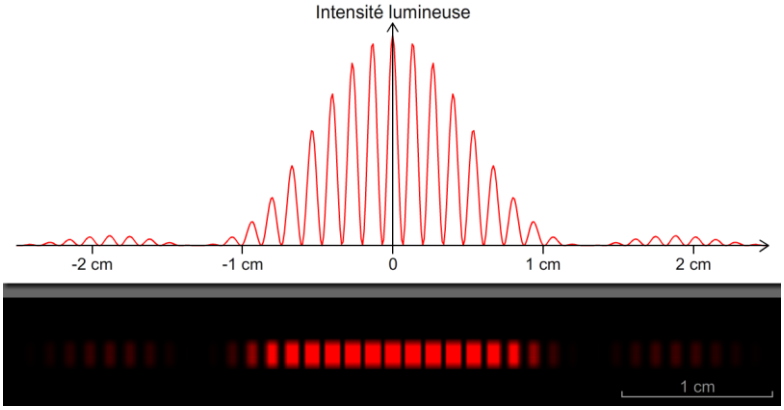
Les interférences sont **destructives** si les ondes arrivent en opposition de phase, autrement dit si la différence de marche δ est un multiple impaire de λ/2 : $\boldsymbol{\delta = (2k+1)\,\lambda/2}$.
Ainsi les positions des points M pour lesquels on obtient des franges sombres sont données par :

$$x = (2k+1)\frac{\lambda \times D}{2 \times S_1S_2}$$

On appelle **interfrange i** la distance qui sépare deux franges consécutives de même nature (2 sombres ou 2 brillantes). Par le calcul on trouve :

$$\boldsymbol{i = \lambda\, D / S_1S_2}$$

L'image obtenue peut alors être :



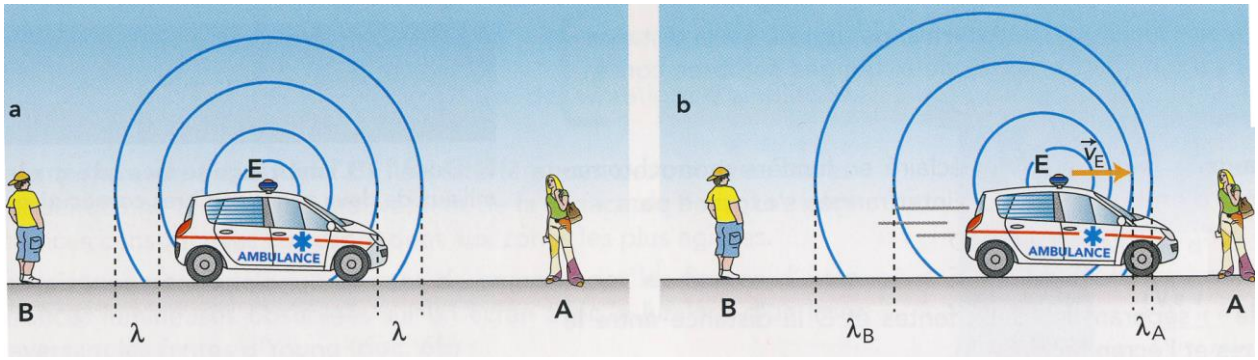
Remarque :
Dans le cas d'une source polychromatique comme le soleil, il apparaît alors différentes couleurs (des irisations) que l'on nomme **couleurs interférentielles**.
C'est ce que l'on observe sur les bulles de savon ou les taches d'huile.

5. L'effet Doppler

5.1. Principe

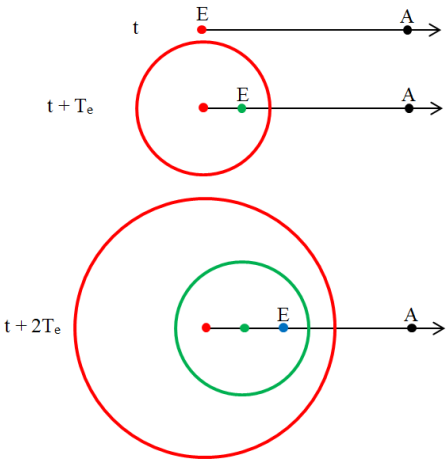
L'**effet Doppler** est la variation de fréquence mesurée entre l'émission et la réception d'une onde, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

Exemple :
Le cas le plus connu est celui d'une sirène de véhicule de secours :
Quand l'émetteur E est immobile, le son se propage dans toutes les directions de façon uniforme. La longueur d'onde, et donc la fréquence de l'onde, sera la même pour les récepteurs A et B.
Quand l'émetteur E est en mouvement, la longueur d'onde du son émis sera plus courte en se rapprochant (λ_A) et donc la fréquence plus grande et donc le son est plus aigu. A l'inverse la longueur d'onde sera plus grande en s'éloignant (λ_B) et donc la fréquence plus petite et le son est donc plus grave.



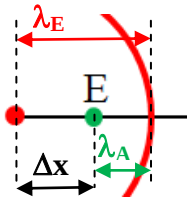
Savoir faire la démonstration

Plaçons-nous *dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension pour établir l'expression du décalage Doppler*.
A une date t, l'émetteur E émet une onde (point rouge).
A la date $(t + T_e)$, l'émetteur qui s'est déplacé (point vert) émet à nouveau l'onde mais la première onde émise à la date t s'est propagée (cercle rouge). Et ainsi de suite.
La première onde (cercle rouge) a parcouru la distance λ_E alors que l'émetteur E a parcouru une distance Δx. La différence correspond donc à la distance entre les deux fronts d'onde (cercles rouge et vert) donc à la longueur d'onde λ_A perçue par A.



Ainsi : $\lambda_E = \Delta x + \lambda_A$

La suite … ce sont des mathématiques ☺ !



Savoir faire la démonstration

$\lambda_E = \Delta x + \lambda_A$ $\quad c \times T_e = v \times T_e + c \times T_a$ $\quad$ v = vitesse de E $\quad$ c = célérité de l'onde
T_a = période de l'onde perçue par A

$c \times T_e - v \times T_e = c \times T_a$ $\quad T_e (c - v) = c \times T_a$ $\quad \frac{1}{f_e}(c - v) = c \frac{1}{f_a}$

$f_a (c - v) = c \times f_e$ $\quad$ d'où $\quad \boldsymbol{f_a = f_e \times \frac{c}{c-v}}$

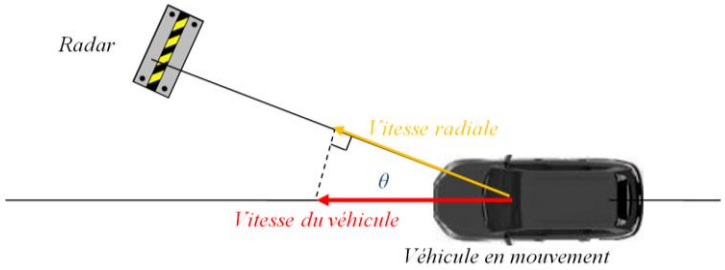
La fréquence reçue par A est donc plus élevée (son plus aigu) que celle émise car $\frac{c}{c-v} > 1$.

En faisant la démonstration pour B (donc E s'éloigne) on aura $\lambda_B = \Delta x + \lambda_E$ et $\boldsymbol{f_b = f_e \times \frac{c}{c+v}}$, la fréquence reçue par B est donc plus basse (son plus grave) que celle émise car $\frac{c}{c+v} < 1$.

5.2. Applications

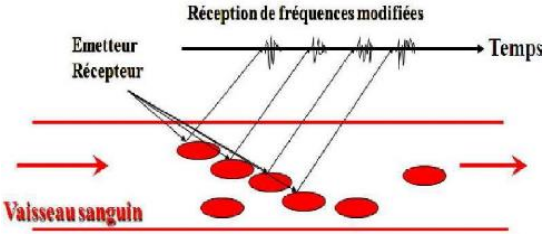
La variation de fréquence entre l'onde perçue et l'onde émise dépend de la vitesse de l'émetteur. On l'utilise donc pour mesurer des vitesses dans de nombreux domaines :

- **Radar routier :**
Le radar envoie une onde électromagnétique (centimétrique ou lumineuse si c'est un laser) de fréquence f_e qui, après réflexion sur le véhicule, revient à la fréquence f_r.



Par la mesure de la différence de fréquence et par le calcul, on peut déterminer la vitesse du véhicule par : $V = \frac{f_r - f_e}{2 f_e \cos(\theta)} c_{onde}$

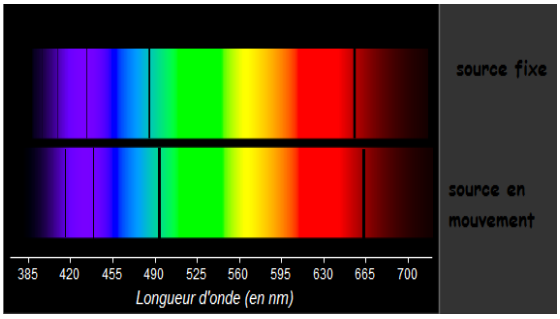
- **En médecine :**
L'**échographie Doppler** suit le même principe que le radar routier mais utilise les ultrasons pour mesurer la vitesse des globules rouges et donc en déduire la circulation sanguine.



- **En astrophysique :**
A partir des travaux de Christian Doppler, Hyppolyte Fizeau postule en 1848 que si une étoile ou une galaxie s'éloigne ou s'approche de la Terre on observe un décalage de ses raies d'absorption (**effet Doppler Fizeau**). La mesure de ce décalage permet de calculer la vitesse à laquelle l'astre s'approche ou s'éloigne de la Terre :

$\lambda = \lambda_0 (1 - \frac{V}{c})$

λ_0 : longueur d'onde de référence
λ : longueur d'onde mesurée
V : vitesse de l'astre
c : célérité de la lumière dans le vide



Si l'astre s'éloigne de nous (V < 0) donc $\lambda > \lambda_0$ **la raie est décalée vers le rouge**. A l'inverse, si l'astre se rapproche de nous (V > 0) donc $\lambda < \lambda_0$ la raie est décalée vers le bleu.