# Cours de physique de $6^e$ secondaire - 2021-2022
# En cours de rédaction et correction - ne pas distribuer
# tout commentaire bienvenu par email à manueldephysique@educode.be

James Dann - Corinne Leyssen - Nicolas Pettiaux

July 5, 2022



## Table des matières

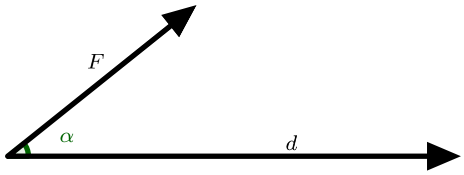



Figure 1: Produit scalaire de la force $\vec{F}$ et de la distance $\vec{d}$. FIXME à remettre en page

# 1 Énergie, travail, puissance et rendement

## 1.1 Travail d'une force

Lorsqu'une force $\vec{F}$ déplace un corps sur une distance $\vec{d}$, on dit que cette force effectue un travail $W$.

Le travail de la force $\vec{F}$ sur la distance $\vec{d}$ est définie par : $W = \vec{F} \cdot \vec{d} = Fd\cos(\theta)$

L'unité du travail est celle de l'énergie : le joule $J$. 1 J = 1 N.m Il s'agit donc d'une unité définie dans le Système international d'unités, le SI.

Quelques conséquences importantes découlent de ces définitions :

- Une force n'effectue de travail que lorsque son point d'application se déplace. Par exemple, la force musculaire d'un haltérophile effectue un travail lorsqu'il soulève une haltère mais n'en n'accomplit plus pendant qu'il la maintient à bout de bras au-dessus de la tête.
- **Le travail d'une force est une grandeur scalaire** obtenue à partir de deux grandeurs vectorielles $\vec{F}$ et $\vec{d}$.
- On parle de **travail moteur** lorsque $\alpha < 90°$ et donc $\cos(\alpha) > 0$. Le travail d'une force motrice est donc généralement positif.
- On parle de **travail résistant** lorsque $\alpha > 90°$ et donc $\cos(\alpha) < 0$. Le travail d'une force de frottement est donc généralement négatif.
- **Une force perpendiculaire au déplacement** ($\alpha = 90°$) **n'effectue aucun travail**. C'est le cas de la force centripète du mouvement circulaire. Par exemple la force gravité qui retient la Lune tournant autour de la Terre. C'est aussi le cas de la force de pesanteur lors d'un déplacement horizontal.

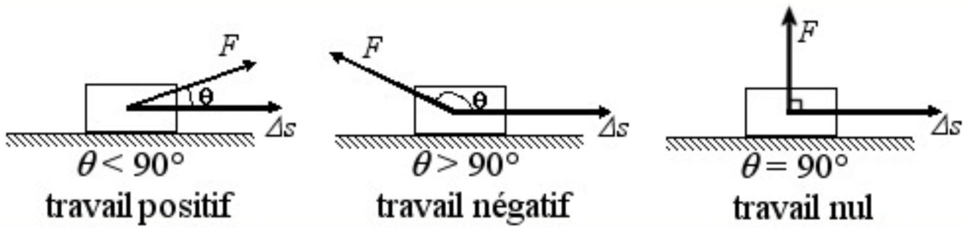



Figure 2:

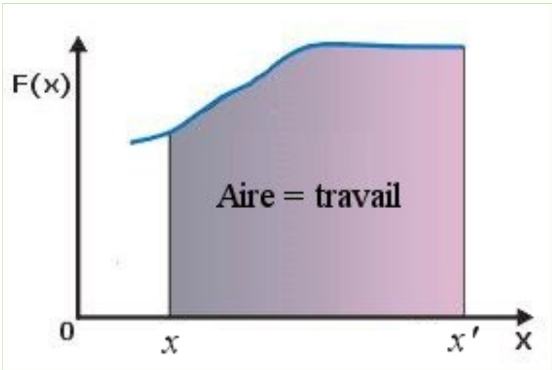



Figure 3:

- Le travail fait sur un objet est l'aire sous la courbe de la force agissant sur l'objet en fonction de la position .

  TODO ajouter une graphe F(t) et $\int_a^b \vec{F} \cdots \vec{dx}$ et des explications

(Sur le schéma : $(x' - x) = \delta$) FIXME à mettre au bon endroit)

## 1.2 Énergie

### 1.2.1 Définition

On définit **l'énergie est la capacité que possède un corps à produire un travail. Son unité le Joule (J).**

La notion d'énergie est sans doute la plus importante de la physique. TODO à expliquer

### 1.2.2 Différentes formes d'énergie :

- cinétique liée à la vitesse et à la masse d'un corps
- potentielle liée à la masse d'un corps et à la hauteur à laquelle il se trouve. (g est l'accélération de pesanteur).
- mécanique égale la somme : Ecinétique + Epotentielle

- thermique liée à la température d'un corps
- électrique liée à l'électricité
- chimique liée aux liaisons chimiques entre les atomes
- rayonnante liée aux ondes électromagnétiques : la lumière, l'infrarouge, l'ultraviolet etc.
- nucléaire liée aux liaisons des protons et neutrons dans les noyaux d'atomes
- de masse liée à la masse selon la relation d'Einstein : $E = mc^2$, la formule sans doute la plus connue de tous, mais sans doute aussi mal comprise.

### 1.3 Puissance

En physique, la puissance reflète la vitesse à laquelle un travail est fourni.

*Définition* : C'est la quantité d'énergie fournie par unité de temps.

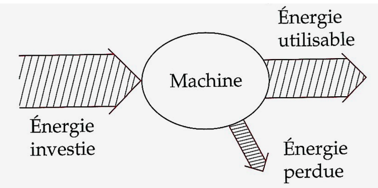
Son unité est le watt (w) (Remarque : ne confondez pas le travail (W) et le watt (w).

La puissance est une grandeur scalaire.

La puissance correspond donc à un débit d'énergie : si deux systèmes de puissances différentes fournissent **le même** travail**, le plus puissant des deux est celui qui est le plus rapide.**

### 1.4 Rendement

$$\boxed{\eta = \frac{E_{utilisable}}{E_{investie}}}$$




L'énergie utilisable est la part de l'énergie finale **réellement exploitée** pour satisfaire le besoin de l'usager.

Ce rapport est toujours inférieur à 1 (100 %).

Un rendement de 100% signifie qu'il n'y a aucune perte d'énergie.

### 1.5 Des ordres de grandeur

La liste ci-dessous reprend des ordres de grandeur d'énergie à connaître par cœur. L'énergie de

- un photon dans le domaine visible $10^{-19}$ J
- un électron dans un tube TV $10^{-15}$ J
- une pomme en chute libre 1 J
- une balle de tennis $10^2$ J
- une balle de fusil $10^4$ J
- chauffage de l'eau d'un bain $10^7$ J

- travail journalier d'un homme $10^7$ J
- une bombe d'une tonne de TNT $10^{10}$ J
- un éclair (de la foudre) $10^{10}$ J
- consommée quotidiennement en Suisse $10^{14}$ J
- une bombe H (100 mégatonnes) $10^{18}$ J
- une éruption solaire $10^{24}$ J
- d'une explosion de supernova $10^{40}$ J

La puissance est l'énergie produite ou dissipée par unité de temps, $P = \frac{E}{\Delta t}$. L'unité du SI de puissance est le Watt, w.

TODO rajouter biographie de Watt et origine du WATT.

Quelques ordres de grandeur de puissances sont importantes à connaître :

- dégagée par un corps humain au repos 70 à 100 w
- consommée par un récepteur TV 100 w
- consommée par un vélomoteur de 50 cm3 900 w
- consommée par un brûleur butane 900 w
- consommée par un sèche-cheveux 1000 à 1300 w
- consommée par une plaque électrique 1,5 kw
- dégagée par un corps humain en activité 300 à 2000 w
- consommée par séchoir à linge $5.10^3$ w à $8.10^3$ w
- consommée par une voiture de tourisme (1400 $cm^3$) 40 kw
- consommée par une locomotive électrique 5 Mw
- dégagée par une centrale nucléaire (Doel) 3000 Mw

## 1.6 Exercices

### Exercice 1

Une voiture de 1,2 tonne et d'une puissance de 3000 watts atteint une vitesse de 21,6 km/h en 10 secondes sur une route horizontale.

1. Quelle est l'énergie consommée ?
2. Quel sera le rendement ?

**Exercice 2**

1. Quelle est l'énergie cinétique d'une voiture d'une tonne roulant à 72 km/h ?
2. Quel travail faut-il effectuer pour arrêter cette voiture ?

**Exercice 3**

Quelle est l'énergie consommée si on fournit une puissance de 2000 watts pendant une minute ?

**Exercice 4**

1. Quelle est l'énergie potentielle d'un plongeur de 75 kg sur le plongeoir des 10 mètres ?
2. En négligeant les frottements, quelle est son énergie cinétique à l'arrivée dans l'eau ?
3. En négligeant le frottement, quelle est sa vitesse en arrivant dans l'eau, 10 mètres plus bas ?
4. En négligeant le frottement, quelle est son énergie mécanique sur le plongeoir et à l'arrivée dans l'eau ?

**Exercice 5**

Une force de 12 N tire un chariot placé sur des rails. L'angle entre la force et le sens des rails (et donc du déplacement) est de 30°. Quel est le travail accompli si le chariot se déplace de 14m ?

**Exercice 6**

Un haltérophile peut arracher du sol une masse de 183 kg et le soulever à une hauteur de 2,1 m en 2 secondes. Quelle est la puissance développée ?

**Exercice 7**

Un wagon a une masse de 20 tonnes.

1. Quelle force motrice faut-il lui appliquer pour qu'il atteigne une vitesse de 54 km/h au bout de 5minutes ?
2. Quel sera le déplacement correspondant ?
3. Quelle est la puissance du moteur ?

## 1.7 Résolutions

**EXERCICES**

**Exercice 1**

Une voiture de 1,2 tonne et d'une puissance de 3000 watts atteint une vitesse de 21,6 km/h en 10 secondes sur une route horizontale.

a) Quelle est l'énergie consommée ?

$m = 1{,}2.10^3\ kg$

$P = 3.10^3\ W$

$V_0 = 0$

$V = 21{,}6\ \frac{km}{h} = 6\ \frac{m}{s}$

$t = 10\ s$

$W$ ?

$W = P.t = 3.10^3.10 = 30.10^3\ J = 30\ kJ$

$\boxed{W = 30\ kJ}$

b) Quel sera le rendement ?

$\boxed{\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie consommée}}}$

or l'Energie consommée $= 30\,000\ J$

Energie utile ?

Energie utile ($W_{utile}$) $= \Delta E_c = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{1{,}2.10^3.6^2}{2} = 21600\ J$

$\Rightarrow \eta = \frac{21600}{30\,000} = 0{,}72 = \boxed{72\ \% = \eta}$

**Exercice 2**

a) Quelle est l'énergie cinétique d'une voiture d'une tonne roulant à 72 km/h ?

$E_c = \frac{mv^2}{2} = \frac{10^3.20^2}{2} = 200\,000\ J = \boxed{200\ kJ = E_c}$

$m = 10^3\ kg$

$V = 72\ \frac{km}{h} = 20\ \frac{m}{s}$

b) Quel travail faut-il effectuer pour arrêter cette voiture ?

$V = 20\ m/s$ $V = 0$

$E_c = 200\ kJ$

$\Rightarrow$ l'Energie nécessaire pour arrêter la voiture sera de 200 kJ

$\boxed{E = 200\ kJ}$

**Exercice 3**

Quelle est l'énergie consommée si on fournit une puissance de 2000 watts pendant une minute ?

$P = 2.10^3\ W$

$t = 1\ min = 60\ s$

$W$ ?

$W = P.t = 2.10^3.60 = 120\,000\ J$

$\boxed{W = 120\ kJ}$

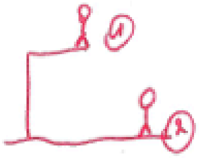
**Exercice 4**

a) Quelle est l'énergie potentielle d'un plongeur de 75 kg sur le plongeoir des 10 mètres ?

$m = 75\,kg$
$h = 10\,m$

$E_p = mgh = 75 \cdot 9{,}81 \cdot 10 = \boxed{7357{,}5\,J = E_p}$

b) En négligeant les frottements, quelle est son énergie cinétique à l'arrivée dans l'eau ?



Principe de conservation d'Energie.

$E_{1} = E_{2}$

$\Rightarrow E_{2} = E_c = \boxed{7357{,}5\,J = E_c}$

c) En négligeant le frottement, quelle est sa vitesse en arrivant dans l'eau, 10 mètres plus bas ?

$E_c = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7357{,}5}{75}} = 14\,\frac{m}{s}$

$V = 14\,\frac{m}{s} = 50\,\frac{km}{h}$

d) En négligeant le frottement, quelle est son énergie mécanique sur le plongeoir et à l'arrivée dans l'eau ?

Puisque les frottements sont négligés et qu'il n'y a pas de forces motrices, $E_{1} = E_{2}$

**Exercice 5**

Une force de 12 N tire un chariot placé sur des rails. L'angle entre la force et le sens des rails (et donc du déplacement) est de 30°. Quel est le travail accompli si le chariot se déplace de 14m ?

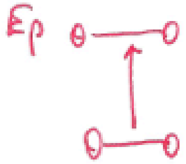
$F = 12\,N$
$\alpha = 30°$
$d = 14\,m$
$W$ ?

$W = F \cdot d \cdot \cos\alpha = 12 \cdot 14 \cdot \cos 30° = 145{,}5\,J$


$\boxed{W = 145{,}5\,J}$

**Exercice 6**

Un haltérophile peut arracher du sol un masse de 183 kg et le soulever à une hauteur de 2,1 m en 2 secondes. Quelle est la puissance développée ?




$P$ ? $P = \frac{W}{t}$

$\Rightarrow$ L'haltérophile communique à la masse une Energie égale à l'Energie potentielle

$E_p = mgh = 183 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}1 = 3770\,J = W$

$P = \frac{W}{t} = \frac{3770}{2} = \boxed{1885\,W = P}$

**Exercice 7**

Un wagon a une masse de 20 tonnes.

a) Quelle force motrice faut-il lui appliquer pour qu'il atteigne une vitesse de 54 km/h au bout de 5minutes ?

$V_0 = 0$

$V = 54\ km/h = 15\ \frac{m}{s}$

$t = 5\ min = 300\ s$

On néglige les frottements

$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow F = ma$ < $a$ ? $F$ ?

$a = \frac{V - V_0}{t} = \frac{15-0}{300} = 0{,}05\ \frac{m}{s^2}$

$F = ma = 20.10^3 . 0{,}05 = \boxed{10^3 N = F}$

b) Quel sera le déplacement correspondant ?

$d = V_0 t + \frac{at^2}{2} = \frac{0{,}05 . 300^2}{2} = \boxed{2250\ m = d}$

c) Quelle est la puissance du moteur ?

$P = \frac{W}{t} = \frac{F.d}{t} = \frac{10^3 . 2250}{300} = \boxed{7{,}5 . 10^3\ W = P}$

# 2 Énergie de l'oscillateur harmonique

## 2.1 Vidéos à regarder

1. Bilan énergétique de l'oscillateur horizontal
2. Énergie d'un oscillateur masse-ressort horizontal

## 2.2 Différentes formes d'énergie d'un oscillateur harmonique

1. Energie cinétique (due à la vitesse) : $E = \frac{1}{2}mv^2$
2. Energie potentielle gravifique (due à la hauteur) : $E = mgh$
3. Energie potentielle élastique (due à la compression ou dilatation d'un ressort) $E = \frac{1}{2}ky^2$

## 2.3 Energie totale d'un oscillateur harmonique

L'énergie totale mécanique d'un oscillateur harmonique est la somme des énergies cinétique et potentielle (gravifique pour un pendule simple et élastique pour un ressort horizontal).

Dans le cas où les frottements sont négligés, l'énergie totale reste constante (principe de conservation d'énergie).

Exprimons mathématiquement ce principe en répondant à la question :

En toute généralité, quelle est l'énergie totale d'un oscillateur harmonique (que ce soit un pendule simple ou un pendule élastique) ?

Lorsqu'un oscillateur harmonique est à une position extrême (+A ou -A), l'énergie cinétique est nulle et l'énergie potentielle maximale (énergie potentielle gravifique pour un pendule simple et énergie potentielle élastique pour un ressort horizontal).

De même, pour un oscillateur harmonique (quel qu'il soit), lorsque la vitesse est maximale, l'énergie potentielle est nulle (énergie potentielle gravifique pour un pendule simple et énergie potentielle élastique pour un ressort horizontal). L'énergie totale de l'OH ($E_T$) est donc égale à $E = \frac{1}{2}mv^2_{\text{max}}$

Or nous savons que : $E_{\text{T}} = \frac{1}{2}mv^2_{\text{max}}$ avec $v_{\text{max}} = A\omega$. Donc $E_{\text{T}} = \frac{1}{2}mv^2_{\text{max}} = \frac{1}{2}mA^2\omega^2$

Or $T$ et $\omega$ ne varient pas au cours de l'oscillation, elles sont constantes.

Notons $k = m\omega^2$ où k est une constante. On trouve $E_{\text{totale}} = \frac{1}{2}kA^2$ qui est donc l'énergie totale d'un oscillateur harmonique.

## 2.4 Que représente k ?

L'énergie totale d'un oscillateur harmonique est $E_{\text{T}} = \frac{1}{2}kA^2$ :

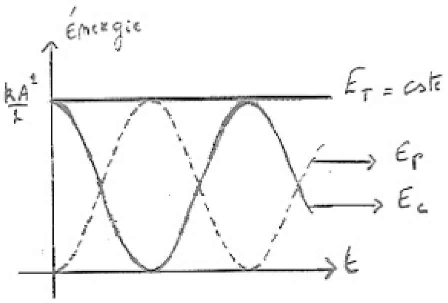
Que représente physiquement cette constante $k = m\omega^2$?

Pour un pendule élastique (un ressort)

k est la constante de raideur du ressort $F = kx$(loi de Hooke) où $x$ étant l'allongement du ressort à l'équilibre lorsque ce dernier est soumis à une force de traction (ou de compression) F.

Pour un pendule simple $k = m\omega^2$ $\omega = 2\frac{\pi}{T}$ et $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. Don $\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} = 4\pi^2\frac{1}{4\pi^2}\frac{g}{L} = \frac{g}{L}$ et $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$ où $L$ est longueur du pendule et $m$, sa masse.

## 2.5 Évolution au cours du temps des énergies cinétique, potentielle et totale.




On remarque que lorsque l'énergie cinétique est maximale alors l'énergie potentielle est nulle et vice versa. Il y a constamment conversion de l'énergie cinétique en potentielle et vice versa, de telle sorte que l'énergie totale reste constante.

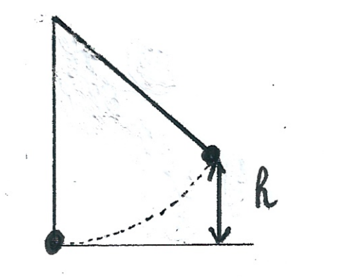
Variation de l'énergie cinétique $E_c(t) = \frac{1}{2}mv(t) = \frac{1}{2}m\omega^2A^2\cos^2(\omega t+\phi)$
Variation de l'énergie potentielle $E_p(t) = \frac{1}{2}ky^2 = \frac{1}{2}kA^2\sin^2(\omega t+\phi)$
L'énergie totale reste constante. Elle est égale à la somme des énergies cinétique et potentielle.

$$E_c(t) + E_p(t) = E_t = \text{constante}$$

## 2.6 Exercices

### Exercice 1

Un pendule simple de longueur égale à 40 cm et d'une masse de 50 g est lâché lorsqu'il fait un angle de 10° avec la verticale.




1. Calculez son énergie potentielle maximale.
2. Calculez sa vitesse maximale.
3. Calculez sa vitesse à mi-hauteur.
4. Quelle est son énergie totale ?

[

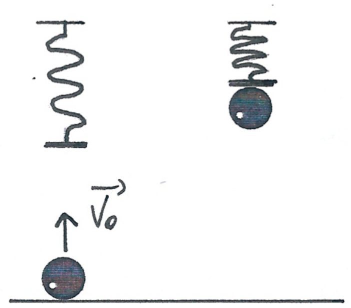
Exercice 2]Exercice 2

Pour lancer une boule (masse 50 g) de « flipper », on comprime de 10 cm un ressort d'une constante de raideur égale à 200 N/m. Quelle sera la vitesse de la boule lorsqu'elle aborde le virage au bout d'une course rectiligne de 1,5 m après qu'elle ait quitté le ressort. Négligez tout frottement !

1. si le flipper est horizontal ?
2. s'il fait un angle de 5° avec l'horizontale ?

[

Exercice 3]Exercice 3



Une balle de 500g est lancée verticalement vers le haut sur un ressort de constante de raideur égale à 32 N/m et de masse négligeable. La vitesse de lancer de 2 m/s.

Le ressort se comprime de 12 cm lorsque la bille atteint sa hauteur maximale.

Quelle est la hauteur atteinte par la bille ?

**Exercice 4**

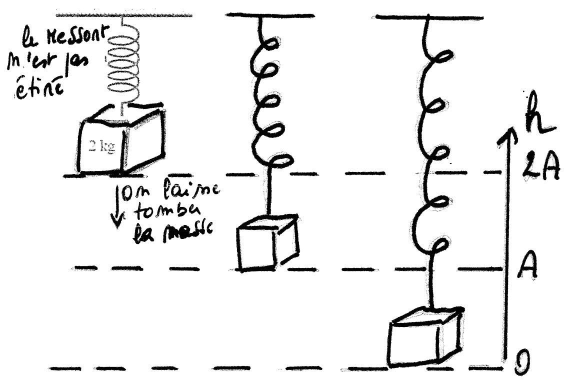
Un fusil de fléchettes comprend un ressort de raideur k = 250 N/m, de longueur à vide l0 = 12 cm et qui, comprimé par la fléchette de masse 25 g, ne mesure plus que l = 4,0 cm.

1. Avec quelle vitesse la fléchette sort-elle du fusil dans le cas d'un tir horizontal. Faire le calcul sans tenir compte du frottement entre fléchette et fusil.

2. Quelle altitude maximale peut-elle atteindre dans le cas d'un tir vertical ? Faire le calcul sans tenir compte du frottement entre fléchette et fusil ni de la résistance de l'air.

[

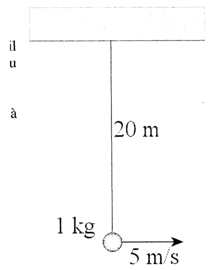
Exercice 5]Exercice 5




La masse de 2 kg de la figure ci-contre est suspendue au plafond avec un ressort de masse négligeable et dont la constante de raideur vaut 200 N/m. Au départ, le ressort n'est pas étiré ni comprimé. On laisse alors tomber la masse sans la pousser. On aura alors un mouvement d'oscillation de la masse.

1. Quelle sera la distance parcourue par le ressort avant qu'il n'entame sa remontée verticale ?

2. Quelle sera la vitesse maximale du ressort ?




**Exercice 6**

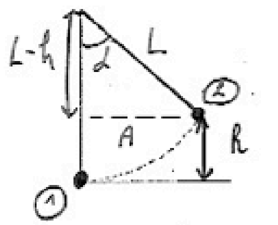
Le pendule de la figure ci-contre est en mouvement harmonique et a une vitesse de 5 m/s quand il passe par sa position d'équilibre. Quelle est la vitesse du pendule lorsqu'il fait un angle de 10° par rapport à la verticale ?

## 2.7 Résolutions

**EXERCICE 1**

Un pendule simple de longueur égale à 40 cm et d'une masse de 50 g est lâché lorsqu'il fait un angle de 10° avec la verticale.

a) Calculez son énergie potentielle maximale.




Il y a deux façons de procéder car l'énergie potentielle maximale est l'énergie potentielle gravifique que le pendule a en position ② (cf. schéma)

(Remarque : dans ce problème, il n'y a pas d'énergie potentielle élastique car il n'y a pas de ressort.)

Je vais avoir besoin de h et de A

1) h ? $\cos\alpha = \frac{L-h}{L} \Rightarrow \boxed{h = L - L\cos\alpha}$

2) A ? $\sin\alpha = \frac{A}{L} \Rightarrow \boxed{A = L\sin\alpha}$

1) Or l'énergie potentielle gravifique en ② (que je vais noter $E_{g②}$) $= mgh$

2) Ou bien $E_{g②} = E_T = \frac{kA^2}{2}$ (car la seule énergie que le pendule a en position ② est de l'énergie potentielle gravifique $= E_T$ (Energie totale))

$\boxed{1}$ Calculons $E_{g②} = mgh$

$$E_{g②} = mgh = mg(L - L\cos\alpha) = 0{,}050 \cdot 9{,}81\,(0{,}4 - 0{,}4\cdot\cos 10°) \quad \begin{cases}\alpha = 10°\\ L = 0{,}4\text{ m}\\ m = 0{,}050\text{ kg}\end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{E_{g②} = 0{,}003\text{ J}}$$

$\boxed{2}$ Autre façon de procéder : Calculons $E_{g②} = E_T$ (Energie totale du pendule)

$$E_T = \underbrace{E_c}_{0} + E_g + E_{él}$$

($E_{él}$ = 0 car il n'y a pas de ressort) ($E_c$ = 0 car en ②, $v = 0$)

Or $E_T = \frac{kA^2}{2} = \frac{m\omega^2A^2}{2}$ et $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$\Rightarrow E_T = \frac{m\cdot 4\pi^2 A^2}{2T^2}$ avec $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow T^2 = 4\pi^2\frac{L}{g} \Rightarrow \frac{1}{T^2} = \frac{g}{4\pi^2 L}$

$\Rightarrow E_T = \frac{m\cdot\cancel{4\pi^2}\cdot A^2}{2}\cdot\frac{g}{\cancel{4\pi^2}L} = \frac{mA^2g}{2L}$ avec $A = L\sin\alpha$

$\Rightarrow E_T = \frac{mL^2\sin^2\alpha\cdot g}{2L} = \frac{mL\sin^2\alpha\cdot g}{2} = \frac{0{,}050\cdot 0{,}4\cdot(\sin 10°)^2\cdot 9{,}81}{2}$

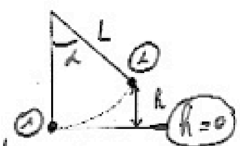
$\Rightarrow \boxed{E_T = 0{,}003\text{ J}}$ ☺ On obtient bien la même valeur qu'en $\boxed{1}$ (mais le chemin était moins rapide...)

Remarque : ne vous affolez pas ... la résolution de cet exercice prend 3 lignes (cf $\boxed{1}$). J'ai pris une page à vous expliquer puisque je ne sais pas le faire de vive voix. Mais c'est un bel exercice, vous ne trouvez pas ? ☺

**Exercice 1 (suite)**

b) Calculez sa vitesse maximale.

Vmax !




Rappel :
$h = L - L\cos\alpha$
$A = L\sin\alpha$

Il y a de nouveau deux façons de procéder. Soit par le principe de conservation d'énergie $\boxed{1}$, soit avec les équations de la cinématique de l'OH $\boxed{2}$

$\boxed{1}$ Principe de conservation d'énergie

$$E_{T(1)} = E_c + E_g + E_{El} = \underbrace{\frac{m V_{max}^2}{2}}_{\text{car en (1) la vitesse est max}} + \underbrace{0}_{\text{car } h=0 \text{ en (1)}} + 0 \quad \text{car il n'y a pas de ressort}$$

$$\Rightarrow E_{T(1)} = \frac{m V_{max}^2}{2}$$

$$E_{T(2)} = E_c + E_g + E_{El} = \underbrace{0}_{\text{car } v=0 \text{ en (2)}} + mgh + 0 \quad \text{car il n'y a pas de ressort}$$

$$\Rightarrow E_{T(2)} = mgh$$

Et par le principe de conservation d'énergie : $E_{T(1)} = E_{T(2)}$

$$\Rightarrow \frac{\cancel{m} V_{max}^2}{2} = \cancel{m} gh \Rightarrow V_{max} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot g (L - L\cos\alpha)}$$

$$\Rightarrow V_{max} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\,(0{,}4 - 0{,}4 \cdot \cos 10^\circ)} = \boxed{0{,}34 \text{ m/s} = V_{max}}$$

$\boxed{2}$ $V_{max}$ ? $\quad V_{max} = A\omega = A\frac{2\pi}{T}$ $\quad A = L\sin\alpha$, $\quad \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}}$

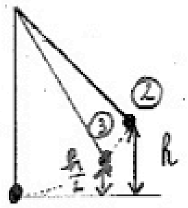
$$\Rightarrow V_{max} = L \cdot \sin\alpha \cdot \cancel{2\pi} \cdot \frac{1}{\cancel{2\pi}}\sqrt{\frac{g}{L}}$$

$$= L\sin\alpha\sqrt{\frac{g}{L}} = \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{L^2 g}{L}} = \sin\alpha\sqrt{L \cdot g}$$

$$\Rightarrow V_{max} = \sin 10^\circ \sqrt{0{,}4 \cdot 9{,}81} = \boxed{0{,}34 \frac{m}{s} = V_{max}}$$

**Exercice 1 (suite)**

c) Calculez sa vitesse à mi-hauteur.




Principe de conservation d'Energie

$E_{T(1)} = E_{T(3)}$ $V_3$ ?

a) $E_{T(1)} = E_c + E_g + E_{EP} = 0 + mgh + 0$

$E_{T(1)} = mgh$

b) $E_{T(3)} = E_c + E_g + E_{EP} = \frac{mV_3^2}{2} + mg\frac{h}{2} + 0$

à mi-hauteur

$E_{T(1)} = E_{T(3)} \Rightarrow mgh = \frac{mV_3^2}{2} + mg\frac{h}{2} \Rightarrow \frac{V_3^2}{2} = gh - g\frac{h}{2} = \frac{2gh - gh}{2}$

$\Rightarrow \frac{V_3^2}{2} = \frac{gh}{2} \Rightarrow V_3 = \sqrt{gh} = \sqrt{g(L - L\cos\alpha)} = \sqrt{9{,}81(0{,}4 - 0{,}4 \cdot \cos 10°)}$

$\Rightarrow \boxed{V_3 = 0{,}24\ \frac{m}{s}}$

Remarquez que la vitesse à mi-hauteur n'est pas égale à la moitié de la vitesse max. (Normal, le problème n'est pas linéaire mais harmonique).

d) Quelle est son énergie totale ?

$\boxed{E_T = \frac{kA^2}{2}}$ avec $\boxed{k = m\omega^2}$ $\boxed{E_T = 0{,}003\ J}$ (cf a) $\boxed{2}$)

ou

$E_T = \frac{mV_{max}^2}{2} = \frac{0{,}050 \cdot 0{,}34^2}{2} = \boxed{0{,}003\ J = E_T}$

ou

$E_T = mgh = \boxed{0{,}003\ J = E_T}$ (cf. a) $\boxed{1}$)

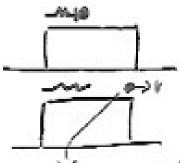
**EXERCICE 2**

Pour lancer une boule (masse 50 g) de « flipper », on comprime de 10 cm un ressort d'une constante de raideur égale à 200 N/m. Quelle sera la vitesse de la boule lorsqu'elle aborde le virage au bout d'une course rectiligne de 1,5 m après qu'elle ait quitté le ressort. Négligez tout frottement !

$m = 0{,}050$ kg
$y = 0{,}1$ m
$k = 200$ N/m
$V$ ?
$d = 1{,}5$ m

a) si le flipper est horizontal ? V ?

le ressort est comprimé d'une distance $y$ => il contient de l'énergie potentielle élastique $E_e = \frac{ky^2}{2}$



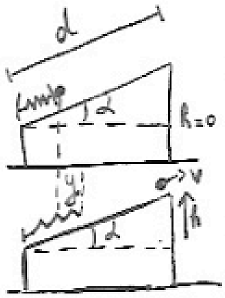

$E_T = \frac{ky^2}{2}$ $\qquad \frac{ky^2}{2} = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{ky^2}{m}}$

$E_T = \frac{mv^2}{2}$ $\qquad \Rightarrow V = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^{-2}}{50 \cdot 10^{-3}}} = 6{,}3$ m/s

$\boxed{V = 6{,}3 \ \frac{m}{s}}$

l'énergie élastique du ressort comprimé s'est convertie en énergie cinétique de la balle

b) s'il fait un angle de 5° avec l'horizontale ? V ? $\alpha = 5°$




$E_T = \frac{ky^2}{2}$ (La seule énergie est l'énergie élastique emmagasinée dans la compression du ressort)

$E_T = \frac{mv^2}{2} + mgh$ (La balle a de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle gravifique)

$\Rightarrow \frac{ky^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + mgh$ $\quad V$ ? $h$ ? $\quad \sin\alpha = \frac{h}{d}$

$\Rightarrow h = d \sin\alpha$

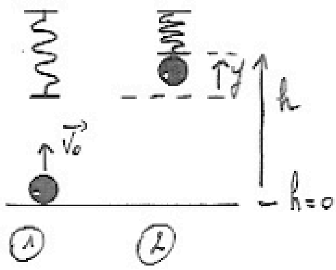
$\boxed{V = 6{,}12 \ \frac{m}{s} \ (22 \ \frac{km}{h})}$

$\Rightarrow \frac{mV^2}{2} = \frac{ky^2}{2} - mgh \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2}{m}\left(\frac{ky^2}{2} - mgh\right)} = \sqrt{\frac{2}{m}\left(\frac{ky^2}{2} - mgd\sin\alpha\right)}$

$\Rightarrow V = \sqrt{\frac{2\left(\frac{200 \cdot 10^{-2}}{2} - 50 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}5 \cdot \sin 5°\right)}{50 \cdot 10^{-3}}} = 6{,}12 \ \frac{m}{s}$

**EXERCICE 3**

Une balle de 500g est lancée verticalement vers le haut sur un ressort de constante de raideur égale à 32 N/m et de masse négligeable. La vitesse de lancer de 2 m/s.
Le ressort se comprime de 12 cm lorsque la bille atteint sa hauteur maximale.
Quelle est la hauteur atteinte par la bille ?




$m = 0,5\ kg$

$k = 32\ \frac{N}{m}$

$V_0 = 2\ m/s$

$y = 0,12\ m \Rightarrow$ distance de compression du ressort

$h$ ?

---

$E_{T1} = E_{T2} \Rightarrow$ Principe de conservation d'Energie

1) $E_{T1} = E_c + E_g + E_{EP}$

$= \frac{mV_0^2}{2} + 0 + 0$ (la seule Energie est l'Energie cinétique de la balle)

2) $E_{T2} = E_c + E_g + E_{EP}$

$= 0 + mgh + \frac{ky^2}{2}$ $\Rightarrow$ un ressort est comprimé

$V_{balle} = 0$ ; Energie gravifique de la balle

$\Rightarrow \frac{mV_0^2}{2} = mgh + \frac{ky^2}{2}$ (car $E_{T1} = E_{T2}$)

$\boxed{h = 15,7\ cm}$

$\Rightarrow h = \left(\frac{mV_0^2}{2} - \frac{ky^2}{2}\right) \cdot \frac{1}{mg}$

$\Rightarrow h = \left(\frac{0,5 \cdot 2^2}{2} - \frac{32 \cdot 0,12^2}{2}\right) \cdot \frac{1}{0,5 \cdot 9,81} = 0,157\ m$

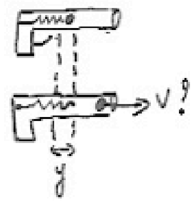
**EXERCICE 4**

Un fusil de fléchettes comprend un ressort de raideur k = 250 N/m, de longueur à vide $l_0$ = 12 cm et qui, comprimé par la fléchette de masse 25 g, ne mesure plus que l = 4.0 cm.


$L_0 = 12$ cm, $L = 4$ cm $\Rightarrow y = 8$ cm $= 0{,}08$ m

$m = 25 \cdot 10^{-3}$ kg, $k = 250 \frac{N}{m}$

a) Avec quelle vitesse la fléchette sort-elle du fusil dans le cas d'un tir horizontal. Faire le calcul sans tenir compte du frottement entre fléchette et fusil.




$\Rightarrow E_T = \frac{ky^2}{2}$

$\Rightarrow E_T = \frac{mv^2}{2}$

$\frac{ky^2}{2} = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{ky^2}{m}}$

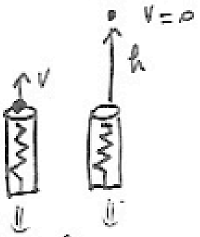
$\Rightarrow V = \sqrt{\frac{250 \cdot 0{,}08^2}{25 \cdot 10^{-3}}} = 8 \frac{m}{s}$

$\left(\cong 30 \frac{km}{h}\right)$

$\boxed{V = 8 \frac{m}{s}}$

b) Quelle altitude maximale peut-elle atteindre dans le cas d'un tir vertical ? Faire le calcul sans tenir compte du frottement entre fléchette et fusil ni de la résistance de l'air.

le ressort n'est plus comprimé.

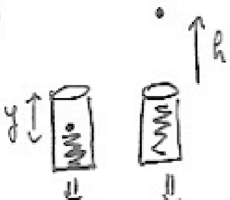



$E_T = \frac{mv^2}{2}$ $E_T = mgh$

$\Rightarrow \frac{\cancel{m}v^2}{2} = \cancel{m}gh$

$\Rightarrow h = \frac{v^2}{2g} = \frac{64}{2 \cdot 9{,}81} = 3{,}3$ m

OU




$E_T = \frac{ky^2}{2}$ $E_T = mgh$

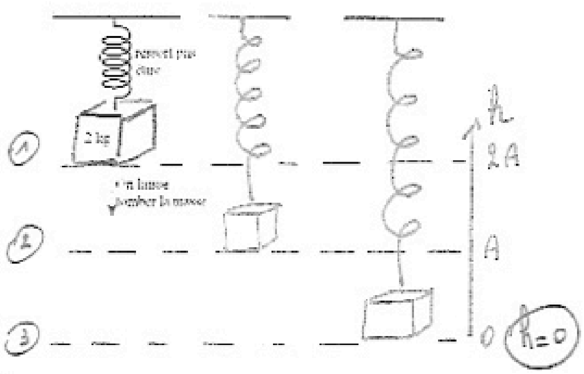
$\Rightarrow \frac{ky^2}{2} = mgh \Rightarrow h = \frac{ky^2}{2mg}$

$\Rightarrow h = \frac{250 \cdot 0{,}08^2}{2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}81} = 3{,}3$ m

$\boxed{h = 3{,}3 \text{ m}}$

**QUESTION** 5

La masse de 2 kg de la figure est suspendue au plafond avec un ressort donc la constante vaut 200 N/m. Au départ, le ressort n'est pas étiré ni comprimé. On laisse alors tomber la masse sans la pousser. On aura alors un mouvement d'oscillation de la masse.




a) Quelle sera la distance parcourue par le ressort avant qu'il n'entame sa remontée verticale ?

$$E_{T(1)} = mg2A$$

$$E_{T(3)} = \frac{k(2A)^2}{2}$$

$$\Rightarrow mg2A = \frac{k4A^2}{2} = k2A^2$$

$$\Rightarrow mg = kA \Rightarrow A = \frac{mg}{k} = \frac{2 \cdot 9{,}81}{200}$$

$$\boxed{2A = 0{,}1962\ m}$$

$$\Rightarrow A = 0{,}098\ m$$

$\Rightarrow$ distance parcourue $= 2A = 0{,}1962\ m$

Cette méthode est bien plus rapide... ☺

b) Quelle sera la vitesse maximale du ressort ?

$$E_{T(2)} = E_{T(1)} \Rightarrow \frac{mV_{max}^2}{2} + mgA + \frac{kA^2}{2} = mg2A$$

$$\Rightarrow \frac{mV_{max}^2}{2} = mg2A - mgA - \frac{kA^2}{2}$$

ou $V_{max} = A\omega = 0{,}098 \cdot \frac{2\pi}{0{,}628\text{s}}$

$V_{max} = 0{,}98\ m/s$

$$\Rightarrow V_{max}^2 = \left(mgA - \frac{kA^2}{2}\right)\frac{2}{m}$$

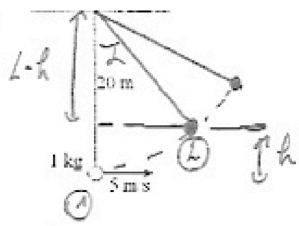
$$V_{max} = \sqrt{2gA - \frac{kA^2}{m}}$$

$$\boxed{V_{max} = 0{,}98\ \frac{m}{s}}$$

$$V_{max} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}098 - \frac{200 \cdot (0{,}098)^2}{2}} = 0{,}98\ \frac{m}{s}$$

**QUESTION** 6

Le pendule de la figure ci-contre a une vitesse de 5 m/s quand il est à sa position d'équilibre. Quelle est la vitesse du pendule lorsqu'il fait un angle de 10° par rapport à la verticale ?




⚠ en ② $V \neq 0$ (il n'a pas atteint sa hauteur max)

$E_{T1} = \frac{m V_{max}^2}{2}$ ⟹

$E_{T1} = mgh + \frac{mV^2}{2}$

$\alpha = 10°$

⟹ $h$ ? ⟹ $\cos\alpha = \frac{L-h}{L}$ ⟹ $L\cos\alpha = L-h$

⟹ $h = L - L\cos\alpha = 20 - 20\cos 10°$

⟹ $h = 0{,}304\,m$

⟹ $\frac{m V_{max}^2}{2} = mgh + \frac{mV^2}{2}$

⟹ $\frac{V^2}{2} = \frac{V_{max}^2}{2} - gh$

⟹ $V = \sqrt{2\left(\frac{V_{max}^2}{2} - gh\right)} = \sqrt{2\left(\frac{5^2}{2} - 9{,}81 \cdot 0{,}304\right)}$

⟹ $V = 4{,}36\ \frac{m}{s}$

$\boxed{V = 4{,}36\ \frac{m}{s}}$

# 3 Ondes mécaniques

## 3.1 Ondes mécaniques -exemples et définition

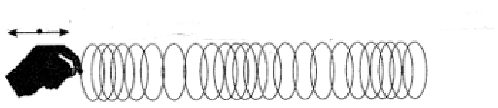
Au premier chapitre, nous avons vu les caractéristiques des oscillateurs harmoniques.

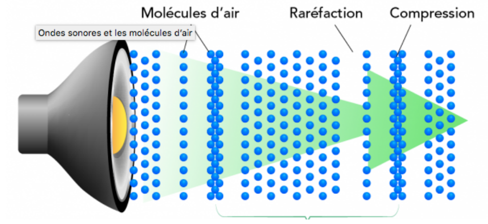
Un oscillateur harmonique vibrant au sein d'un milieu produit une onde au sein de ce milieu. Mais qu'est-ce qu'une onde ?

Prenons quelques exemples :

- Laissez tomber un caillou dans l'eau, la chute du caillou dans l'eau produit des vagues. Ces vagues se propagent au sein du milieu (ici l'eau). Dans ce cas, l'oscillateur harmonique est du à la chute du caillou et l'onde est due aux vagues qui se propagent.

- Réalisez des ondes le long d'une corde. Nous voyons une perturbation qui se propage le long de la corde. Ici, l'oscillateur harmonique est la main et le milieu de propagation de l'onde est la corde.

- 
  Produisons des ondes le long d'un ressort en réalisant un mouvement vibratoire horizontal avec la main (l'oscillateur harmonique). Nous voyons une succession de compressions dilatations qui se propagent le long du ressort (le milieu).

- 
  
  Le son est également une onde. Un haut-parleur (l'oscillateur) produit des ondes en **vibrant dans l'air (le milieu).** Lorsque le haut-parleur vibre, il pousse contre l'air ambiant. Les vibrations entraînent une succession de compressions et de **dilatations** de l'air. Cela provoque des zones de haute et de basse pression à mesure que le son se propage.

## 3.2 Ondes longitudinales et transversales

### 3.2.1 Vidéos à visualiser

1. Ondes mécaniques progressives
2. Ondes transversales et longitudinales
3. Cours de physique TS ondes
4. 45 épic battles

## 3.3 Caractéristiques des ondes progressives

### 3.3.1 Fréquence d'une onde progressive

Considérons une onde progressive se déplaçant au sein d'un milieu. (Par exemple des vagues à la surface de l'eau).

Chaque point du milieu oscille avec la même fréquence que celle de l'oscillateur harmonique responsable de la production de l'onde.

### 3.3.2 Longueur d'onde d'une onde progressive

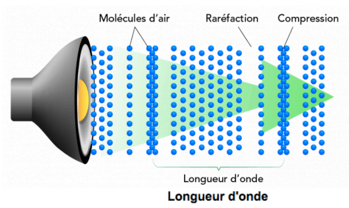
La vitesse v d'une onde **(aussi appelée célérité** de l'onde) sera égale au rapport de la distance parcourue par l'onde sur le temps mis pour parcourir cette distance.

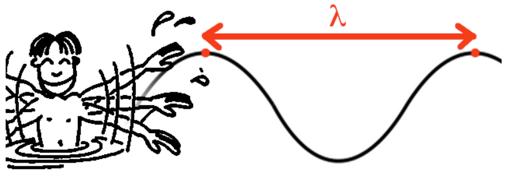
Si nous considérons un intervalle de temps égal à la période, la distance parcourue sera alors appelée la longueur d'onde et représentée par la lettre lambda $\lambda$.

Nous avons donc :

## 3.4 Vidéos à visualiser

1. Grandeurs et caractéristiques d'une onde
2. Longueur d'onde et fréquence
3. Caractéristiques des ondes progressives Vitesse du son




### 3.4.1 Vitesse de propagation d'une onde

La vitesse de propagation d'une onde ne dépend que des caractéristiques du milieu au sein duquel l'onde se propage.

La vitesse d'une onde au sein d'un milieu sera d'autant plus grande que la rigidité du milieu sera importante.

Exemples :

1. la vitesse de propagation du son dans l'air à 15°C est de 340 m/s. (à connaître par cœur) . Nous utiliserons souvent cette valeur dans la suite du cours et pour les exercices.
2. la vitesse de propagation du son dans l'air à 30°C est de 349 m/s.
3. la vitesse de propagation du son dans l'air à 0°C est de 331 m/s.
4. la vitesse de propagation du son dans l'eau de mer est de 1500m/s.

Autrement dit, si vous modifiez la fréquence d'une onde sans modifier le milieu au sein duquel elle se propage, la vitesse de l'onde reste inchangée, c'est la longueur d'onde qui varie.

## 3.5 Exercice

**Exercice 1**

Une onde progressive transversale et entretenue est produite le long d'une corde. La distance entre deux crêtes est de 20 cm et la fréquence du vibreur étant de 50 Hz, quelle est la vitesse de propagation de l'onde le long de la corde. Exprime-la en km/h.

**Exercice 2**

Une chauve-souris émet des ondes ultrasonores dont la plus petite longueur d'onde est de 3,4 mm. La durée mise par les ondes pour revenir à la chauve-souris permet à cette dernière, après réflexion de l'onde sur une proie, d'apprécier la distance la séparant de cette proie, un papillon par exemple. C'est le phénomène d'écholocation.

Calcule la fréquence des ondes émises par la chauve-souris.

**Exercice 3**

Sachant que la gamme d'audibilité de l'oreille humaine est comprise entre 20 Hz et 20 kHz, vérifie que la fréquence des ondes ultrasonores émises par la chauve-souris ne sont pas audibles par l'homme.

**Exercice 4**

Un sonar sur un bateau émet des ultrasons. L'appareil envoie un signal au fond de la mer. Le signal réfléchi est reçu 0,2 secondes après l'émission. Calculer la profondeur de l'eau.

**Exercice 5**

Une cuve à onde est un récipient rempli d'eau. Un vibreur produit des vagues à la surface de l'eau et à l'aide d'un miroir qui se trouve à l'intérieur de la cuve, nous pouvons visualiser la propagation des vagues sur un écran. Les cercles en traits pointillés représentent les creux des vagues et les cercles en traits pleins, les crêtes des vagues.

**Exercice 6**

Un expérimentateur observe une distance entre deux crêtes de 3 cm lorsque le vibreur oscille à une fréquence de 220 Hz.

1. Quelle est la longueur d'onde de l'onde produite ?

2. Quelle est la vitesse des ondes à la surface de l'eau (donc la vitesse des vagues) ?

3. Si la fréquence du vibreur augmente, comment varie la vitesse des ondes ? Justifie ta réponse.

**Exercice 7**

Un bateau au mouillage, soumis à la houle des vagues, monte et descend de 2 mètres (en tout) toutes les 12 secondes. On mesure la distance entre deux crêtes qui est 8 mètres.

1. Réaliser le graphique de la variation de l'élongation en fonction du temps.

2. Réaliser le graphique de la variation de l'élongation en fonction de la distance à la source.

3. Calculer la vitesse des vagues.

**Exercice 8**

Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ? Indique la réponse correcte, V ou F, et justifie chaque réponse par une petite phrase ou un calcul.

1. La longueur d'onde d'un son dans l'air est d'autant plus petite que la fréquence de l'onde est grande.

2. Les rides provoquées à la surface de l'eau par un excitateur sont des ondes longitudinales.

3. Un signal dont la période est de 25 ns a une fréquence de 40 GHz.

4. La vitesse de propagation d'une onde au sein d'un milieu dépend de la fréquence du signal responsable de la propagation des ondes.

5. Au plus une corde de guitare est tendue, au plus le son émis par cette corde est grave.

6. Le phénomène de résonance réalisé à l'aide de deux diapasons peut se produire dans le vide.

7. La longueur d'onde d'une vibration sonore dans l'air étant de 5 cm, la fréquence correspondante est de 6,8 kHz.

8. Un son d'une fréquence de 30 MHz est audible pour l'homme.

9. Si on entend l'écho d'un cri 3 secondes après l'avoir émis, l'obstacle réfléchissant se trouve donc à 510 m.

10. Un son aigu dans l'air a une plus grande longueur d'onde que le son produit par la même source mais placée dans l'eau.

11. Des vagues à la surface de l'eau dans une cuve à onde se déplacent plus rapidement si la fréquence du vibreur augmente

**Exercice 9**

Lors de la propagation d'une onde mécanique, il y a :

- Transport d'énergie
- Transport de matière
- Ni transport de matière et ni transport d'énergie

Quelle(s) est (sont) la (les) affirmation(s) correcte(s) ?

**Exercice 10**

Dans une piscine, Juliette se trouve en un point M situé à 5,0 m de la machine à vagues placée en S. Comme elle est juste assez grande pour sortir la tête de l'eau, elle doit sauter à chaque fois qu'une crête de vague l'atteint. La vitesse des vagues est de 2,0 m/s. Juliette doit sauter :

1. 2,5 s après la création de la vague en S
2. 0,40 s après la création de la vague en S
3. En même temps que se crée la vague en S

**Exercice 11**

Les ondes progressives périodiques présentent :

1. Une périodicité temporelle
2. Une périodicité spatiale

La fréquence d'un phénomène périodique :

1. est l'inverse de la période
2. est le nombre de fois que se répète le phénomène par seconde
3. représente la durée du phénomène

**Exercice 12**

Une onde de période T = 10 ms se propage à la vitesse v = 250 m/s. Sa longueur d'onde $\lambda$ vaut :

1. 2,5 m
2. 2,5 km
3. 25 km

**Exercice 13**

Voici quatre propositions concernant la propagation du son dans l'air, laquelle (lesquelles) est (sont) correcte(s) ?

1. Il s'agit de la transmission de proche en proche de la vibration des molécules constituant l'air.
2. Cette vibration s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation.
3. La longueur d'onde d'un son périodique est indépendante de sa fréquence.
4. Dans le même milieu, un observateur entend les sons aigus plus rapidement que les sons graves issus simultanément de la même source.

**Exercice 14**

On utilise des ultrasons émis à la fréquence de 40 kHz, dans l'air. Parmi les affirmations suivantes, laquelle (lesquelles) est (sont) correcte(s) ?

1. La longueur d'onde des ultrasons est 8,5 mm.
2. La distance parcourue pendant une période est 8,5 mm.
3. La fréquence est modifiée si l'on change la nature du gaz dans lequel ils se propagent.
4. Si la fréquence des ultrasons est divisée par deux, alors leur vitesse de propagation dans un milieu donné est également divisée par 2.

# 4 Étude mathématique de l'onde progressive

## 4.1 Vidéos à visualiser

1. Onde mécanique sinusoïdale dans une corde
2. Onde sur une corde.

## 4.2 Mise en situation :

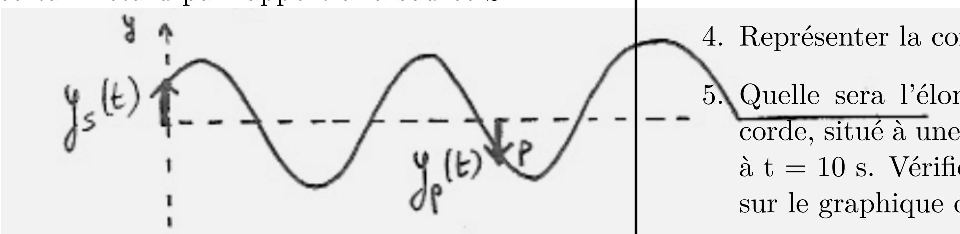
Soit une onde transversale progressive et périodique produite le long d'une corde.

- S étant la source (le vibreur est un oscillateur harmonique).
- P est un point de la corde situé à une distance d de la source.
- Vous savez que la variation de l'élongation de la source S en fonction du temps peut s'écrire :

$y_s(t) = A \sin(t)$ si nous considérons la constante de phase nulle.

Comment pourrions-nous écrire la variation de l'élongation d'un point P de la corde en fonction du temps, sachant que le point P est distant d'une distance d de la source ? Notons la $y_P(t)$.

Un point P quelconque de la corde oscille à la même fréquence que la source S mais à un instant donné, leurs élongations ne sont pas les mêmes. Le point P oscille comme la source mais avec un certain déphasage dû au temps que met l'onde pour atteindre le point P. Le point P oscille donc avec un certain retard par rapport à la source S.




FIXME à faire au net

Le point P reproduit l'oscillation de la source avec un certain retard t' qui est le temps mis par l'onde pour atteindre le point P.

Or nous savons que le temps est le rapport d'une distance sur une vitesse.

$\Rightarrow t' = \frac{d}{v}$ ⇒ $t'$ : temps mis par l'onde distance d

$v$ : vitesse de l'onde.

Les variations d'élongations de S et

mais déphasées dans le temps.

$\Rightarrow y_P(t) = y_S(t - t')$ OR $y_S = A$

$\Rightarrow y_P(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}(t - t')\right)$ OR $t' = \frac{d}{v}$

$\Rightarrow y_P(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{d}{v}\right)\right) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right.$

$\Rightarrow y_P(t) = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi d}{\lambda}\right) = A \sin(\omega$

$\Rightarrow \boxed{y_P(t) = A \sin\left(\omega t - \frac{2\pi d}{\lambda}\right)}$ $y_P(t)$ l'élonga distant d

## 4.3 Exemple

Un vibreur provoque des ondes sinusoïdales de période T = 2s à l'extrémité d'une corde. A l'instant initial, l'élongation est nulle. L'amplitude des ondes est de 1 mètre. La vitesse de l'onde le long de la corde est de 4 m/s.

1. Déterminez la longueur d'onde le long de cette corde.
2. Quelle est l'élongation du vibreur à t = 10 s ?
3. Quelle sera la distance parcourue par l'onde à t = 10s ?
4. Représenter la corde à t = 10 s.
5. Quelle sera l'élongation d'un point P de la corde, situé à une distance d = 3m du vibreur à t = 10 s. Vérifier l'exactitude de la réponse sur le graphique du point précédent.
6. Quelle sera l'élongation d'un point P de la corde, situé à une distance d = 5m du vibreur à t = 10 s. Vérifier l'exactitude de la réponse sur le graphique du point 4).

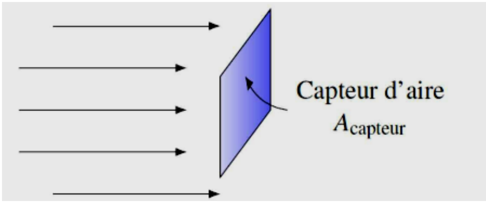



Figure 12:

# 5 Ondes sonores - le son

## 5.1 Trois caractéristiques du son

Lorsque vous écoutez une mélodie jouée par un instrument de musique ou une personne qui parle, vous pouvez déterminer de quel instrument il s'agit ou quelle est la personne qui parle.

Vous pouvez également détecter les différences de fréquence et les variations de volume sonore.

Le son a trois caractéristiques :

1. La hauteur : liée à la fréquence. La hauteur du son est la sensation d'aigu ou de grave. Elle est liée à la fréquence de vibration de la source oscillante.

   Un son grave pour l'oreille humaine correspond à une basse fréquence, un son aigu à une fréquence élevée.

   L'oreille humaine perçoit des sons si leur fréquence est comprise approximativement entre 16 Hz et 20 kHz.

   D'un point de vue musical, la hauteur du son détermine la note.

2. Le timbre

   Le timbre d'un son est la sensation physiologique qui permet de distinguer deux sons de même fréquence mais dont la perception semble différente. C'est une caractéristique du son qui nous permet de déterminer la différence entre deux voix de deux personnes différentes.

3. L'intensité sonore.

   C'est la caractéristique du son liée à l'amplitude du son perçu. Nous disons dans le langage courant qu'il s'agit du volume du son (plus ou moins « fort »).

## 5.2 Intensité sonore

Une source sonore produit une onde qui est captée par un auditeur se trouvant à une certaine distance de l'émetteur.

Quelle sera l'intensité sonore perçue par le capteur ? Comment définir cette intensité sonore ?

1. Énergie captée en fonction de la surface du capteur

   Dans le cas d'une onde sonore à une dimension, un capteur situé juste à côté de l'émetteur reçoit la totalité de la puissance de l'onde, car l'onde n'a pas d'autre place où aller.

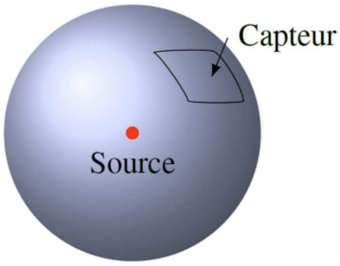



Figure 13:

Pour une onde en trois dimensions (produisant un son de façon isotrope dans toutes les directions), le capteur ne captera qu'une partie de l'onde, car seule une partie de l'onde atteint le capteur. L'énergie captée dépend donc de la surface du capteur.

2. Énergie captée en fonction du temps

   Évidemment, on captera plus d'énergie si on capte l'énergie de l'onde pendant plus de temps. La quantité d'énergie captée doit donc être proportionnelle au temps pendant lequel on capte l'énergie.

L'énergie captée (E) est :

- proportionnelle à un facteur qui va dépendre de l'énergie de l'onde. On va appeler ce facteur *l'intensité de l'onde (I).* On capte peu d'énergie avec une onde de faible intensité et beaucoup avec une onde de grande intensité. La quantité d'énergie captée doit donc être proportionnelle à l'intensité $I$ de l'onde.
- proportionnelle à la surface du capteur (A)
- proportionnelle au temps durant lequel le capteur reçoit l'onde (t).

Donc, une bonne définition de l'intensité sonore est l'énergie captée par unité de surface et de temps autrement dit la puissance captée par unité de surface.

L'intensité sonore s'exprime donc en w/m$^2$.

## 5.3 Intensité sonore et échelle logarithmique

L'oreille humaine peut capter des sons dont l'intensité est au minimum de 10−12 w/m$^2$.

Si le son a une intensité plus petite que cette valeur, on n'entend pas le son.

L'intensité sonore minimale perceptible par l'oreille humaine est de $10^{-12}$w/m$^2$.

Une conversation normale correspond à une intensité de $310^{-6}$w/m$^2$.

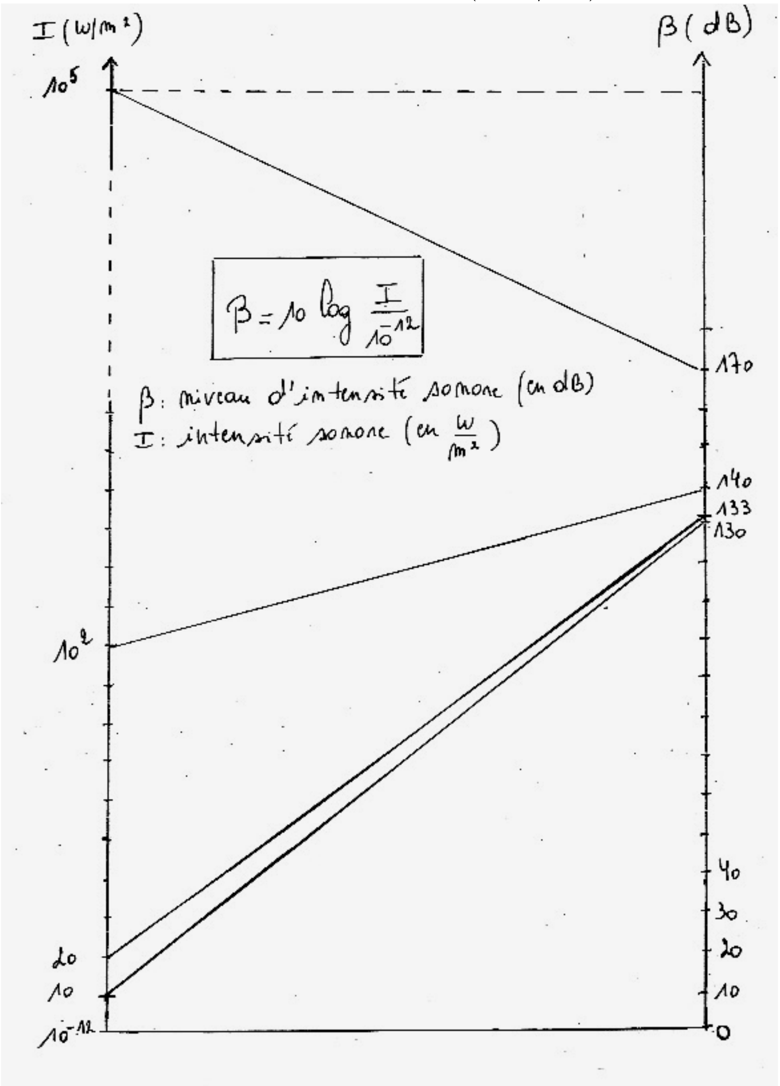
Le son devient trop intense pour l'oreille humaine si son intensité dépasse 1W/m$^2$ approximativement. C'est le seuil de la douleur.

Des bruits dangereux pour l'oreille correspondent à $10^2$W/m$^2$ et plus.

Une intensité sonore de $10^5$w/m$^2$ serait l'intensité sonore perçue si vous placiez votre oreille à la sortie d'un réacteur d'avion. C'est la limite de rupture du tympan (approximativement).

L'éventail des sons audibles en terme d'intensité sonore est très grand. C'est pourquoi il est plus commode d'utiliser *une échelle logarithmique, appelée échelle décibel.*

La relation entre l'intensité sonore I (en $w/m^2$) et le niveau d'intensité sonore (en décibel noté dB) est :




***Exercices***

Convertir en dB, les intensités sonores de :

1. $I = 10^{-12} w/m^2$ (Rép : 0 dB)
2. $I = 10 W/m^2$ (Rép : 130 dB)
3. $I = 20 w/m^2$ (Rép : 133 dB)
4. $I = 10^2 W/m^2$ (Rép : 140 dB)
5. $I = 10^5 w/m^2$ (Rép : 170 dB)

## 5.4 Exercice

1. Calculez le niveau d'intensité sonore émis par un haut-parleur produisant un son d'une intensité sonore de $10^{-5}$ w/m$^2$(Rép : 70 dB)
2. Calculez le niveau d'intensité sonore émis par deux haut-parleurs produisant chacun un son d'une intensité sonore de $10^{-5}$ w/m$^2$(Rép : 73 dB)
3. Calculez le niveau d'intensité sonore émis par trois haut-parleurs produisant chacun un son d'une intensité sonore de $10^{-5}$ w/m$^2$(Rép : 75 dB)
4. Calculez le niveau d'intensité sonore émis par dix haut-parleurs produisant chacun un son d'une intensité sonore de $10^{-5}$ w/m$^2$(Rép : 80 dB)

## 5.5 Conclusion

L'échelle des décibels n'est pas une échelle linéaire (c'est une échelle logarithmique).

*Chaque fois que l'intensité sonore double , le niveau d'intensité sonore augmente de approximativement 3 dB.* Autrement dit, un son deux fois plus intense verra son niveau d'intensité sonore augmenter de 3 dB.

Si l'intensité sonore est **multipliée par 10**, le niveau d'intensité sonore **augmente** exactement de 10 dB (car il s'agit d'un logarithme en base 10).

## 5.6 Règles en vigueur en Belgique.

Pour la sécurité de vos oreilles, je vous conseille vivement de lire le livre de la page 53 à 55.

*En Belgique, un arrêté de l'Exécutif régional wallon limite à 90 dB le niveau d'intensité sonore dans les discothèques et salles de concert.* Cette norme sécuritaire est malheureusement trop peu souvent respectée.

Il existe une application sur les Smartphones : le sonomètre. Téléchargez l'application, essayer là et faites en une démonstration en classe si vous le désirez.

## 5.7 Exercices

### Exercice 1

Calculer le niveau d'intensité sonore correspondant à un ensemble de trois sources identiques produisant chacune séparément un niveau d'intensité sonore de 60 dB.

### Exercice 2

Dans une pièce, une imprimante produit un son d'un niveau sonore de 60 dB. Simultanément, dans la même pièce, un ventilateur produit un son de niveau sonre égal à 50 dB. Calculer le niveau d'intensité sonore perçu par un auditeur dans la pièce.

### Exercice 3

Un son de niveau d'intensité sonore de 70 dB atteint un mur dans lequel il perd 99% de son intensité en le traversant. Quel est le niveau d'intensité sonore perçu après avoir traversé le mur ? (C'est à peu près ce qu'il se passe entre deux locaux dans lesquels deux profs donnent cours en parlant simultanément).

**Exercice 4**

En Belgique, l'exposition des travailleurs à des bruits de niveau d'intensité sonore de 80 dB pendant 8 heures par jour est considérée légalement comme le plafond à ne pas dépasser. Pour un niveau d'intensité sonore de seulement 3 dB en plus, la durée d'exposition doit être réduite de moitié, soit 4 heures maximum. Justifie la logique de cette règle.

**Exercice 5**

Une exposition quotidienne durant 8 heures à un niveau d'intensité sonore de 80 dB est considérée par la loi belge comme étant la limite maximale à ne pas dépasser.

Calculez la durée d'exposition quotidienne à ne pas dépasser si le niveau d'intensité sonore est de 98 dB (comme dans beaucoup de discothèques ou lorsque vous êtes proches des enceintes à un festival).

**Exercice 6**

Calculer le niveau d'intensité sonore correspondant à un ensemble de trois sources identiques produisant chacune séparément un niveau d'intensité sonore de 60 dB.

**Exercice 7**

Dans une pièce, une imprimante produit un son d'un niveau sonore de 60 dB. Simultanément, dans la même pièce, un ventilateur produit un son de niveau sonre égal à 50 dB. Calculer le niveau d'intensité sonore perçu par un auditeur dans la pièce.

**Exercice 8**

Un son de niveau d'intensité sonore de 70 dB atteint un mur dans lequel il perd 99% de son intensité en le traversant. Quel est le niveau d'intensité sonore perçu après avoir traversé le mur ? (C'est à peu près ce qu'il se passe entre deux locaux dans lesquels deux profs donnent cours en parlant simultanément).

**Exercice 9**

En Belgique, l'exposition des travailleurs à des bruits de niveau d'intensité sonore de 80 dB pendant 8 heures par jour est considérée légalement comme le plafond à ne pas dépasser. Pour un niveau d'intensité sonore de seulement 3 dB en plus, la durée d'exposition doit être réduite de moitié, soit 4 heures maximum. Justifie la logique de cette règle.

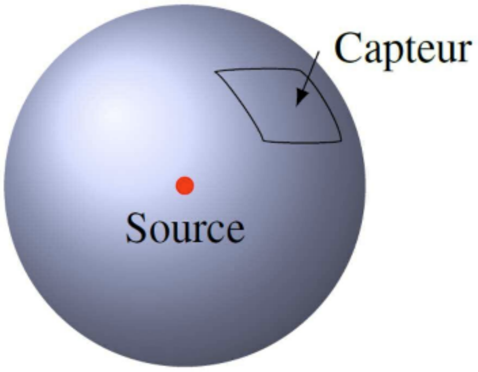
**Exercice 10**

Une exposition quotidienne durant 8 heures à un niveau d'intensité sonore de 80 dB est considérée par la loi belge comme étant la limite maximale à ne pas dépasser.

Calculez la durée d'exposition quotidienne à ne pas dépasser si le niveau d'intensité sonore est de 98 dB (comme dans beaucoup de discothèques ou lorsque vous êtes proches des enceintes à un festival).

## 5.8 Intensité à une distance d'une source isotrope

Imaginez une source, l'explosion d'un pétard par exemple, qui produit un son d'une certaine puissance P. Pourrions-nous calculer l'intensité sonore perçue si vous êtes à une certaine distance R du pétard ?




Imaginons que l'on soit à une certaine distance R d'une source qui émet une énergie E pendant un temps t. Ici, l'énergie est émise également dans toutes les directions, ce qui signifie qu'on a affaire à une source isotrope.

Ainsi, à une certaine distance r, l'énergie émise est distribuée également sur une sphère entourant la source.

À une certaine distance de la source, il y a un capteur ayant une aire $A_{\text{capteur}}$. Le capteur ne capte qu'une partie de l'énergie émise par la source.

La proportion captée est donnée simplement par le rapport entre l'aire du capteur ($A_{\text{capteur}}$) et l'aire totale sur laquelle est répartie l'énergie de la source.

## 5.9 Exercices

### Exercice 11

Une source lumineuse isotrope a une puissance de 100 w. Quelle est l'intensité sonore de l'onde captée à 120 m de la source?

### Exercice 12

Une personne crie à 100 m de distance d'un auditeur en produisant un son d'une intensité perçue de 55 dB. Quelle sera le niveau d'intensité sonore perçu par cet auditeur si 20 000 personnes se trouvant à 100 m de distance de cet auditeur produisent chacune un cri identique ?

### Exercice 13

Un auditeur se trouvant à 50 mètres de distance d'une source sonore isotrope capte un son de 100 dB. Quel est le niveau d'intensité sonore perçu par l'auditeur à 1 km de distance de la source?

**Exercice 14**

L'explosion d'un pétard produit un son ayant une intensité de 40 dB quand on est à 50 m du pétard. Quelle est l'intensité (en dB) du son produit par l'explosion de 1000 pétards si on est à 200 m de l'explosion?

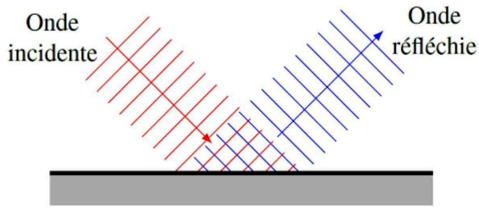



Figure 14:

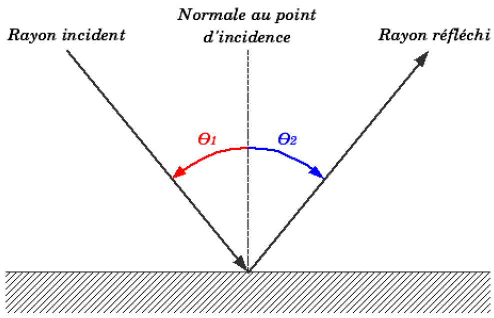



Figure 15:

# 6 Propriétés des ondes : réflexion, réfraction.

Nous avons observé, grâce à la cuve à ondes, ces phénomènes ondulatoires.

Analysons-les plus en détail.

## 6.1 Réflexion des ondes

Nous l'avons observée à l'aide de la cuve à onde et voyez sur la figure ci-contre que **la longueur d'onde est inchangée.**

Sous quel angle est renvoyée l'onde ?

Définitions :

1. **L'angle d'incidence ($\theta_i$)** est l'angle formé par la direction de propagation de l'onde incidente et la normale (la perpendiculaire) à l'obstacle.
2. **L'angle de réflexion ($\theta_r$)** est l'angle formé par la direction des ondes réfléchies et la normale.

Lire les pages 64-65 du livre VANIN, 3è édition de Y. Verbist

1. Réflexion d'ondes sonores.
2. Réflexion sonores dans une salle.
3. Le sonar


Figure 16: La mer gaufrée à la pointe des Baleines à l'Ile de Ré, en France.

4. L'échographie

5. 

Une belle visualisation des ondes réfléchies est la mer gaufrée.

Nous voyons la superposition des vagues incidentes et des vagues réfléchies qui produit "un quadrillage", appellé "mer gaufrée", particulièrement visible à l'Ile de Ré.

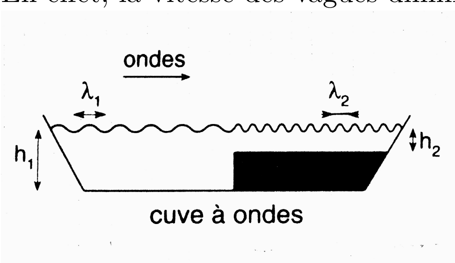
## 6.2 Réfraction des ondes

La **réfraction** est un phénomène ondulatoire qui est tel qu'**une onde change de direction** lorsqu'elle **change de milieu**. Ce changement de direction est dû à un changement de vitesse de l'onde qui traverse deux milieux différents.

**Analyse expérimentale.**

Pour analyser ce phénomène, prenons une cuve à onde et simulons le changement de milieu à l'aide d'une modification de la profondeur de l'eau.

En effet, la vitesse des vagues diminue lorsque la profondeur de l'eau diminue.




Nous pouvons observer :

h1 h2 donc v1 v2

où v1 est la vitesse de l'onde dans le milieu le plus profond et v2 la vitesse de l'onde dans le milieu le moins profond.

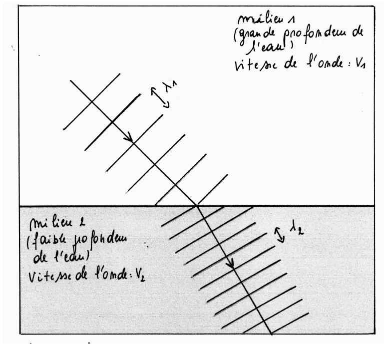



Figure 17:

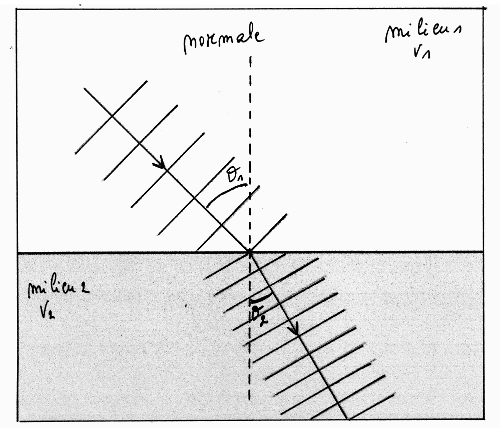



Figure 18:

Et comme f1 = f2 (la fréquence n'est pas modifiée, c'est la fréquence de l'OH) :

1 2

La réfraction modifie la vitesse de l'onde en changeant de milieu et donc modifie dans le même sens la longueur d'onde.

Observons la cuve à onde sous un autre angle, vue de haut (toujours dans la même situation : v1 v2).

Comme l'onde passe d'un milieu profond à un milieu moins profond, elles ralentissent et changent de direction.

Comment quantifier ce changement de direction ?

Définissons les angles d'incidence et de réfraction :

a) **L'angle d'incidence ( 1)** est l'angle formé par la direction de propagation de l'onde incidente et la normale (la perpendiculaire) à l'obstacle.

b**) L'angle de réflexion ( 2)** est l'angle formé par la direction des ondes réfractées et la normale.

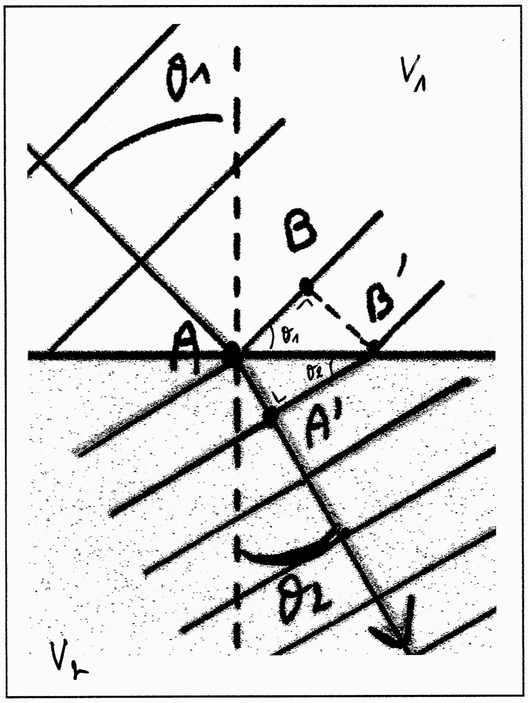
Nous voyons ci-contre que :

si v1 v2 alors 1 2 (l'onde se rapproche de la normale).

Quelle est la relation entre les vitesses et les angles d'incidence et de réfraction ?

***Applications de la réfraction***

Si $V_1 > V_2$




Le temps mis par l'onde dans le milieu 1 pour se déplacer de B à B' est le même que le temps mis par l'onde dans le milieu 2 pour aller de A à A' ($V_1 > V_2$)

Or le temps est le rapport de la distance sur la vitesse

$$t_{BB'} = t_{AA'}$$

$$\Rightarrow \frac{BB'}{V_1} = \frac{AA'}{V_2} \quad (*)$$

et nous avons :

$$\sin\theta_1 = \frac{BB'}{AB'} \Rightarrow BB' = AB'\sin\theta_1$$

$$\sin\theta_2 = \frac{AA'}{AB'} \Rightarrow AA' = AB'\sin\theta_2$$

$$(*) \Rightarrow \frac{\cancel{AB'}\sin\theta_1}{V_1} = \frac{\cancel{AB'}\sin\theta_2}{V_2}$$

$$\Rightarrow \frac{\sin\theta_1}{V_1} = \frac{\sin\theta_2}{V_2} \Rightarrow \boxed{\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2}}$$

Loi de Snell

⇒ Lorsqu'une onde change de milieu, elle change de direction de telle sorte que :

- Si $V_1 > V_2 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2 \Rightarrow$ l'onde se rapproche de la normale
- Si $V_1 < V_2 \Rightarrow \theta_1 < \theta_2 \Rightarrow$ l'onde s'éloigne de la normale

Figure 19:

$$\frac{Sin\,\vartheta_1}{Sin\,\vartheta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Figure 20:

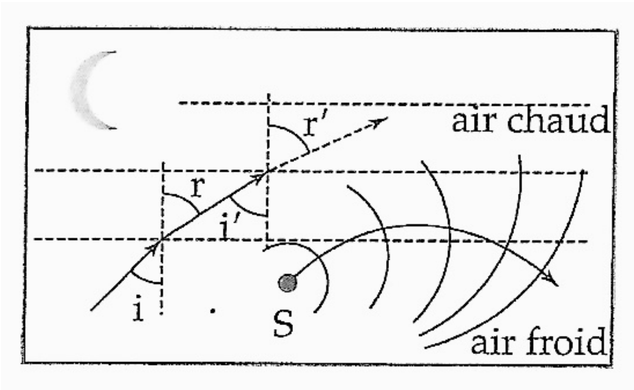
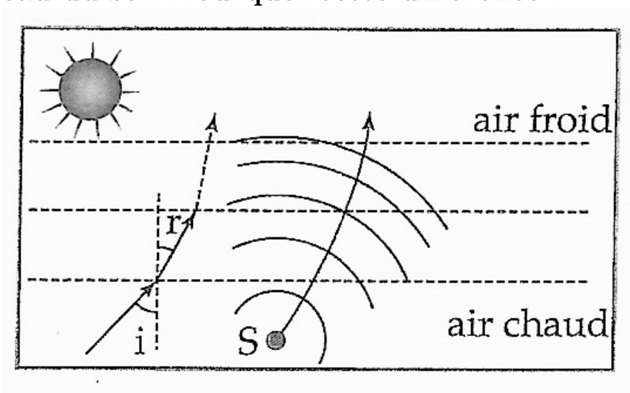



Figure 21:

**On sait que le son se propage plus loin la nuit que le jour, lorsqu'un son est produit au niveau du sol. Pourquoi cette différence ?**




Durant la journée, la température de l'air diminue quand on s'élève en altitude. En effet, le sol chauffe plus rapidement que l'atmosphère.

Or, **la vitesse du son diminue lorsque la température diminue.**

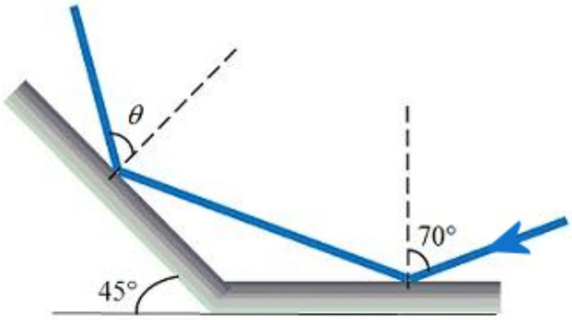
Nous avons vu que lorsque la vitesse d'une onde diminue, l'onde se réfracte de telle sorte que l'angle de réfraction r soit inférieur à l'angle d'incidence i.

En traversant différentes couches d'air de plus en plus froides en s'élevant, le son est dévié vers le haut. Un observateur au sol n'entendra plus le son.

Durant la nuit, le phénomène inverse se passe. La température de l'air augmente quand on s'élève. En effet, le sol se refroidit plus vite que l'atmosphère.

**La vitesse du son augmente lorsque la température augmente** et donc la vitesse de l'onde réfractée est plus grande que la vitesse de l'onde émise. L'angle de réfraction sera plus grand que l'angle d'incidence et l'onde, étant réfractée vers le sol, se rapproche du sol et le son porte plus loin.

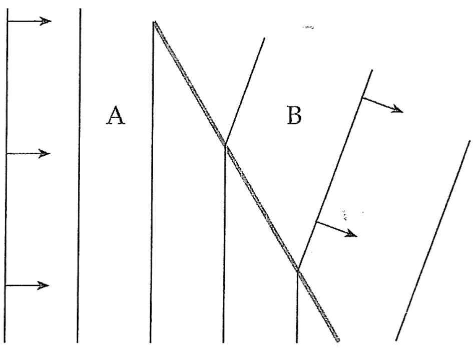
***EXERCICE 1***




Dans le cadre d'un phénomène de réflexion : quel est l'angle sur cette figure?

(Réponse : 65°)

***EXERCICE 2 ( N° 6 du livre p 78)***




La figure ci-contre représente le passage d'une onde d'un milieu A vers un milieu B.

a) Dans lequel de ces deux milieux la vitesse de propagation est-elle la plus élevée ?

b) Si la fréquence des ondes est de 50 Hz et que la figure est à l'échelle 1:1, calculer la vitesse de l'onde dans chaque milieu.

***EXERCICE 3***

Construire le schéma de réfraction d'une onde ayant une vitesse incidente v1 et une vitesse v2 dans le second milieu, avec **v1 = 1,5 v2** ; pour les angles d'incidence suivants :

a) i = 10°

b) i = 30 °

c) i = 41,5 °

d) i = 89°

***EXERCICE 4***

Construire le schéma de réfraction d'une onde ayant une vitesse incidente v1 et une vitesse v2 dans le second milieu, avec **v2 = 1,5 v1** ; pour les angles d'incidence suivants :

a) i = 10°

b) i = 30 °

c) i = 41,5 °

d) Calculer l'angle limite de réfraction

e) Construire la propagation de l'onde pour un angle d'incidence i = 50 °

***EXERCICE 5 (N°8 du livre p 78)***

Quel est l'angle d'incidence maximal pour qu'une onde sonore émise dans l'air puisse être réfractée dans l'eau sans subir de réflexion totale à la surface de l'eau ?

***EXERCICE 6 ( N° 7 DU LIVRE P 78)***

Dans un canal de navigation de 25 mètres de large, une onde; dont la longueur d'onde est de 1,5 m,; se propage à la vitesse de 2 m/s. Que devient cette longueur d'onde lorsque l'onde arrive dans une partie moins profonde du canal où la vitesse de propagation est réduite à 1,6 m/s ?

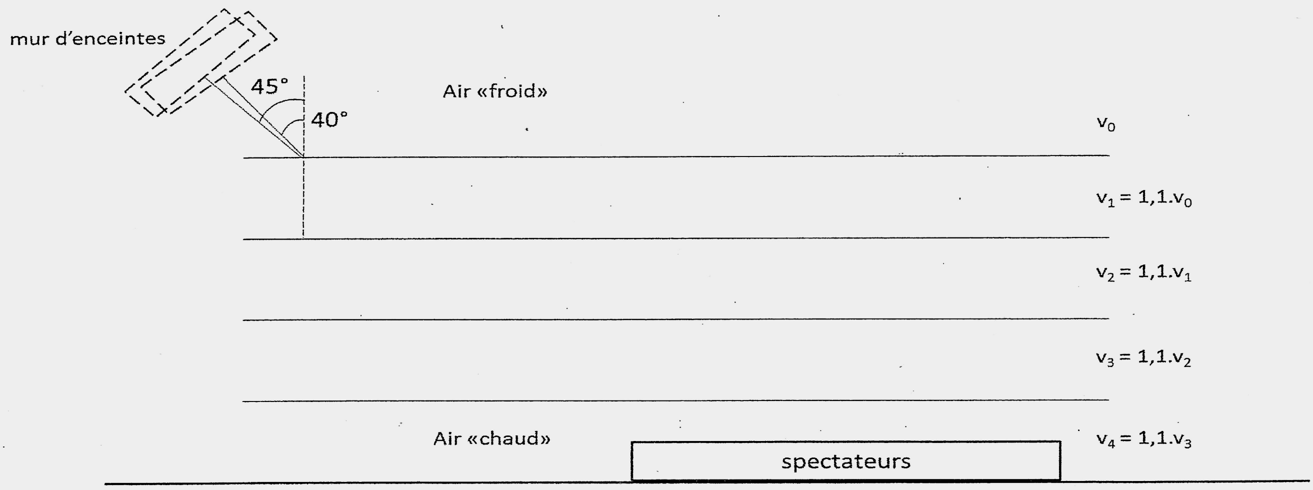
***EXERCICE 7***

# Réfraction des ondes sonores

## Ondes sonores réfractées lors d'un concert en plein air

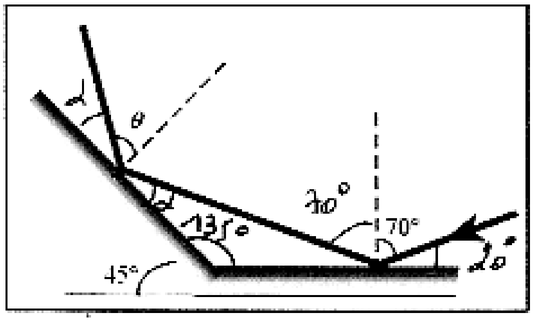
Lors d'un concert en plein air, un mur d'enceintes disposé en hauteur émet des ondes sonores, que l'on supposera localement planes. Par ailleurs, la présence de la foule des spectateurs engendre une augmentation de la température de l'air juste au-dessus d'eux, ce qui provoque un gradient de température entre la source du son et les spectateurs. On modélise cette variation continue de la température en fonction de l'altitude par une succession de couches horizontales où la température est constante (voir schéma ci-dessous).

Sachant que la vitesse de propagation du son dans l'air augmente avec la température, représenter la direction de propagation dans les différentes couches sur le schéma, pour $i = 40°$ puis pour $i = 45°$. En déduire l'importance du choix de l'angle d'incidence (orientation du mur d'enceintes) pour le bon déroulement du concert.



**EXERCICE 1**

Dans le cadre d'un phénomène de réflexion : quel est l'angle θ sur cette figure?
(Réponse : 65°)



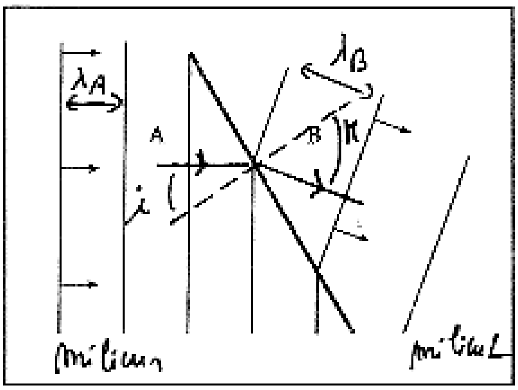

1) La somme des angles dans un triangle = 180°

$\Rightarrow 135° + 20° + \alpha = 180° \Rightarrow \alpha = 180° - 155° = 25°$

2) $\theta + \alpha = 90° \Rightarrow \theta = 90° - 25° = \boxed{65° = \theta}$

**EXERCICE 2 ( N° 6 du livre p 78)**

La figure ci-contre représente le passage d'une onde d'un milieu A vers un milieu B.
a) Dans lequel de ces deux milieux la vitesse de propagation est-elle la plus élevée ?




Il s'agit d'un phénomène de réfraction, l'onde change de direction et de λ.
On voit sur la figure que $\lambda_A < \lambda_B$
Nous savons que $f_A = f_B$ (moteur - la f) car il s'agit de la même source pour l'onde.
OR $V = \lambda f$

$\Rightarrow \begin{cases} V_A = \lambda_A f \\ V_B = \lambda_B f \end{cases}$ comme $\lambda_A < \lambda_B \Rightarrow \boxed{V_A < V_B}$
$\Rightarrow$ la vitesse de l'onde augmente.
La plus grande vitesse est dans le milieu B

**b)** Si la fréquence des ondes est de 50 Hz et que la figure est à l'échelle 1:1, calculer la vitesse de l'onde dans chaque milieu.

$f = 50 Hz$

$\lambda_A = 1 cm$
$\lambda_B = 1,5 cm$
Mesurés à la latte sur le schéma puisque l'échelle est à 1:1

$V_A = \lambda_A \cdot f = 1 \cdot 50 = \boxed{50 \frac{cm}{s} = V_A}$

$V_B = \lambda_B \cdot f = 1,5 \cdot 50 = \boxed{75 \frac{cm}{s} = V_B}$



Sur le schéma, j'ai représenté i (angle d'incidence) et r (angle de réfraction)
On voit que $i < r \Rightarrow$ l'onde s'éloigne de la normale.

11

**EXERCICE 3**

**Construire le schéma de réfraction d'une onde ayant une vitesse incidente v1 et une vitesse v2 dans le second milieu, avec v1 = 1,5 v2 ; pour les angles d'incidence suivants :**

**a) i = 10°**

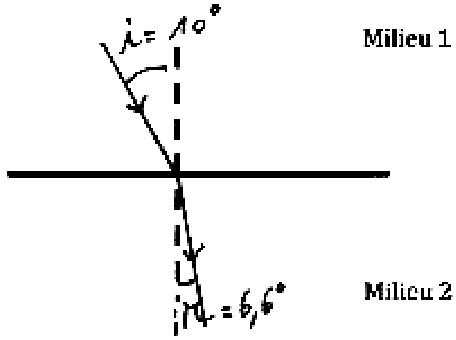
Réfraction $\Rightarrow \dfrac{\sin i}{\sin r} = \dfrac{V_1}{V_2}$

Cherchons r ?

$\sin r = \dfrac{V_2}{V_1} \cdot \sin i \Rightarrow \boxed{r = \operatorname{Arcsin}\left(\dfrac{V_2}{V_1} \cdot \sin i\right)}$

$r = \operatorname{Arcsin}\left(\dfrac{\cancel{V_2}}{1,5 \cdot \cancel{V_2}} \cdot \sin 10°\right) = \operatorname{Arcsin}\left(\dfrac{\sin 10°}{1,5}\right)$

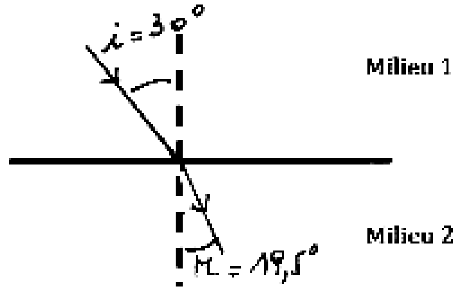
$\Rightarrow r = 6,6°$




**b) i = 30°**

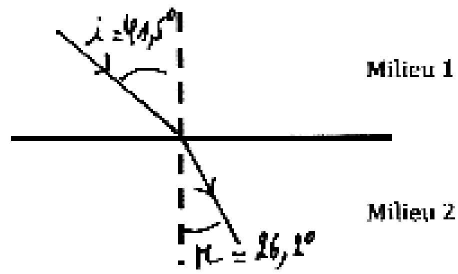
$r = \operatorname{Arcsin}\left(\dfrac{\cancel{V_2}}{1,5 \cdot \cancel{V_2}} \sin 30°\right) = \operatorname{Arcsin}\left(\dfrac{\sin 30°}{1,5}\right)$

$r = 19,5°$



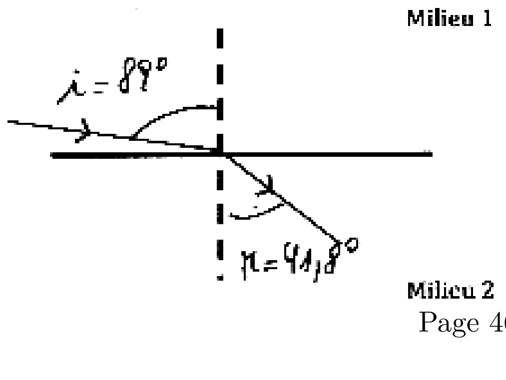

**c) i = 41,5°**

$r = \operatorname{Arcsin}\left(\dfrac{\sin 41,5°}{1,5}\right) = 26,2°$




**d) i = 89°**

$r = \operatorname{Arcsin}\left(\dfrac{\sin 89°}{1,5}\right) = 41,8°$






Nous voyons bien que lorsque $V_1 > V_2$ $(V_1 = 1,5\, V_2)$, l'onde réfractée se rapproche de la normale.

12.

**EXERCICE 4**

Construire le schéma de réfraction d'une onde ayant une vitesse incidente v1 et une vitesse v2 dans le second milieu, avec **v2 = 1,5 v1** ; pour les angles d'incidence suivants :

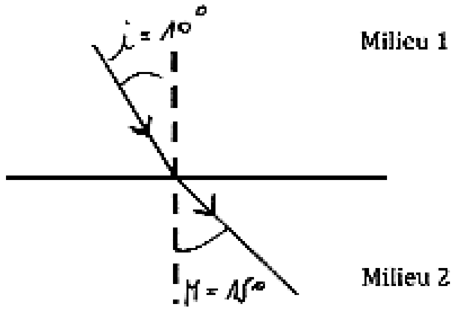
a) i = 10°

$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow r\ ?$

$\sin r = \frac{V_2}{V_1} \sin i \Rightarrow \boxed{r = \mathrm{Arcsin}\left(\frac{V_2}{V_1} \sin i\right)}$

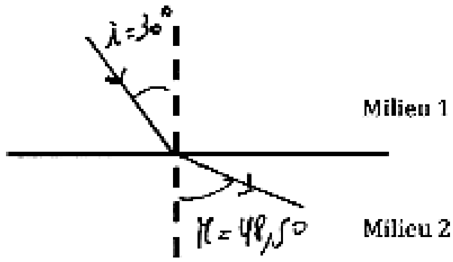
$r = \mathrm{Arcsin}\left(\frac{1{,}5 \cancel{V_1}}{\cancel{V_1}} \sin 10°\right) = \mathrm{Arcsin}(1{,}5 . \sin 10°)$

$\Rightarrow r = 15°$



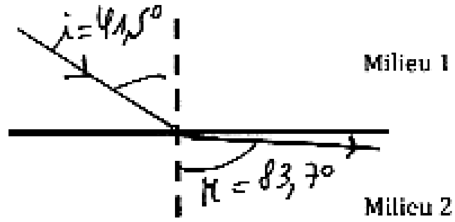

b) i = 30°

$r = \mathrm{Arcsin}(1{,}5 . \sin 30°) = 48{,}5°$




c) i = 41,5°

$r = \mathrm{Arcsin}(1{,}5 . \sin 41{,}5°) = 83{,}7°$



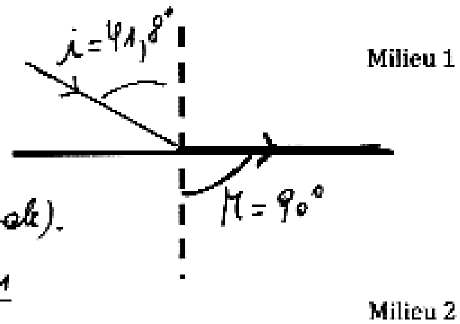

d) Calculer l'angle limite de réfraction

Nous voyons qu'il y aura un certain angle i (i limite) pour lequel r = 90°.
⇒ Il n'y aura plus de réfraction (plus de passage de l'onde dans le milieu 2 mais réflexion (totale).

Si r = 90° ⇒ Comme $\frac{\sin i}{\sin} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow \frac{\sin i}{1} = \frac{V_1}{V_2}$

$\Rightarrow \boxed{i_{limite} = \mathrm{Arcsin} \frac{V_1}{V_2}}$

Dans notre cas : $i_{limite} = \mathrm{Arcsin} \frac{V_1}{1{,}5 V_1} = \mathrm{Arcsin}\left(\frac{1}{1{,}5}\right) = 41{,}8°$

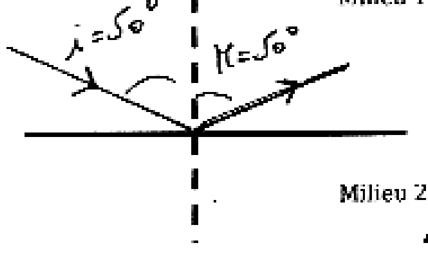





e) Construire la propagation de l'onde pour un angle d'incidence i = 50°

⇒ i > i limite ⇒ il n'y aura plus de réfraction mais réflexion
⇒ $r_{réflexion} = i = 50°$

(C'est un principe utilisé par les fibre optiques)




13

**EXERCICE 5 (N°8 du livre p 78)**

Quel est l'angle d'incidence maximal pour qu'une onde sonore émise dans l'air puisse être réfractée. dans l'eau sans subir de réflexion totale à la surface de l'eau ?

⇒ Il s'agit d'un phénomène de réfraction.
Pour éviter la réflexion totale : $i < i_{limite}$.

$i_{limite} = \text{Arcsin} \dfrac{V_1}{V_2}$ avec $\begin{cases} V_1 = V_{onde \ ds \ air} = 340 \ \frac{m}{s} \\ V_2 = V_{onde \ ds \ eau} = 1500 \ \frac{m}{s} \end{cases}$

$i_{limite} = \text{Arcsin} \dfrac{340}{1500} = \boxed{13,1° = i_{limite}}$

**EXERCICE 6 ( N° 7 DU LIVRE P 78)**

Dans un canal de navigation de 25 mètres de large, une onde; dont la longueur d'onde est de 1,5 m,; se propage à la vitesse de 2 m/s. Que devient cette longueur d'onde lorsque l'onde arrive dans une partie moins profonde du canal où la vitesse de propagation est réduite à 1,6 m/s ?

$\lambda_1 = 1,5 \ m$
$V_1 = 2 \ \frac{m}{s}$
$\lambda_2$ ?
$V_2 = 1,6 \ \frac{m}{s}$

Réfraction car il y a changement de milieu.
OR $f_1 = f_2$ (= f de la source : ici, le vent)

$\Rightarrow \begin{cases} V_1 = \lambda_1 f \\ V_2 = \lambda_2 f \end{cases} \Rightarrow f = \dfrac{V_1}{\lambda_1} = \dfrac{V_2}{\lambda_2}$

$\Rightarrow \lambda_2 = \dfrac{V_2 \lambda_1}{V_1} = \dfrac{1,6 \cdot 1,5}{2} = \boxed{1,2 \ m = \lambda_2}$



1.4.

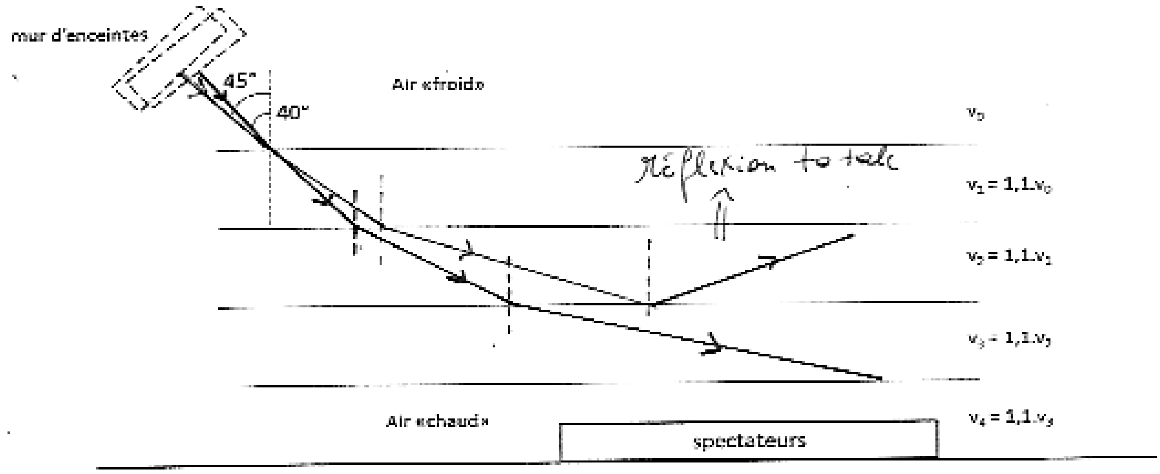
**EXERCICE 7**

## Réfraction des ondes sonores

### Ondes sonores réfractées lors d'un concert en plein air

Lors d'un concert en plein air, un mur d'enceintes disposé en hauteur émet des ondes sonores, que l'on supposera localement planes. Par ailleurs, la présence de la foule des spectateurs engendre une augmentation de la température de l'air juste au-dessus d'eux, ce qui provoque un gradient de température entre la source du son et les spectateurs. On modélise cette variation continue de la température en fonction de l'altitude par une succession de couches horizontales où la température est constante (voir schéma ci-dessous).

Sachant que la vitesse de propagation du son dans l'air augmente avec la température, représenter la direction de propagation dans les différentes couches sur le schéma, pour $i = 40°$ puis pour $i = 45°$. En déduire l'importance du choix de l'angle d'incidence (orientation du mur d'enceintes) pour le bon déroulement du concert.




**Pour $i = 40°$**

1) $V_1 = 1,1.V_0$ et $i = 40°$

$r = \text{Arcsin}\left(\frac{V_1}{V_0}\sin i\right) = \text{Arcsin}\left(\frac{1,1 V_0}{V_0}\sin i\right)$

$r = \text{Arcsin}(1,1.\sin i)$

$r = \text{Arcsin}(1,1.\sin 40°) = 45°$

2) $V_2 = 1,1.V_1$ et $i = 45°$

$\Rightarrow r = \text{Arcsin}(1,1.\sin 45°) = 51°$

3) $V_3 = 1,1.V_2$ et $i = 51°$

$\Rightarrow r = \text{Arcsin}(1,1.\sin 51°) = 59°$

4) $V_4 = 1,1.V_3$ et $i = 59°$

$\Rightarrow r = \text{Arcsin}(1,1.\sin 59°) = 70,5°$

**Pour $i = 45°$**

1) $V_1 = 1,1.V_0$ et $i = 45°$

$\Rightarrow r = \text{Arcsin}(1,1.\sin 45°) = 51°$

2) $V_2 = 1,1.V_1$ et $i = 51°$

$\Rightarrow r = \text{Arcsin}(1,1.\sin 51°) = 59°$

3) $V_3 = 1,1.V_2$ et $i = 59°$

$\Rightarrow r = \text{Arcsin}(1,1.\sin 59°) = 70,5°$

4) $V_4 = 1,1.V_3$ et $i = 70,5°$

$\Rightarrow r = \text{Arcsin}(1,1.\sin 70,5°) = (n'\nexists)$

↳ Il y a réflexion totale car $i > i_{limite}$

$i_{limite} = \text{Arcsin}\frac{V_3}{V_4} = \text{Arcsin}\frac{1}{1,1} = 65,4°$

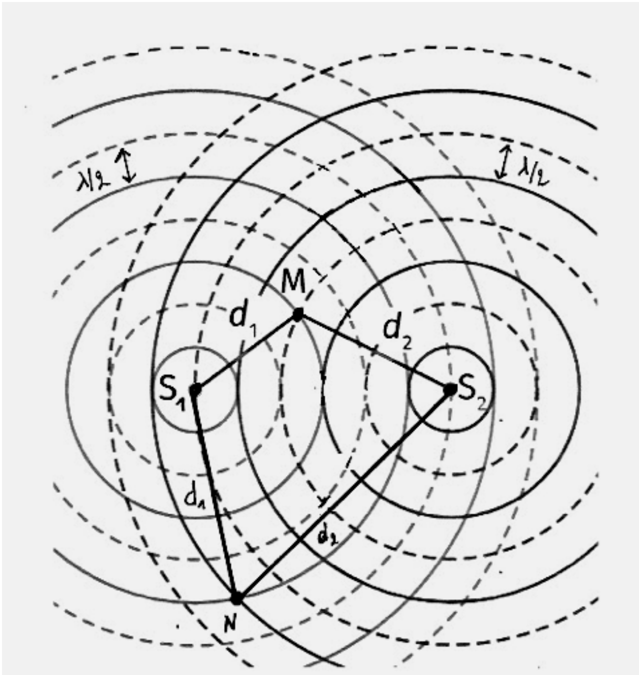
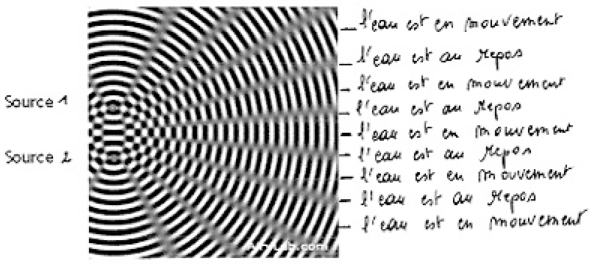



Figure 22:

***Interférences***

**Le phénomène d'interférence est du à la superposition de deux ondes.**

**Il en résulte des zones où les ondes s'additionnent (zone de tempête) et des zones où la superposition des ondes donne une amplitude résultante nulle (zone de repos).**




***a) Expérience avec la cuve à onde***

Nous avons visualisé ce phénomène à l'aide de la cuve à onde.

Pour ce faire, nous avons pris des pointes qui vibrent dans l'eau, chacune produisant des ondes circulaires.

Nous avons obervé des endroits où l'eau est en mouvement et des endroits où l'eau est au repos. Comment expliquer cette observation?

***b) Analyse théorique***

Prenons deux sources $S_1$ et $S_2$ émettant en concordance de phase des ondes de même fréquence (on dira que les sources sont alors ***cohérentes***).

Les cercles concentriques représentent les vagues vues de haut *(les cercles en traits pleins des crêtes et les cercles en traits pointillés des creux).*

Nous voyons bien que les 2 sources ($S_1$ et $S_2$) émettent des ondes de même longueur d'onde et donc de même fréquence.

***Considérons le point M.***

L'onde produite par $S_1$ a parcouru une distance $d_1$ pour arriver en M et l'onde produite par $S_2$ a parcouru une distance $d_2$ pour arriver en M. Les deux ondes arrivent donc au point M avec un déphasage puisqu'elle n'ont pas parcouru la même distance.

Dans notre exemple ci-contre :

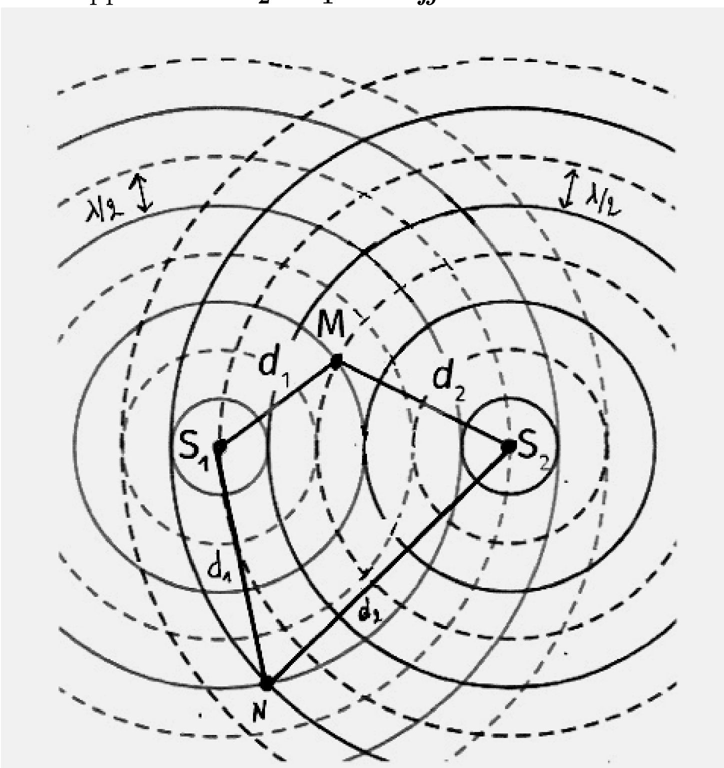
1) La distance $d_1$ parcourue par l'onde provenant de $S_1$ jusque M est égale à 3 /2 (trois demi-longueur d'onde). Regardez sur le schéma.

2) La distance $d_2$ parcourue par l'onde provenant de $S_2$ jusque M est égale à 4 /2 (quatre demi-longueur d'onde).

3) Les deux ondes arrivent donc en M décalées de (4 /2 - 3 /2) = /2

Elles sont donc au point M en opposition de phase l'une par rapport à l'autre. En effet, au point M, l'onde provenant de $S_1$ est une crète tandis que l'onde provenant de $S_2$ est un creux. Donc, au point M, l'eau sera au repos. On parlera ***d'interférence destructive.***

Nous appelerons $\mathbf{d_2}$ **-** $\mathbf{d_1}$ ***la différence de marche.***




***Considérons le point N.***

L'onde produite par $S_1$ a parcouru une distance $d_1$ pour arriver en N et l'onde produite par $S_2$ a parcouru une distance $d_2$ pour arriver en N. Les deux ondes arrivent donc au point M avec un déphasage.

1) La distance $d_1$ parcourue par l'onde provenant de $S_1$ jusque M est égale à 5 /2 (cinq demi-longueur d'onde). Regardez sur le schéma.

2) La distance $d_2$ parcourue par l'onde provenant de $S_2$ jusque N est égale à 7 /2 (sept demi-longueur d'onde).

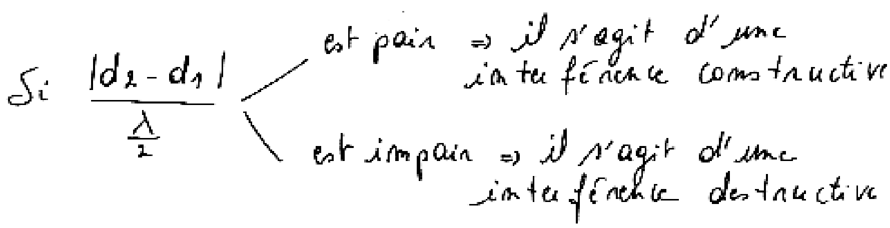
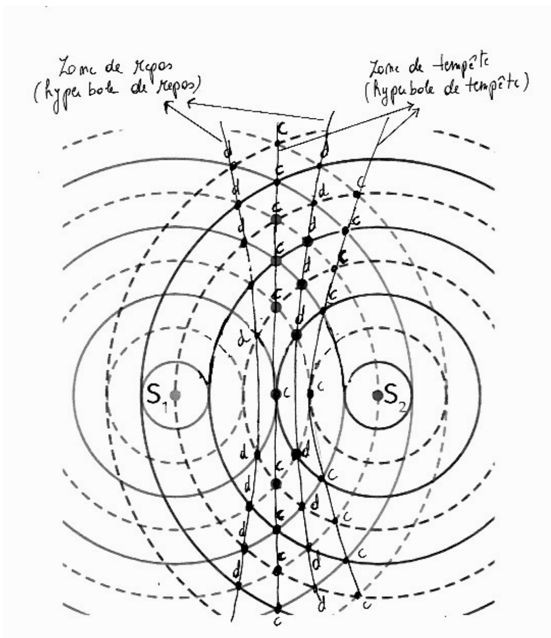



Figure 23:

3) Les deux ondes arrivent donc en M décalées de (7 /2 - 5 /2) = 2 /2

Elles sont donc au point N en concordance de phase l'une par rapport à l'autre. En effet, au point N, l'onde provenant de $S_1$ est une crête et de même, l'onde provenant de $S_2$ est une crête. Donc, au point N, deux crêtes vont se superposer, ce qui donnera de l'eau en mouvement avec une amplitude double par rapport aux amplitudes des sources. On parlera ***d'interférence constructive.***




***Hyperboles de repos et hyperboles de tempête***

Pour expliquer les zones de tempête et de repos, observez attentivement le schéma ci-contre :

*1) En chaque point d :*

Chaque point d est atteint par un creux (cercle en pointillé) ***et*** une crête (cercle en trait plein), la résultante du mouvement nous donne donc une **zone de repos.** Vous pouvez ainsi observer ces courbes (ce sont des hyperboles) où l'eau au repos.

*2) En chaque point c :*

Chaque point c est atteint par soit deux creux (cercles en pointillé) , soit deux crêtes (cercles en trait plein), la résultante du mouvement nous donne donc une **zone de tempête.** Vous pouvez ainsi observer ces courbes (ce sont des hyperboles) où l'eau est en mouvement.

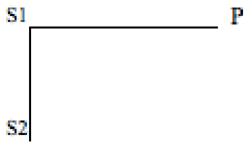



Figure 24:

***EXERCICE 1***

Soient deux sources sonores ponctuelles S1 et S2. Elles envoient des ondes en concordance de phase, dont la fréquence est égale à 5 Hz et qui se propagent à la vitesse de 10 cm/s. L'amplitude de chacune des ondes est de 3cm

Calculez l'amplitude d'un point P situé à 6 cm de S1 et à 8 cm de S2 ?

***EXERCICE 2***

Deux haut-parleurs séparés de 2 m émettent un signal à 680 Hz en phase. Un microphone est placé à 6,75 m de l'un et à 7 m de l'autre. Quelle est l'amplitude du signal mesuré ?

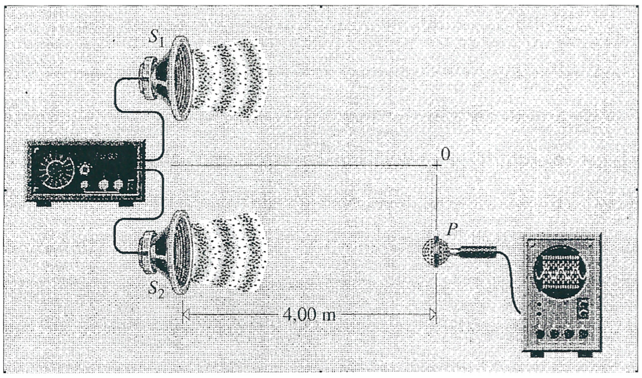
***EXERCICE 3***

Deux haut-parleurs S1 et S2 distants de 6 m émettent des ondes sonores en concordance de phase. Le point P de la figure est à 8 m de S1. Quelle est la fréquence minimale à laquelle l'intensité en P est :

a) nulle ?

a) maximale ?

***EXERCICE 4***




Deux petits haut-parleurs distants de 3 mètres émettent des sons de fréquence constante de 344 Hz dans une pièce surchauffée. On déplace un microphone P le long d'une droite parallèle à la ligne S1S2 joignant les deux haut-parleurs et située à 4 mètres de cette ligne. On trouve deux maxima d'intensité : le premier au point O, équidistants des deux haut-parleurs et le second juste en face de l'un d'eux.

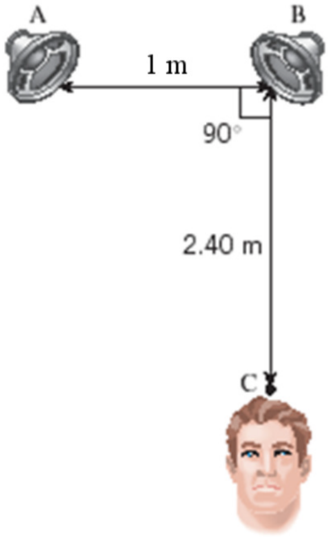
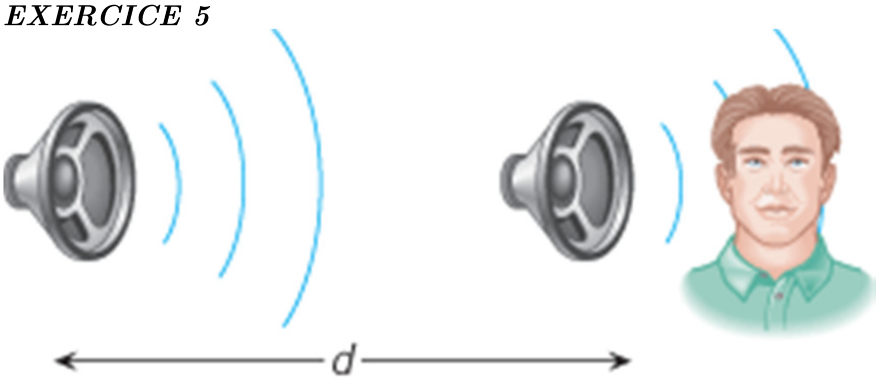



Figure 25:

Utilisant ces données, calculer la vitesse du son dans cette pièce surchauffée
( rappel : la vitesse du son dans l'air est de 340 m/s à une température de 20°C)

***EXERCICE 5***




Les deux haut-parleurs montrés sur la figure émettent, en phase, un son ayant une longueur d'onde de 25 cm. Quelle est la distance minimale d entre les haut-parleurs qu'il doit y avoir pour qu'il y ait de l'interférence destructive pour l'observateur?

***EXERCICE 6***

Les haut-parleurs de la figure émettent des ondes sonores en concordance de phase. Quelle est la fréquence minimale qui permet d'obtenir de l'interférence destructive à l'endroit où est situé l'observateur?

***INTERFERENCES - EXERCICES***

***EXERCICE 1***

Soient deux sources sonores ponctuelles S1 et S2. Elles envoient des ondes en concordance de phase, dont la fréquence est égale à 5 Hz et qui se propagent à la vitesse de 10 cm/s. L'amplitude de chacune des ondes est de 3cm

Calculez l'amplitude d'un point P situé à 6 cm de S1 et à 8 cm de S2 ?

***EXERCICE 2***

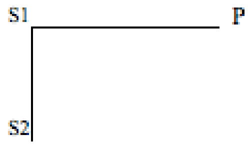



Figure 26:

Deux haut-parleurs séparés de 2 m émettent un signal à 680 Hz en phase. Un microphone est placé à 6,75 m de l'un et à 7 m de l'autre. Quelle est l'amplitude du signal mesuré ?

***EXERCICE 3***

Deux haut-parleurs S1 et S2 distants de 6 m émettent des ondes sonores en concordance de phase. Le point P de la figure est à 8 m de S1. Quelle est la fréquence minimale à laquelle l'intensité en P est :

a) nulle ?

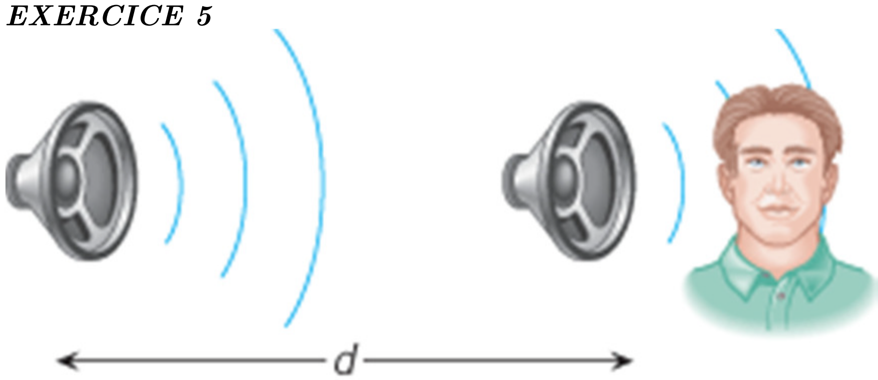
a) maximale ?

***EXERCICE 4***

Deux petits haut-parleurs distants de 3 mètres émettent des sons de fréquence constante de 344 Hz dans une pièce surchauffée. On déplace un microphone P le long d'une droite parallèle à la ligne S1S2 joignant les deux haut-parleurs et située à 4 mètres de cette ligne. On trouve deux maxima d'intensité : le premier au point O, équidistants des deux haut-parleurs et le second juste en face de l'un d'eux.

Utilisant ces données, calculer la vitesse du son dans cette pièce surchauffée
( rappel : la vitesse du son dans l'air est de 340 m/s à une température de 20°C)

***EXERCICE 5***




Les deux haut-parleurs montrés sur la figure émettent, en phase, un son ayant une longueur d'onde de 25 cm. Quelle est la distance minimale d entre les haut-parleurs qu'il doit y avoir pour qu'il y ait de l'interférence destructive pour l'observateur?

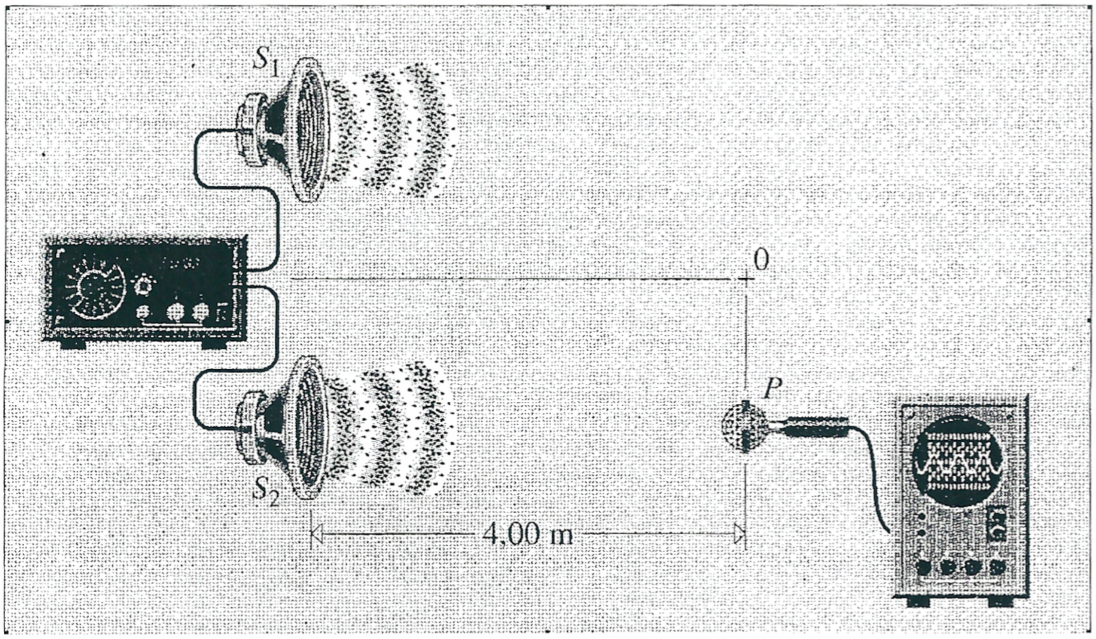
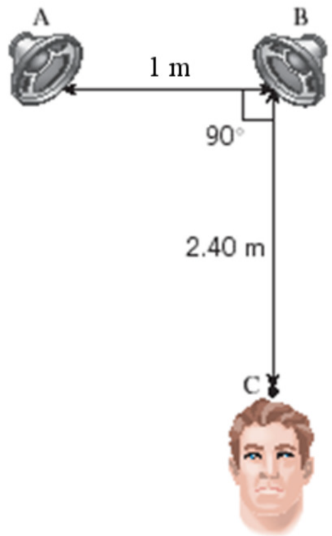



Figure 27:




***EXERCICE 6***

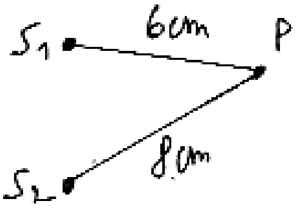
Les haut-parleurs de la figure émettent des ondes sonores en phase. Quelle est la fréquence minimale qui permet d'obtenir de l'interférence destructive à l'endroit où est situé l'observateur?

# INTERFÉRENCES - EXERCICES

## EXERCICE 1

Soient deux sources sonores ponctuelles S1 et S2. Elles envoient des ondes en concordance de phase, dont la fréquence est égale à 5 Hz et qui se propagent à la vitesse de 10 cm/s. L'amplitude de chacune des ondes est de 3cm

Calculez l'amplitude d'un point P situé à 6 cm de S1 et à 8 cm de S2 ?




$f = 5\,Hz$, $V = 10\,\frac{cm}{s}$ $\Big|$ $\lambda = \frac{V}{f} = \frac{10}{5} = 2\,cm$

$A = 3\,cm$ $\Rightarrow \frac{\lambda}{2} = 1\,cm$

$d_1 = 6\,cm$

$d_2 = 8\,cm$

Déterminons si le point P est le siège d'une interférence constructive ou d'une interférence destructive.

$\Rightarrow$ si $\dfrac{|d_2 - d_1|}{\frac{\lambda}{2}}$ est pair (IC) ou impair (ID).

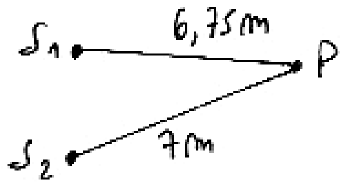
$\dfrac{|d_2 - d_1|}{\frac{\lambda}{2}} = \dfrac{|8-6|}{1} = 2 \Rightarrow$ pair $\Rightarrow$ IC

$\Rightarrow$ l'amplitude en P sera le double de amplitude des sources. $\Rightarrow A_P = 6\,cm$

$$\boxed{A_P = 6\,cm}$$

## EXERCICE 2

Deux haut-parleurs séparés de 2 m émettent un signal à 680 Hz en phase. Un microphone est placé à 6,75 m de l'un et à 7 m de l'autre. Quelle est l'amplitude du signal mesuré ?




$f = 680\,Hz$, $V_{son} = 340\,\frac{m}{s}$ $\Big\}$ $\lambda = \frac{V}{f} = \frac{340}{680} = 0,5\,m$

$d_1 = 6,75\,m$ $\Rightarrow \frac{\lambda}{2} = 0,25\,m$

$d_2 = 7\,m$

$\dfrac{|d_2 - d_1|}{\frac{\lambda}{2}} = \dfrac{|7 - 6,75|}{0,25} = \dfrac{0,25}{0,25} = 1$ $\Rightarrow$ les ondes vont arriver en P décalées d'une $\frac{\lambda}{2}$

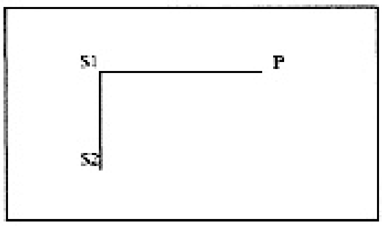
(impair) $\Rightarrow$ en opposition de phase

$\Rightarrow$ ID

$\Rightarrow$ l'interférence étant destructive l'amplitude du point P sera nulle.

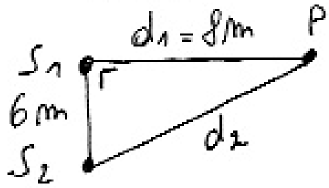
$$\boxed{A_P = 0}$$

**EXERCICE 3**




Deux haut-parleurs S1 et S2 distants de 6 m émettent des ondes sonores en concordance de phase. Le point P de la figure est à 8 m de S1. Quelle est la fréquence minimale à laquelle l'intensité en P est :

a) nulle ?




$V_{son} = 340 \frac{m}{s}$

1) $f$ ? $\lambda = \frac{V}{f}$

2) Pour que l'intensité en P soit nulle, le point P doit être le siège d'une interférence destructive.

$\Rightarrow \frac{|d_2 - d_1|}{\frac{\lambda}{2}} = 1$ (1 est le plus petit chiffre impair et on cherche la fréquence minimale)

$\Rightarrow |d_2 - d_1| = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f} \Rightarrow f = \frac{V}{2|d_2 - d_1|}$ $f$ ? $d_2$

$\underline{d_2}$ ? $d_2^2 = 8^2 + 6^2 \Rightarrow d_2 = \sqrt{64 + 36} = 10 m$

$\Rightarrow f = \frac{340}{2|10-8|} = \frac{340}{4} = 85 Hz$

$\boxed{f = 85 Hz}$

b) maximale ? $\Rightarrow$ Interférence constructive

$\Rightarrow |d_2 - d_1| = \lambda = \frac{V}{f}$

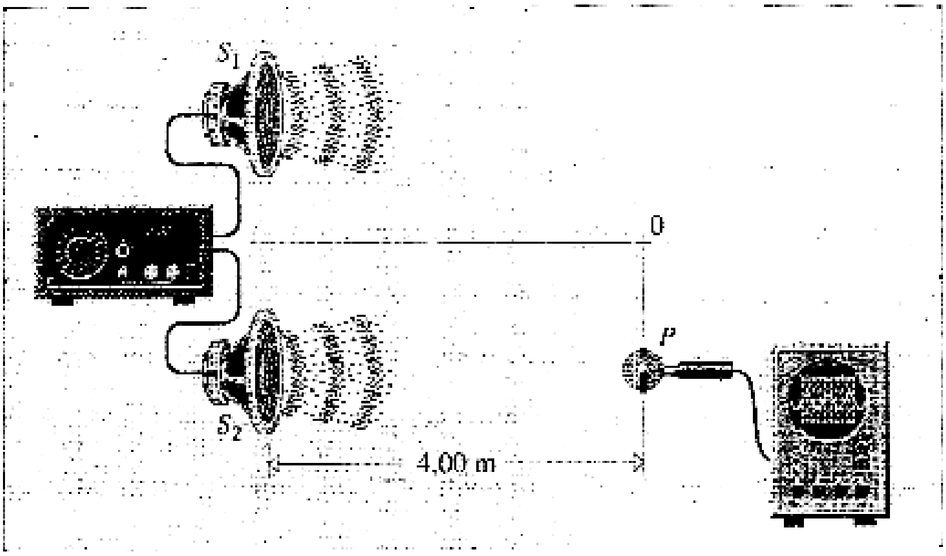
$\Rightarrow f = \frac{V}{|d_2 - d_1|} = \frac{340}{2} = 170 Hz$



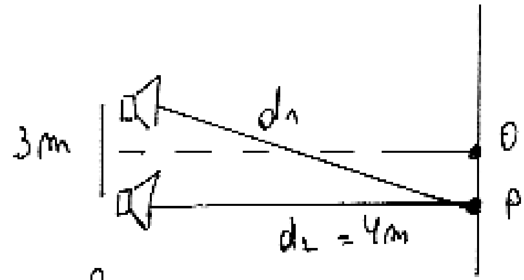
$\boxed{f = 170 Hz}$

**EXERCICE 4**

Deux petits haut-parleurs distants de 3 mètres émettent des sons de fréquence constante de 344 Hz dans une pièce surchauffée. On déplace un microphone P le long d'une droite parallèle à la ligne S1S2 joignant les deux haut-parleurs et située à 4 mètres de cette ligne. On trouve deux maxima d'intensité : le premier au point O, équidistants des deux haut-parleurs et le second juste en face de l'un d'eux.
Utilisant ces données, calculer la vitesse du son dans cette pièce surchauffée
( rappel : la vitesse du son dans l'air est de 340 m/s à une température de 20°C)




$f = 344\,Hz$




En O, il s'agit d'une IC car $d_2 = d_1$

P ⇒ IC ⇒ $\dfrac{|d_2 - d_1|}{\frac{\lambda}{2}} = 2$ (ou $|d_2 - d_1| = \lambda$)

V ?

$\Rightarrow |d_2 - d_1| = \lambda = \dfrac{V}{f} \Rightarrow V = f\,|d_2 - d_1| <$ V ? $d_1$ ?

$d_1 = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{25} = 5\,m$

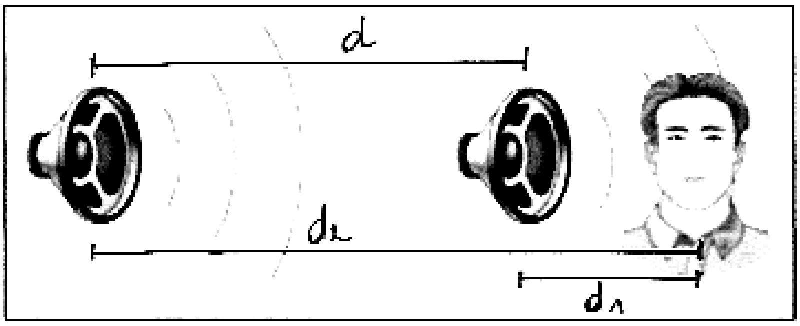
$\Rightarrow V = 344 . |4 - 5| = 344\,m/s$



$\boxed{V = 344\,m/s}$

**EXERCICE 5**

Les deux haut-parleurs montrés sur la figure émettent, en phase, un son ayant une longueur d'onde de 25 cm. Quelle est la distance minimale d entre les haut-parleurs qu'il doit y avoir pour qu'il y ait de l'interférence destructive pour l'observateur?




$\lambda = 25.10^{-2}$ m

d ? ID $\Rightarrow |d_2 - d_1| = \frac{\lambda}{2}$

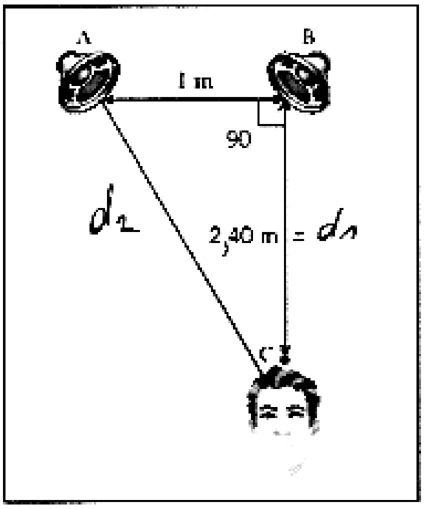
or $|d_2 - d_1| = d$

$\Rightarrow d = \frac{\lambda}{2} = 12,5.10^{-2}$ m $= 12,5$ cm

$\boxed{d = 12,5 \text{ cm}}$

**EXERCICE 6**

Les haut-parleurs de la figure émettent des ondes sonores en phase. Quelle est la fréquence minimale qui permet d'obtenir de l'interférence destructive à l'endroit où est situé l'observateur?




$f_{minimale}$ ?

ID $\Rightarrow |d_2 - d_1| = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2f}$

$\Rightarrow f = \frac{V}{2|d_2 - d_1|}$. $f$ ? $d_2$ ?

$d_2 = \sqrt{1^2 + 2,4^2} = 2,6$ m

$\Rightarrow f = \frac{340}{2.|2,6 - 2,4|} = \frac{340}{2.0,2} = 850$ Hz

$\boxed{f_{min} = 850 \text{ Hz}}$

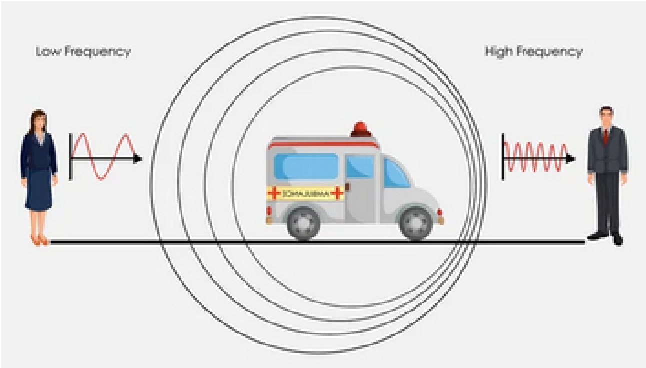



Figure 28:

# 7 *L'effet Doppler*

***1. Mise en situation***

Lorsqu'une source d'ondes sonores se déplace, on observe que la fréquence du son entendu est différente du son qu'on entendrait si la source est immobile.

Par exemple, lorsque la sirène d'une ambulance ou d'une voiture de police s'approche d'un auditeur, le son perçu par l'auditeur est plus aigu (fréquence plus élevée).

Lorsque la sirène d'une ambulance ou d'une voiture de police s'éloigne d'un auditeur, le son perçu par l'auditeur est plus grave (fréquence plus basse).

Il y a également un changement de fréquence si l'observateur est en mouvement et la source est immobile. Le son est plus aigu quand on se dirige vers la source et plus grave quand on s'éloigne de la source.

Ce changement de fréquence du au mouvement de l'observateur ou de la source porte le nom d'effet Doppler puisque la théorie décrivant cet effet fut développée par le physicien allemand Christian Doppler en 1842.

***2. Etude quantitative***

Deux situations peuvent être traitées :

a) L'observateur s'éloigne ou se rapproche de la source fixe.

b) La source s'éloigne ou se rapproche d'un observateur fixe.

Nous supposerons pour chacune des situations que l'observateur ou la source se déplace suivant une trajectoire rectiligne et à vitesse constante.

La différence de fréquence entre celle émise et celle perçue est due à une variation de la longueur d'onde perçue par l'observateur.

*2.1- Une source en mouvement s'approche de l'observateur fixe à une vitesse* $v_s$

Nous noterons :

**$v_s$ : la vitesse de la source**

**v : la vitesse de l'onde.**

**f : la fréquence émise par la source**

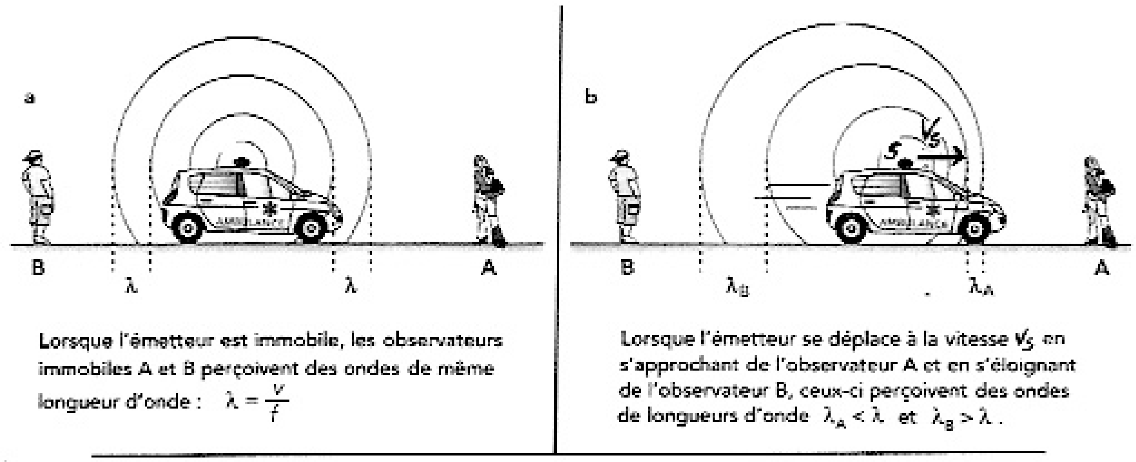
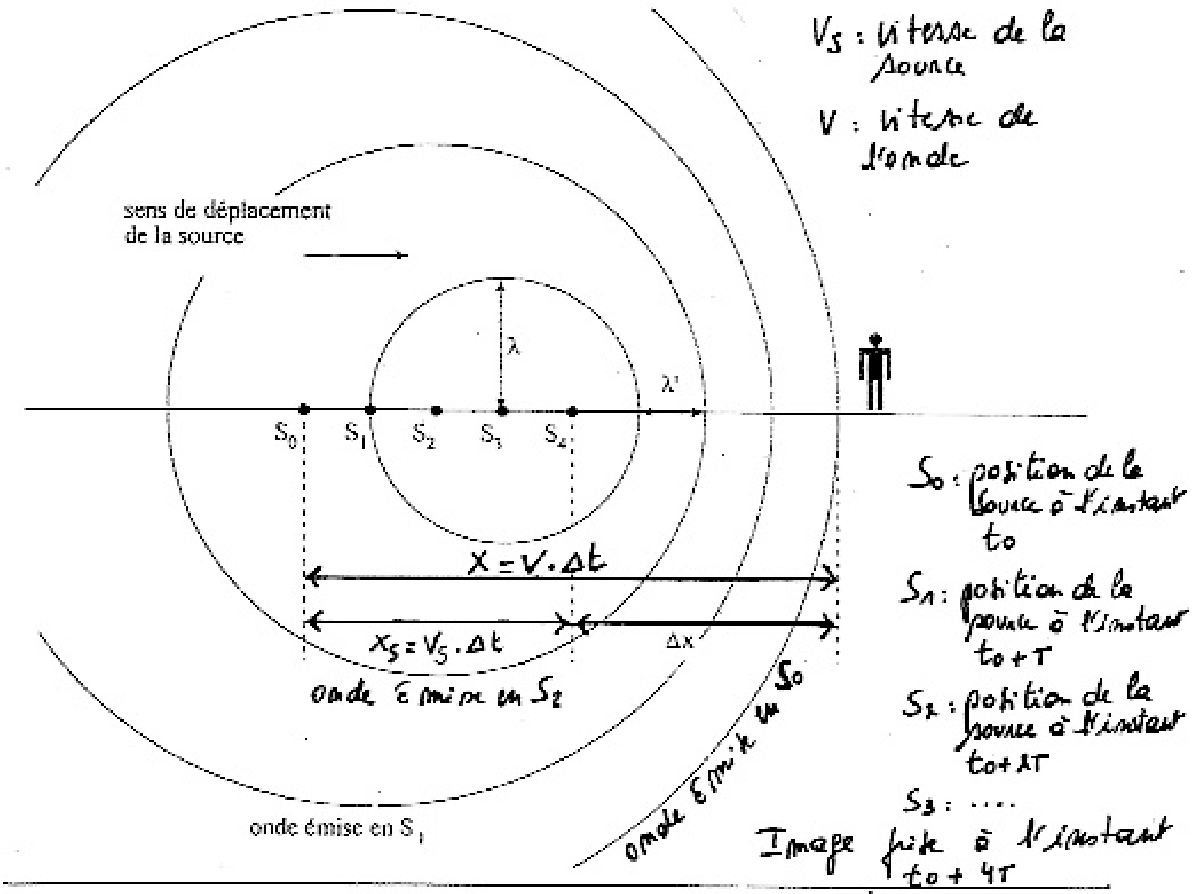



Figure 29:




Relation entre f (f émise par la source) et f' (f perçue par l'observateur) :

- Durant un temps $\Delta t$ (temps mis par l'onde en $S_0$ pour atteindre l'observateur)
  - ↳ l'onde partie de $S_0$ parcourt une distance $X = V \cdot \Delta t$
  - ↳ la source s'est déplacée d'une distance $X_S = V_S \cdot \Delta t$

⇒ l'écart entre les deux est : $\Delta X = V \cdot \Delta t - V_S \cdot \Delta t = \text{nbre} \cdot \lambda'$

**la fréquence perçue par l'observateur.**

Nous pourrions dans le même état d'esprit, démontrer les relations entre f et f ' pour les autres situations :

a) L'observateur s'éloigne ou se rapproche de la source fixe.

b) La source s'éloigne d'un observateur fixe.

Je vous laisse le plaisir de les réaliser.

En résumé, voici les relations pour les 4 situations :

***EXERCICES***

***Exercice 1*(N°14 du livre p 79)**

La fréquence d'une sirène est de 600 Hz (perception au repos).

Si un observateur perçoit ces ondes avec une fréquence de 580 Hz, y a-t-il éloignement ou rapprochement entre lui et la sirène ?

***Exercice 2* (N°18 du livre p 80)**

La sirène d'une voiture de police a une fréquence de 1200 Hz. Quelle est la fréquence entendue par un observateur immobile si la voiture se déplace à 108 km/h :

a) vers l'observateur ?

b) en s 'éloignant de l'observateur ?

***Exercice 3* (N°19 du livre p 80)**

Une source sonore émet à une fréquence de 600 Hz. C signal est perçu par un observateur immobile avec une fréquence de 640 Hz lorsque la source s'approche de lui. Calculer la fréquence perçue si la source s'éloigne à la même vitesse.

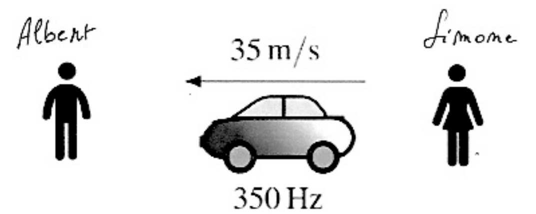
***Exercice 4* (N°20 du livre p 80)**

La sirène d'une voiture de police a une fréquence de 600 Hz. La voiture s'approche d'un grand mur à la vitesse de 108 km/h. Calculer la fréquence du son réfléchi entendu par le policier dans la voiture.

***Exercice 5 (N°21 du livre p 80)***

Debout sur le trottoir, un piéton perçoit une fréquence de 510 Hz provenant de la sirène d'une voiture de police qui s'approche. Après le passage de la voiture, la fréquence perçue du son de la sirène par le piéton est de 430Hz. Calculer la vitesse de la voiture.

***Exercice 6***




Le conducteur de l'auto fait fonctionner son klaxon, qui a une fréquence de 350 Hz, pour prévenir Albert qui est distrait sur la rue.

a) Quelle est la fréquence du son entendu par Albert?

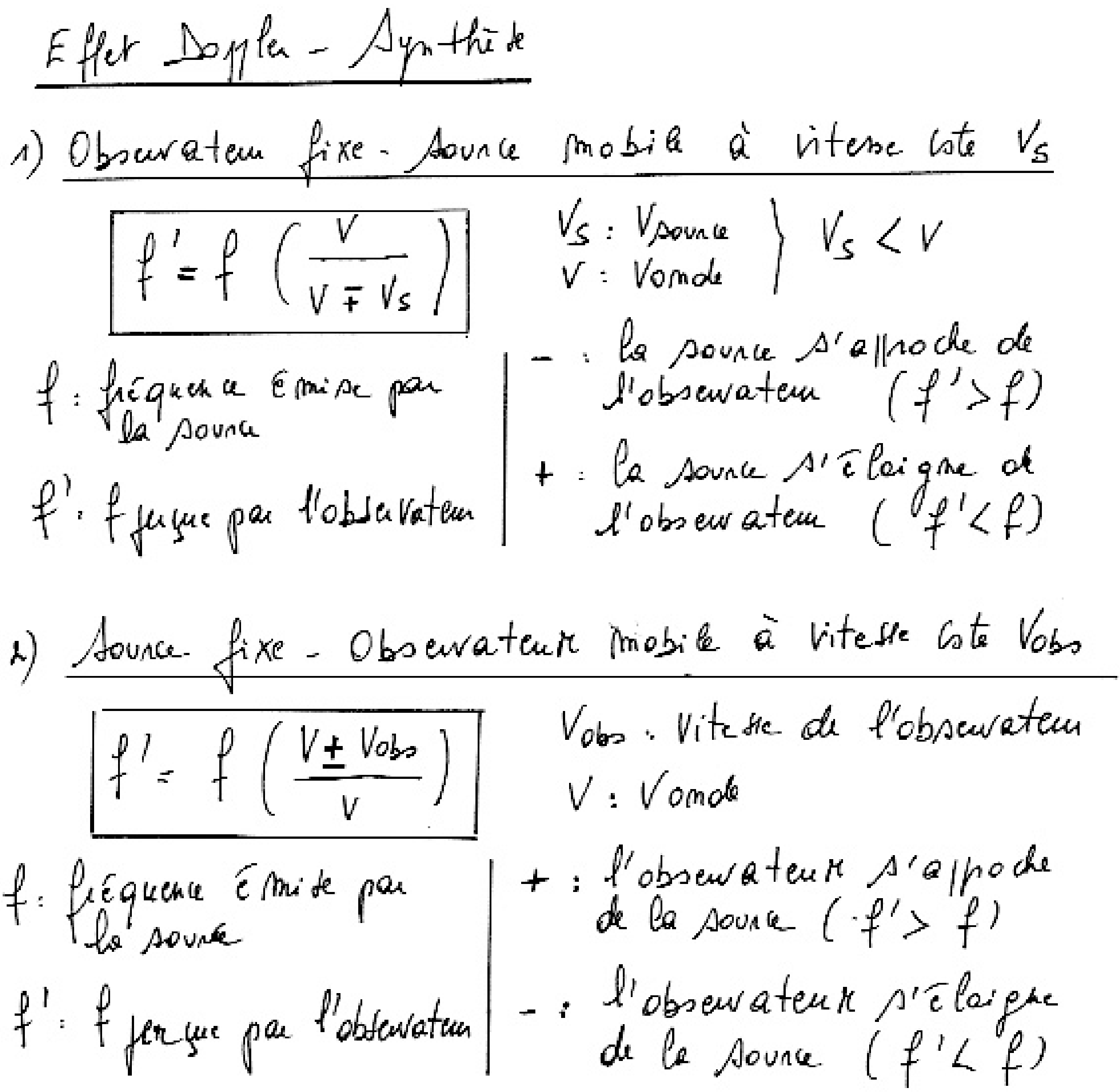
b) Quelle est la longueur d'onde du son perçu par Albert?

c) Quelle est la fréquence du son entendu par Simone ?

d) Quelle est la longueur d'onde du son perçu par Simone ?

(Rép : 390 Hz ; 87 cm ; 317 Hz ; 1,07 m)

***Exercice 7***



Effet Doppler - Synthèse

1) Observateur fixe - Source mobile à vitesse cste $V_S$

$$\boxed{f' = f\left(\frac{V}{V \mp V_S}\right)}$$

$V_S$ : $V_{source}$
$V$ : $V_{onde}$ } $V_S < V$

$f$ : fréquence émise par la source

$f'$ : $f$ perçue par l'observateur

$-$ : la source s'approche de l'observateur ($f' > f$)

$+$ : la source s'éloigne de l'observateur ($f' < f$)

2) Source fixe - Observateur mobile à vitesse cste $V_{obs}$

$$\boxed{f' = f\left(\frac{V \pm V_{obs}}{V}\right)}$$

$V_{obs}$ : Vitesse de l'observateur

$V$ : $V_{onde}$

$f$ : fréquence émise par la source

$f'$ : $f$ perçue par l'observateur

$+$ : l'observateur s'approche de la source ($f' > f$)

$-$ : l'observateur s'éloigne de la source ($f' < f$)

Figure 30:

La raie spectrale de l'hydrogène ayant normalement une longueur d'onde de 656,279 nm a une longueur d'onde de 656,263 nm dans le spectre de l'étoile Sirius observé sur la Terre. Avec quelle vitesse Sirius s'approche-t-elle ou s'éloigne-t-elle de nous?

(Rép :7314 m/s)

# 8 *EXERCICES*

*Exercice 1*(N°14 du livre p 79)

La fréquence d'une sirène est de 600 Hz (perception au repos).

Si un observateur perçoit ces ondes avec une fréquence de 580 Hz, y a-t-il éloignement ou rapprochement entre lui et la sirène ?

*Exercice 2* (N°18 du livre p 80)

La sirène d'une voiture de police a une fréquence de 1200 Hz. Quelle est la fréquence entendue par un observateur immobile si la voiture se déplace à 108 km/h :

a) vers l'observateur ?

b) en s 'éloignant de l'observateur ?

*Exercice 3* (N°19 du livre p 80)

Une source sonore émet à une fréquence de 600 Hz. C signal est perçu par un observateur immobile avec une fréquence de 640 Hz lorsque la source s'approche de lui. Calculer la fréquence perçue si la source s'éloigne à la même vitesse.

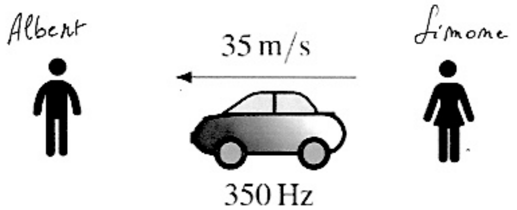
*Exercice 4* (N°20 du livre p 80)

La sirène d'une voiture de police a une fréquence de 600 Hz. La voiture s'approche d'un grand mur à la vitesse de 108 km/h. Calculer la fréquence du son réfléchi entendu par le policier dans la voiture.

*Exercice 5 (N°21 du livre p 80)*

Debout sur le trottoir, un piéton perçoit une fréquence de 510 Hz provenant de la sirène d'une voiture de police qui s'approche. Après le passage de la voiture, la fréquence perçue du son de la sirène par le piéton est de 430Hz. Calculer la vitesse de la voiture.

*Exercice 6*




Le conducteur de l'auto fait fonctionner son klaxon, qui a une fréquence de 350 Hz, pour prévenir Albert qui est distrait sur la rue.

a) Quelle est la fréquence du son entendu par Albert?

b) Quelle est la longueur d'onde du son perçu par Albert?

c) Quelle est la fréquence du son entendu par Simone ?

d) Quelle est la longueur d'onde du son perçu par Simone ?

*Exercice 7*

La raie spectrale de l'hydrogène ayant normalement une longueur d'onde de 656,279 nm a une longueur d'onde de 656,263 nm dans le spectre de l'étoile Sirius observé sur la Terre. Avec quelle vitesse Sirius s'approche-t-elle ou s'éloigne-t-elle de nous?

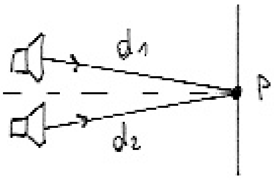



Figure 31:

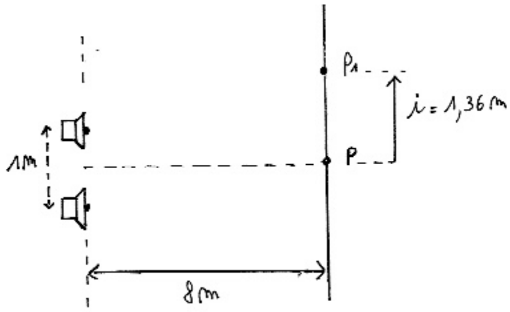
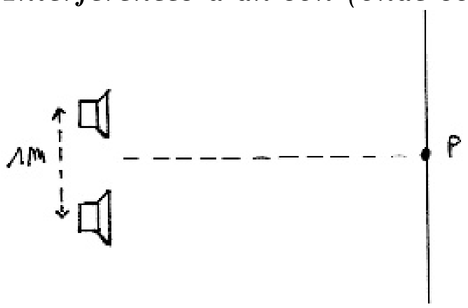



Figure 32:

***EXPERIENCE DE YOUNG***
***Mise en évidence du comportement ondulatoire de la lumière.***
***1) Interférences d'un son (onde sonore)***




***Exemple 1***

Deux haut-parleurs sont distants de 1 mètre et émettent chacun un son d'une fréquence égale à 1000 Hz en concordance de phase.

Comment sera l'intensité du son perçu au point P ?

Réponse :

P est situé en un point tel que $d_1$=$d_2$ la différence de marche $d_2$ - $d_1$ est nulle et donc les ondes arrivent au point P en concordance de phase. Il s'agit d'un point d'interférence constructive et l'intensité du son en P sera maximale.

***Exemple 2***

Deux haut-parleurs sont distants de 1 mètre et émettent chacun un son d'une fréquence égale à 1000 Hz en concordance de phase.

Comment sera l'intensité du son perçu au point P1 si ce point se trouve à une distance i=1,36 m du point P?

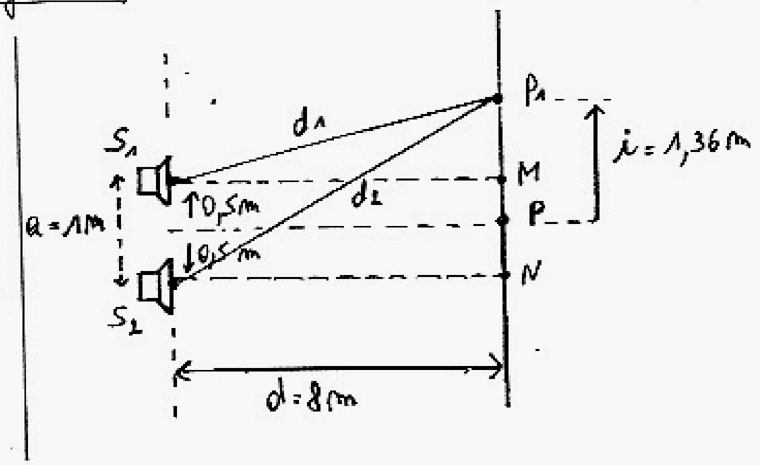
Pour résoudre cet exercice, calculons $|d_2 - d_1|$ et comparons-le à $\frac{\lambda}{2}$.

1) Soit le triangle rectangle $S_1P_1M$

$d_1 = \sqrt{d^2 + (i-0,5)^2}$

$\Rightarrow d_1 = \sqrt{8^2 + (1,36-0,5)^2}$

$\Rightarrow d_1 = 8,046\ m$




2) Soit le triangle rectangle $S_2P_1N$

$d_2 = \sqrt{d^2 + (i+0,5)^2}$

$\Rightarrow d_2 = \sqrt{8^2 + (1,36+0,5)^2}$

$\Rightarrow d_2 = 8,213\ m$

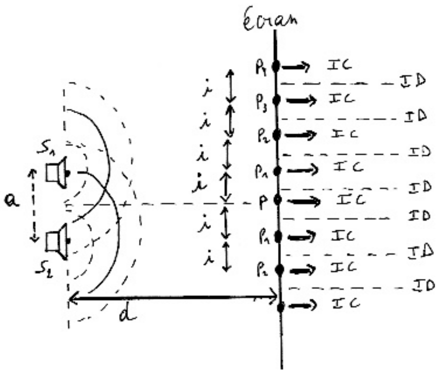
Calculons $|d_2 - d_1|$

$|d_2 - d_1| = |8,213 - 8,046| = 0,17$ et $\frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f} = \frac{340}{2 \cdot 1000} = 0,17$

$\Rightarrow |d_2 - d_1| = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow$ Il s'agit d'une interférence destructive et l'intensité du son au point $P_1$ est nulle.

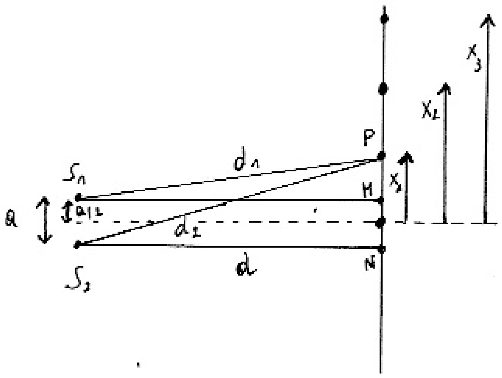
Figure 33:

***Généralisation***




Nous voyons donc que lorsque nous nous déplaçons sur la droite verticale (que nous appellerons l'écran), nous parcourons une succession de zones d'interférences constructives (IC) et d'interférences destructives (ID).

Les zones d'interférences constructives sont telles que l'intensité du son est maximale et les zones d'interférences destructives, telles que l'intensité du son est nulle. Elles sont séparées d'une distance i (appelée interfrange)




***La question est : pouvons-nous trouver la distance qui sépare les zones d'interférence constructives (l'interfrange i), en fonction de , a et d où :***

: longueur d'onde des sons émis.

i : distance entre deux zones d'interférences constructives.

d : distance entre les sources et l'écran.

a : distance entre les deux sources.

Remarquez sur le schéma ci-contre : $x_1$=i, $x_2$-$x_1$ = i, $x_3$-$x_2$ = i, ….

x est la distance entre le point central et un point d'interférence constructive.

***2) Interférence lumineuse***

***a) EXPERIENCE DE YOUNG : diffraction à travers deux fentes et figure d'interférences.***

Nous venons de voir que les interférences sonores sont caractéristiques d'un comportement ondulatoire.

Soit P un point d'interférence constructive

$\Rightarrow$ en P : $d_2 - d_1 = k\lambda$ ($k \in \mathbb{N}$)

Prenons le triangle $S_2PN \Rightarrow d_2^2 = d^2 + (x+\frac{a}{2})^2 = d^2 + x^2 + \frac{a^2}{4} + 2x\frac{a}{2}$

Prenons le triangle $S_1PM \Rightarrow d_1^2 = d^2 + (x-\frac{a}{2})^2 = d^2 + x^2 + \frac{a^2}{4} - 2x\frac{a}{2}$

En soustrayant les deux équations membres à membres $\Rightarrow$ $d_2^2 - d_1^2 = \cancel{2}x\frac{a}{\cancel{2}} - (-\cancel{2}x\frac{a}{\cancel{2}}) = xa + xa = 2xa$

$\Rightarrow (d_2 + d_1)(d_2 - d_1) = 2xa$

Approximation : si x et a sont très petits devant $d \Rightarrow d \simeq d_1 \simeq d_2$

$\Rightarrow \cancel{2}d\,(d_2 - d_1) = \cancel{2}xa \Rightarrow d_2 - d_1 = \frac{xa}{d}$

OR P est un point d'IC $\Rightarrow d_2 - d_1 = k\lambda$

$\Rightarrow \frac{xa}{d} = k\lambda$ $\Rightarrow$ A chaque k, on peut associer un x, appelons-le $x_k$

$$\Rightarrow x_k = \frac{k\lambda d}{a} \Rightarrow \left.\begin{array}{l} x_0 = 0 \\ x_1 = \frac{\lambda d}{a} \\ x_2 = \frac{2\lambda d}{a} \\ x_3 = \frac{3\lambda d}{a} \\ \vdots \end{array}\right\} \begin{array}{l} x_1 = i = \frac{\lambda d}{a} \\ x_2 - x_1 = i = \frac{\lambda d}{a} \\ x_3 - x_2 = i = \frac{\lambda d}{a} \end{array} \Rightarrow \boxed{i = \frac{\lambda d}{a}}$$

Figure 34:

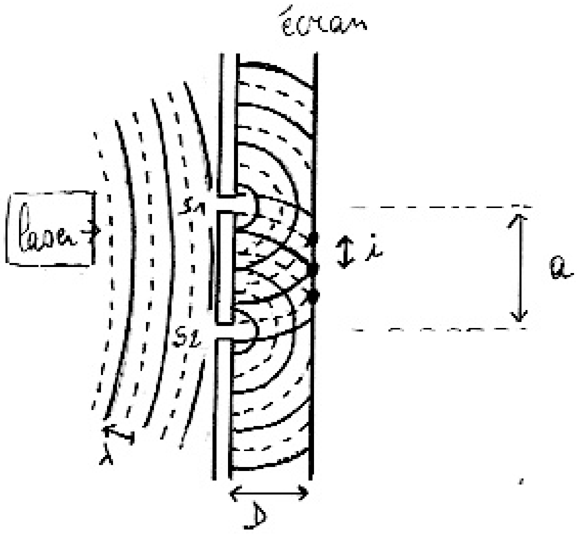
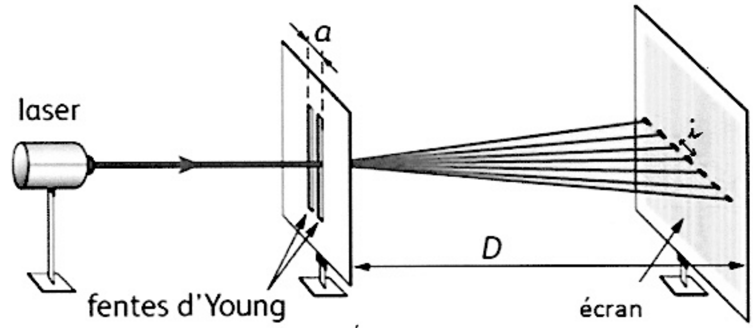



Figure 35:




***Que se passera-t-il si nous soumettons la lumière à cette expérience d'interférence ?***

Décrivons cette expérience, ***l'expérience de Young.***

De la lumière provenant d'un laser traverse un écran percé de deux fentes fines, distantes d'une courte distance a (les fentes de Young).

Sur un écran, situé à une distance D des fentes, on observe une succession de points lumineux, séparés par une distance i.

*Interprétation*

En analogie avec deux sources d'ondes sonores, nous pouvons conclure que seul le modèle ondulatoire peut expliquer ces observations.

Les deux fentes de Young S1 et S2 vont se comporter comme de nouvelles sources et diffracter la lumière incidente provenant du laser.

$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

Figure 36:

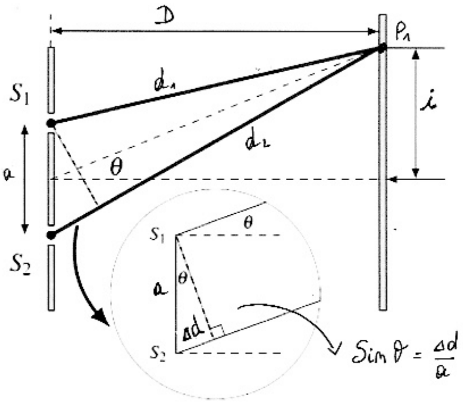



Figure 37:

Ces deux ondes vont produire des interférences sur l'écran et produire une succession de points lumineux.

Les points lumineux sont des zones d'interférences constructives et entre les points lumineux, l'absence de lumière, correspond à des zones d'interférences destructives, ce qui est typiquement un comportement ondulatoire.

Nous avons démontré précédemment, dans le cas d'interférences de deux ondes sonores, le lien qui relie , i, a et D. En suivant une démarche identique pour cette expérience de Young, nous obtenons la relation :

Dans notre situation : i et a sont très petits devant D, l'approximation est très pertinente (voir démonstration).

L'expérience de Young avec de la lumière conduit à la même relation :

***Cette expérience montre que la lumière a un caractère ondulatoire et donc que la lumière se comporte comme une onde. Elle est donc caractérisée par une fréquence f et une longueur d'onde .***

***b) Calcul angulaire de la position des points d'interférence constructive***

Soit $P_1$, un point d'interférence constructive situé juste après le point central, notons la position angulaire de ce point.

En ce point $P_1$, l'interférence étant constructive, la différence de marche d = $d_2 - d_1$ =

En faisant l'approximation déjà réalisée précédemment, à savoir : a et i D, nous pouvons considérer que les rayons lumineux d1 et d2 sont quasiment parallèles.

En considérant le triangle rectangle représenté sur le schéma :

d = = a Sin

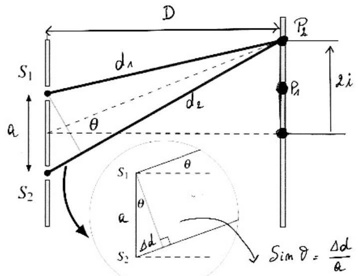
Nous avons donc que : = a Sin et donc :

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

Figure 38:

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

Figure 39:




***Généralisation***

- Considérons un point $P_2$

En ce point $P_2$ , l'interférence étant constructive, la différence de marche d = $d_2 - d_1$ = 2

En considérant le triangle rectangle représenté sur le schéma : d = = a Sin

Donc : $$\sin\theta = \frac{2\lambda}{a}$$

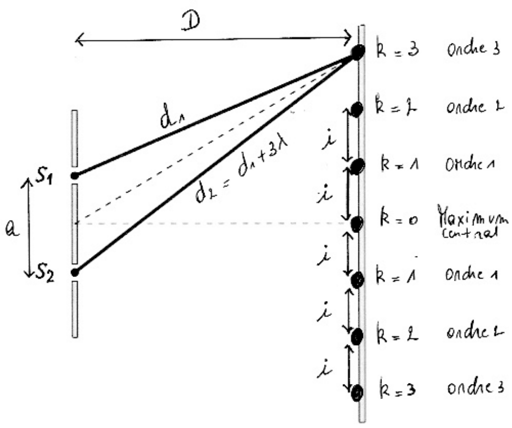
En continuant le raisonnement de la sorte pour des points :

$P_3$ distant de 3i du point central,

$P_4$ distant de 4i du point central,

$P_5$ distant de 5i du point central, …

Nous arrivons à :




***Synthèse:***

***4)Applications***

$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

Figure 40:

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

Figure 41:

***3.1 Détermination expérimentale de la longueur d'onde de la lumière.***

L'expérience de Young permet de déterminer la fréquence de la lumière

a) Réalisons l'expérience de Young avec une lumière jaune et les données suivantes :

D=1,75 m

a=1 mm

i =1 mm

$D = 1{,}75\ m$

$a = 10^{-3}\ m$

$i = 10^{-3}\ m$

$\lambda$ ?

$$\lambda = \frac{ia}{D} = \frac{10^{-3} \cdot 10^{-3}}{1{,}75} = 5{,}71 \cdot 10^{-7}\ m$$

OR $\boxed{1\ nm = 10^{-9}\ m}$

1) $\Rightarrow \lambda = 571 \cdot 10^{-9}\ m = 571\ nm \Rightarrow \boxed{\lambda_{jaune} = 571\ nm}$

2) $f = \dfrac{V}{\lambda} = \dfrac{3 \cdot 10^{8}}{571 \cdot 10^{-9}} = 5{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{8+9} = \boxed{5{,}25 \cdot 10^{14}\ Hz = f_{jaune}}$

Calculez la longueur d'onde de la lumière jaune ainsi que la fréquence de la lumière correspondante.

b) Réalisons l'expérience de Young avec une lumière verte sachant que l'expérience de Young nous fournit les valeurs suivantes :

D=4,95 m

a=0,2 mm

i =1,32 cm

Calculez la longueur d'onde de la lumière verte ainsi que la fréquence de la lumière correspondante. Exprimez votre réponse en nm.

***c) Le spectre de la lumière blanche***

***Ces expériences nous montrent que chaque couleur de la lumière possède une longueur d'onde et donc une fréquence caractéristique de la couleur.***

**$_{jaune}$ $_{vert}$ et donc $f_{jaune}$ $f_{vert}$**

Or la lumière blanche est composée de toutes les couleurs de l'arc en ciel. L'expérience de Young nous

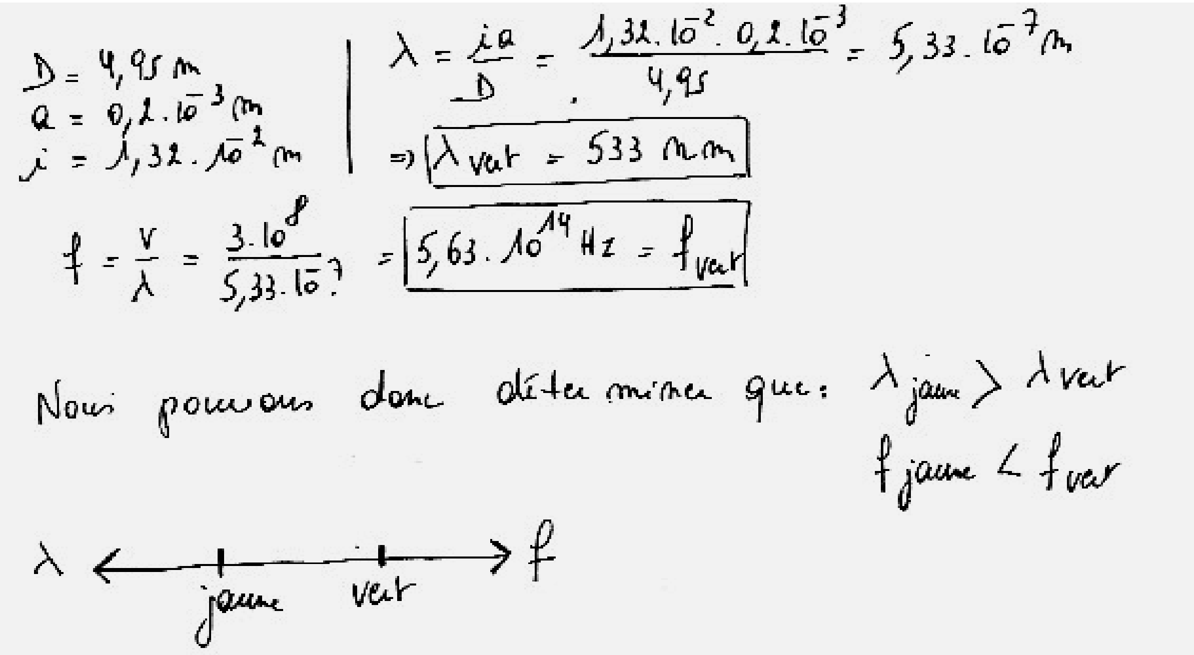
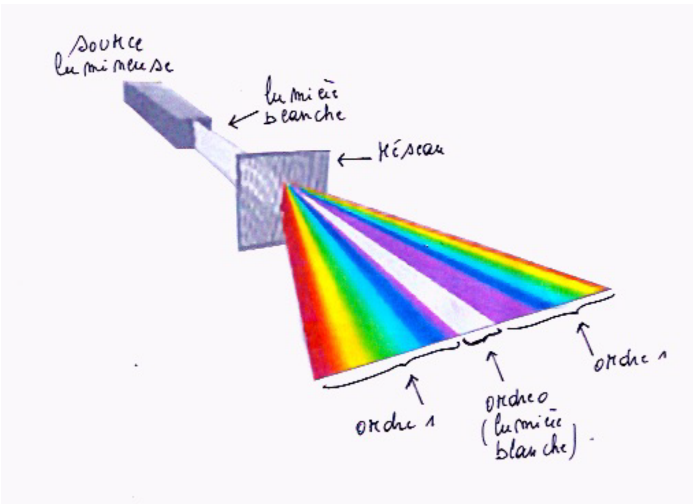



Figure 42:

permet donc de classer toutes les couleurs qui composent la lumière blanche en fonction de leur longueur d'onde ( et donc de leur fréquence).

C'est ce qu'on appelle ***le spectre de la lumière blanche. (voir livre p 115)***




***d) Diffraction de la lumière blanche***

Si on réalise l'expérience de diffraction de la lumière blanche par un réseau, on observe que chaque couleur présentera ses maximums à un angle différent, sauf pour le maximum central qui est à la même position ( = 0) pour toutes les couleurs.

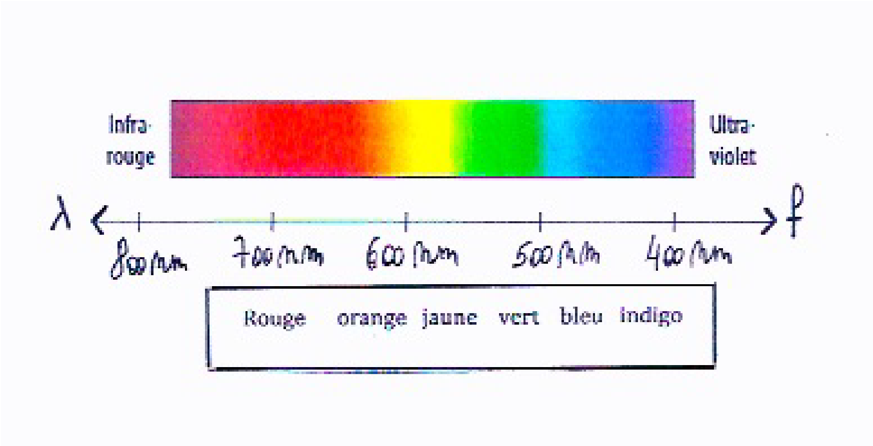



Figure 43:

$\sin\theta = \frac{k\lambda}{a}$ Les plus grandes longueurs d'onde subiront les plus grandes déviations.

**Le maximum d'ordre 1 du mauve sera celui le plus près du maximum** central puisque c'est la longueur d'onde visible la plus petite alors que **le maximum d'ordre 1 le plus éloigné du maximum central sera celui du rouge** puisque c'est cette couleur du visible qui a la plus grande longueur d'onde. On aura alors la figure d'interférence ci-contre.

***Applications :***

Les plumes si colorées de certains oiseaux.

***EXERCICES***

## 9 *Exercice 1*

De la lumière de longueur d'onde égale à 600 nm éclaire, suivant la normale, deux fentes séparées de 0,1 mm.

a) Quelle est la position angulaire d'ordre 1? (Rép : 0,34°)
b) A quelle distance du point central se trouve ce maximum d'ordre 1 sur un écran situé à 3 mètres des fentes? (Rép : 18 mm)

***Exercice 2***

On fait passer de la lumière ayant une longueur d'onde de 500 nm à travers deux fentes séparées de 0,01 mm. On observe la figure de diffraction sur un écran situé à 2 m de la fente.

a) Quelle est la distance entre le maximum central et le premier minimum? (Rép : 5 cm)

b) Quelle est la distance entre le maximum central et le deuxième minimum? (Rép : 15 cm)

***Exercice 3***

On fait passer des micro-ondes à travers deux fentes séparées de 1 cm. Sur un écran situé à 1,6 m de distance de la fente, on observe une interfrange de 50 cm. Quelle est la longueur d'onde des micro-ondes? (Rép : 3 mm)

***Exercice 4***

Dans une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 500 nm. La distance entre les fentes est de 0,1 mm et on observe la figure d'interférence sur un écran situé à 1,6 m des fentes. Quel est l'angle entre le maximum central et le maximum d'ordre 5? (Rép : 1,43°)

***Exercice 5***

Dans une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 600 nm.

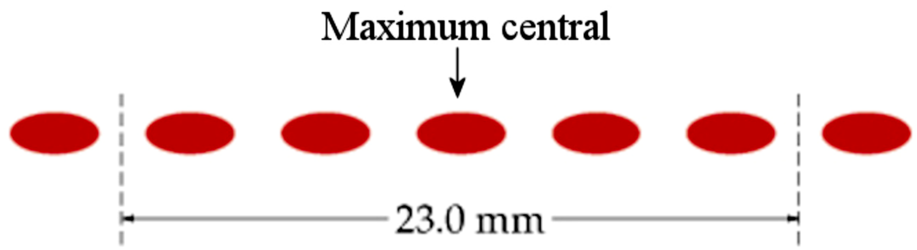
On remarque alors que le maximum d'ordre 4 est à 1 cm du maximum central sur un écran situé à 2 m des fentes. Quelle est la distance entre les fentes ? (Rép : 0,48 mm)

***Exercice 6***

Au cours d' une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 632 nm et

la distance entre les fentes est de 0,2 mm. La figure montre la figure d'interférence

qu'on observe sur un écran. À quelle distance des fentes est situé l'écran ? (Rép : 1,46 m)




***EXERCICES***

# 10 *Exercice 1*

De la lumière de longueur d'onde égale à 600 nm éclaire, suivant la normale, deux fentes séparées de 0,1 mm.

a) Quelle est la position angulaire du maximum d'ordre 1 ?

b) A quelle distance du point central se trouve ce maximum d'ordre 1 sur un écran situé à 3 mètres des fentes?

***Exercice 2***

On fait passer de la lumière ayant une longueur d'onde de 500 nm à travers deux fentes séparées de 0,01 mm. On observe la figure de diffraction sur un écran situé à 2 m de la fente.

a) Quelle est la distance entre le maximum central et le premier minimum?

b) Quelle est la distance entre le maximum central et le deuxième minimum?

***Exercice 3***

On fait passer des micro-ondes à travers deux fentes séparées de 1 cm. Sur un écran situé à 1,6 m de distance de la fente, on observe une interfrange de 50 cm. Quelle est la longueur d'onde des micro-ondes?

***Exercice 4***

Dans une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 500 nm. La distance entre les fentes est de 0,1 mm et on observe la figure d'interférence sur un écran situé à 1,6 m des fentes. Quel est l'angle entre le maximum central et le maximum d'ordre 5? (Rép :

***Exercice 5***

Dans une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 600 nm.

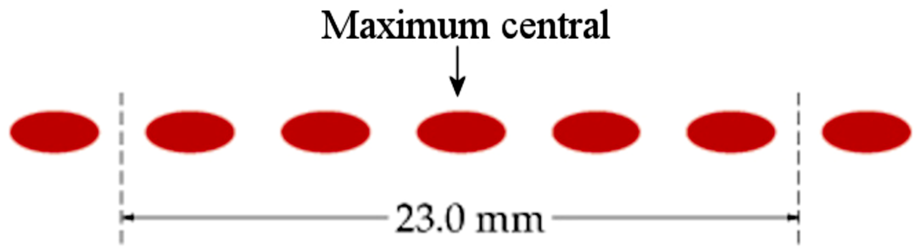
On remarque alors que le maximum d'ordre 4 est à 1 cm du maximum central sur un écran situé à 2 m des fentes. Quelle est la distance entre les fentes ? (Rép :

***Exercice 6***

Au cours d' une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 632 nm et

la distance entre les fentes est de 0,2 mm. La figure montre la figure d'interférence

qu'on observe sur un écran. À quelle distance des fentes est situé l'écran ? (Rép :


Maximum central
23.0 mm

**EXERCICES**

**Exercice 1**

De la lumière de longueur d'onde égale à 600 nm éclaire, suivant la normale, deux fentes séparées de 0,1 mm.

$\lambda = 600\cdot10^{-9}\,m$ et $a = 0{,}1\cdot10^{-3}\,m = 10^{-4}\,m$

a) Quelle est la position angulaire du maximum d'ordre 1 ? $\Rightarrow k = 1$

$\theta$ ? $\sin\theta = \frac{k\lambda}{a} \Rightarrow \sin\theta = \frac{\lambda}{a}$

$\Rightarrow \theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(\frac{600\cdot10^{-9}}{10^{-4}}\right) = \boxed{0{,}34° = \theta}$

b) A quelle distance du point central se trouve ce maximum d'ordre 1 sur un écran situé à 3 mètres des fentes?

$i$ ?

$D = 3\,m$

$\lambda = \frac{ia}{D} \Rightarrow i = \frac{\lambda D}{a} = \frac{600\cdot10^{-9}\cdot3}{10^{-4}} = 0{,}018\,m = \boxed{18\,mm = i}$

**Exercice 2**

On fait passer de la lumière ayant une longueur d'onde de 500 nm à travers deux fentes séparées de 0,01 mm. On observe la figure de diffraction sur un écran situé à 2 m de la fente.

$\lambda = 500\cdot10^{-9}\,m$

$a = 10^{-5}\,m$

$D = 2\,m$

a) Quelle est la distance entre le maximum central et le premier minimum?

1er minimum $\Rightarrow i/2$

$\lambda = \frac{ia}{D} \Rightarrow i = \frac{\lambda D}{a} \Rightarrow \frac{i}{2} = \frac{\lambda D}{2a} = \frac{500\cdot10^{-9}\cdot\cancel{2}}{\cancel{2}\cdot10^{-5}} = \boxed{5\,cm = \frac{i}{2}}$

b) Quelle est la distance entre le maximum central et le deuxième minimum?

$\frac{3i}{2} \Rightarrow i = \frac{\lambda D}{a} = \frac{500\cdot10^{-9}\cdot2}{10^{-5}} = 10\,cm$

$\Rightarrow \frac{3i}{2} = \frac{3\cdot10}{2} = \boxed{15\,cm = \frac{3i}{2}}$

**Exercice 3**

On fait passer des micro-ondes à travers deux fentes séparées de 1 cm. Sur un écran situé à 1,6 m de distance de la fente, on observe une interfrange de 50 cm. Quelle est la longueur d'onde des micro-ondes?

$a = 1\,cm = 10^{-2}\,m$

$D = 1{,}6\,m$

$i = 0{,}5\,m$

$\lambda$ ?

$\lambda = \frac{ia}{D} = \frac{0{,}5\cdot10^{-2}}{1{,}6} = 0{,}003\,m = \boxed{3\,mm = \lambda}$

**Exercice 4**

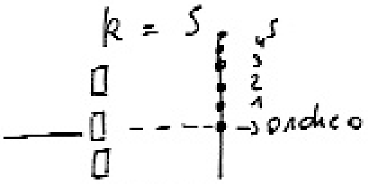
Dans une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 500 nm. La distance entre les fentes est de 0,1 mm et on observe la figure d'interférence sur un écran situé à 1,6 m des fentes. Quel est l'angle entre le maximum central et le maximum d'ordre 5? (Rép :

$\lambda = 500 \cdot 10^{-9}\,m$

$a = 10^{-4}\,m$

$D = 1{,}6\,m$

$k = 5$




$\theta$ pour $5i$ ?

$\sin\theta = \frac{k\lambda}{a} \Rightarrow \sin\theta = \frac{5\lambda}{a}$

$\Rightarrow \theta = \text{Arcsin}\left(\frac{5\lambda}{a}\right) = \text{Arcsin}\left(\frac{5 \cdot 500 \cdot 10^{-9}}{10^{-4}}\right)$

$\boxed{\theta = 1{,}43°}$

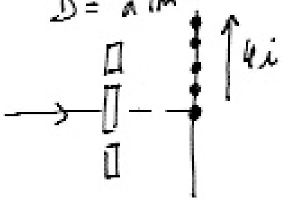
**Exercice 5**

Dans une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 600 nm.
On remarque alors que le maximum d'ordre 4 est à 1 cm du maximum central sur un écran situé à 2 m des fentes. Quelle est la distance entre les fentes ? (Rép :

$\lambda = 600 \cdot 10^{-9}\,m$

$k = 4$

$D = 2\,m$



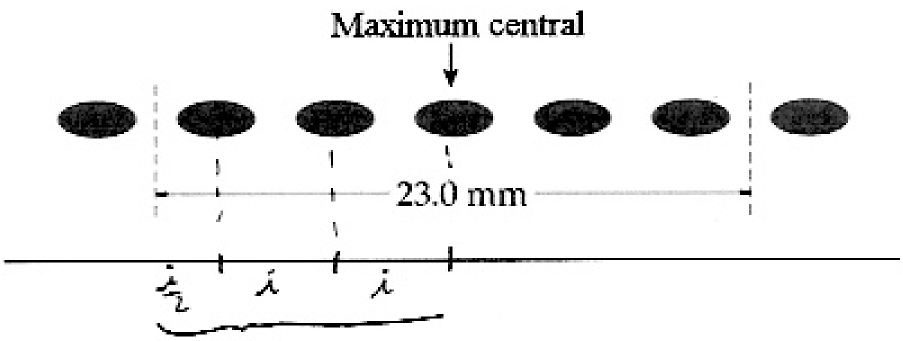

$4i = 1\,cm \Rightarrow i = 2{,}5\,mm = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\,m$

$a$ ?

$a = \frac{\lambda D}{i} = \frac{600 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{2{,}5 \cdot 10^{-3}} = 4{,}8 \cdot 10^{-4}\,m = \boxed{0{,}48\,mm = a}$

**Exercice 6**

Au cours d' une expérience de Young, la longueur d'onde de la lumière est de 632 nm et la distance entre les fentes est de 0,2 mm. La figure montre la figure d'interférence qu'on observe sur un écran. À quelle distance des fentes est situé l'écran ? (Rép :




$\lambda = 632 \cdot 10^{-9}\,m$

$a = 2 \cdot 10^{-4}\,m$

$D$ ?

$\frac{5i}{2}$



$\Rightarrow 23\,mm \rightarrow \frac{10i}{2} = 5i \Rightarrow i = \frac{23\,mm}{5} = 4{,}6\,mm = 4{,}6 \cdot 10^{-3}\,m$

$\Rightarrow \lambda = \frac{ia}{D} \Rightarrow D = \frac{ia}{\lambda} = \frac{4{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{632 \cdot 10^{-9}} = \boxed{1{,}46\,m = D}$

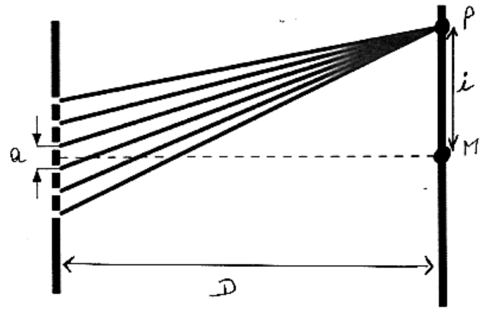
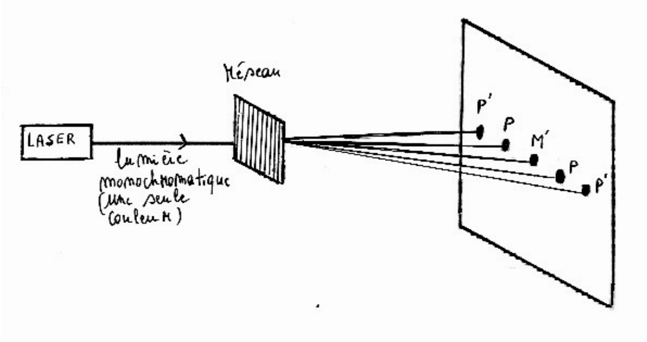



Figure 44:

***Diffraction de la lumière par un réseau et interférences – Comportement ondulatoire***

Que se passera-t-il si nous utilisons plusieurs fentes (appelé réseau) au lieu de deux comme dans l'expérience de Young ?




*Mais qu'est ce qu'un réseau de diffraction ?*

Un réseau de diffraction est constitué d'un très grand nombre de fentes, (au lieu de deux dans l'expérience de Young), très fines et très proches les unes des autres, parallèles et équidistantes.

La distance entre deux fentes est a.

Si de la lumière provenant du laser est une lumière monochromatique (une seule couleur et donc une seule fréquence), il apparaît alors sur l'écran une série de points lumineux : un point central M' dans le prolongement du faisceau incident et des points lumineux, P,P',... répartis symétriquement de part et d'autre du point central.

Nous observons donc une figure d'interférences, comme dans le cas de l'expérience de Young.

*Cherchons une relation entre i, , a et D.*

Chaque fente étant très étroite, il y a une diffraction importante : on pet donc considérer que chaque fente se comporte comme une nouvelle source d'ondes circulaires envoyant des ondes dans toutes les directions. Par clarté, nous ne dessinerons que celle qui atteignent un point P.

Ces ondes venant de chacune des fentes vont interférer.

On constate que les distances des très nombreuses fentes au point P sont très légèrement différentes, ce qui entraine un déphasage des différentes ondes arrivant au point P.

M est le point lumineux central,

P les points lumineux consécutifs au point central.

Nous pouvons mesurer :

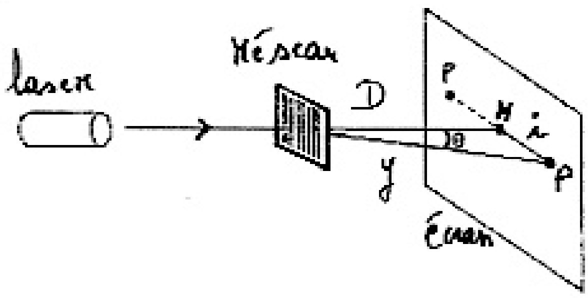
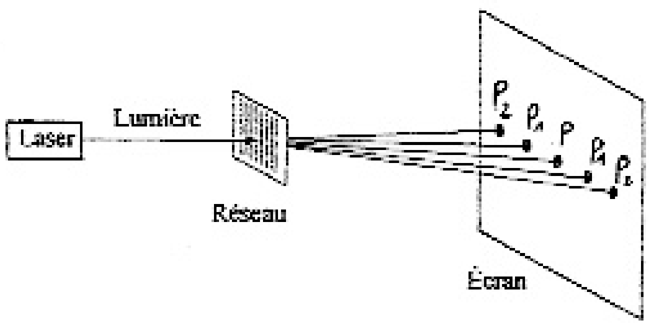



Figure 45:

i (l'interfrange),
 (l'angle de déviation)
D (distance entre le réseau et l'écran).
Ceci nous permettra de calculer la longueur d'onde de la lumière.
*Cherchons la relation entre , i, a et D .*
*Diffraction delà lumière par un réseau - Synthèse*




$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

***EXERCICES***
***Exercice 1***
Un réseau a 300 fentes/mm. On fait passer de la lumière rouge ayant une longueur d'onde de 650 nm dans le réseau et on observe les maximums sur un écran situé à 2,4 m du réseau.
Quelle est la distance sur l'écran entre le maximum d'ordre 1 et le maximum central? (Rép : 468 mm)

## 11 *Exercice 2*

De la lumière de longueur d'onde égale à 550 nm éclaire selon la normale un réseau comprenant 400 traits par mm. Calcule l'angle sous lequel on observe les maxima pour les ordres 2 et 3.
(Rép : 26° et 41,3°)
***Exercice 3***
On fait passer de la lumière provenant d'une ampoule au sodium à travers un réseau ayant 300 fentes/mm. On observe les maximums sur un écran situé à 2 m des fentes. Dans la lumière faite par une telle lampe, on retrouve de la lumière ayant une longueur d'onde de 589,0 nm et de la lumière ayant une longueur d'onde

• P est un point d'interférence constructive d'ordre 1 $(k=1)$

1) $\Rightarrow \sin\theta = \dfrac{\lambda}{a}$

• Sur le schéma, nous voyons que :

$$\sin\theta = \frac{i}{y} \quad \text{et} \quad y = \sqrt{D^2+i^2}$$

2) $\Rightarrow \sin\theta = \dfrac{i}{\sqrt{D^2+i^2}}$

En combinant 1) et 2) $\Rightarrow \dfrac{\lambda}{a} = \dfrac{i}{\sqrt{D^2+i^2}}$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{ia}{\sqrt{D^2+i^2}}$$

• Approximation : si $i \lll d \Rightarrow D^2+i^2 \simeq D^2$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{ia}{\sqrt{D^2}} \Rightarrow \boxed{\lambda = \frac{ia}{D}}$$

Et nous retrouvons l'expression démontrée suite à l'expérience de Young

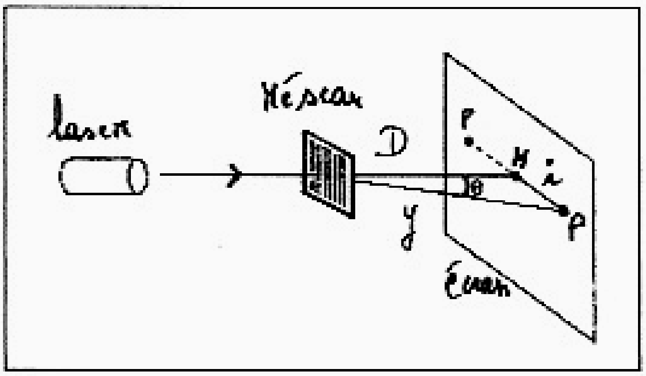
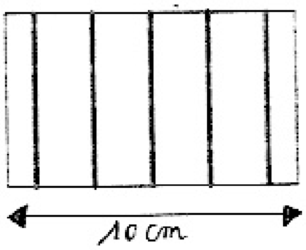



Figure 46:

de 589,6 nm (qu'on appelle le doublet du sodium). Quelle est la distance sur l'écran entre les maximums d'ordre 1 de ces deux ondes de longueurs d'onde différente?

(Rép : 0,36 mm)




***Exercice 4***

Sur un écran situé à 46 cm d'un réseau éclairé avec de la lumière monochromatique, on observe la figure suivante : Le pas du réseau est de 10 m.

a) En déduire la longueur d'onde de la lumière monochromatique qui éclaire le réseau. (Rép : 435 nm)
b) De quelle couleur s'agit-il ? (Rép : bleu)

***EXERCICES***

***Exercice 1***

Un réseau a 300 fentes/mm. On fait passer de la lumière rouge ayant une longueur d'onde de 650 nm dans le réseau et on observe les maximums sur un écran situé à 2,4 m du réseau.

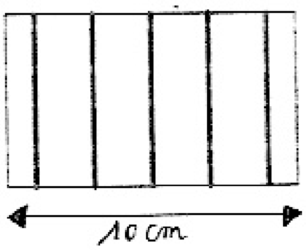
Quelle est la distance sur l'écran entre le maximum d'ordre 1 et le maximum central?

## 12 *Exercice 2*

De la lumière de longueur d'onde égale à 550 nm éclaire selon la normale un réseau comprenant 400 traits par mm. Calcule l'angle sous lequel on observe les maxima pour les ordres 2 et 3.

***Exercice 3***

On fait passer de la lumière provenant d'une ampoule au sodium à travers un réseau ayant 300 fentes/mm. On observe les maximums sur un écran situé à 2 m des fentes. Dans la lumière faite par une telle lampe, on retrouve de la lumière ayant une longueur d'onde de 589,0 nm et de la lumière ayant une longueur d'onde de 589,6 nm (qu'on appelle le doublet du sodium). Quelle est la distance sur l'écran entre les maximums d'ordre 1 de ces deux ondes de longueurs d'onde différente?




***Exercice 4***

Sur un écran situé à 46 cm d'un réseau éclairé avec de la lumière monochromatique, on observe la figure suivante : Le pas du réseau est de 10 m.

a) En déduire la longueur d'onde de la lumière monochromatique qui éclaire le réseau.

b) De quelle couleur s'agit-il ?

**EXERCICES**

**Exercice 1**

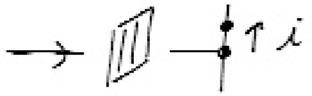
Un réseau a 300 fentes/mm. On fait passer de la lumière rouge ayant une longueur d'onde de 650 nm dans le réseau et on observe les maximums sur un écran situé à 2,4 m du réseau.
Quelle est la distance sur l'écran entre le maximum d'ordre 1 et le maximum central?

300 fentes $\rightarrow 10^{-3}$ m

1 fente $\rightarrow \frac{10^{-3}}{300}$ m $\Rightarrow a = 3,33.10^{-6}$ m

$\lambda = 650.10^{-9}$ m

D ? $k = 1$




$\lambda = \frac{i\,a}{D} \Rightarrow i = \frac{\lambda D}{a}$

$\Rightarrow i = \frac{650.10^{-9}.2,4}{3,33.10^{-6}} = 0,468$ m $= 468$ mm

$\boxed{i = 468 \text{ mm}}$

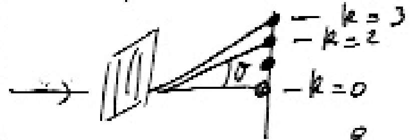
**Exercice 2**

De la lumière de longueur d'onde égale à 550 nm éclaire selon la normale un réseau comprenant 400 traits par mm. Calcule l'angle sous lequel on observe les maxima pour les ordres 2 et 3.

$\lambda = 550.10^{-9}$ m

400 traits $\rightarrow$ 1 mm $= 10^{-3}$ m

1 traits $\rightarrow \frac{10^{-3}}{460}$ m $\rightarrow a = 2,5.10^{-6}$ m




ordre 2 : $\sin\theta = \frac{2\lambda}{a} \Rightarrow \theta = \text{Arcsin}\left(\frac{2\lambda}{a}\right) = \text{Arcsin}\left(\frac{2.550.10^{-9}}{2,5.10^{-6}}\right) = \boxed{26° = \theta_2}$

ordre 3 : $\sin\theta = \frac{3\lambda}{a} \Rightarrow \theta = \text{Arcsin}\left(\frac{3\lambda}{a}\right) = \text{Arcsin}\left(\frac{3.550.10^{-9}}{2,5.10^{-6}}\right) = \boxed{41,3° = \theta_3}$

**Exercice 3**

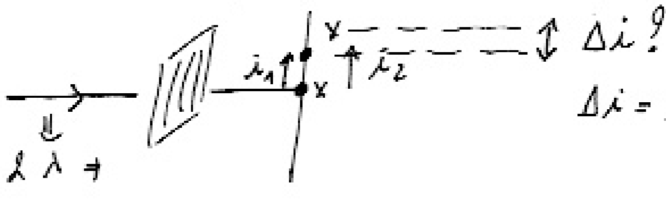
On fait passer de la lumière provenant d'une ampoule au sodium à travers un réseau ayant 300 fentes/mm. On observe les maximums sur un écran situé à 2 m des fentes. Dans la lumière faite par une telle lampe, on retrouve de la lumière ayant une longueur d'onde de 589,0 nm et de la lumière ayant une longueur d'onde de 589,6 nm (qu'on appelle le doublet du sodium). Quelle est la distance sur l'écran entre les maximums d'ordre 1 de ces deux ondes de longueurs d'onde différente?

300 fentes $\rightarrow 10^{-3}$ m $\Rightarrow$ 1 fente $\rightarrow \frac{10^{-3}}{300}$ m $\Rightarrow a = 3,33.10^{-6}$ m

$D = 2$ m

$\lambda_1 = 589.10^{-9}$ m

$\lambda_2 = 589,6.10^{-9}$ m




$\Delta i = i_2 - i_1$

$\lambda_1 < \lambda_2 \Rightarrow i_1 < i_2$

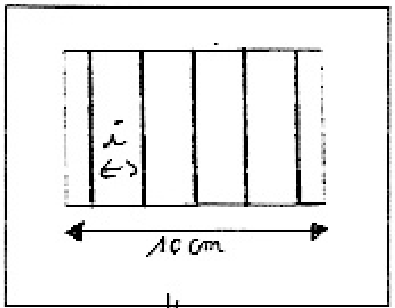
$i_1 = \frac{\lambda_1 D}{a} = \frac{589.10^{-9}.2}{3,33.10^{-6}} = 353,75.10^{-3}$ m $= 353,75$ mm

$i_2 = \frac{\lambda_2 D}{a} = \frac{589,6.10^{-9}.2}{3,33.10^{-6}} = 354,11$ mm

$\Delta i = i_2 - i_1 = 0,36$ mm

**Exercice 4**

Sur un écran situé à 46 cm d'un réseau éclairé avec de la lumière monochromatique, on observe la figure suivante : Le pas du réseau est de 10 µ m.




a) En déduire la longueur d'onde de la lumière monochromatique qui éclaire le réseau. (Rép :

b) De quelle couleur s'agit-il ? (Rép :

$\ell = 10.10^{-6}\,m = 10^{-5}\,m$

$D = 0{,}46\,m = 46.10^{-2}\,m$

$5i = 10\,cm$

$i = 2\,cm = 2.10^{-2}\,m$

a) $\lambda$ ?

$$\lambda = \frac{i\ell}{D} = \frac{2.10^{-2}.10^{-5}}{46.10^{-2}} = 0{,}0435.10^{-5}\,m = 435\,nm$$

$\lambda = 435\,nm$

b) $\lambda$ : 800 ⇒ rouge ; 400 ⇒ bleue ⇒ C'est de la lumière bleue

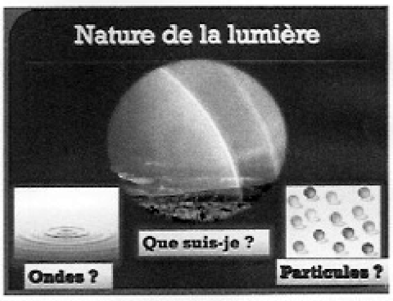


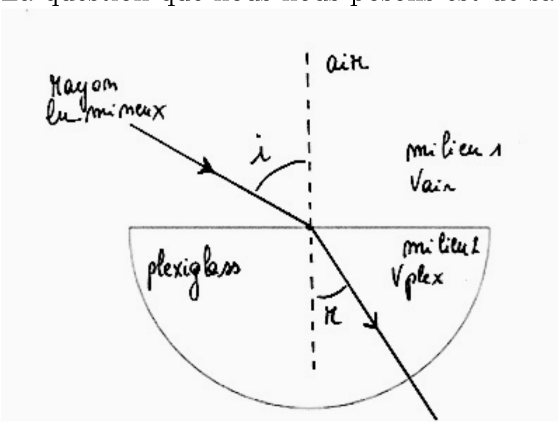

Figure 47:

***Réfraction de la lumière***

L'expérience de Young nous a permis d'affirmer que la lumière a un comportement ondulatoire.

Continuons la démarche dans le cadre de la dualité onde-particule de la lumière, et intéressons-nous à la réfraction de la lumière. Cette dernière obéit-elle à la loi de Snell élaborée avec la cuve à onde, autrement dit, la lumière a-t-elle un comportement ondulatoire si elle est soumise au phénomène de la réfraction ?

La question que nous nous posons est de savoir si la lumière obéit à la loi de Snell.




*Expérience :*

Pour ce faire, faisons réfracter la lumière monochromatique à travers un prisme semi-circulaire en plexiglas et observons la relation entre l'angle d'incidence, l'angle de réfraction, la vitesse de la lumière dans l'air ($v_1$) et la vitesse de la lumière dans le plexiglas ($v_2$).

*Observation :*

Lorsqu'un rayon lumineux passe de l'air au plexiglas, nous pouvons observer que i r (le rayon se rapproche de la normale).

Il nous reste à savoir si $v_1$ $v_2$ , autrement dit, si la vitesse de la lumière dans l'air que la vitesse de la lumière dans le plexiglas.

Comment faire ? La vitesse de la lumière est de l'ordre de 300 000 km/s !!! C'est impossible de la mesurer dans notre petit laboratoire terrestre ....

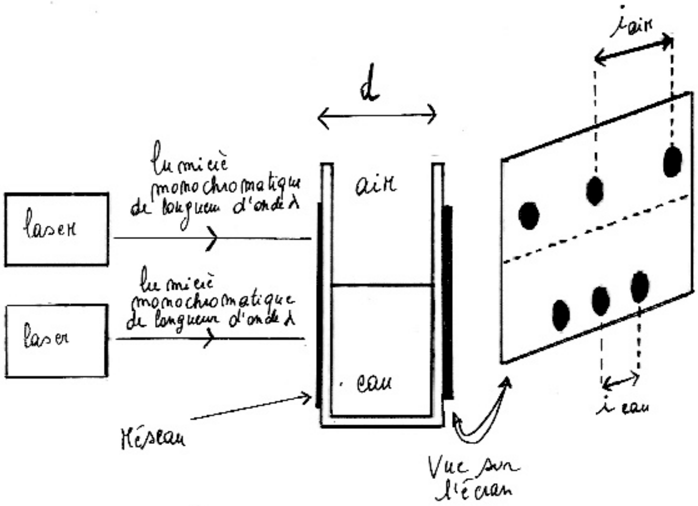
Nous pouvons calculer le rapport des vitesses car nous savons déterminer le rapport des longueurs d'onde grâce à l'expérience de diffraction de la lumière par un réseau !!!!

Ceci fera l'objet du laboratoire suivant. Nous reviendrons à nos moutons ensuite, lorsque nous aurons

Figure 48:

déterminer si la lumière e propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau ( u le plexiglas) ou inversement.

***1. LABORATOIRE - Détermination du rapport des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau .***




***Dispositif expérimental :***

On utilise de la lumière monochromatique (une seule fréquence) d'un laser.

Un réseau de 530 traits par mm est placé contre une des faces du réservoir rempli en partie d'eau.

L'écran est placé contre la face opposée à celle où est placé le réseau.

La hauteur du laser sera ajustée pour que la lumière traverse tantôt de l'air, tantôt de l'eau.

En mesurant $i_{air}$ et $i_{eau}$ , nous pouvons calculer expérimentalement le rapport des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau (vair/veau).

Mesures expérimentales :

1) Mesure de i dans l'air :

2) Mesure de i dans l'eau :

3) Calculer le rapport

$$\frac{v_{\text{air}}}{v_{\text{eau}}}$$

sachant que V= f et que

Conclusion : La lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau.

***La diffraction de la lumière par un réseau conduit à la conclusion que la lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau.***

***2 . Réfraction de la lumière allant de l'air dans le plexiglas (ou dans l'eau)***

$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{V_1}{V_2}$$

Figure 49:

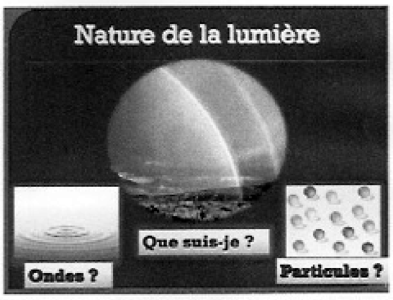
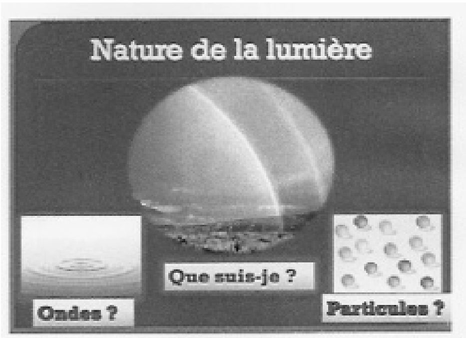



Figure 50:

# 13 Grâce au laboratoire précédent, nous avons expérimentalement déterminé que *la vitesse de la lumière dans l'air est supérieure à la vitesse de la lumière dans l'eau* (ou dans le plexiglas)

La question que nous nous posons est de savoir si la lumière obéit à la loi de Snell.

Pour ce faire, revenons à nos moutons et faisons réfracter la lumière monochromatique à travers un prisme semi-circulaire en plexiglas et observons la relation entre l'angle d'incidence, l'angle de réfraction, la vitesse de la lumière dans l'air et la vitesse de la lumière dans le plexiglas.




Grâce à l'expérience de Young, réalisée dans l'air et dans le plexiglas (comme nous l'avions réalisée dans l'air et dans l'eau), nous pouvons expérimentalement déterminer que *pour la lumière* :

$V_{air}$ $V_{pleg}$ ($V_1$ $V_2$)

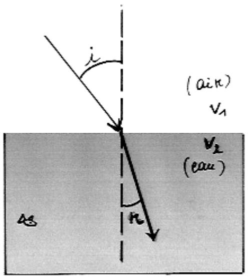
Et nous avons observé expérimentalement (voir figure ci-contre) :

i r

et donc :

***3. Conclusion quand au caractère ondulatoire ou corpusculaire de la lumière***

LUMIERE : ONDE OU PARTICULE ?




1) Si nous nous reportons à l'expérience de réfraction avec la lumière :

Lorsque la lumière passe de l'air à l'eau, nous observons de la réfraction avec :

i r

et $v_{air}$ $v_{eau}$ ($v_1$ $v_2$)

Ce qui est conforme à la loi de Snell (ondulatoire).

Cela confère à la lumière un *comportement ondulatoire.*

2) Les phénomènes de diffraction et d'interférences ne sont explicables que par un comportement ondulatoire. Or la lumière diffracte et est soumise aux interférences. Elle a donc un *comportement ondulatoire.*

3) La diffraction de la lumière par un réseau conduit à la conclusion que la lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau.

Cela lui confère un *comportement corpusculaire.*

4) La propagation de la lumière dans le vide (donc en l'absence de milieu), lui confère un *comportement corpusculaire.*

Nous ne sommes pas sortis de l'auberge ….

Cette dualité prend ses racines dans un débat remontant aussi loin que le XVII$^{e}$ siècle , quand s'affrontaient les théories concurrentes de Christiaan Huygens qui considérait que la lumière était composée d'ondes et celle de Isaac Newton qui considérait que la lumière était des particules.

En attendant de continuer cette démarche scientifique qui permettrait de trouver une réponse à cette dualité, nous allons nous attarder à exploiter les expériences et théories relatives à la réfraction de la lumière et à sa diffraction par un réseau.

Passons aux exercices et applications au chapitre suivant.

$$\frac{Sin(i)}{Sin(r)} = \frac{V_1}{V_2}$$

Figure 51:

$$V = \frac{c}{n}$$

Figure 52:

***Réfraction de la lumière et indice de réfraction***

***1. Définition - Indice de réfraction (n)***

***L'indice de réfraction d'un milieu*** est le rapport entre la vitesse de la lumière dans l'air (notée c) et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. Il sera noté n.

L'**indice de réfraction** d'un milieu est une grandeur sans dimension, caractéristique d'un milieu, et décrivant le comportement de la lumière dans celui-ci.

c étant la vitesse de la lumière dans l'air (quasi égale à la vitesse de la lumière dans le vide), l'indice de réfraction de l'air est égal à 1.

Intégrons cet indice dans la loi de Snell :

Tenant compte de la définition de l'indice de réfraction,

nous avons que la vitesse v de la lumière dans un milieu est :

On a donc :

***2. Conclusion : La réfraction de la lumière obéit à la loi suivante :***

$$n = \frac{c}{V} \quad \frac{Sin(i)}{Sin(r)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

et

**Chaque milieu transparent est caractérisé par un indice de réfraction qui lui est propre.**

c étant la vitesse de la lumière dans l'air (quasi égale à la vitesse de la lumière dans le vide), l'indice de réfraction de l'air est égal à 1.

C'est la plus petite valeur pour un indice de réfraction. (le milieu est le vide ou l'air) L'indice de réfraction du vide est quasi égal à l'indice de réfraction de l'air.

$$\frac{Sin(i)}{Sin(r)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Figure 53:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,33}{1}$$

Figure 54:

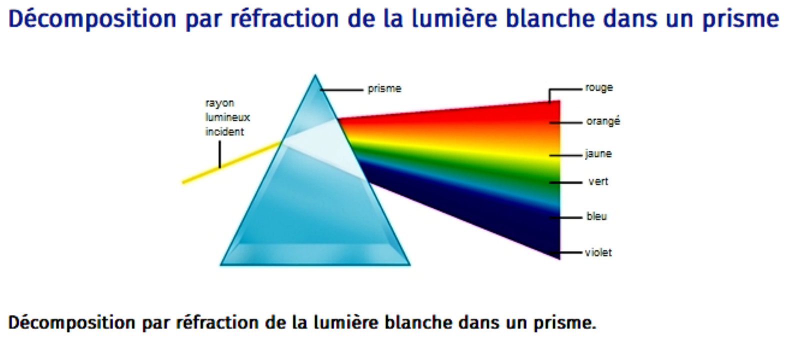
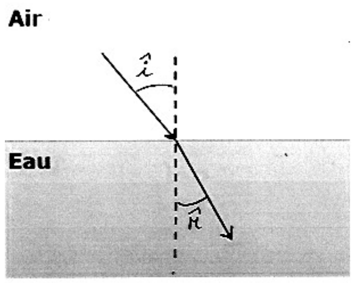



Figure 55:

Voici les indices de réfraction de quelques matériaux
(pour une onde lumineuse de longueur d'onde égale à 589 nm)

# 14

# 15 *Exemple* : Comparer quantitativement la vitesse de la lumière dans l'air et celle dans l'eau




$n_{air} = 1$

$n_{eau} = 1,33$

Donc, lorsque la lumière passe de l'air à l'eau :

Donc $V_1 = 1,33\ V_2$

La vitesse de la lumière dans l'air est égale à 1,33 fois la vitesse de la lumière dans l'eau.

***Application : Décomposition de la lumière blanche à travers un prisme***

De la lumière blanche qui passe à travers un prisme est décomposée dans toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

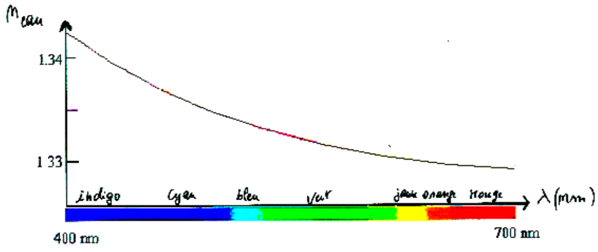



Figure 56:

$$\frac{Sin(i)}{Sin(r)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Figure 57:

Ce phénomène est dû à la réfraction de la lumière.

Comment l'expliquer ?

**L'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde de la lumière qui le traverse : l'indice est *légèrement plus faible* pour les lumières de longueur d'onde élevée.**

$n_{bleu}$ $n_{rouge}$ pour un même milieu.

Chaque couleur de la lumière blanche possède une longueur d'onde qui lui est propre.

**Pour certaines longueurs d'onde, la lumière sera (très légèrement) plus lente que pour d'autres, ce qui explique que l'indice de réfraction dépende de la longueur d'onde.**

**Comme l'angle de réfraction est relié à l'indice de réfraction qui est lui-même reliée à la vitesse de la lumière dans le milieu, il est logique qu'un rayon bleu ne soit pas dévié de la même façon qu'un rayon rouge.**

Lorsque la lumière traverse deux milieux différents, la déviation sera plus marquée si la différence entre les indices de réfraction est élevée. Donc, pour un même milieu $n_1$, au plus un indice de réfraction ($n_2$) est grand, au plus l'angle de réfraction sera petit. Et au plus l'angle de réfraction est petit, au plus la déviation est grande.

Comme $n_{bleu}$ $n_{rouge}$ (pour un même milieu), l'angle de réfraction du bleu sera plus petit que l'angle de réfraction du rouge et la déviation du bleu plus grande que celle du rouge.

***La lumière bleue subira donc une plus grande déviation que la lumière rouge lorsque de la lumière blanche traverse un prisme (réfraction).***

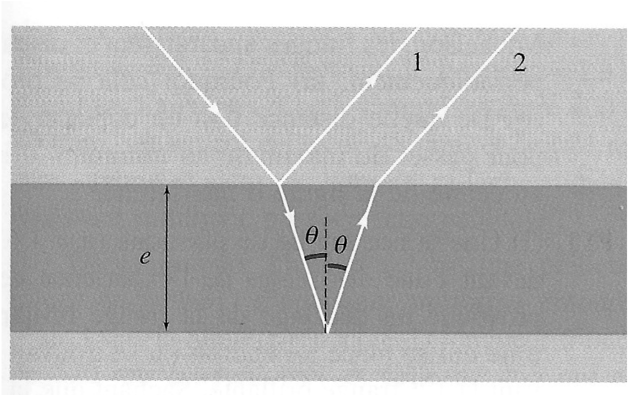
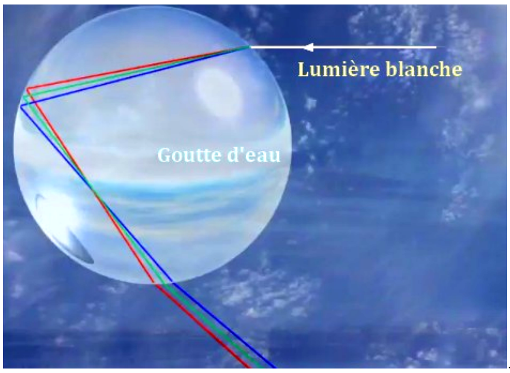



Figure 58:



***Application 1: l'arc-en-ciel***

La dispersion de la lumière du Soleil par des gouttes de pluie approximativement sphériques provoque l'arc-en-ciel. La lumière est d'abord réfractée en pénétrant la surface de la goutte, subit ensuite une réflexion partielle à l'arrière de cette goutte et, enfin est réfractée à nouveau en sortant.

L'observateur verra donc la lumière blanche décomposée en toutes ses couleurs.

***Application 2 - Interférences des couches minces (p115)***

Les couleurs que l'on peut observer sur des bulles de savon, des films d'huile ou d'essence sur le sol mouillé, l'irisation de certaines plumes de paon ou de

papillons sont dues à des phénomènes de réfraction et d'interférences.

*Explication :*

Lorsqu'une couche mince est éclairée par de la lumière blanche (une aile de papillon par exemple, ou une tache d'huile sur la route, ou la surface d'une DVD), une partie de la lumière est réfléchie par la première surface et l'autre partie par la seconde surface (après avoir subi deux réfractions). (cfr schéma)

La première onde est réfléchie par la partie supérieure de la surface. La seconde onde subit une réfraction, une réflexion et une seconde réfraction. Les deux ondes vont donc subir une interférence.

Comme vous le savez, chaque couleur de la lumière blanche possède une longueur d'onde qui lui est propre.

Si l'interférence est destructive pour une certaine longueur d'onde, la lumière aura perdu une partie de ses composantes colorées, elle n'est plus blanche et présentera une couleur.

Comme l'épaisseur d'une couche mince varie d'un point à l'autre, les conditions d'interférence destructives

Figure 59:

et construtives varient également, ce qui donne toute cette variété de couleurs.

***Application 3 -Différence entre diffraction de la lumière par un réseau et réfraction de la lumière.***

***Figure 1 : diffraction de la lumière par un réseau***

Rappel : la diffraction de la lumière par un réseau et la décomposition de la lumière blanche qui en découle est du à un phénomène d'interférence tel que l'angle de déviation est proportionnel à la longueur d'onde.

Comme $_{bleu}$ $_{rouge}$ , $_{bleu}$ $_{rouge}$

La couleur bleue subira un angle de déviation inférieur à l'angle de déviation de la couleur rouge.

*La couleur rouge subira une plus grande déviation que la couleur bleue.*

***Figure 2 : réfraction de la lumière par un prisme***

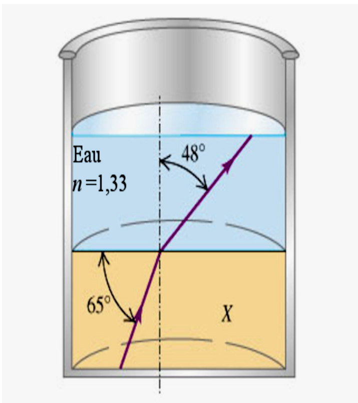
Rappel : la réfraction de la lumière est due à un changement de direction lorsqu'il y a changement de milieu. Ceci étant la conséquence d'une variation de vitesse.

Lorsque de la lumière blanche traverse un prisme, chaque couleur subira un angle de réfraction inversement proportionnel à son indice de réfraction.

$$n = \frac{c}{V} \frac{Sin(i)}{Sin(r)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Comme $n_{bleu}$ $n_{rouge}$ (pour un même milieu $n_1$ et un même angle d'incidence i), $r_{bleu}$ $r_{rouge}$.

*La couleur bleue subira une plus grande déviation que la couleur rouge.*




***EXERCICE 1***

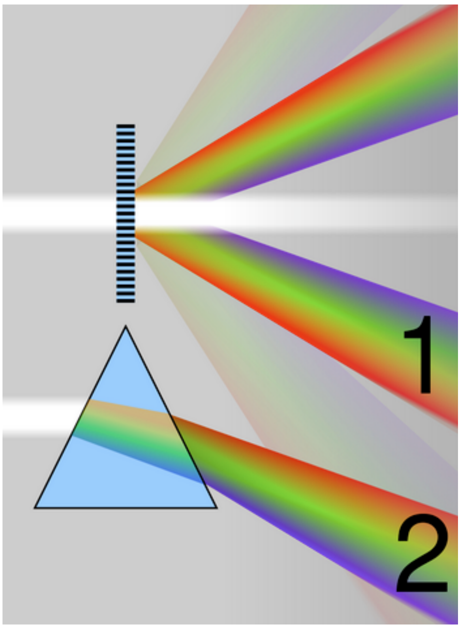



Figure 60:

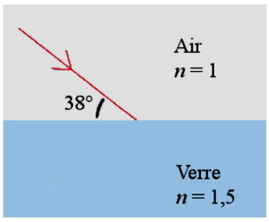


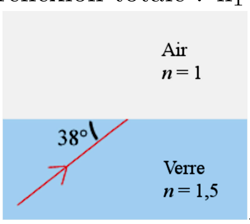

Figure 61:

Un rayon lumineux passe d'une substance transparente X à l'eau telle qu'illustrée sur la figure.
a) Quel est l'indice de réfraction de la substance X? (Rép : 2,34)
b) Quelle est la vitesse de la lumière dans la substance X ? (Rép :1,28.$10^8$ m/s)
c) Quel sera l'angle limite de réflexion totale ? (Rép : 34,5°)

***EXERCICE 2***

De la lumière arrive à une interface entre le verre et l'air tel qu'illustré sur la figure.

La lumière fera-t-elle une réflexion totale ou non ? (Rép : non, dans notre situation, il n'y aura jamais de réflexion totale : $n_1$ $n_2$ et donc $v_1$ $v_2$)




***EXERCICE 3***

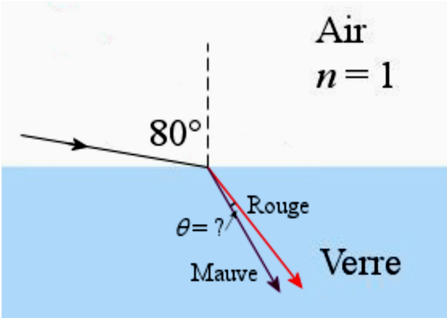



Figure 62:

De la lumière arrive à une interface entre le verre et l'air tel qu'illustré sur la figure.

La lumière fera-t-elle une réflexion totale ou non ? (Rép : oui, i $i_{lim}$)

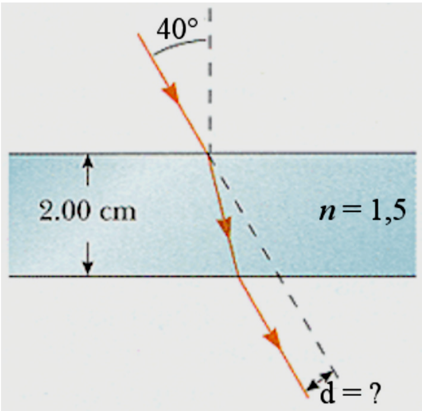
***EXERCICE 4***

De la lumière blanche se propageant dans l'air arrive avec un angle d'incidence de 80° sur la surface d'un morceau de verre.

En se réfractant dans le verre, les couleurs se séparent puisque l'indice de réfraction n'est pas le même selon les couleurs.

L'indice passe de 1,66 pour le mauve à 1,62 pour le rouge.

Quel est l'angle entre le rayon mauve et le rayon rouge dans le verre ? (Rép : 1 ,04°)




***EXERCICE 5***

Un rayon lumineux traverse une plaque de verre telle qu'illustrée sur la figure.

Après avoir traversé le verre, le faisceau est décalé d'une distance d par rapport à sa trajectoire initiale.

Quelle est la valeur de d? (Rép : 5,6 mm)

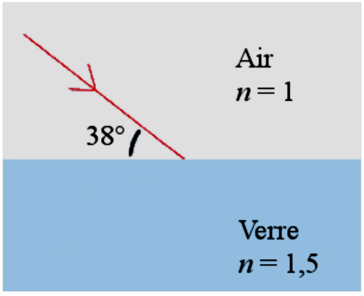
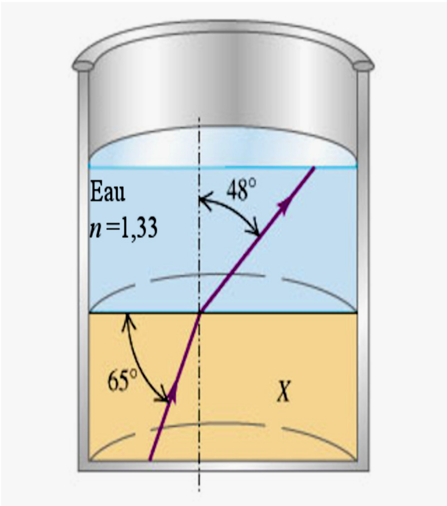



Figure 63:




***EXERCICE 1***

Un rayon lumineux passe d'une substance transparente X à l'eau telle qu'illustrée sur la figure.
a) Quel est l'indice de réfraction de la substance X?
b) Quelle est la vitesse de la lumière dans la substance X ?
c) Quel sera l'angle limite de réflexion totale ?

***EXERCICE 2***

De la lumière arrive à une interface entre le verre et l'air tel qu'illustré sur la figure.
La lumière fera-t-elle une réflexion totale ou non ?

***EXERCICE 3***

De la lumière arrive à une interface entre le verre et l'air tel qu'illustré sur la figure.
La lumière fera-t-elle une réflexion totale ou non ?

***EXERCICE 4***

De la lumière blanche se propageant dans l'air arrive avec un angle d'incidence de 80° sur la surface d'un morceau de verre.

En se réfractant dans le verre, les couleurs se séparent puisque l'indice de réfraction n'est pas le même selon les couleurs.

L'indice passe de 1,66 pour le mauve à 1,62 pour le rouge.

Quel est l'angle entre le rayon mauve et le rayon rouge dans le verre ?

***EXERCICE 5***

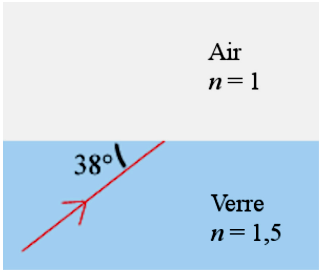



Figure 64:

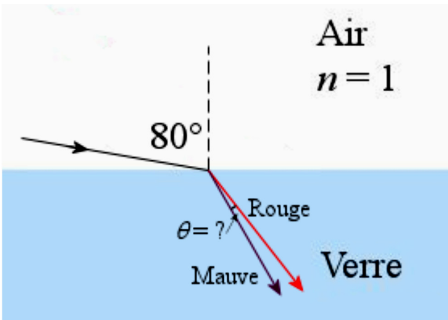



Figure 65:

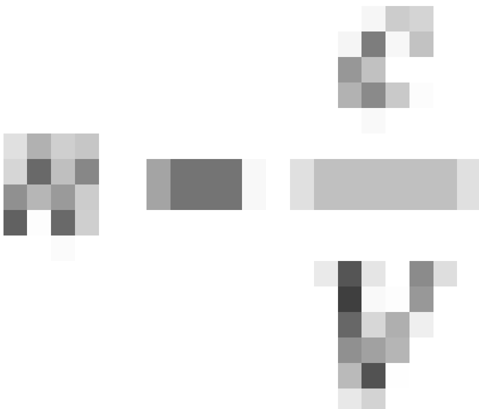
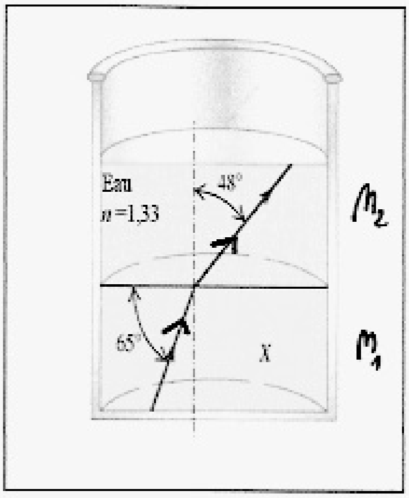


Figure 66:

Un rayon lumineux traverse une plaque de verre telle qu'illustrée sur la figure.
Après avoir traversé le verre, le faisceau est décalé d'une distance d par rapport à sa trajectoire initiale.
Quelle est la valeur de d?

**EXERCICE 1**

Un rayon lumineux passe d'une substance transparente X à l'eau telle qu'illustrée sur la figure.




a) Quel est l'indice de réfraction de la substance X?

$i = 90° - 65° = 25°$
$r = 48°$
$n_2 = 1{,}33$
$n_1$ ?

$$\begin{array}{|l} i = 25° \\ r = 48° \\ n_2 = 1{,}33 \end{array}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 = n_2 \frac{\sin r}{\sin i}$$

$$\Rightarrow n_1 = 1{,}33 \cdot \frac{\sin 48°}{\sin 25°} = \boxed{2{,}34 = n_1}$$

b) Quelle est la vitesse de la lumière dans la substance X ?

La vitesse dans la substance X $\Rightarrow V_1$ ?

$$n_1 = \frac{c}{V_1} \Rightarrow V_1 = \frac{c}{n_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{2{,}34} = \boxed{1{,}28 \cdot 10^8 \, m/s = V_1}$$

Et si on voulait calculer $V_2$ ?

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow V_2 = \frac{n_1 V_1}{n_2} = \frac{2{,}34 \cdot 1{,}28 \cdot 10^8}{1{,}33}$$

$$\Rightarrow V_2 = 2{,}25 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

c) Quel sera l'angle limite de réflexion totale ?

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow \text{si } r = 90° \Rightarrow \sin i_{lim} = \frac{V_1}{V_2}$$

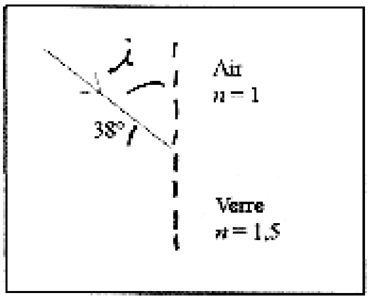
$$\Rightarrow i_{limite} = \text{Arcsin}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \text{Arcsin}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \text{Arcsin}\left(\frac{1{,}33}{2{,}34}\right)$$

$$\Rightarrow i_{limite} = 34{,}6°$$

5

**EXERCICE** 2

De la lumière arrive à une interface entre le verre et l'air tel qu'illustré sur la figure.
La lumière fera-t-elle une réflexion totale ou non ?




Réflexion totale

$\Rightarrow i_{limite} = \text{Arcsin}\left(\frac{n_{verre}}{n_{air}}\right)$

$\left( \text{car } \frac{\sin i}{\sin 90°} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow i = \text{Arcsin } \frac{n_2}{n_1} \right)$

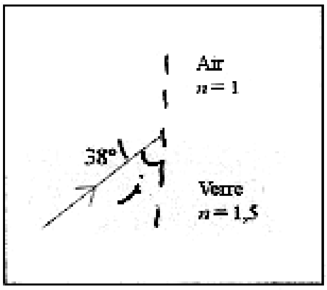
$i_{limite} = \text{Arcsin}\left(\frac{1,5}{1}\right) \Rightarrow n'\nexists$

Dans ce cas, il n'y aura jamais de réflexion totale car $n_1 < n_2 \Rightarrow V_1 > V_2 \Rightarrow i > r$

$\Rightarrow$ l'onde se rapprochera de la normale.

**EXERCICE** 3

De la lumière arrive à une interface entre le verre et l'air tel qu'illustré sur la figure.
La lumière fera-t-elle une réflexion totale ou non ?




$i = 90 - 38 = 52°$

réflexion totale !

$i$ limite $= \text{Arcsin} \frac{n_2}{n} = \text{Arcsin} \frac{n_{air}}{n_{verre}}$

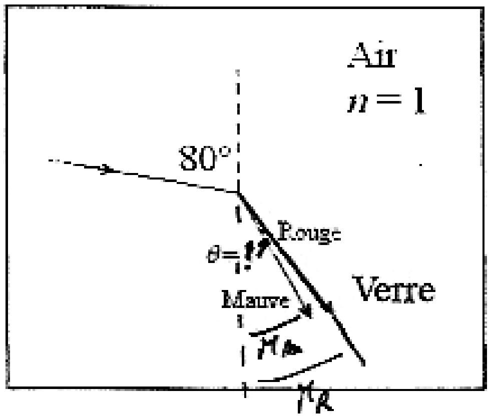
$i$ limite $= \text{Arcsin} \frac{1}{1,5} = 41,81°$

(car $\frac{\sin i}{\sin 90°} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow i$ limite $= \text{Arcsin} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$)

or $i = 52°$ $\Rightarrow$ cô $52° > i$ limite $\Rightarrow$ il y aura réflexion totale.

**EXERCICE 4**

De la lumière blanche se propageant dans l'air arrive avec un angle d'incidence de 80° sur la surface d'un morceau de verre. En se réfractant dans le verre, les couleurs se séparent puisque l'indice de réfraction n'est pas le même selon les couleurs.
L'indice passe de 1,66 pour le mauve à 1,62 pour le rouge.
Quel est l'angle entre le rayon mauve et le rayon rouge dans le verre?




$n_R = 1{,}62$

$n_m = 1{,}66$

$\theta$ ?

$\theta = r_R - r_m$

1) $r_R$ ? $\quad \dfrac{\sin i}{\sin r_R} = \dfrac{n_R}{n_{air}} \Rightarrow \sin r_R = \dfrac{n_{air}}{n_R} \cdot \sin i$

$\Rightarrow r_R = \text{Arcsin}\left(\dfrac{n_{air}}{n_R} \cdot \sin i\right) = \text{Arcsin}\left(\dfrac{1}{1{,}62} \cdot \sin 80°\right) = 37{,}43°$

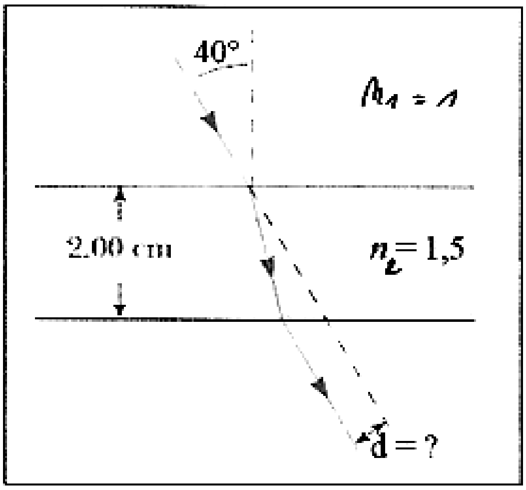
$r_m = \text{Arcsin}\left(\dfrac{n_{air}}{n_m} \cdot \sin i\right) = \text{Arcsin}\left(\dfrac{1}{1{,}66} \cdot \sin 80°\right) = 36{,}39°$

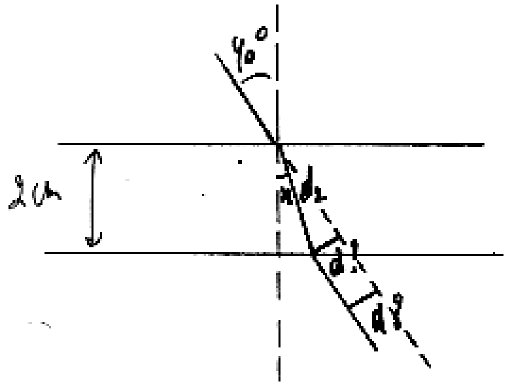
$\theta = r_R - r_m = 37{,}43° - 36{,}39° = \boxed{1{,}04° = \theta}$

EXERCICE 5

Un rayon lumineux traverse une plaque de verre telle qu'illustrée sur la figure.
Après avoir traversé le verre, le faisceau est décalé d'une distance d par rapport à sa trajectoire initiale.
Quelle est la valeur de d?



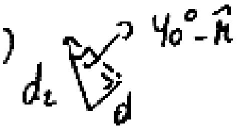

1) $\hat{r}$ ?

$n_1 = 1$

$n_2 = 1,5$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin r = \frac{n_1}{n_2}\sin i \Rightarrow r = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\sin i\right)$$

$$\Rightarrow r = \arcsin\left(\frac{1}{1,5}\sin 40°\right) \Rightarrow \boxed{r = 25,4°}$$

2) 


$$\Rightarrow \sin(40° - r) = \frac{d}{d_2} \Rightarrow d_2 \text{ ?}$$


$$\cos r = \frac{2}{d_2} \Rightarrow d_2 = \frac{2}{\cos r}$$

$$\Rightarrow \sin(40° - r) = \frac{d}{d_2} \Rightarrow d = d_2 \sin(40° - r)$$

$$\Rightarrow d = \frac{2}{\cos r}\sin(40° - r)$$

$$\Rightarrow d = \frac{2}{\cos 25,4} \cdot \sin(40° - 25,4°) = 0,56 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \boxed{d = 5,6 \text{ mm}}$$

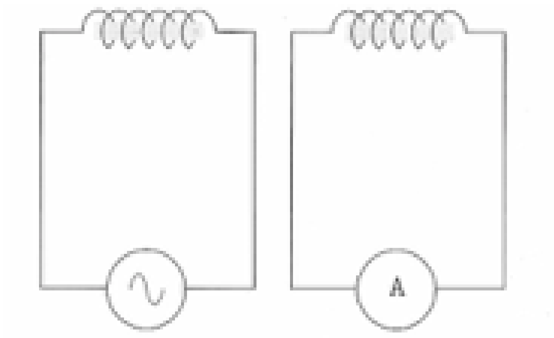



Figure 67:

***LES ONDES ELECTROMAGNETIQUES***
***REFERENCE : LIVRE PAGES 141 à 156***
***1 - MISE EN SITUATION***

Soit un premier circuit constitué d'une bobine soumise à une différence de potentiel variable (courant alternatif).

Une seconde bobine, placée à quelques centimètres de la première n'est pas raccordée à une source de courant mais est raccordée à un ampèremètre (appareil qui mesure l'intensité du courant qui traverse le circuit).

Nous observons que l'ampèremètre mesure un courant alternatif de même fréquence que la fréquence du courant alternatif du premier circuit.

*INTERPRETATION*

***Une énergie s'est donc propagée, à travers l'air, du premier circuit vers le deuxième.*** Cette énergie a permis aux électrons libres du second circuit de se déplacer et donc de créer un courant, alternatif lui aussi.

(Soit dit en passant, c'est ainsi que fonctionnent les ondes radio, Gsm, .... Nous les appellerons les ondes électromagnétiques).

*MAIS QUELLE EST DONC CETTE FORME D'ENERGIE ?*

*Rappel :*

*Une charge électrique produit dans son environnement un champ électrique.*

*Un champ électrique est une région de l'espace au sein de laquelle une charge témoin subit une force.*

Les électrons libres du premier circuit oscillent (il s'agit d'un courant alternatif) et donc ils produisent un champ électrique variable dans l'espace. Les électrons libres du second circuit sont donc soumis à cette variation de champ électrique, ils subissent la force électrique variable et entrent en oscillation.

*Rappel :*

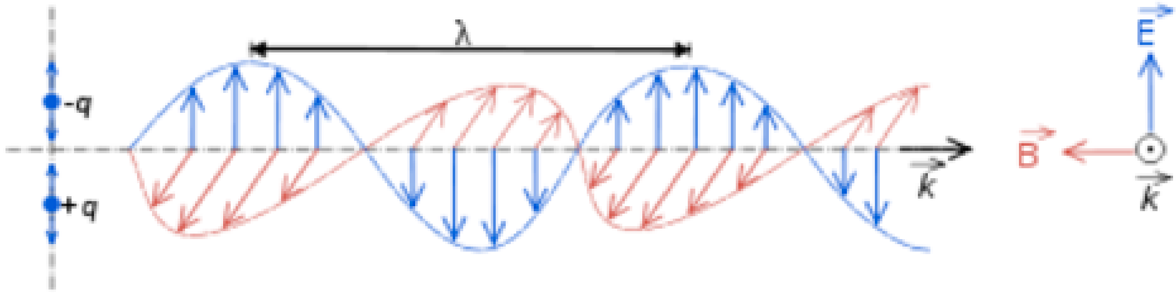
*Un courant électrique produit dans son environnement un champ magnétique.*

*Une variation de champ magnétique à l'intérieur d'une bobine induit un courant électrique variable.*

Les électrons libres du premier circuit oscillent (il s'agit d'un courant alternatif) et donc ils produisent un champ magnétique variable dans l'espace. La seconde bobine est donc le siège d'un courant induit variable.

***2- SPECULATIONS DE MAXWELL***

Lorsque des charges en mouvement oscillent, elles produisent donc à la fois un champ électrique et un champ magnétique variables dans le temps. Maxwell a appelé *ONDE ELECTROMAGNETIQUE cette* *propagation d'une énergie stockée sous forme électrique et magnétique et produite par des charges électriques oscillantes.*




Les équations écrites par Maxwell (1865) montrent que le champ électrique

$$\overrightarrow{E}$$

et le champ magnétique

$$\overrightarrow{B}$$

, engendrés par des charges oscillantes (ici, un courant alternatif) ont les propriétés suivantes :

- Ils oscillent sinusoïdalement à la fréquence du courant.
- Ils transportent de l'énergie sous forme électrique et magnétique (électromagnétique donc).
- Ils sont perpendiculaires entre eux.

***Une onde électromagnétique est donc une forme d'énergie qui se propage sous forme de « paquet d'énergie électromagnétique», produite par des charges oscillant à une certaine fréquence. Ce « paquet d'énergie » est appelé un photon.***

### *3. CONFIRMATION EXPERIMENTALE*

En 1887, Hertz confirme expérimentalement les spéculations de Maxwell. Utilisant des courants alternatifs de haute fréquence, il crée des ondes électromagnétiques de longueur d'onde de l'ordre du mètre : ce sont les premières ondes hertziennes.

Poursuivant l'œuvre de Hertz, des physiciens (Marconi, Popov, Branly, ...) contribuèrent à la mise au point d'un télégraphe sans fil. Cette technique deviendra la base de la radiodiffusion et de ses prolongements célèbres que sont la télévision et la mobilophonie.

Par la suite, on a montré que ces ondes peuvent être réfléchies, réfractées, diffractées et qu'elles donnent lieu à des phénomènes d'interférences. Elles ont un comportement ondulatoire, d'où leur nom d'ondes électromagnétiques.

De plus, elles se déplacent toutes à la vitesse de la lumière.

### *4. GAMME DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES*

La famille des ondes électromagnétiques peut être divisée en différentes catégories : chaque catégorie ayant son mode de production, de détection et son domaine d'applications.

Chacune de ces catégories est caractérisée par une gamme de fréquence f (et donc de longueur d'onde). Au plus la fréquence est grande, au plus l'énergie de l'onde électromagnétique est grande.

Toutes les ondes électromagnétiques se déplacent à la vitesse de la lumière au sein d'un milieu ou dans le vide.

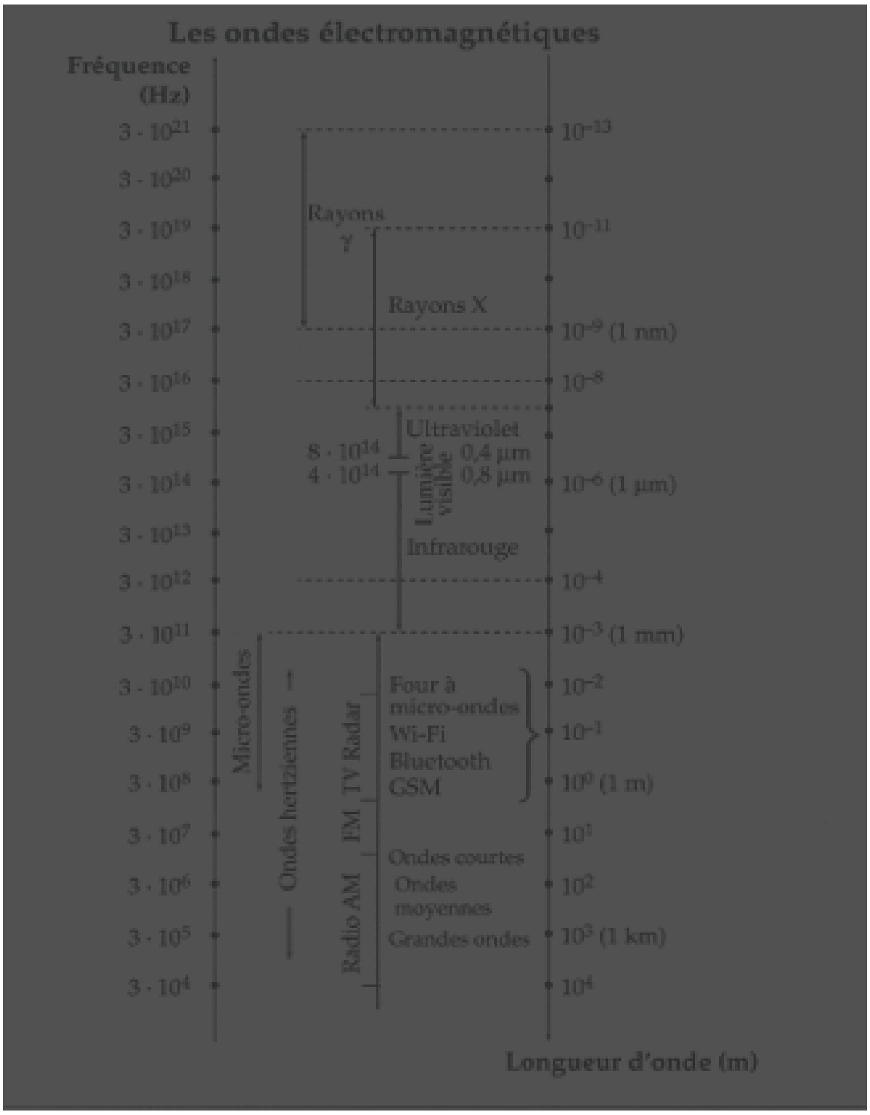

Les ondes électromagnétiques
Fréquence (Hz)
3 · 10^21
3 · 10^20
3 · 10^19
3 · 10^18
3 · 10^17
3 · 10^16
3 · 10^15
3 · 10^14
3 · 10^13
3 · 10^12
3 · 10^11
3 · 10^10
3 · 10^9
3 · 10^8
3 · 10^7
3 · 10^6
3 · 10^5
3 · 10^4
Rayons γ
Rayons X
Ultraviolet
8 · 10^14
4 · 10^14
Lumière visible
0,4 µm
0,8 µm
Infrarouge
Micro-ondes
Ondes hertziennes
Radio AM
FM
TV Radar
Four à micro-ondes
Wi-Fi
Bluetooth
GSM
Ondes courtes
Ondes moyennes
Grandes ondes
10^-13
10^-11
10^-9 (1 nm)
10^-8
10^-6 (1 µm)
10^-4
10^-3 (1 mm)
10^-2
10^-1
10^0 (1 m)
10^1
10^2
10^3 (1 km)
10^4
Longueur d'onde (m)

Figure 68:

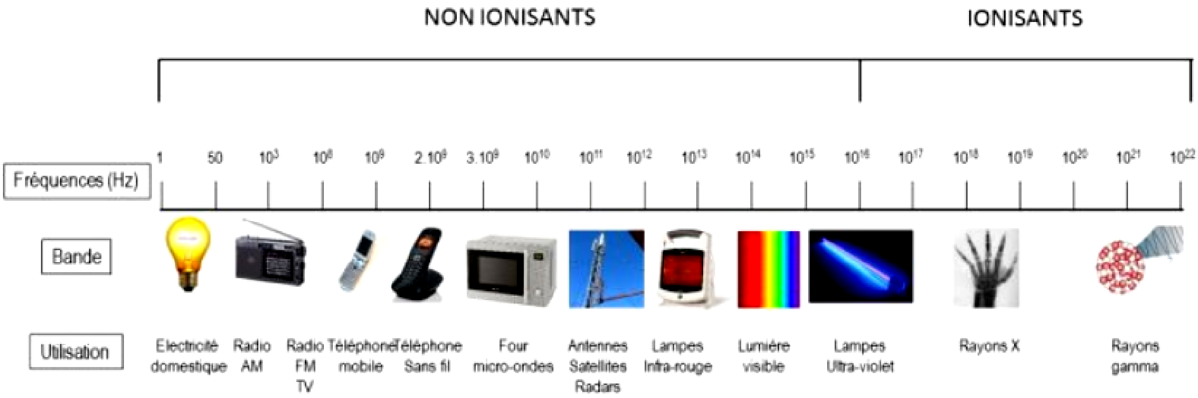



Figure 69:

**En partant des ondes les plus énergétiques (de plus grande fréquence), on distingue successivement :**

- ***Les rayons gamma* ( ) :** ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes en cas d'excès.

- ***Les rayons X* :** rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma. Ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien) et dans la recherche pour l'étude de la matière (rayonnement synchrotron).

- ***Les ultraviolets* :** rayonnements qui restent assez énergétiques. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets émis par le soleil est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur.

- ***Le domaine visible* :** correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. Il s'agit de la lumière visible.
  *Il s'étend de 400 nm (lumière bleue) à 800 nm (lumière rouge).*

- ***L'infrarouge* :** rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C).
  En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des surfaces terrestres et océaniques, ainsi que celle des nuages.

- ***Les micro-ondes* :**

  - **La télécommunication par satellite.**
  - **Les ondes radar** : notamment utilisées en navigation maritime et aérienne. Dans la même gamme de fréquence, on trouve les ondes émises par les clés de verrouillage/déverrouillage automatique des portes de voiture.
  - **Dans les fours à micro-ondes** de cuisine, les molécules d'eau entrent en résonance et oscillent avec une grande amplitude. Cette énergie d'oscillation est rapidement transformée en énergie thermique par collisions avec les autres molécules.
  - **Wi-Fi** (Wireless Fidelity).
  - **Bluetooth**.
  - La téléphonie mobile : ondes **GSM** (Global System Mobile).

- ***Les ondes hertziennes*** **:** Ce domaine de longueurs d'onde concerne les ondes qui ont les plus basses fréquences. Il s'étend des longueurs d'onde de quelques cm à plusieurs km.

  - **Les ondes en télévision** : transmission des images en télévision.
  - **Les ondes radio** : relativement faciles à émettre et à recevoir, les ondes radio sont utilisées pour la transmission de l'information (radio).

Nous sommes entourés d'ondes électromagnétiques au niveau domestique : une petite illustration.

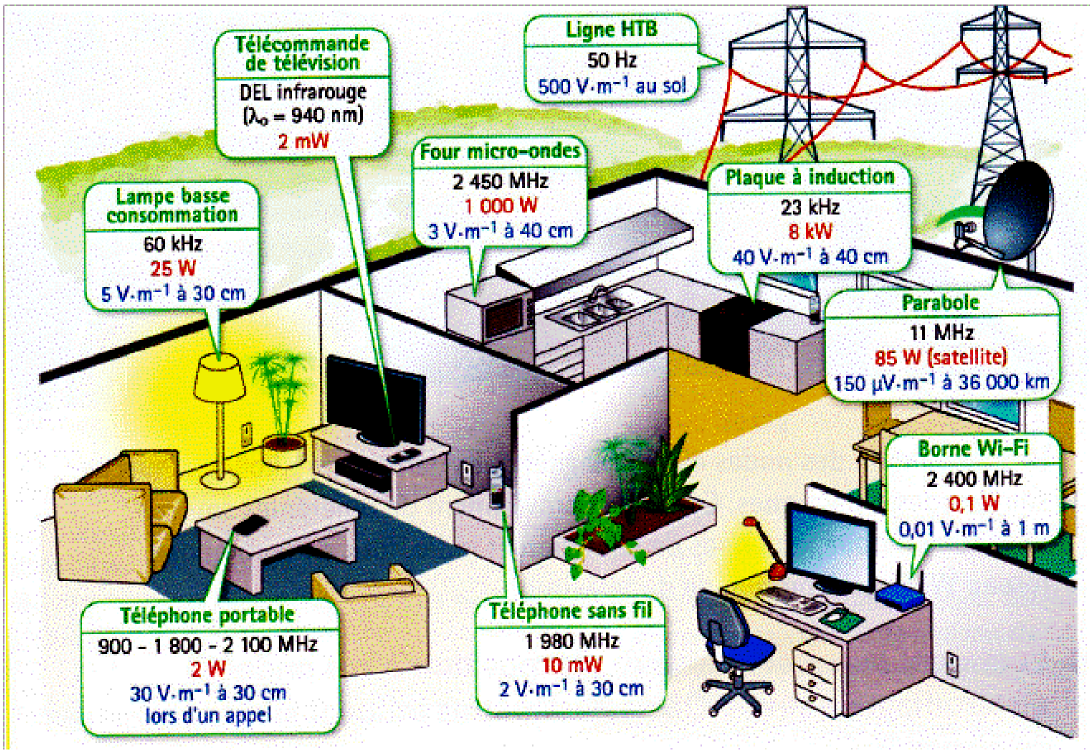

Télécommande de télévision
DEL infrarouge
($\lambda_0$ = 940 nm)
2 mW
Ligne HTB
50 Hz
500 V·m$^{-1}$ au sol
Four micro-ondes
2 450 MHz
1 000 W
3 V·m$^{-1}$ à 40 cm
Plaque à induction
23 kHz
8 kW
40 V·m$^{-1}$ à 40 cm
Lampe basse consommation
60 kHz
25 W
5 V·m$^{-1}$ à 30 cm
Parabole
11 MHz
85 W (satellite)
150 µV·m$^{-1}$ à 36 000 km
Borne Wi-Fi
2 400 MHz
0,1 W
0,01 V·m$^{-1}$ à 1 m
Téléphone portable
900 – 1 800 – 2 100 MHz
2 W
30 V·m$^{-1}$ à 30 cm
lors d'un appel
Téléphone sans fil
1 980 MHz
10 mW
2 V·m$^{-1}$ à 30 cm

Figure 70: