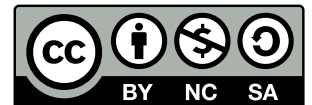


Cours de physique de 6<sup>e</sup> secondaire - 2021-2022  
En cours de rédaction et correction - ne pas distribuer  
tout commentaire bienvenu par email à  
manueldephysique@educode.be

Alexandra David - Corinne Leyssen - Nicolas Pettiaux - Matteo Poncé

3 juin 2022

This work is licensed under a [Creative Commons “Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported”](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/) license.



## Table des matières

---

# 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](#).

TODO insérer un schéma de produit scalaire  
Quelques exemples 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  $\alpha < 90^\circ$  et donc  $\cos(\alpha) > 0$ . Le travail d'une force motrice est donc généralement positif.
- On parle de **travail résistant** lorsque  $\alpha > 90^\circ$  et donc  $\cos(\alpha) < 0$ . Le travail d'une force de frottement est donc généralement négatif.
- **Une force perpendiculaire au déplacement** ( $\alpha = 90^\circ$ ) **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.
- 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  $\int_a^b \vec{F} \cdot \dots \vec{dx}$  et des explications

(Sur le schéma :  $(x^2-x) = d$ )

## 2 Énergie

### 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

### 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 :  $E_{cinétique} + E_{potentielle}$
- 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.

## 3 Puissance

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

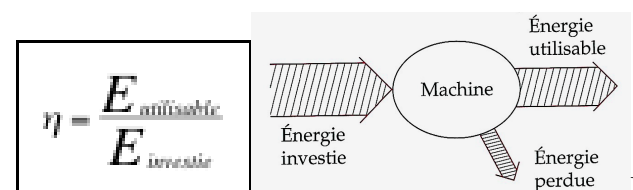
*Définition* : C'est la quantité d'énergie fournie par unité de temps.

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.

## 4 Rendement



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



Ce rapport est toujours inférieur à 1 (100 %).  
Un rendement de 100% signifie qu'il n'y a aucune perte d'énergie.

## 5 Des ordres de grandeur

La liste ci-dessous reprend des ordres de grandeur d'énergie à connaître. ' 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 cm<sup>3</sup> 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  $5 \cdot 10^3$  w à  $8 \cdot 10^3$  w

- consommée par une voiture de tourisme (1400 cm<sup>3</sup>) 40 kw
- consommée par une locomotive électrique 5 Mw
- dégagée par une centrale nucléaire (Doel) 3000 Mw

## 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 plongeur 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 plongeur 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**

de 5minutes ?

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

2. Quel sera le déplacement correspondant ?

3. Quelle est la puissance du moteur ?

## 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 ?

$$\begin{array}{l}
 m = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg} \\
 P = 3 \cdot 10^3 \text{ W} \\
 v_0 = 0 \\
 v = 21,6 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\
 t = 10 \text{ s}
 \end{array}
 \quad \left| \begin{array}{l}
 W ? \\
 W = P \cdot t = 3 \cdot 10^3 \cdot 10 = 30 \cdot 10^3 \text{ J} = 30 \text{ kJ} \\
 \boxed{W = 30 \text{ kJ}}
 \end{array} \right.$$

b) Quel sera le rendement ?

$$\eta = \frac{E_{\text{énergie utile}}}{E_{\text{énergie consommée}}}$$

OK l'énergie consommée = 30 000 J  
Énergie utile ?

$$E_{\text{énergie utile}} (W_{\text{utile}}) = \Delta E_c = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{1,2 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{2} = 21600 \text{ J}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{21600}{30000} = 0,72 = \boxed{72\% = \eta}$$

**Exercice 2**

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

$$E_c = \frac{mv^2}{2} = \frac{10^3 \cdot 20^2}{2} = 200000 \text{ J} = \boxed{200 \text{ kJ} = E_c}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 m = 10^3 \text{ kg} \\
 v = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{array} \right|$$

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

$$\begin{array}{c}
 \text{voiture} \\
 \hline
 v = 20 \text{ m/s} \\
 E_c = 200 \text{ kJ}
 \end{array}
 \quad \left| \begin{array}{l}
 \text{voiture} \\
 \hline
 v = 0 \\
 \Rightarrow \text{l'énergie mécanique pour arrêter la voiture sera de } 200 \text{ kJ} \\
 \boxed{E = 200 \text{ kJ}}
 \end{array} \right.$$

**Exercice 3**

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

$$\begin{array}{l}
 P = 2 \cdot 10^3 \text{ W} \\
 t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s} \\
 W ?
 \end{array}
 \quad \left| \begin{array}{l}
 W = P \cdot t = 2 \cdot 10^3 \cdot 60 = 120000 \text{ J} \\
 \boxed{W = 120 \text{ kJ}}
 \end{array} \right.$$

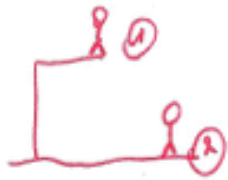
**Exercice 4**

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

$$m = 75 \text{ kg} \quad | \quad h = 10 \text{ m} \quad \left| \quad E_p = mgh = 75 \cdot 9,81 \cdot 10 = \underline{7357,5 \text{ J}} = E_p \right.$$

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

Principe de conservation d'énergie.



$$E_{(1)} = E_{(2)}$$

$$\Rightarrow E_{(2)} = E_c = \underline{7357,5 \text{ J}} = E_c$$

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

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

$$v = 14 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

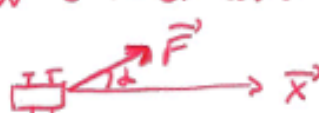
- d) En négligeant le frottement, quelle est son énergie mécanique sur le plongoir et à l'arrivée dans l'eau ?

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  $30^\circ$ . Quel est le travail accompli si le chariot se déplace de 14 m ?

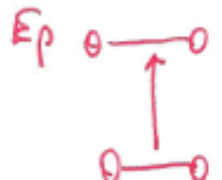
$$F = 12 \text{ N} \quad | \quad \alpha = 30^\circ \quad | \quad d = 14 \text{ m} \quad | \quad W ?$$

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


$$\underline{W = 145,5 \text{ J}}$$

**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 ?



$E_p$

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

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

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

$$P = \frac{W}{t} = \frac{3770}{2} = \underline{1885 \text{ W}} = P$$

**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 5 minutes ?

$$\begin{array}{l}
 v_0 = 0 \\
 v = 54 \text{ km/h} = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\
 t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 \text{On néglige les frottements} \\
 \sum \vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow F = ma \quad (a?) \\
 a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{15 - 0}{300} = 0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\
 F = ma = 20 \cdot 10^3 \cdot 0,05 = \boxed{10^3 \text{ N} = F}
 \end{array} \right.$$

- b) Quel sera le déplacement correspondant ?

$$d = v_0 t + \frac{at^2}{2} = \frac{0,05 \cdot 300^2}{2} = \boxed{2250 \text{ m} = d.}$$

- c) Quelle est la puissance du moteur ?

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

## 8 Énergie de l'oscillateur harmonique

### 8.1 Vidéos à regarder

1. [Bilan énergétique de l'oscillateur horizontal](#)
2. [Énergie d'un oscillateur masse-ressort horizontal](#)

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

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

### 8.3 Énergie 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  $E = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$

Or nous savons que :  $E_T = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$  avec  $v_{\max} = A\omega$ . Donc  $E_T = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = \frac{1}{2}mA^2\omega^2$

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.

### 8.4 Que représente $k$ ?

L'énergie totale d'un oscillateur harmonique est  $E_T = \frac{1}{2}kA^2$  :

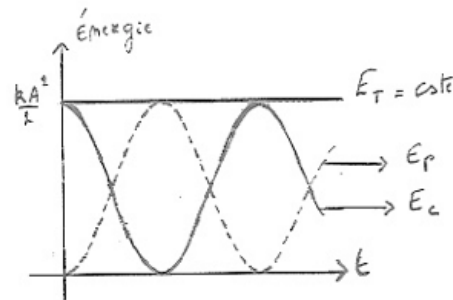
Que représente physiquement cette constante  $k = m\omega^2$  ?

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  $k = m\omega^2$   $\omega = \frac{2\pi}{T}$  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.

### 8.5 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.

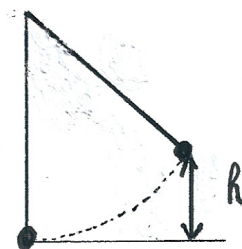
Variation de l'énergie cinétique  $E_c(t) = \frac{1}{2}mv(t) = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \phi)$

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.

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

### 8.6 Énergie d'un oscillateur harmonique - exercices





**8.6.1 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  $10^\circ$  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 ?

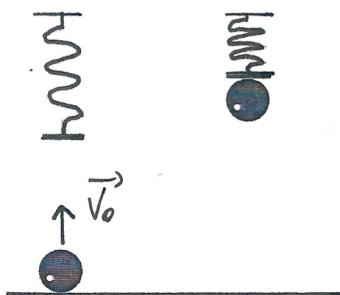
**8.6.2 Exercice 2**



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  $5^\circ$  avec l'horizontale ?

**8.6.3 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.

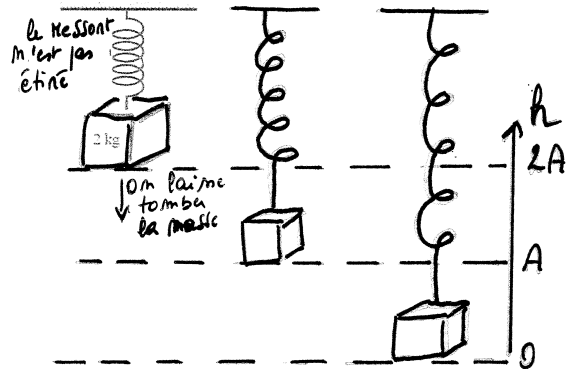
Le ressort se comprime de 12 cm lorsque la bille atteint sa hauteur maximale.  
Quelle est la hauteur atteinte par la bille ?

**8.6.4 Exercice 4**

Un fusil de fléchettes comprend un ressort de raideur  $k = 250 \text{ N/m}$ , de longueur à vide  $l_0 = 12 \text{ cm}$  et qui, comprimé par la fléchette de masse 25 g, ne mesure plus que  $l = 4,0 \text{ cm}$ .

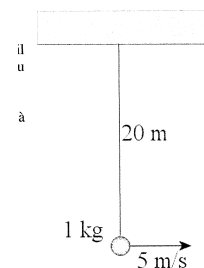
1. Avec quelle vitesse la fléchette sort-elle du fusil dans le cas d'un tir horizontal. Faire le calcul sans tenir compte du frottement entre fléchette et fusil.
2. Quelle altitude maximale peut-elle atteindre dans le cas d'un tir vertical ? Faire le calcul sans tenir compte du frottement entre fléchette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

**8.6.5 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 ?



**8.6.6 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  $10^\circ$  par rapport à la verticale ?

## 9 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  $10^\circ$  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.)

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

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

1) Calculons  $E_{g(2)} = mgh$

$$E_{g(2)} = mgh = mg(L - L \cos d) = 0,050 \cdot 9,81 (0,4 - 0,4 \cos 10^\circ)$$

$$\Rightarrow E_{g(2)} = 0,003 \text{ J}$$

2) Autre façon de procéder : calculons  $E_{g(2)} = E_T$  (Énergie totale du pendule)  
 $E_T = E_c + E_g + E_{el} (=0 \text{ car il n'y a pas de ressort})$   
 $0$  (car en ②,  $v=0$ )

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

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

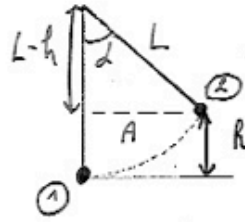
$$\Rightarrow E_T = \frac{m \cdot 4\pi^2 A^2}{2} \cdot \frac{g}{4\pi^2 L} = \frac{mA^2 g}{2L} \quad \text{avec } A = L \sin d$$

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

$$\Rightarrow E_T = 0,003 \text{ J}$$

😊 On obtient bien la même valeur qu'en 1) (mais le chemin était moins rapide...)

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



Je vais avoir besoin de h et de A

1) h ?

$$\cos d = \frac{L-h}{L} \Rightarrow h = L - L \cos d$$

2) A ?

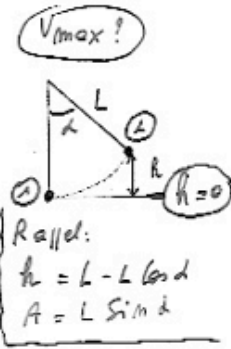
$$\sin d = \frac{A}{L} \Rightarrow A = L \sin d$$



**Exercice 1 (suite)**

b) Calculez sa vitesse maximale.

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



[1] Principe de conservation d'énergie

$$E_{T(A)} = E_c + E_g + E_{el} = \frac{m V_{max}^2}{2} + 0 + 0$$

$\Rightarrow E_{T(A)} = \frac{m V_{max}^2}{2}$ 
(car il n'y a pas de ressort)  
(car  $h=0$ )  
(car il n'y a pas de ressort)

$$E_{T(B)} = E_c + E_g + E_{el} = 0 + mgh + 0$$

$\Rightarrow E_{T(B)} = mgh$ 
(car  $v=0$ )  
(car il n'y a pas de ressort)

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

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

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

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

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

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

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

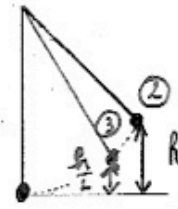


**Exercice 1 (suite)**

c) Calculez sa vitesse à mi-hauteur.

Principe de conservation d'énergie

$$E_{T(2)} = E_{T(3)} \quad (V_3 \text{ ?})$$



$$a) E_{T(2)} = E_c + E_g + E_{EP} = 0 + mgh + 0$$

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

$$b) E_{T(3)} = E_c + E_g + E_{EP} = \frac{mv_3^2}{2} + mgh \frac{1}{2} + 0$$

à mi-hauteur

$$E_{T(2)} = E_{T(3)} \Rightarrow mgh = \frac{mv_3^2}{2} + mg \frac{h}{2} \Rightarrow \frac{v_3^2}{2} = gh - g \frac{h}{2} = \frac{2gh - gh}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{v_3^2}{2} = \frac{gh}{2} \Rightarrow v_3 = \sqrt{gh} = \sqrt{g(L - L \cos \alpha)} = \sqrt{9,81(0,4 - 0,4 \cos 10^\circ)}$$

$$\Rightarrow v_3 = 0,24 \frac{m}{s}$$

Remarque: 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 ?

$$E_T = \frac{kA^2}{2} \text{ avec } (k = m\omega^2) \quad E_T = 0,003 \text{ J} \quad (\text{cf. a) [2]})$$

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

$$E_T = mgh = 0,003 \text{ J} = E_T \quad (\text{cf. a) [2]})$$

**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 !



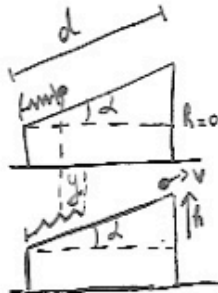
a) si le flipper est horizontal ?  $V?$   
 le ressort est comprimé d'une distance  $y \Rightarrow$  il contient de l'énergie potentielle élastique  $E_e = \frac{ky^2}{2}$

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

$E_T = \frac{ky^2}{2}$   $\left\{ \begin{array}{l} \frac{ky^2}{2} = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{ky^2}{m}} \\ \Rightarrow v = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^{-2}}{50 \cdot 10^{-3}}} = 6,3 \text{ m/s} \end{array} \right.$

l'énergie élastique du ressort convertie en énergie cinétique de la boule  
 b) s'il fait un angle de  $5^\circ$  avec l'horizontale ?  $d = 50$

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



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

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

$\Rightarrow \frac{ky^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + mgh$   $\left\{ \begin{array}{l} v? \\ h? \end{array} \right.$   $\sin d = \frac{h}{d}$

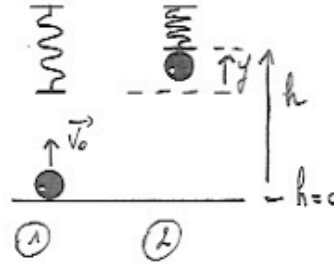
$V = 6,12 \frac{m}{s} \left( 22 \frac{km}{h} \right)$

$\Rightarrow \frac{mv^2}{2} = \frac{ky^2}{2} - mgh \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2}{m} \left( \frac{ky^2}{2} - mgh \right)} = \sqrt{\frac{2}{m} \left( \frac{ky^2}{2} - mgd \sin d \right)}$

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

**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 balle atteint sa hauteur maximale. Quelle est la hauteur atteinte par la balle ?



$$m = 0,5 \text{ kg}$$

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

$$v_0 = 2 \text{ m/s}$$

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

h ?

$E_{T(1)} = E_{T(2)} \Rightarrow$  Principe de conservation d'énergie

$$1) E_{T(1)} = E_c + E_p + E_{sp} \\ = \frac{mv_0^2}{2} + 0 + 0$$

(la seule énergie est l'énergie cinétique de la balle)

$$2) E_{T(2)} = E_c + E_p + E_{sp} \\ = 0 + mgh + \frac{ky^2}{2}$$

$$v_{\text{balle}} = 0$$

Énergie  
gravitationnelle de  
la balle

$\Rightarrow$  un ressort est comprimé

$$\Rightarrow \frac{mv_0^2}{2} = mgh + \frac{ky^2}{2} \quad (\text{car } E_{T(1)} = E_{T(2)})$$

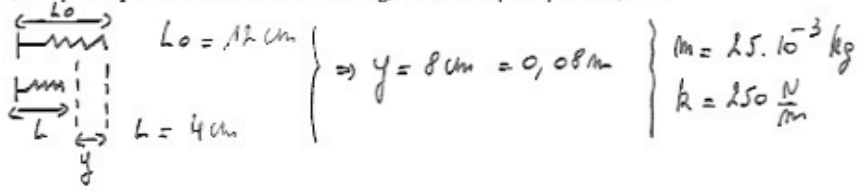
$$h = 15,7 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow h = \left( \frac{mv_0^2}{2} - \frac{ky^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{mg}$$

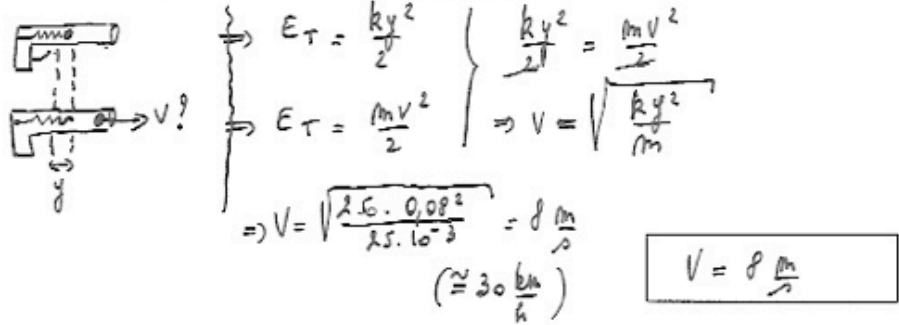
$$\Rightarrow h = \left( \frac{0,5 \cdot 2^2}{2} - \frac{32 \cdot 0,12^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{0,5 \cdot 9,81} = 0,157 \text{ m}$$

**EXERCICE 4**

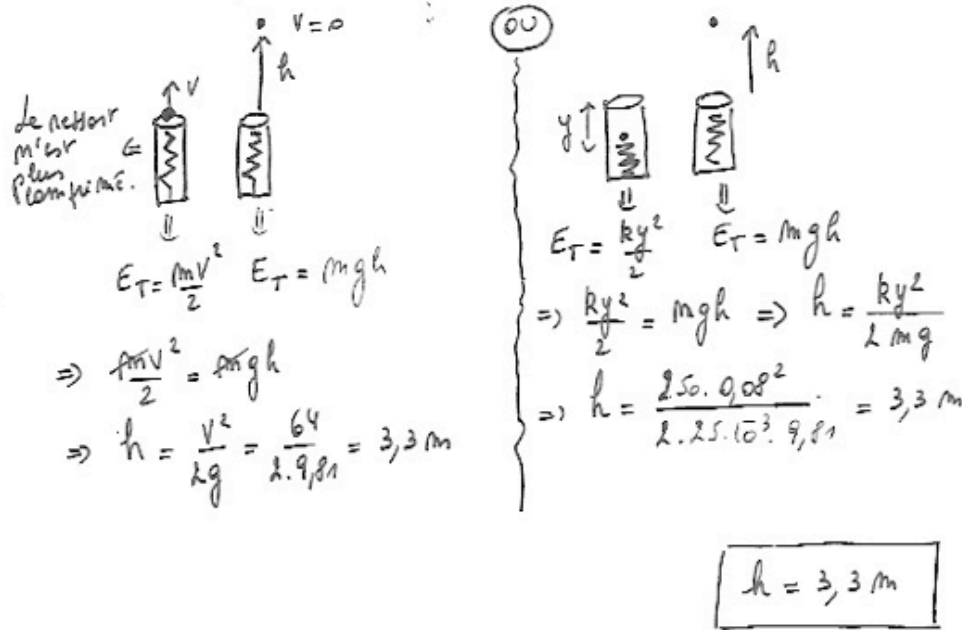
Un fusil de fléchettes comprend un ressort de raideur  $k = 250 \text{ N/m}$ , de longueur à vide  $l_0 = 12 \text{ cm}$  et qui, comprimé par la fléchette de masse  $25 \text{ g}$ , ne mesure plus que  $l = 4,0 \text{ cm}$ .



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.

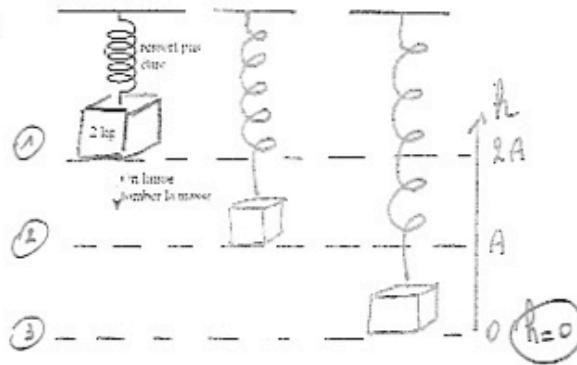


b) Quelle altitude maximale peut-elle atteindre dans le cas d'un tir vertical ? Faire le calcul sans tenir compte du frottement entre fléchette et fusil ni de la résistance de l'air.



**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 ?

$$E_{T(0)} = mg \cdot 2A$$

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

$$\Rightarrow mg \cdot 2A = \frac{k4A^2}{2} = k2A^2$$

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

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

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

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

b) Quelle sera la vitesse maximale du ressort ?

$$E_{T(2)} = E_{T(0)} \Rightarrow \frac{mV_{\text{max}}^2}{2} + mgA + \frac{kA^2}{2} = mg2A$$

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

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

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

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

$$\omega V_{\text{max}} = A\omega = 0,098 \cdot \frac{2\pi}{0,6283}$$

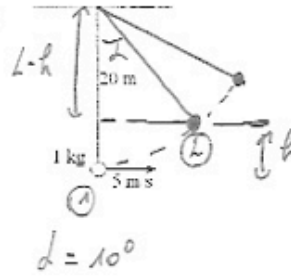
$$V_{\text{max}} = 0,98 \text{ m/s}$$

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

Cette méthode est bien plus rapide... ☺

**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  $10^\circ$  par rapport à la verticale ?



$$E_{TA} = \frac{mv_{max}^2}{2}$$

$$E_{TA} = mgh + \frac{mv^2}{2}$$

! on a  
 $v \neq 0$  (il n'a pas  
atteint sa  
hauteur max)

$$\Rightarrow h ? \quad L-h \quad \triangle$$

$$\Rightarrow \cos \alpha = \frac{L-h}{L} \Rightarrow L \cos \alpha = L-h$$

$$\Rightarrow h = L - L \cos \alpha = 20 - 20 \cos 10^\circ$$

$$\Rightarrow h = 0,304 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \frac{mv_{max}^2}{2} = mgh + \frac{mv^2}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{v^2}{2} = \frac{v_{max}^2}{2} - gh$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{2 \left( \frac{v_{max}^2}{2} - gh \right)} = \sqrt{2 \left( \frac{5^2}{2} - 9,81 \cdot 0,304 \right)}$$

$$\Rightarrow v = 4,36 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = 4,36 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 10 Ondes mécaniques

### 10.1 Ondes mécaniques -exemples et définition

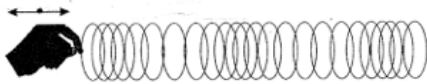
Au premier chapitre, nous avons vu les caractéristiques des oscillateurs harmoniques.

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

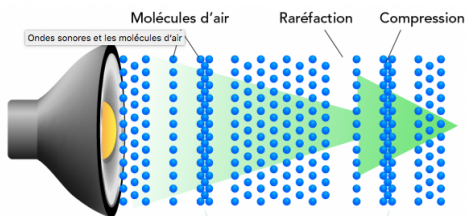


Prenons quelques exemples :

- 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 dilata-tions 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.

### 10.2 Ondes longitudinales et transversales

#### 10.2.1 Vidéos à visualiser

- Ondes mécaniques progressives : <https://youtu.be/6eTtMmU9sqM>
- Ondes transversales et longitudinales : <https://youtu.be/X8wx9n0mgaM>
- Cours de physique TS ondes : <https://youtu.be/mq9qbbSGgos>
- 45 epic battles : <https://youtu.be/cNXP3XnS60s>

### 10.3 Caractéristiques des ondes progressives

#### 10.3.1 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.

#### 10.3.2 Longueur d'onde d'une onde progressive

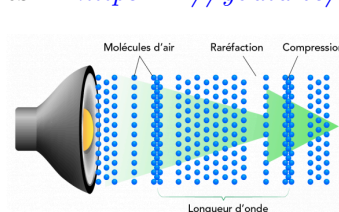
La vitesse  $v$  d'une onde (**aussi appelée célérité** de l'onde) sera égale au rapport de la distance parcourue par l'onde sur le temps mis pour parcourir cette distance.

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

Nous avons donc :

### 10.4 Vidéos à visualiser

- Khan Academy : grandeurs et caractéristiques d'une onde : <https://youtu.be/4dnzEEHRTEI>
- Longueur d'onde et fréquence : <https://youtu.be/2ww9MBD9UC0>
- Caractéristiques des ondes progressives. <https://youtu.be/C5woKhTTKCM>





### 10.4.1 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 :

- la vitesse de propagation du son dans l'air à 15°C est de 340 m/s. (à connaître) .Nous utiliserons cette valeur dans la suite du cours et pour les exercices.
- la vitesse de propagation du son dans l'air à 30°C est de 349 m/s.
- la vitesse de propagation du son dans l'air à 0°C est de 331 m/s.
- 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.

## 10.5 Vidéos à visualiser

Khan Academy : vitesse du son : [https ://youtu.be/pkv9OIH0mSU](https://youtu.be/pkv9OIH0mSU)

## 10.6 Exercice

### 10.6.1 Exercice

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.

### 10.6.2 Exercice

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.

### 10.6.3 Exercice

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.

### 10.6.4 Exercice

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.

### 10.6.5 Exercice

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.

### 10.6.6 Exercice

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.
1. 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.
  1. Réaliser le graphique de la variation de l'élongation en fonction de la distance à la source.
  1. Calculer la vitesse des vagues.

### 10.6.7 Exercice 2

Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ? Indique la réponse correcte, V ou F, dans la case prévue à cet effet.

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

### 10.7 Exercice 3 QCM

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

1. **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

### 10.7.1 Exercice 4

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

**Les ondes progressives périodiques présentent :**

1. Une périodicité temporelle
2. Une périodicité spatiale

**La fréquence d'un phénomène périodique :**

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

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

- A. 2,5 m
- B. 2,5 km
- C. 25 km

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

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

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

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

**11 4- Etude mathématique de l'onde progressive (P 39 - 40 du livre)**

Vidéos à visualiser sur YouTube :

Onde mécanique sinusoïdale 1/2.CORDE (transversale). =vT.Phase.Double périodicité. <https://youtu.be/9Hs9jeuDzwg>

Onde sur une corde. <https://youtu.be/N654RoNHalc>

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 :  $y_s(t) = A \sin(\omega t)$  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.

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.

$\Rightarrow t' = \frac{d}{v} \Rightarrow t' : \text{temps mis par l'onde pour parcourir la distance } d$   
 $v : \text{vitesse de l'onde.}$

des variations d'élongations de S et P (mais déphasées dans le temps).

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

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

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

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

$\Rightarrow y_P(t) = A \sin\left(\omega t - \frac{2\pi d}{\lambda}\right)$  |  $y_P(t)$  est l'élongation d'un point P distant d de la source S

**Exemple**

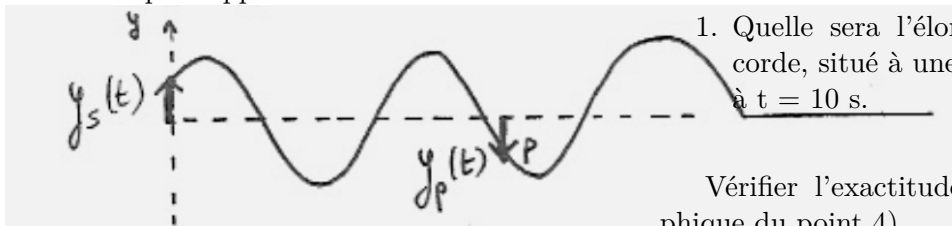
Un vibreur provoque des ondes sinusoïdales de période  $T = 2s$  à l'extrémité d'une corde. A l'instant initial, l'élongation est nulle. L'amplitude des ondes est de 1 mètre. La vitesse de l'onde le long de la corde est de 4 m/s.

1. Déterminez la longueur d'onde le long de cette corde.
1. Quelle est l'élongation du vibreur à  $t = 10 s$  ?
1. Quelle sera la distance parcourue par l'onde à  $t = 10s$  ?
1. Représenter la corde à  $t = 10 s$ .
1. 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 4).

1. 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).



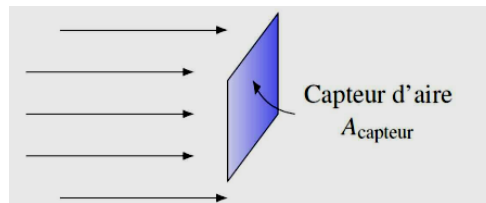


FIG. 12 :

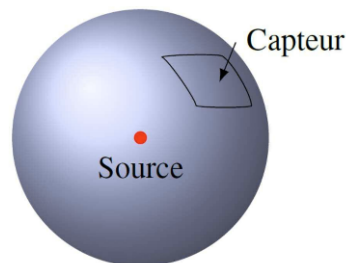


FIG. 13 :

## ONDES SONORES

### LES 3 CARACTERISTIQUES 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 »).

##### 3.1) Définition de l'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 ?

##### a) Energie 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.

Pour une onde en trois dimensions (produisant un son de façon isotrope dans toutes les directions), le capteur ne capttera 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.

##### b) Energie captée en fonction du temps

Évidemment, on capttera 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

**La définition de l'intensité sonore est donc 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  $W/m^2$**

### 3.2) 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.

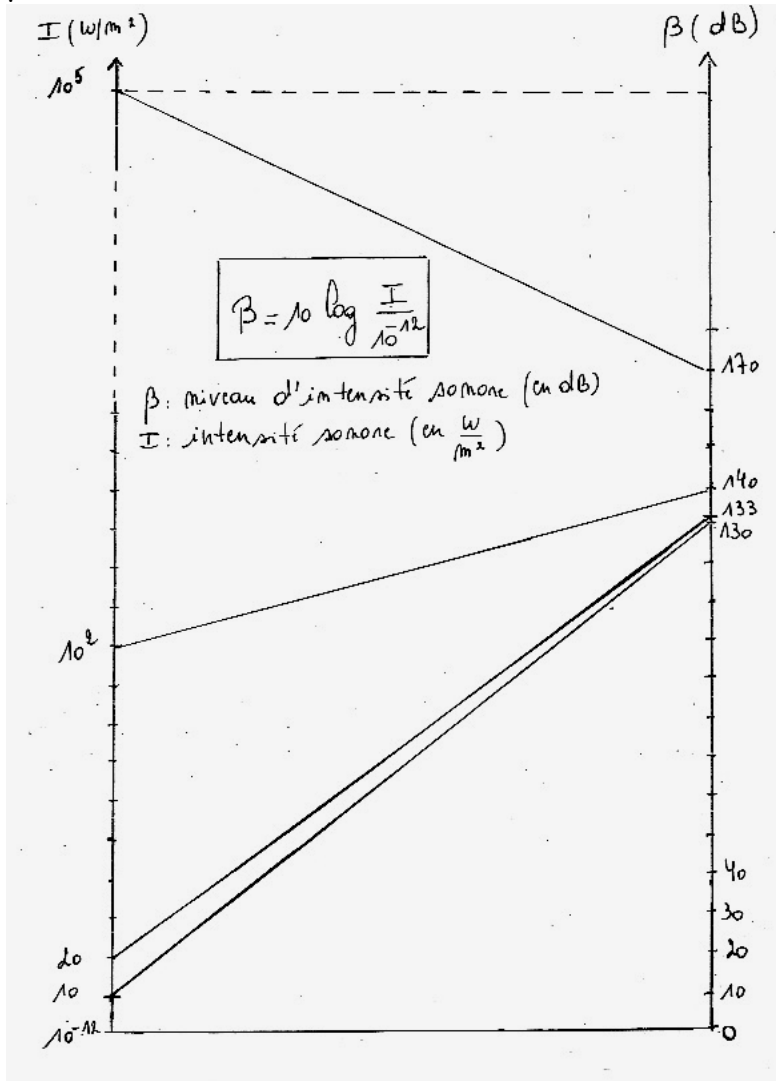
- L'intensité sonore minimale perceptible par l'oreille humaine est de  $10^{-12} W/m^2$
- Une conversation normale correspond à une intensité de  $3 \cdot 10^{-6} W/m^2$
- Le son devient trop intense pour l'oreille humaine si son intensité dépasse  $1 W/m^2$  (approximativement).

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 :

- $I = 10^{-12} W/m^2$  (Rép : = 0 dB)
- $I = 10 W/m^2$  (Rép : = 130 dB)
- $I = 20 W/m^2$  (Rép : = 133 dB)

- d)  $I = 10^2 \text{ W/m}^2$  (Rép : = 140 dB)  
 e)  $I = 10^5 \text{ W/m}^2$  (Rép : =170 dB)

## 12 Exercice

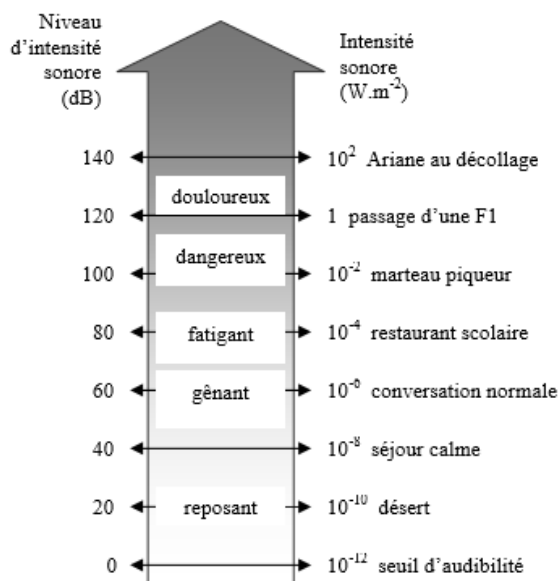
- a) Calculez le niveau d'intensité sonore émis par un haut-parleur produisant un son d'une intensité sonore de  $10^{-5} \text{ W/m}^2$  (Rép : =70 dB)  
 a) Calculez le niveau d'intensité sonore émis par deux haut-parleurs produisant chacun un son d'une intensité sonore de  $10^{-5} \text{ W/m}^2$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

## 13 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 log en base 10).



### Règles en vigueur en Belgique.

Pour la sécurité de vos oreilles, je vous conseille vivement de lire votre 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 très peu souvent respectée).

Il existe une application sur les Smartphones : le sonomètre.

Vous pouvez m'en faire une démonstration en classe si vous le désirez.

### EXERCICES (du livre p 58)

- 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.
- 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 sonore égal à 50 dB. Calculer le niveau d'intensité sonore perçu par un auditeur dans la pièce.

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).

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.

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).

### **EXERCICES (du livre p 58)**

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.

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 sonore égal à 50 dB. Calculer le niveau d'intensité sonore perçu par un auditeur dans la pièce.

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).

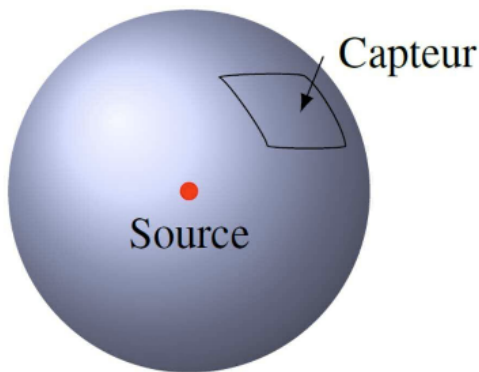
4) En Belgique, l'exposition des travailleurs à des bruits de niveau d'intensité sonore de 80 dB pendant 8 heures par jour est considérée légalement comme le plafond à ne pas dépasser. Pour un niveau d'intensité sonore de seulement 3 dB en plus, la durée d'exposition doit être réduite de moitié, soit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

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).

### **3.3. Intensité à une distance $r$ 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.

#### **Exercices**

##### **EXERCICE 1**

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 2**

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 3**

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 4**

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 ?

**Exercices****EXERCICE 1**

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 2**

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 3**

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 4**

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 ?



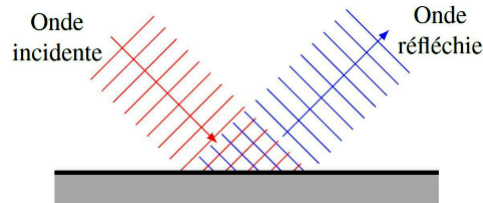


FIG. 14 :

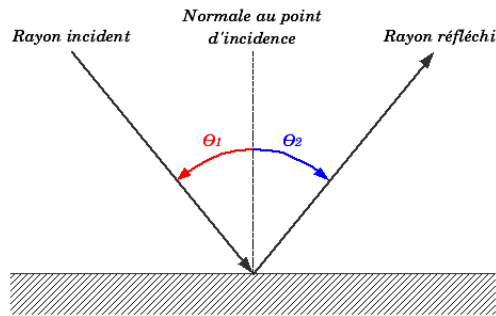


FIG. 15 :

### **PROPRIETES DES ONDES – Réflexion, réfraction.**

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

Analysons-les plus en détail.

#### **1- Réflexion des ondes (p 62 à 65 du livre)**

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 :*

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 réfléchies et la normale.

Nous constatons que :

#### **Applications : ( Lire p 64-65)**

- 1) Réflexion d'ondes sonores.
- 2) Réflexion sonores dans une salle.
- 3) Le sonar
- 4) L'échographie
- 5) La mer gaufrée- Pointe des Baleines à l'île de Ré, en France.

Une belle visualisation des ondes réfléchies est la mer gaufrée.



FIG. 16 :

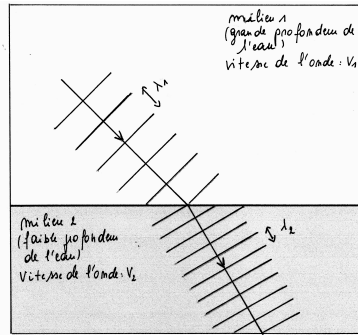


FIG. 17 :

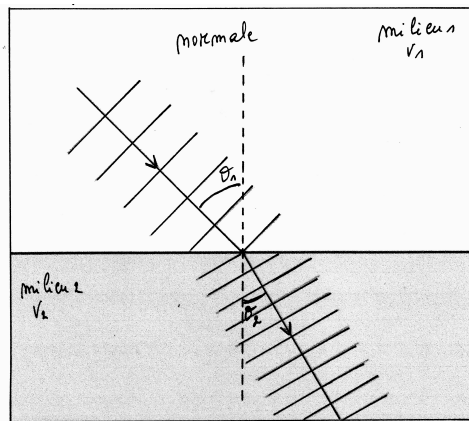


FIG. 18 :

Nous voyons la superposition des vagues incidentes et des vagues réfléchies qui produit “un quadrillage”, appelé “mer gaufrée”, particulièrement visible à l’Ile de Ré.

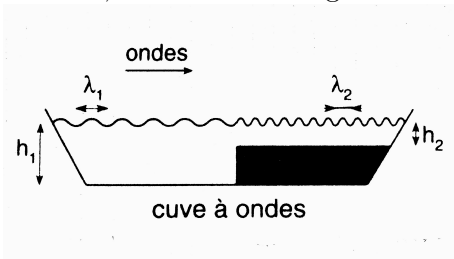
**2- Réfraction des ondes ( P 66 à 69 du livre)**

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 :

$$h_1 > h_2 \text{ donc } v_1 < v_2$$

où  $v_1$  est la vitesse de l’onde dans le milieu le plus profond et  $v_2$  la vitesse de l’onde dans le milieu le moins profond.

Et comme  $f_1 = f_2$  (la fréquence n’est pas modifiée, c’est la fréquence de l’OH) :

$$\lambda_1 > \lambda_2$$

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 :  $v_1 < v_2$ ).

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 réfraction ( 2 )** est l'angle formé par la direction des ondes réfractées et la normale.

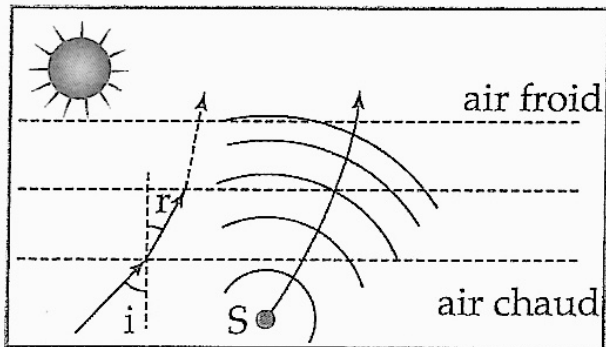
Nous voyons ci-contre que :

si  $v_1 < v_2$  alors  $i < r$  (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

**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.**

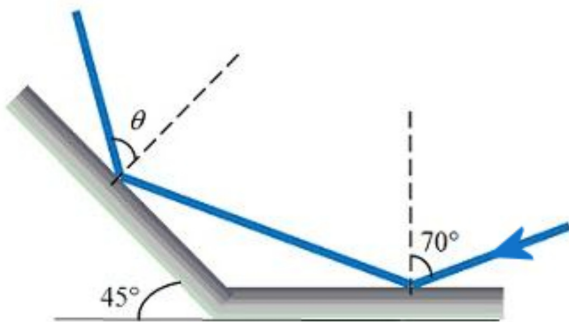
Nous avons vu que lorsque la vitesse d'une onde diminue, l'onde se réfracte de telle sorte que l'angle de réfraction  $r$  soit inférieur à l'angle d'incidence  $i$ .

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

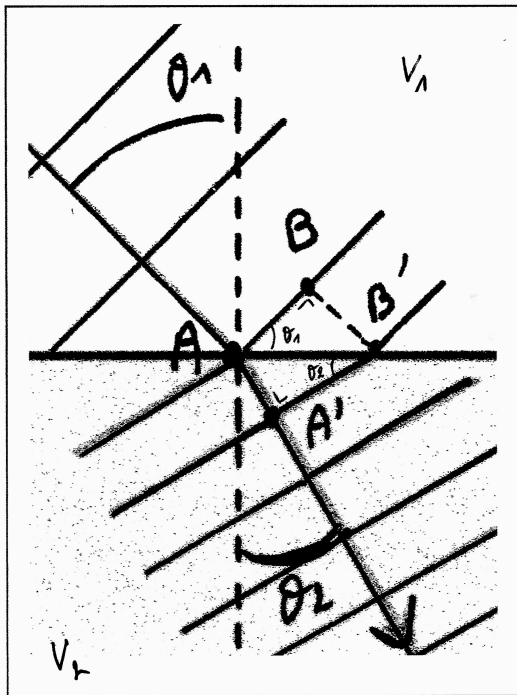


l'angle  $\theta$  sur cette figure ?

(Réponse :  $65^\circ$ )

### EXERCICE 2 ( N° 6 du livre p 78)

Dans le cadre d'un phénomène de réflexion : quel est

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 :

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

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

$$(*) \Rightarrow \frac{AB' \sin \theta_1}{v_1} = \frac{AB' \sin \theta_2}{v_2}$$

$$\Rightarrow \frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \Rightarrow$$

$$\boxed{\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}}$$

Loi de Snell

⇒ Lors qu'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

FIG. 19 :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

FIG. 20 :

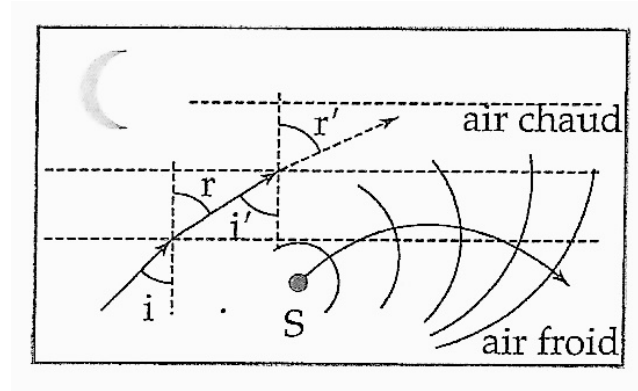
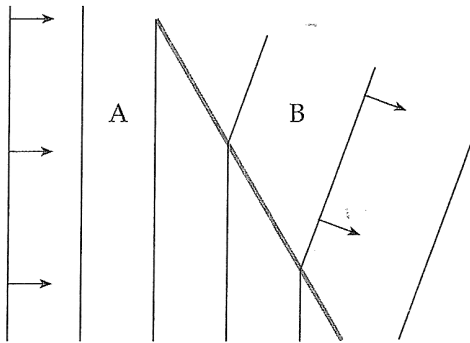


FIG. 21 :



La figure ci-contre représente le passage d'une onde d'un mi-

lieu A vers un milieu B.

- Dans lequel de ces deux milieux la vitesse de propagation est-elle la plus élevée ?
- 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  $v_1$  et une vitesse  $v_2$  dans le second milieu, avec  $v_1 = 1,5 v_2$ ; pour les angles d'incidence suivants :

- $i = 10^\circ$
- $i = 30^\circ$
- $i = 41,5^\circ$
- $i = 89^\circ$

### EXERCICE 4

Construire le schéma de réfraction d'une onde ayant une vitesse incidente  $v_1$  et une vitesse  $v_2$  dans le second milieu, avec  $v_2 = 1,5 v_1$ ; pour les angles d'incidence suivants :

- $i = 10^\circ$
- $i = 30^\circ$
- $i = 41,5^\circ$
- Calculer l'angle limite de réfraction
- Construire la propagation de l'onde pour un angle d'incidence  $i = 50^\circ$

### 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 ?

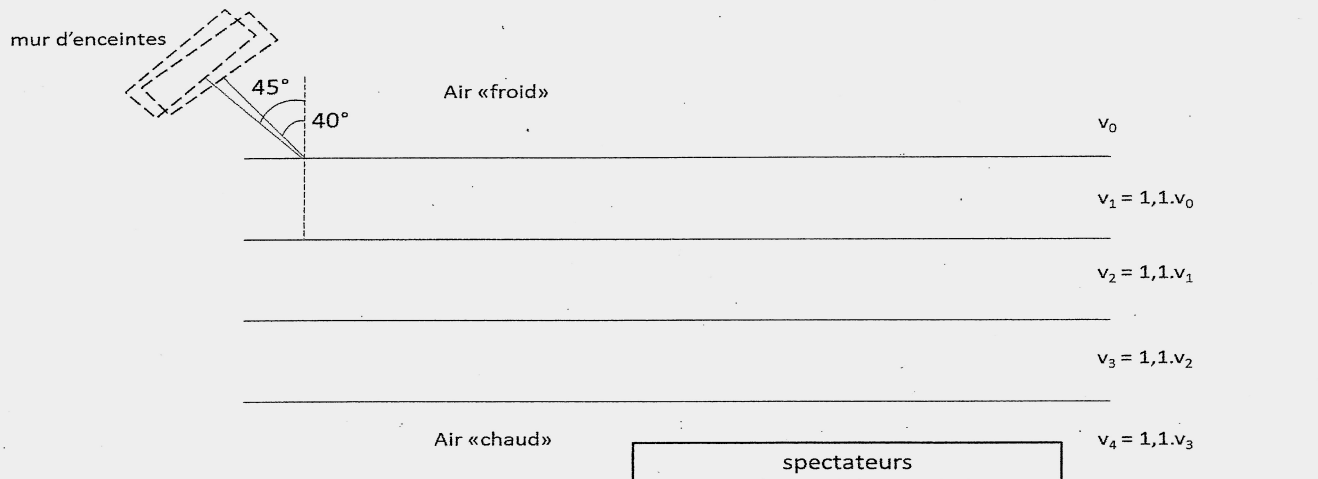
### EXERCICE 7

### Réfraction des ondes sonores

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

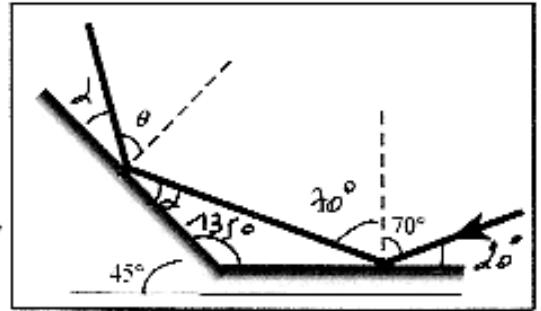
Lors d'un concert en plein air, un mur d'enceintes disposé en hauteur émet des ondes sonores, que l'on supposera localement planes. Par ailleurs, la présence de la foule des spectateurs engendre une augmentation de la température de l'air juste au-dessus d'eux, ce qui provoque un gradient de température 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  $i = 40^\circ$  puis pour  $i = 45^\circ$ . 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  $\theta$  sur cette figure?  
 (Réponse :  $65^\circ$ )

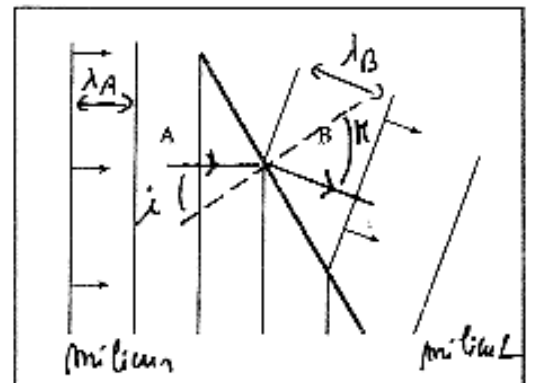


1) La somme des angles dans un triangle =  $180^\circ$   
 $\Rightarrow 135^\circ + 20^\circ + \alpha = 180^\circ \Rightarrow \alpha = 180^\circ - 155^\circ = 25^\circ$   
 2)  $\theta + \alpha = 90^\circ \Rightarrow \theta = 90^\circ - 25^\circ = \boxed{65^\circ = \theta}$

**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  $\lambda$ .  
 On voit sur la figure que  $\lambda_A < \lambda_B$   
 Nous savons que  $f_A = f_B$  (notons-la  $f$ ) car il s'agit de la même source pour l'onde.  
 OR  $v = \lambda f$

$\Rightarrow \left. \begin{matrix} v_A = \lambda_A f \\ v_B = \lambda_B f \end{matrix} \right\} \text{ Comme } \lambda_A < \lambda_B \Rightarrow \boxed{v_A < v_B}$   
 $\Rightarrow$  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.

$f = 50 \text{ Hz}$

$\lambda_A = 1 \text{ cm}$   
 $\lambda_B = 1,5 \text{ cm}$  } Mesures à la règle sur le schéma puisque l'échelle est à 1:1

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

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

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  $v_1$  et une vitesse  $v_2$  dans le second milieu, avec  $v_1 = 1,5 v_2$ ; pour les angles d'incidence suivants :

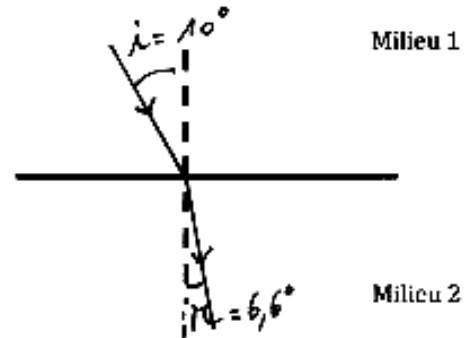
a)  $i = 10^\circ$  Réfraction  $\Rightarrow \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$

Cherchons  $r$  ?

$$\sin r = \frac{v_2}{v_1} \cdot \sin i \Rightarrow \boxed{r = \text{Arctan} \left( \frac{v_2}{v_1} \cdot \sin i \right)}$$

$$r = \text{Arctan} \left( \frac{v_2}{1,5 \cdot v_2} \cdot \sin 10^\circ \right) = \text{Arctan} \left( \frac{\sin 10^\circ}{1,5} \right)$$

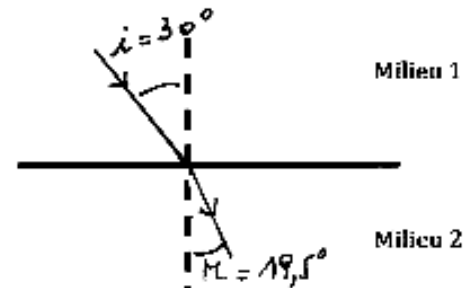
$$\Rightarrow r = 6,6^\circ$$



b)  $i = 30^\circ$

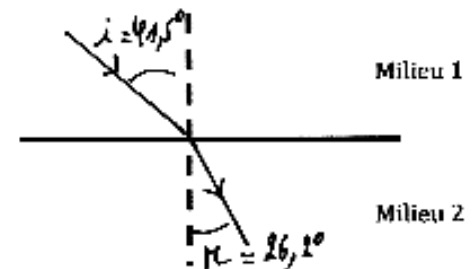
$$r = \text{Arctan} \left( \frac{v_2}{1,5 \cdot v_2} \sin 30^\circ \right) = \text{Arctan} \left( \frac{\sin 30^\circ}{1,5} \right)$$

$$r = 19,5^\circ$$



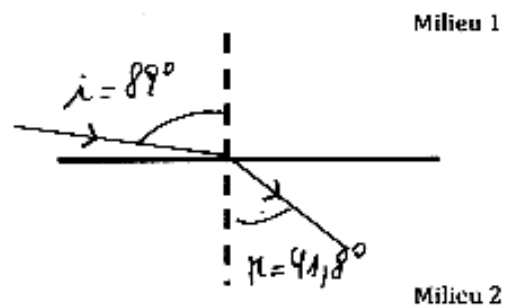
c)  $i = 41,5^\circ$

$$r = \text{Arctan} \left( \frac{\sin 41,5^\circ}{1,5} \right) = 26,2^\circ$$



d)  $i = 89^\circ$

$$r = \text{Arctan} \left( \frac{\sin 89^\circ}{1,5} \right) = 41,8^\circ$$



Nous voyons bien que lorsque  $v_1 > v_2$  ( $v_1 = 1,5 v_2$ ), l'onde réfractée se rapproche de la normale.

A2.



**EXERCICE 4**

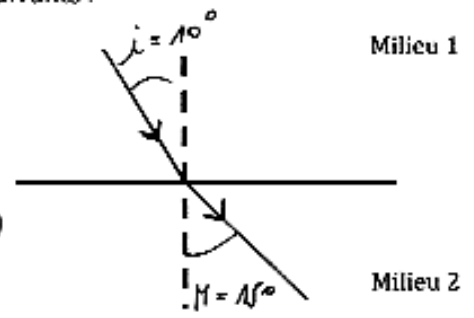
Construire le schéma de réfraction d'une onde ayant une vitesse incidente  $v_1$  et une vitesse  $v_2$  dans le second milieu, avec  $v_2 = 1,5 v_1$ ; pour les angles d'incidence suivants :

a)  $i = 10^\circ$   $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow r = ?$

$$\sin r = \frac{v_2}{v_1} \sin i \Rightarrow \boxed{r = \text{Arcsin} \left( \frac{v_2}{v_1} \sin i \right)}$$

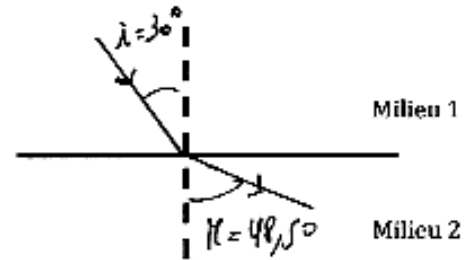
$$r = \text{Arcsin} \left( \frac{1,5 v_1}{v_1} \sin 10^\circ \right) = \text{Arcsin} (1,5 \cdot \sin 10^\circ)$$

$$\Rightarrow r = 15^\circ$$



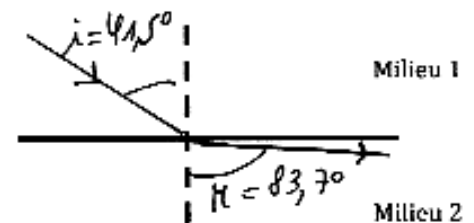
b)  $i = 30^\circ$

$$r = \text{Arcsin} (1,5 \cdot \sin 30^\circ) = 48,5^\circ$$



c)  $i = 41,5^\circ$

$$r = \text{Arcsin} (1,5 \cdot \sin 41,5^\circ) = 83,7^\circ$$



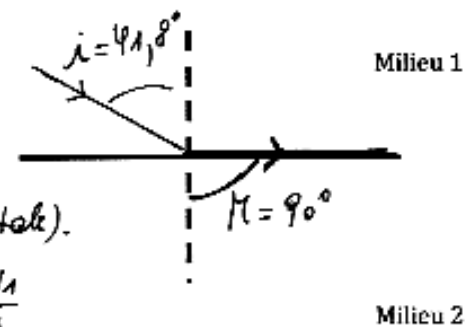
d) Calculer l'angle limite de réfraction

Nous voyons qu'il y aura un certain angle  $i$  ( $i_{\text{limite}}$ ) pour lequel  $r = 90^\circ$ .  
 $\Rightarrow$  Il n'y aura plus de réfraction (plus de passage de l'onde dans le milieu 2 mais réflexion totale).

$$\text{Si } r = 90^\circ \Rightarrow \text{comme } \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{\sin i}{1} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{i_{\text{limite}} = \text{Arcsin} \frac{v_1}{v_2}}$$

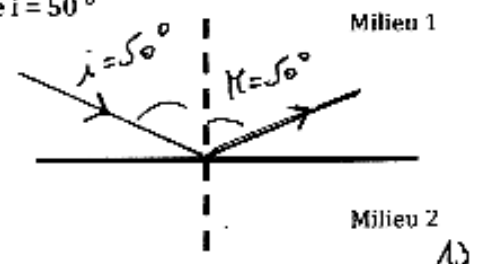
$$\text{Dans notre cas : } i_{\text{limite}} = \text{Arcsin} \frac{v_1}{1,5 v_1} = \text{Arcsin} \left( \frac{1}{1,5} \right) = 41,8^\circ$$



e) Construire la propagation de l'onde pour un angle d'incidence  $i = 50^\circ$

$\Rightarrow i > i_{\text{limite}} \Rightarrow$  il n'y aura plus de réfraction mais réflexion  
 $\Rightarrow r_{\text{réflexion}} = i = 50^\circ$

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



**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 :  $i < i_{\text{limite}}$ .

$$i_{\text{limite}} = \text{Arcsin} \frac{v_1}{v_2} \quad \text{avec } \begin{cases} v_1 = v_{\text{onde ds air}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ v_2 = v_{\text{onde ds eau}} = 1500 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{cases}$$

$$i_{\text{limite}} = \text{Arcsin} \frac{340}{1500} = \boxed{13,1^\circ = i_{\text{limite}}}$$

**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 ?

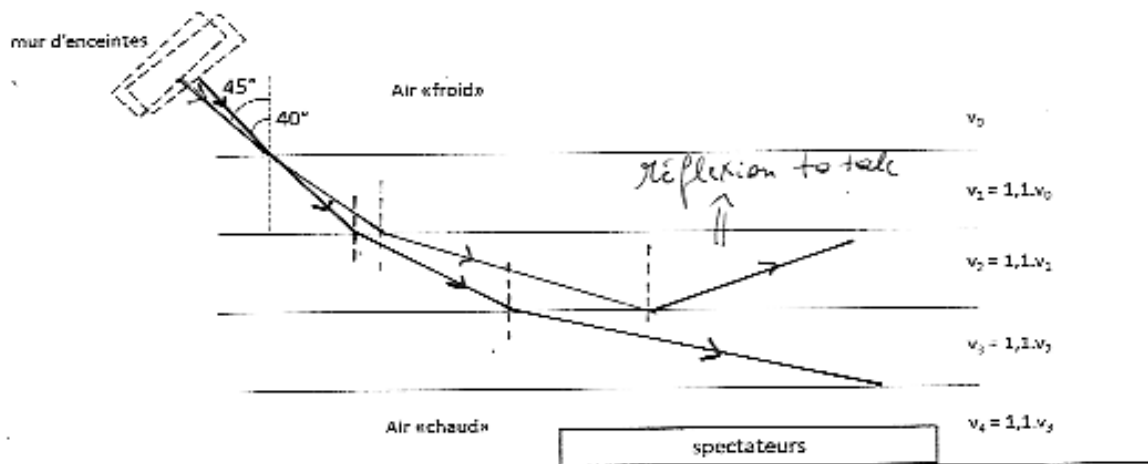
$$\left. \begin{array}{l} \lambda_1 = 1,5 \text{ m} \\ v_1 = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \lambda_2 ? \\ v_2 = 1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Réfraction car il y a changement} \\ \text{de milieu.} \\ \text{OR } f_1 = f_2 (= f \text{ de la source : ici, le vent}) \\ \Rightarrow \left. \begin{array}{l} v_1 = \lambda_1 f \\ v_2 = \lambda_2 f \end{array} \right\} \Rightarrow f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \end{array}$$

$$\Rightarrow \lambda_2 = \frac{v_2 \lambda_1}{v_1} = \frac{1,6 \cdot 1,5}{2} = \boxed{1,2 \text{ m} = \lambda_2}$$

**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  $i = 40^\circ$  puis pour  $i = 45^\circ$ . En déduire l'importance du choix de l'angle d'incidence (orientation du mur d'enceintes) pour le bon déroulement du concert.



Pour  $i = 40^\circ$

- 1)  $v_1 = 1,1 \cdot v_0$  et  $i = 40^\circ$   
 $\kappa = \text{Arctan} \left( \frac{v_1}{v_0} \sin i \right) = \text{Arctan} \left( \frac{1,1 v_0}{v_0} \sin i \right)$   
 $\kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin i)$   
 $\kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin 40^\circ) = 45^\circ$
- 2)  $v_2 = 1,1 \cdot v_1$  et  $i = 45^\circ$   
 $\Rightarrow \kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin 45^\circ) = 51^\circ$
- 3)  $v_3 = 1,1 \cdot v_2$  et  $i = 51^\circ$   
 $\Rightarrow \kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin 51^\circ) = 59^\circ$
- 4)  $v_4 = 1,1 \cdot v_3$  et  $i = 59^\circ$   
 $\Rightarrow \kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin 59^\circ) = 70,5^\circ$

Pour  $i = 45^\circ$

- 1)  $v_1 = 1,1 \cdot v_0$  et  $i = 45^\circ$   
 $\Rightarrow \kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin 45^\circ) = 51^\circ$
  - 2)  $v_2 = 1,1 \cdot v_1$  et  $i = 51^\circ$   
 $\Rightarrow \kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin 51^\circ) = 59^\circ$
  - 3)  $v_3 = 1,1 \cdot v_2$  et  $i = 59^\circ$   
 $\Rightarrow \kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin 59^\circ) = 70,5^\circ$
  - 4)  $v_4 = 1,1 \cdot v_3$  et  $i = 70,5^\circ$   
 $\Rightarrow \kappa = \text{Arctan} (1,1 \cdot \sin 70,5^\circ) = 77^\circ$
- $\hookrightarrow$  Il y a réflexion totale car  $i > i_{\text{limite}}$
- $$i_{\text{limite}} = \text{Arctan} \frac{v_3}{v_4} = \text{Arctan} \frac{1}{1,1} = 65,4^\circ$$

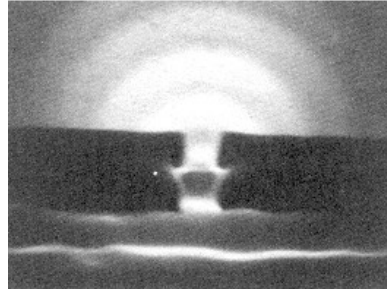


FIG. 22 :

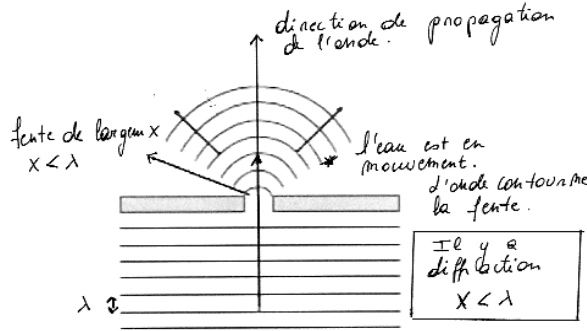


FIG. 23 :

**3. La diffraction des ondes**

Tant qu'une onde ne change pas de milieu ou ne rencontre pas d'obstacles, elle se propage en ligne droite. Que se passe-t-il lorsqu'elle passe près d'obstacles ?

Nous entendons facilement au milieu de la classe, des bruits venant du couloir lorsque la porte est ouverte. De même, nous percevons très bien des bruits provenant de l'extérieur et ce par une fenêtre ouverte. **Une onde ne devrait-elle pas être arrêtée par un obstacle ?**

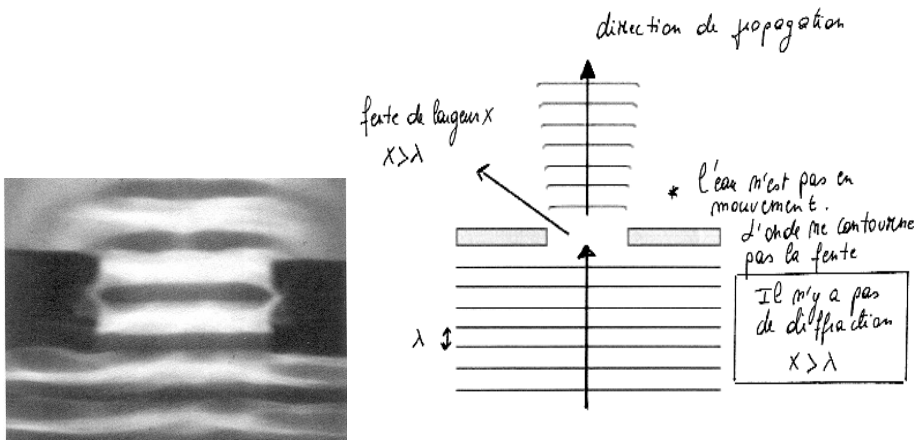
**3.1 Observations avec la cuve à onde.**

**3.1.1 - Passage à travers une fente**

Considérons des ondes planes, produites dans une cuve à onde, comme nous l'avons vu au cours. Les images ci-dessous sont vues de haut, les ondes se propagent du bas vers le haut.

Nous les voyons passer à travers une fente **de largeur que nous noterons  $x$** .

**OBSERVATION AVEC LA CUVE A ONDESCHEMAS**



**Comment expliquer que nous entendons facilement au milieu de la classe, des bruits venant du couloir lorsque la porte est ouverte alors que nous savons que la propagation des ondes est rectiligne ?**

**3.1.2. Le principe de Huygens.**

Pour expliquer ces observations, Huygens a élaboré une théorie ondulatoire (1818) qui permet d'expliquer ce phénomène de diffraction.

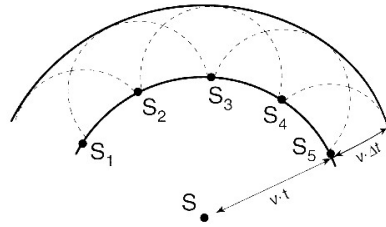


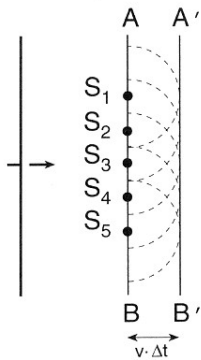
FIG. 24 :

**Principe de Huygens :** tout point atteint par une onde se comporte comme une nouvelle source d'ondes circulaires de même fréquence, c'est-à-dire que ce point génère des ondes circulaires de même fréquence.

a) Pourquoi une onde circulaire continue-t-elle à se propager de façon circulaire ?

Imaginons une goutte d'eau qui tombe à la surface de l'eau en un point S. Une onde circulaire va se propager et atteindre les points S1, S2, S3, S4, .... Chacun de ces points atteints par l'onde va générer des ondes circulaires de même fréquence (et donc de même longueur d'onde si le milieu est inchangé).

C'est ainsi qu'une onde circulaire continue à se propager de façon circulaire.



b) Pourquoi une onde plane continue-t-elle à se propager de façon plane ?

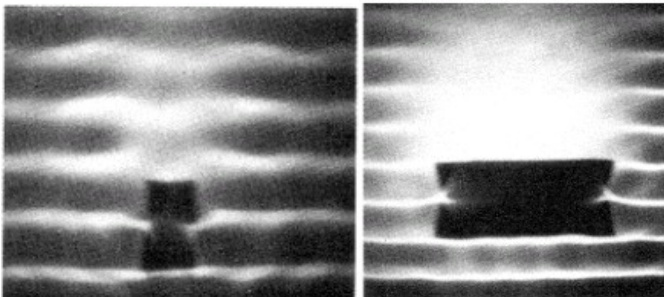
Soit une tige plane produisant des ondes planes. Le front d'ondes arrive sur la ligne AB. En vertu du principe de Huygens, chaque point du segment AB (S1, S2, S3, S4, S5) produit des ondes circulaires et nous voyons que toutes ces ondes vont former finalement sur le segment A'B' une onde plane.

Une onde plane se propage donc en restant une onde plane.

### 3.1.3. Passage (ou non) derrière un obstacle.

Au lieu de faire passer une onde à travers une fente, nous pouvons aussi lui faire rencontrer un obstacle. Nous l'avons observé avec la cuve à onde et vu que :

- Si les dimensions de l'obstacle sont grandes devant la longueur d'onde, l'onde ne contourne pas l'obstacle.
- Si les dimensions de l'obstacle sont petites devant la longueur d'onde, l'onde contourne l'obstacle.



## 3.2 – CONCLUSIONS

La diffraction est le comportement des ondes lorsqu'elles rencontrent un obstacle ou une ouverture.

Plus la longueur d'une onde est grande par rapport aux dimensions de l'obstacle (ou la largeur de l'ouverture), plus cette onde aura de facilité à contourner (à envelopper) l'obstacle.

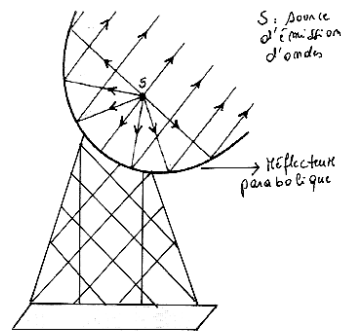
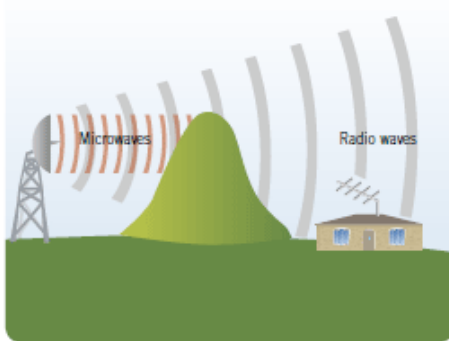


FIG. 25 :

### 3.3. Applications



#### a) Réception des ondes radio en fonction de la longueur d'onde

Ainsi les grandes ondes radio (longueurs d'onde hectométriques et kilométriques) peuvent pénétrer dans le moindre recoin de la surface terrestre tandis que les retransmissions de télévision par satellite (courtes longueurs d'ondes) ne sont possibles que si l'antenne de réception « voit » le satellite.



#### b) Les antennes paraboliques

Pourquoi les réflecteurs des antennes paraboliques sont-ils de si grandes dimensions ?

En plaçant la source  $S$  au foyer du réflecteur parabolique, on produit, par réflexion, un faisceau parallèle de telle sorte que presque toute l'énergie partira dans une seule direction (vers un satellite, vers un relais, ...).

Il faut cependant que la longueur d'onde de l'onde émise soit plus petite que le diamètre du réflecteur pour **éviter la diffraction** (et donc que l'onde ne contourne pas le réflecteur) ( $x$ ).

Le remarque est identique pour des antennes paraboliques réceptrices d'ondes.

#### c) Echolocation

Certains animaux, dauphins, chauve-souris) émettent des ondes acoustiques et ensuite captent les ondes réfléchies par les objets environnants, détectant ainsi les obstacles et proies éventuelles. Il faut pour cela que la longueur d'onde soit inférieure aux dimensions de l'obstacle à détecter. (Il faut donc ici peu de diffraction et le maximum de réflexion).

En effet, si la longueur d'onde était plus grande que les objets, il y aurait trop de diffraction derrière

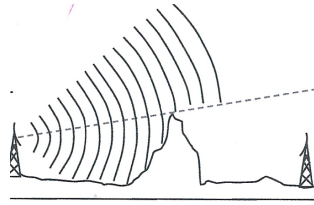
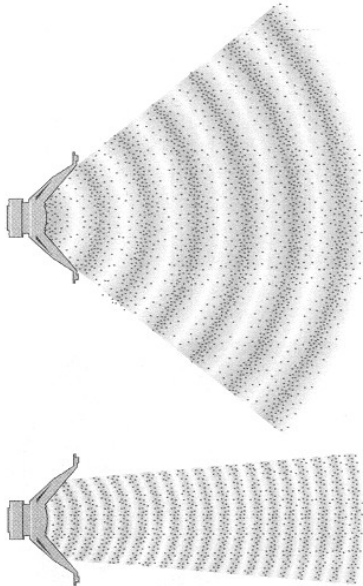


FIG. 26 :

celui-ci et il y aurait peu d'onde réfléchi.

C'est pour cela que les dauphins et chauve-souris émettent des ondes acoustiques de fréquence élevée et donc de longueur d'onde très faible pour *éviter la diffraction* ( $x$ ). Ces ondes seront donc des ultrasons.

C'est aussi le principe du sonar et du radar.

d) *Les dimensions d'un haut-parleur*

Un haut-parleur se comporte comme une fente traversée par une onde.

Un haut-parleur doit envoyer une onde de grande longueur d'onde devant le diamètre du haut-parleur ( $x$ ) pour favoriser la *diffraction* de façon à diffuser les sons dans un cône assez ouvert.

### **EXERCICES SUR LE PHENOMENE DE DIFFRACTION**

#### **14 EXERCICE 1**

**15 Peut-on recevoir derrière une colline de 100 mètres de largeur des ondes radio de 30 000 Hz si l'émetteur se trouve au bas de la colline ?**

#### **EXERCICE 2**

Les chauves-souris émettent des sons de haute fréquence pour situer les objets qui les entourent. La fréquence la plus élevée émise par une espèce de chauve-souris est égale à 50 kHz. Quelles sont les dimensions minimales des insectes qu'elle pourra détecter fiablement ?

#### **EXERCICE 3**

Une station radio émet sur une fréquence de 101 MHz.

Les habitants d'un village situé au fond d'une vallée, dont les dimensions sont de l'ordre du kilomètre vont-ils bien capter cette station ?

#### **EXERCICE 4**

Pour se situer par rapport à d'éventuels obstacles, un dauphin produit des ultrasons de fréquence  $f=40$  kHz.

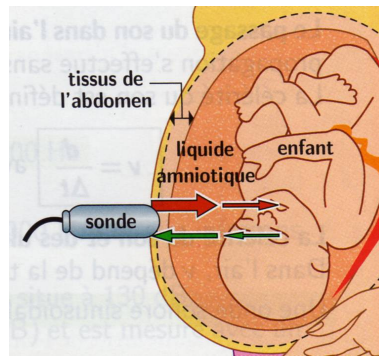
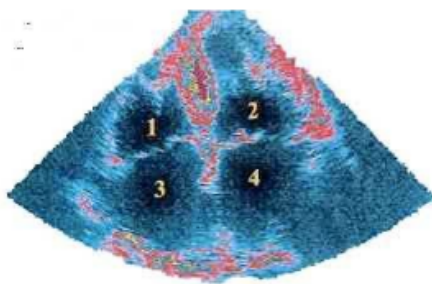


FIG. 27 :

Quelle est la dimension de la plus petite proie que le dauphin peut attraper, les yeux fermés ?



- 1 : oreillette droite
- 2 : oreillette gauche
- 3 : ventricule droit
- 4 : ventricule gauche

### EXERCICE 5

Des ondes ultrasonores de fréquence 2,00 MHz sont utilisées pour réaliser l'échographie du cœur. Dans les tissus cardiaques, leur vitesse de propagation est de l'ordre de 1,5 km/s.

Ces ondes peuvent-elle être diffractées par le cœur ?

### EXERCICE 6

L'échographie est une technique d'imagerie médicale fréquemment utilisée notamment pour suivre le développement des fœtus et la détection d'anomalies éventuelles.

Un examen échographique est réalisé avec une sonde qui émet des impulsions ultrasonores de fréquence 4 MHz. La vitesse des ondes dans le milieu concerné est de 1540 m/s.

Cet examen fonctionne comme un sonar en numérisant à la fin le signal réfléchi en image.

- a) Explique pourquoi on utilise des ultrasons plutôt que des ondes de plus petite fréquence
- a) L'appareil décrit permet-il de détecter un embryon qui ne mesure que 5mm ? Justifie ta réponse

### EXERCICES SUR LE PHENOMENE DE DIFFRACTION

#### 16 EXERCICE 1

17

18 Peut-on recevoir derrière une colline de 100 mètres de largeur des ondes radio de 30 000 Hz si l'émetteur se trouve au bas de la colline ?

### EXERCICE 2

Les chauves-souris émettent des sons de haute fréquence pour situer les objets qui les entourent. La fréquence la plus élevée émise par une espèce de chauve-souris est égale à 50 kHz. Quelles sont les dimensions minimales des insectes qu'elle pourra détecter fiablement ?

### EXERCICE 3



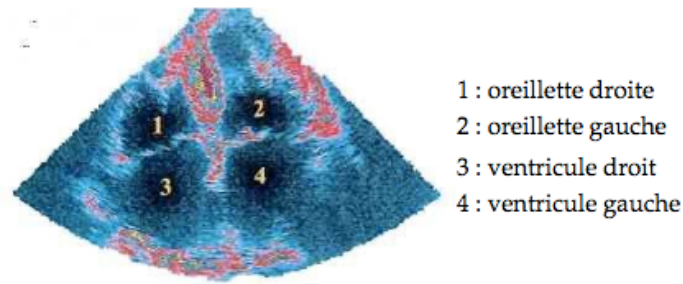
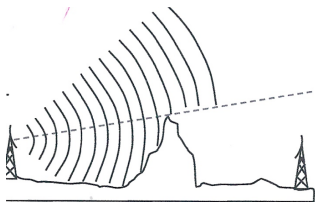


FIG. 28 :



Une station radio émet sur une fréquence de 101 MHz.

Les habitants d'un village situé au fond d'une vallée, dont les dimensions sont de l'ordre du kilomètre vont-ils bien capter cette station ?

#### **EXERCICE 4**

Pour se situer par rapport à d'éventuels obstacles, un dauphin produit des ultrasons de fréquence  $f=40$  kHz.

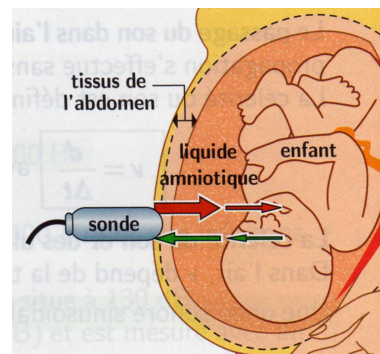
Quelle est la dimension de la plus petite proie que le dauphin peut attraper, les yeux fermés ?

#### **EXERCICE 5**

Des ondes ultrasonores de fréquence 2,00 MHz sont utilisées pour réaliser l'échographie du cœur. Dans les tissus cardiaques, leur vitesse de propagation est de l'ordre de 1,5 km/s.

Ces ondes peuvent-elles être diffractées par le cœur ?

#### **EXERCICE 6**



L'échographie est une technique d'imagerie médicale fréquemment utilisée notamment pour suivre le développement des fœtus et la détection d'anomalies éventuelles.

Un examen échographique est réalisé avec une sonde qui émet des impulsions ultrasonores de fréquence 4 MHz. La vitesse des ondes dans le milieu concerné est de 1540 m/s.

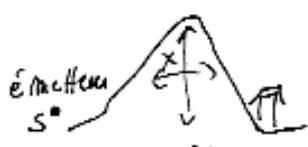
Cet examen fonctionne comme un sonar en numérisant à la fin le signal réfléchi en image.

- Explique pourquoi on utilise des ultrasons plutôt que des ondes de plus petite fréquence
- L'appareil décrit permet-il de détecter un embryon qui ne mesure que 5mm ? Justifie ta réponse

**EXERCICES SUR LE PHENOMENE DE DIFFRACTION**

**EXERCICE 1**

Peut-on recevoir derrière une colline de 100 mètres de largeur des ondes radio de 30 000 Hz si l'émetteur se trouve au bas de la colline ?



$x = 100 \text{ m}$   
 $f = 30000 \text{ Hz}$   
 $= 3 \cdot 10^4 \text{ Hz}$

$V_{\text{ondes radio}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$   
 $\Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^4} = 10^4 \text{ m}$

Pour que l'onde contourne l'obstacle, il faut que  $x$  (dimensions de la colline) soit  $< \lambda$


$\Rightarrow x < \lambda \Rightarrow 100 < 10^4 ? \Rightarrow \text{oui, } x \text{ est } < \lambda$   
 $\Rightarrow \text{il y aura diffraction et l'onde sera perçue derrière la colline}$

oui

**EXERCICE 2**

Les chauves-souris émettent des sons de haute fréquence pour situer les objets qui les entourent. La fréquence la plus élevée émise par une espèce de chauve-souris est égale à 50 kHz. Quelles sont les dimensions minimales des insectes qu'elle pourra détecter fidèlement ?

$f = 50 \cdot 10^3 \text{ Hz}$   
 $v = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$   
 $\Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{50 \cdot 10^3}$   
 $\Rightarrow \lambda = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



$x ?$

6,8 mm

Pour que la chauve-souris détecte l'insecte, elle doit éviter la diffraction pour favoriser la réflexion  $\Rightarrow$  elle doit réaliser la condition  $x > \lambda$

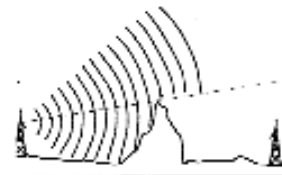
$\Rightarrow x > 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \Rightarrow$  les dimensions minimales de l'insecte sont de  $6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 6,8 \text{ mm}$ . (si l'insecte a des dimensions inférieures à  $6,8 \text{ mm}$ , il ne sera pas détecté car il y aura diffraction.

**EXERCICE 3**

Une station radio émet sur une fréquence de 101 MHz. Les habitants d'un village situé au fond d'une vallée, dont les dimensions sont de l'ordre du kilomètre vont-ils bien capter cette station ?

$f = 101 \cdot 10^6 \text{ Hz}$   
 $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$\left. \begin{array}{l} f = 101 \cdot 10^6 \text{ Hz} \\ v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \end{array} \right\} \lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{101 \cdot 10^6} = 2,97 \text{ m}$



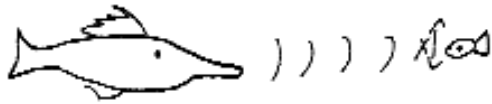
Dans ce cas, il faut que l'onde contourne l'obstacle,  
 $\Rightarrow$  il faut de la diffraction  
 $\Rightarrow$  il faut  $x < \lambda$  OR  $1000 > 2,97 \Rightarrow$  Non, les habitants ne captent pas l'onde.

$x = 1000 \text{ m}$  et  $1000 \text{ m} > 2,97 \text{ m}$

**EXERCICE 4**

Pour se situer par rapport à d'éventuels obstacles, un dauphin produit des ultrasons de fréquence  $f=40$  kHz.

Quelle est la dimension de la plus petite proie que le dauphin peut attraper, les yeux fermés ?



$\Rightarrow$  Pour qu'il y ait détection, les ondes ne doivent pas être diffractées (pour être réfléchies)

$\Rightarrow X > \lambda \Rightarrow X > 0,0375 \text{ m} = 3,75 \text{ cm}$

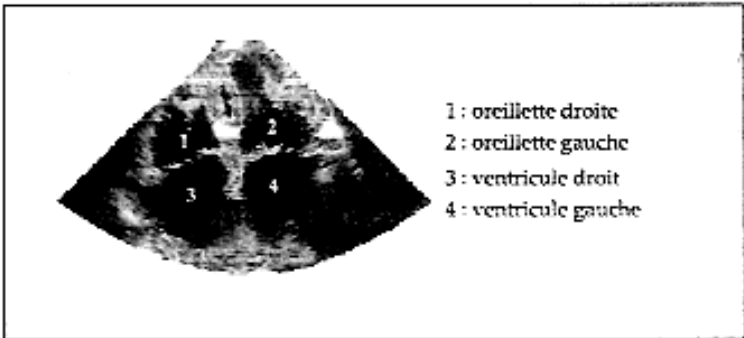
$\Rightarrow X_{\text{minimale}} = 3,75 \text{ cm}$

$$\begin{aligned} f &= 40 \cdot 10^3 \text{ Hz} \\ v &= 1500 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (Vitesse dans l'eau)} \\ \lambda &= \frac{v}{f} = \frac{1500}{40000} = 0,0375 \text{ m} \end{aligned}$$

$X = 3,75 \text{ cm}$

**EXERCICE 5**

Des ondes ultrasonores de fréquence 2,00 MHz sont utilisées pour réaliser l'échographie du cœur. Dans les tissus cardiaques, leur vitesse de propagation est de l'ordre de 1,5 km/s.



$f = 2 \cdot 10^6 \text{ Hz}$   
 $v = 1500 \text{ m/s}$

$\Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{1500}{2 \cdot 10^6} = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

Ces ondes peuvent-elle être diffractées par le cœur ?

Pour qu'il y ait diffraction, il faut  $X < \lambda$

Or  $X = \text{dimensions du cœur}$   
et  $\lambda = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

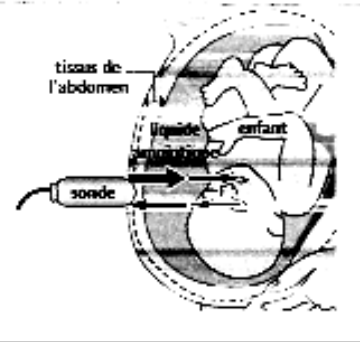
$\Rightarrow$  le cœur a des dimensions supérieures à  $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

$\Rightarrow$  Non, il n'y aura pas de diffraction.

NON

**EXERCICE 6**

L'échographie est une technique d'imagerie médicale fréquemment utilisée notamment pour suivre le développement des fœtus et la détection d'anomalies éventuelles.



Un examen échographique est réalisé avec une sonde qui émet des impulsions ultrasonores de fréquence 4 MHz. La vitesse des ondes dans le milieu concerné est de 1540 m/s.

*Cet examen fonctionne comme un sonar en numérisant le signal réfléchi en image.*

a) Explique pourquoi on utilise des ultrasons plutôt que des ondes de plus petite fréquence

$$\left. \begin{array}{l} f = 4 \cdot 10^6 \text{ Hz} \\ v = 1540 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{1540}{4 \cdot 10^6} = 0,000385 \text{ m} \approx 0,4 \text{ mm}$$

*=> On utilise des ultrasons pour pouvoir détecter des organes de dimensions  $x > 0,4 \text{ mm}$*

*Si on utilisait des ondes de plus petite fréquence (= de plus grande  $\lambda$ ), on ne détecterait pas des organes de petites dimensions (de l'ordre de  $0,4 \text{ mm}$ )*

b) L'appareil décrit permet-il de détecter un embryon qui ne mesure que 5 mm ? Justifie ta réponse

$$x = 5 \text{ mm}$$

$$\lambda = 0,4 \text{ mm}$$

*Évite la diffraction*

$$\Rightarrow x > \lambda ?$$

$$\text{oui } 5 \text{ mm} > 0,4 \text{ mm}$$

oui

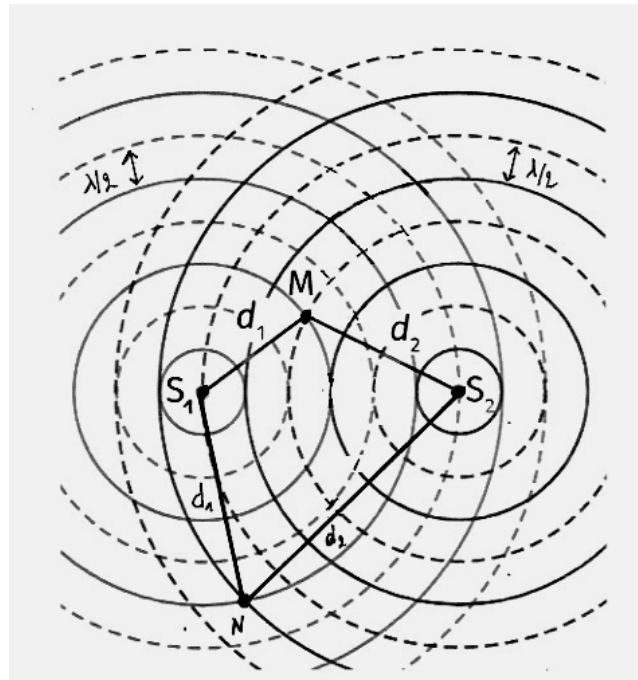
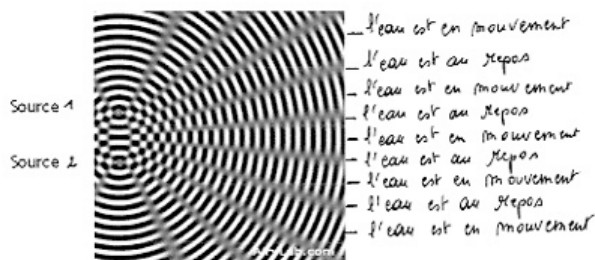


FIG. 29 :

### 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 observé 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'elles n'ont pas parcouru la même distance.

Dans notre exemple ci-contre :

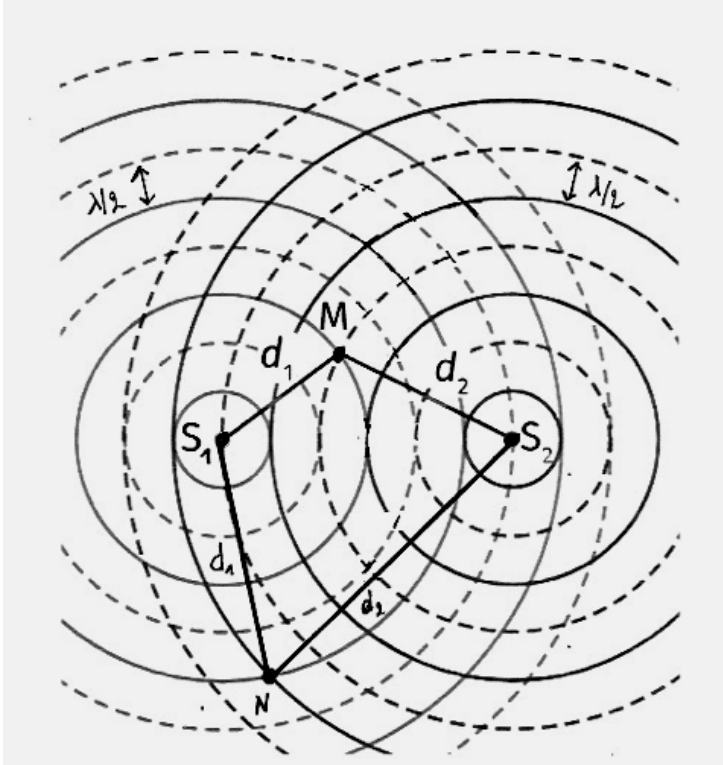
1) La distance  $d_1$  parcourue par l'onde provenant de  $S_1$  jusque M est égale à  $3 \lambda/2$  (trois demi-longueur d'onde). Regardez sur le schéma.

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

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

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<sub>1</sub> est une crête tandis que l'onde provenant de S<sub>2</sub> est un creux. Donc, au point M, l'eau sera au repos. On parlera *d'interférence destructive*.

Nous appellerons  $d_2 - d_1$  la *différence de marche*.

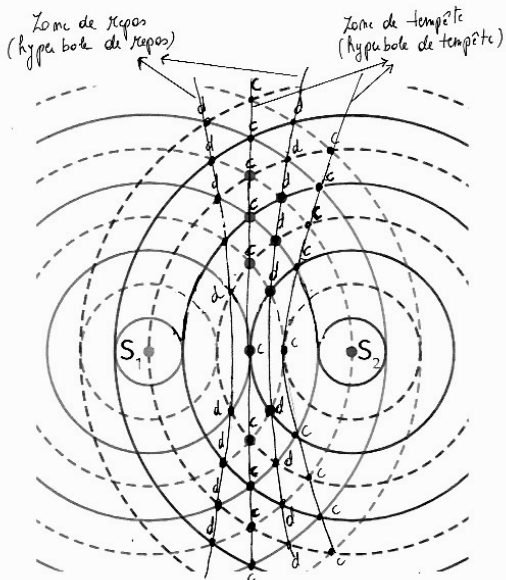


*Considérons le point N.*

L'onde produite par S<sub>1</sub> a parcouru une distance d<sub>1</sub> pour arriver en N et l'onde produite par S<sub>2</sub> a parcouru une distance d<sub>2</sub> pour arriver en N. Les deux ondes arrivent donc au point M avec un déphasage.

- 1) La distance d<sub>1</sub> parcourue par l'onde provenant de S<sub>1</sub> jusque M est égale à 5 /2 (cinq demi-longueur d'onde). Regardez sur le schéma.
- 2) La distance d<sub>2</sub> parcourue par l'onde provenant de S<sub>2</sub> jusque N est égale à 7 /2 (sept demi-longueur d'onde).
- 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<sub>1</sub> est une crête et de même, l'onde provenant de S<sub>2</sub> 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*

Si  $\frac{|d_2 - d_1|}{\frac{\lambda}{2}}$  est pair  $\Rightarrow$  il s'agit d'une interférence constructive  
 est impair  $\Rightarrow$  il s'agit d'une interférence destructive

FIG. 30 :

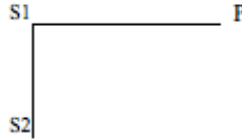


FIG. 31 :

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.

### 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



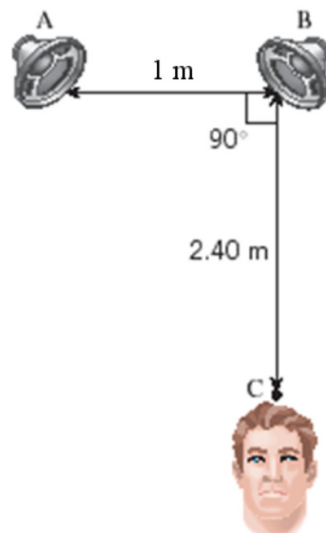
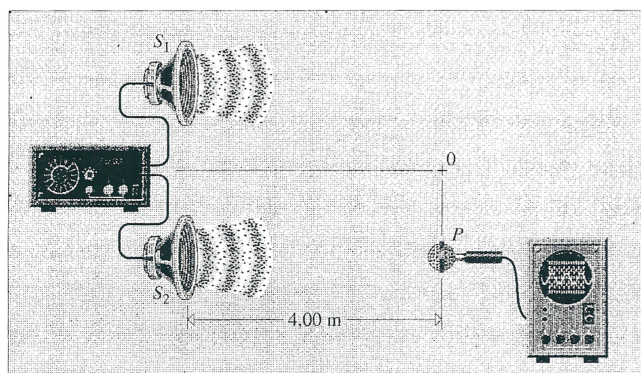


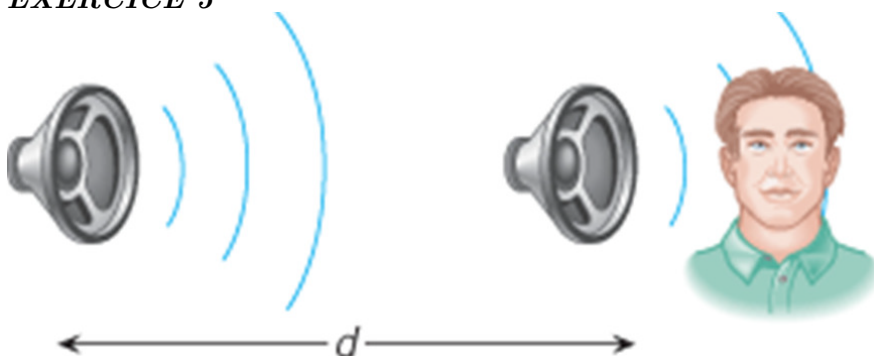
FIG. 32 :



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 ?

### 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





FIG. 33 :

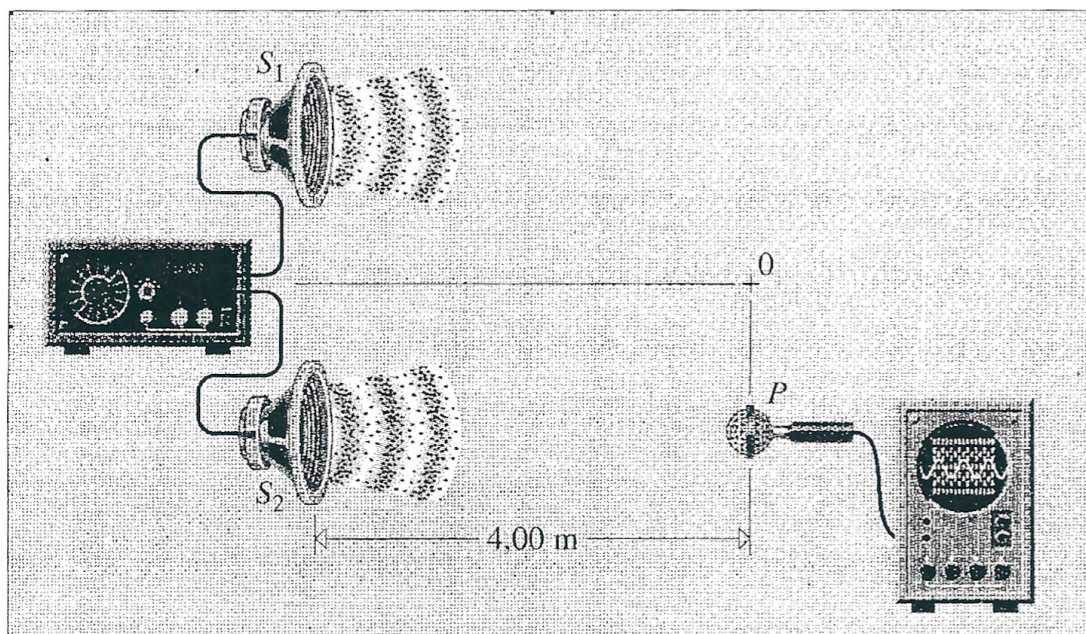


FIG. 34 :

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**

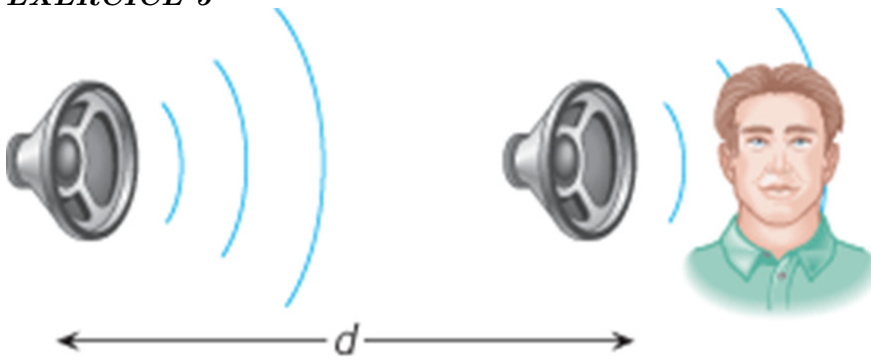
Deux haut-parleurs S1 et S2 distants de 6 m émettent des ondes sonores en concordance de phase. Le point P de la figure est à 8 m de S1. Quelle est la fréquence minimale à laquelle l'intensité en P est :

- a) nulle ?
- a) maximale ?

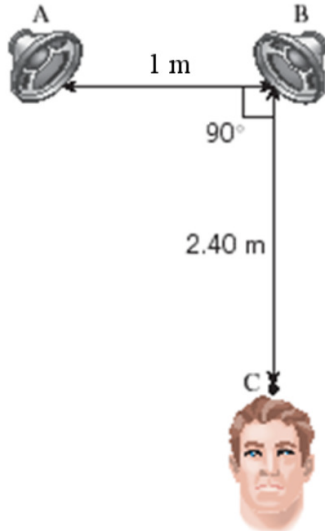
### **EXERCICE 4**

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.

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 ?

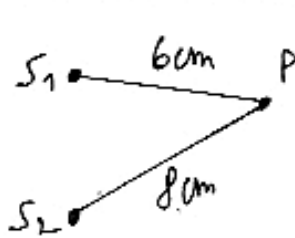
**EXERCICE 6**

Les haut-parleurs de la figure émettent des ondes sonores en 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 3 cm

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



$$\left. \begin{array}{l} f = 5 \text{ Hz} \\ v = 10 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \end{array} \right\} \lambda = \frac{v}{f} = \frac{10}{5} = 2 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \frac{\lambda}{2} = 1 \text{ cm}$$

$$A = 3 \text{ cm}$$

$$d_1 = 6 \text{ cm}$$

$$d_2 = 8 \text{ cm}$$

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

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

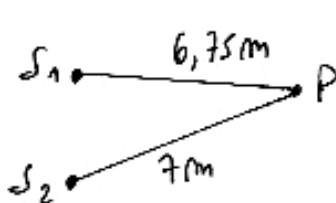
$$\frac{|d_2 - d_1|}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{|8 - 6|}{1} = 2 \Rightarrow \text{pair} \Rightarrow \text{IC}$$

$\Rightarrow$  l'amplitude en P sera le double de l'amplitude des sources.  $\Rightarrow A_R = 6 \text{ cm}$

$$A_R = 6 \text{ cm}$$

**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 ?



$$\left. \begin{array}{l} f = 680 \text{ Hz} \\ v_{\text{son}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{array} \right\} \lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{680} = 0,5 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \frac{\lambda}{2} = 0,25 \text{ m}$$

$$d_1 = 6,75 \text{ m}$$

$$d_2 = 7 \text{ m}$$

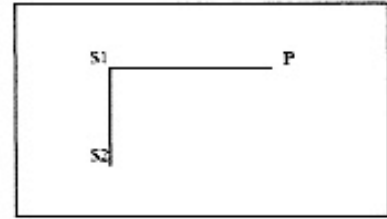
$$\frac{|d_2 - d_1|}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{|7 - 6,75|}{0,25} = \frac{0,25}{0,25} = 1 \Rightarrow \text{Les ondes vont arriver en P décalés d'une } \frac{\lambda}{2} \text{ (impair)} \Rightarrow \text{en opposition de phase}$$

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

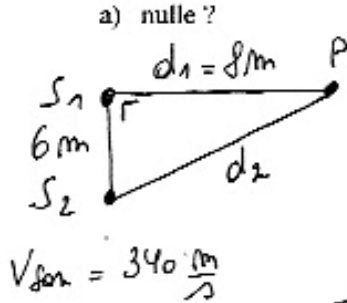
$$A_R = 0$$

**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 ?



$$1) f ? \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

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

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

$$\Rightarrow |d_2 - d_1| = \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f} \Rightarrow f = \frac{v}{2|d_2 - d_1|} \quad \leftarrow f ?$$

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

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

$$f = 85 \text{ Hz}$$

b) maximale ?  $\Rightarrow$  Interférence constructive

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

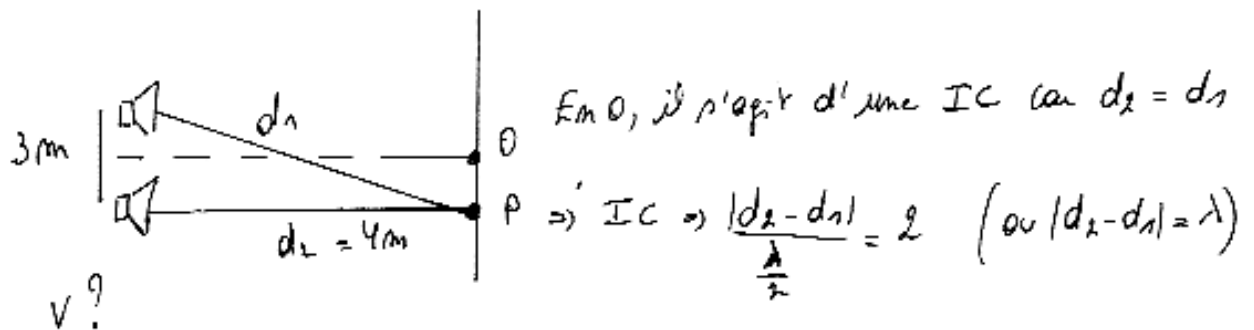
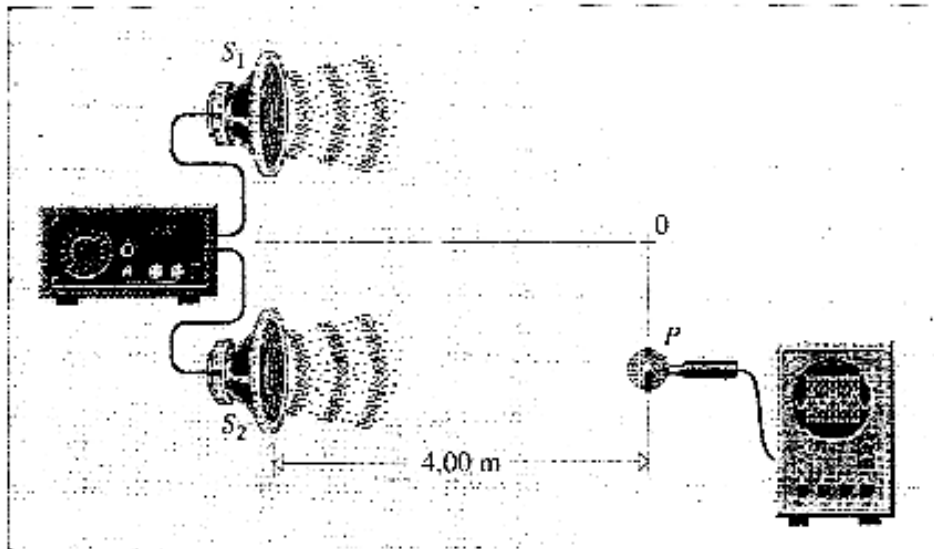
$$\Rightarrow f = \frac{v}{|d_2 - d_1|} = \frac{340}{2} = 170 \text{ Hz}$$

$$f = 170 \text{ Hz}$$

**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  $S_1S_2$  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)



$$\Rightarrow |d_2 - d_1| = \lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow v = f |d_2 - d_1| \stackrel{v?}{<} d_1?$$

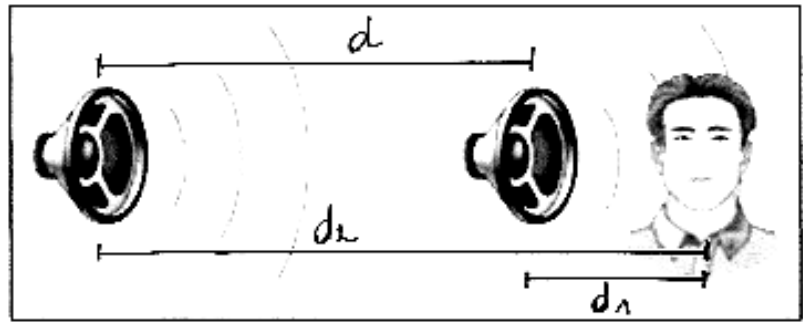
$$d_1 = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{25} = 5 \text{ m}$$

$$\Rightarrow v = 344 \cdot |4 - 5| = 344 \text{ m/s}$$

$$v = 344 \text{ m/s}$$

**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?



$$\lambda = 25 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

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

$$\text{or } |d_2 - d_1| = d$$

$$\Rightarrow d = \frac{\lambda}{2} = 12,5 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 12,5 \text{ cm}$$

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

**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?

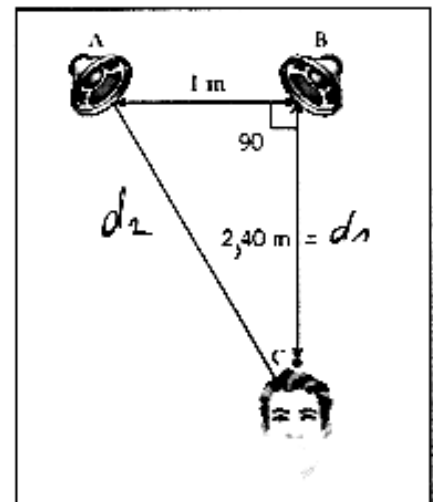
$f_{\text{minimale}} ?$

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

$$\Rightarrow f = \frac{v}{2|d_2 - d_1|} \quad \left\{ \begin{array}{l} f ? \\ d_2 ? \end{array} \right.$$

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

$$\Rightarrow f = \frac{340}{2 \cdot |2,6 - 2,4|} = \frac{340}{2 \cdot 0,2} = 850 \text{ Hz}$$



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

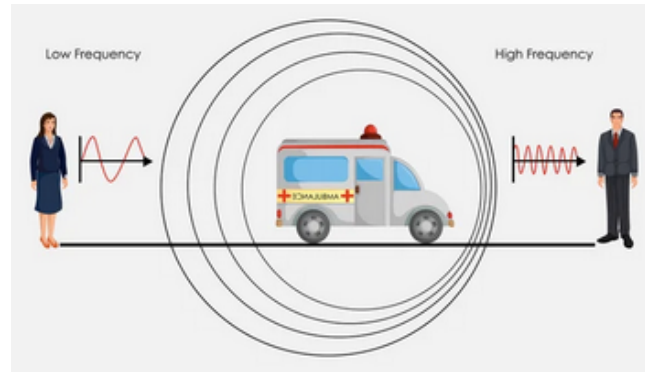


FIG. 35 :

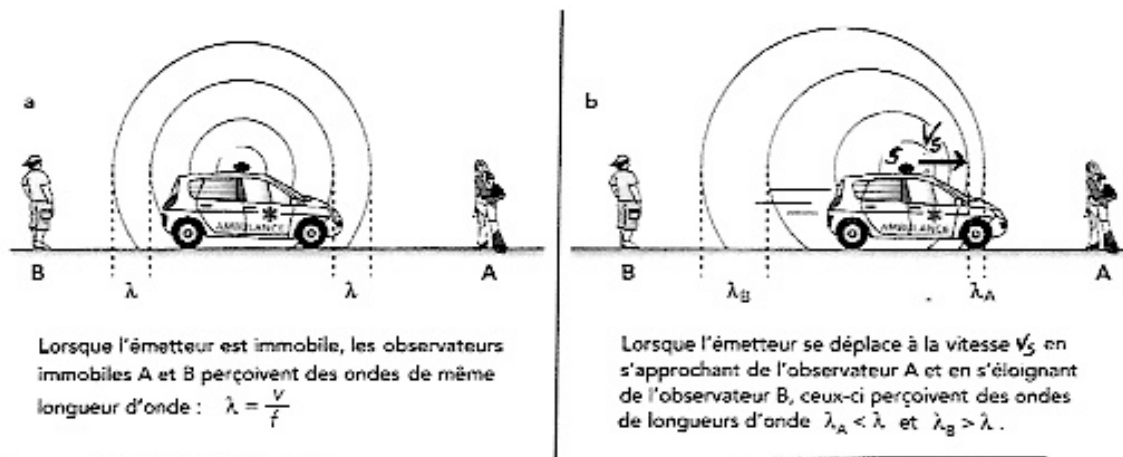


FIG. 36 :

## 19 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 :

- L'observateur s'éloigne ou se rapproche de la source fixe.
- La source s'éloigne ou se rapproche d'un observateur fixe.

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

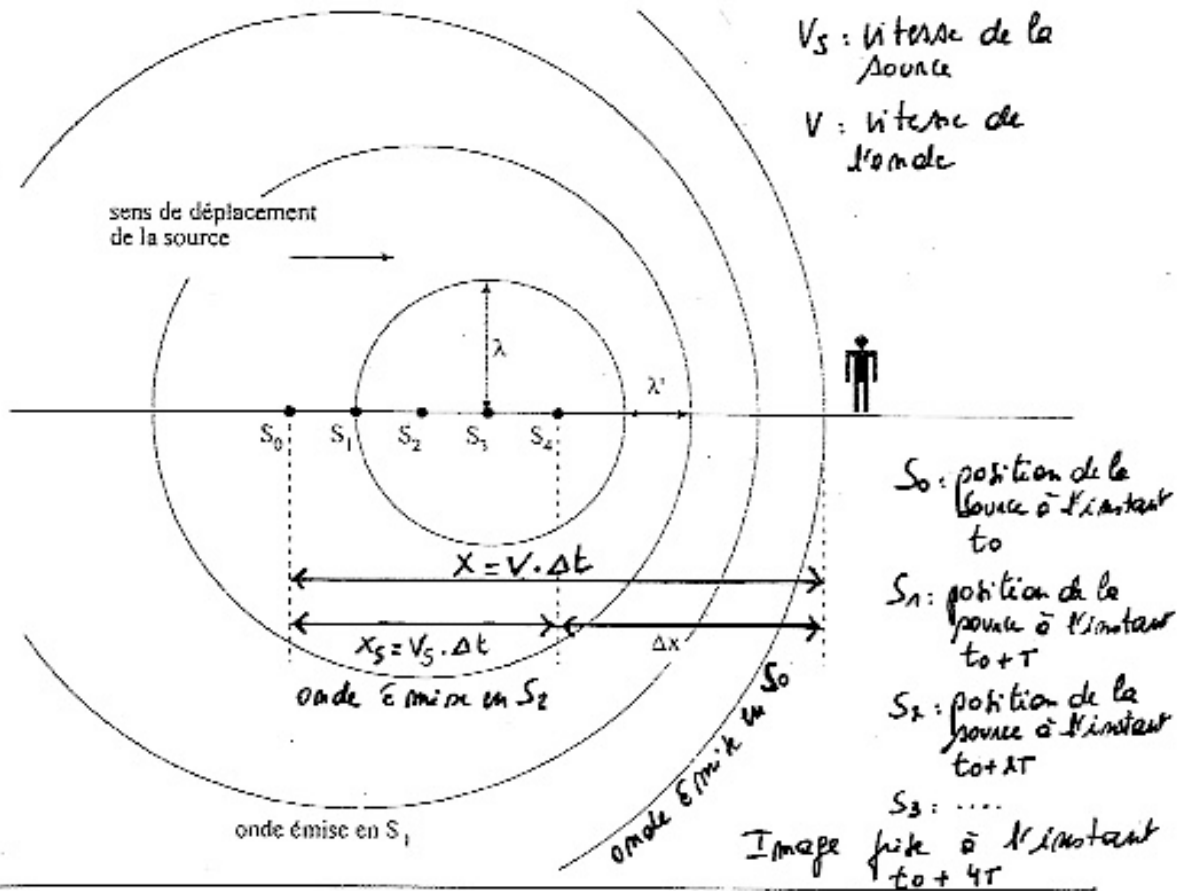
La différence de fréquence entre celle émise et celle perçue est due à une variation de la longueur d'onde perçue par l'observateur.

#### 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



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 part 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 :  $\Delta X = v \cdot \Delta t - v_s \cdot \Delta t = mbc \cdot \lambda'$
- OR, pendant cet intervalle de temps  $\Delta t$ , le nombre d'ondes émises par la source =  $f \cdot \Delta t \Rightarrow mbc = f \cdot \Delta t$ 
  - ⇒  $\Delta X = f \cdot \Delta t \cdot \lambda'$
  - et  $\Delta X = v \cdot \Delta t - v_s \cdot \Delta t \Rightarrow v \cdot \Delta t - v_s \cdot \Delta t = f \cdot \Delta t \cdot \lambda'$
  - ⇒  $v - v_s = f \cdot \lambda' \Rightarrow \lambda' = \frac{v - v_s}{f}$
- OR  $\lambda' = \frac{v}{f'} \Rightarrow \frac{v}{f'} = \frac{v - v_s}{f} \Rightarrow \frac{f'}{v} = \frac{f}{v - v_s}$
- où  $v = v_{\text{onde}}$  (qui est constante)

$$\boxed{f' = f \frac{v}{v - v_s}}$$

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 :



## Effet Doppler - Synthèse

1) Observateur fixe - source mobile à vitesse  $v_s$

$$f' = f \left( \frac{v}{v \mp v_s} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} v_s : v_{\text{source}} \\ v : v_{\text{onde}} \end{array} \right\} v_s < v$$

$f$  : 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  $v_{\text{obs}}$

$$f' = f \left( \frac{v \pm v_{\text{obs}}}{v} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} v_{\text{obs}} : \text{vitesse de l'observateur} \\ v : v_{\text{onde}} \end{array} \right\}$$

$f$  : 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 ( $f' < f$ )

FIG. 37 :

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. Ce 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.

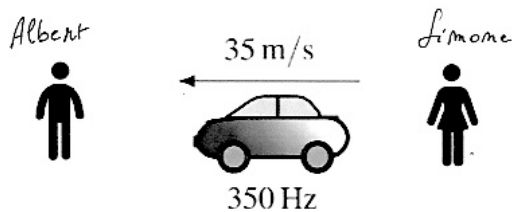
**Exercice 4 (N°20 du livre p 80)**

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 430 Hz. 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.

- Quelle est la fréquence du son entendu par Albert ?
- Quelle est la longueur d'onde du son perçu par Albert ?
- Quelle est la fréquence du son entendu par Simone ?
- Quelle est la longueur d'onde du son perçu par Simone ?

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

**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 ?

(Rép : 7314 m/s)

## 20 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 :

- vers l'observateur ?
- en s'éloignant de l'observateur ?

**Exercice 3 (N°19 du livre p 80)**

Une source sonore émet à une fréquence de 600 Hz. Ce 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.

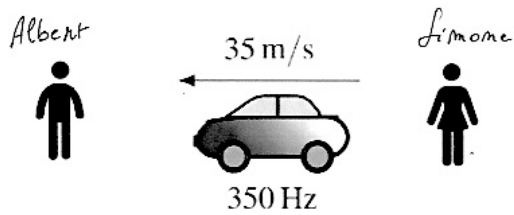
**Exercice 4 (N°20 du livre p 80)**

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 430 Hz. 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.

- Quelle est la fréquence du son entendu par Albert ?
- Quelle est la longueur d'onde du son perçu par Albert ?
- Quelle est la fréquence du son entendu par Simone ?
- 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 ?

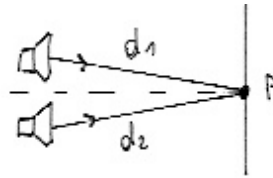


FIG. 38 :

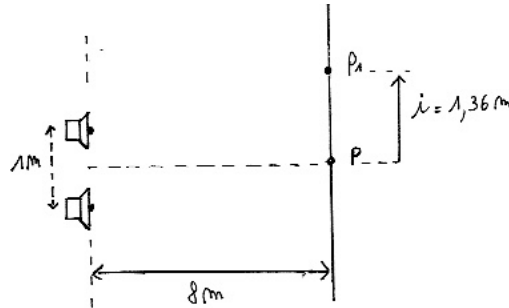
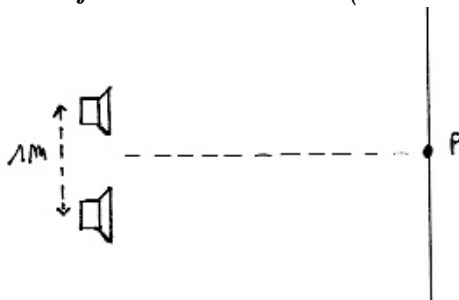


FIG. 39 :

**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 :

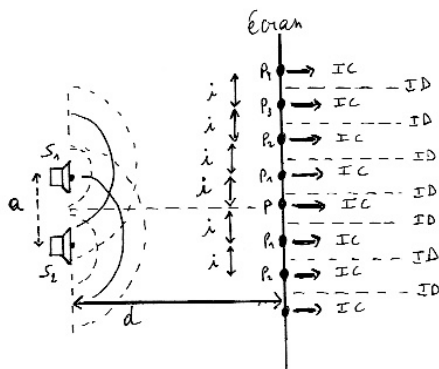
P est situé en un point tel que  $d_1=d_2$  la différence de marche  $d_2 - d_1$  est nulle et donc les ondes arrivent au point P en concordance de phase. Il s'agit d'un point d'interférence constructive et l'intensité du son en P sera maximale.

**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 ?

**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

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

1) Soit le triangle rectangle  $S_1 P_1 H$

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

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

$$\Rightarrow d_1 = 8,046 \text{ m}$$

2) Soit le triangle rectangle  $S_2 P_1 N$

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

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

$$\Rightarrow d_2 = 8,213 \text{ m}$$

Calculons  $|d_2 - d_1|$

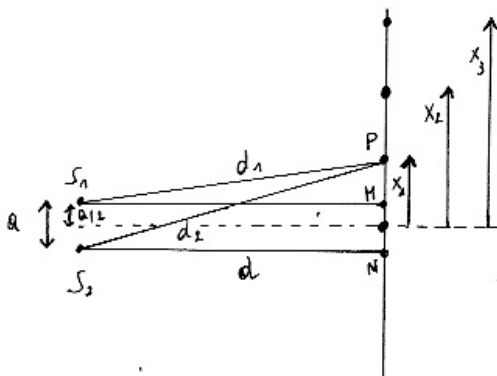
$$|d_2 - d_1| = |8,213 - 8,046| = 0,17 \text{ et } \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{f} = \frac{340}{2.1000} = 0,17$$

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

FIG. 40 :

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  $\lambda$ ,  $a$  et  $d$  où :

- $\lambda$  : 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 :  $x_1 = i, x_2 - x_1 = i, x_3 - x_2 = i, \dots$

$x$  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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\Rightarrow \frac{xa}{d} = k\lambda \Rightarrow \text{A chaque } k, \text{ on peut associer un } x, \text{ a}} \ll \text{ alors } \cdot \text{ le } x_k$$

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

FIG. 41 :

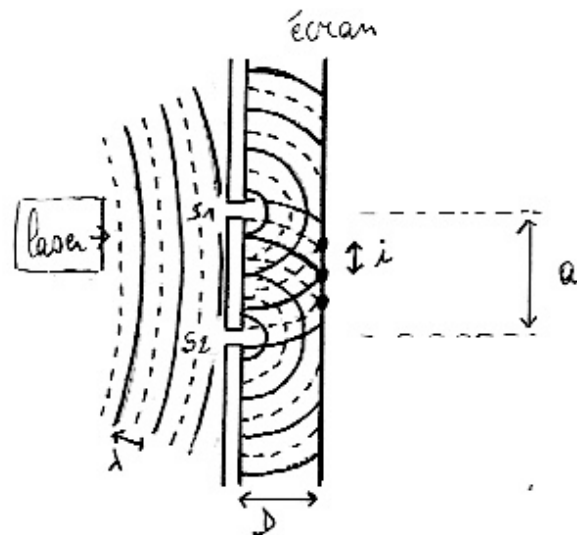
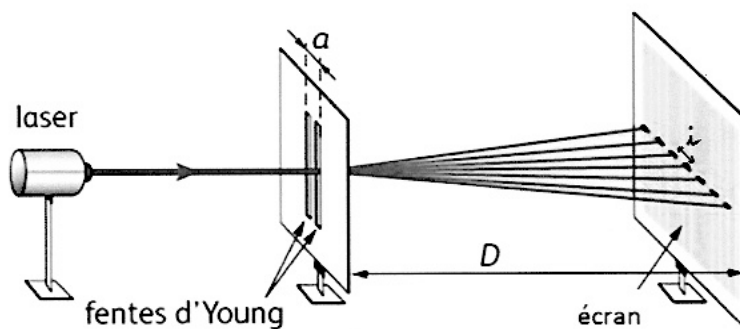


FIG. 42 :

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

FIG. 43 :



*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  $S_1$  et  $S_2$  vont se comporter comme de nouvelles sources et diffracter la lumière incidente provenant du laser.

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 démon-

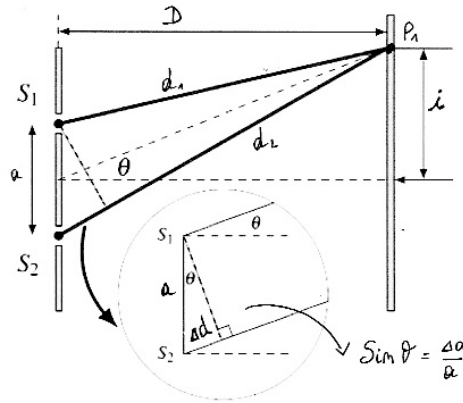


FIG. 44 :

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

FIG. 45 :

tration).

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<sub>1</sub>, un point d'interférence constructive situé juste après le point central, notons la position angulaire de ce point.

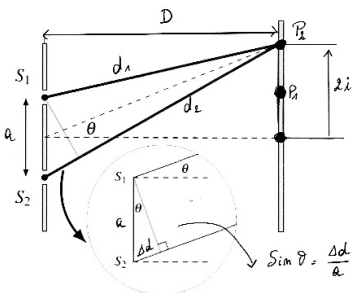
En ce point P<sub>1</sub>, l'interférence étant constructive, la différence de marche  $d = d_2 - d_1 =$

En faisant l'approximation déjà réalisée précédemment, à savoir :  $a \ll D$  et  $i \ll D$ , nous pouvons considérer que les rayons lumineux d<sub>1</sub> et d<sub>2</sub> sont quasiment parallèles.

En considérant le triangle rectangle représenté sur le schéma :

$$d = a \sin \theta$$

Nous avons donc que :  $d = a \sin \theta$  et donc :



**Généralisation**

- Considérons un point P<sub>2</sub>

En ce point P<sub>2</sub>, l'interférence étant constructive, la différence de marche  $d = d_2 - d_1 = 2\lambda$

En considérant le triangle rectangle représenté sur le schéma :  $d = a \sin \theta$

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

Donc :

En continuant le raisonnement de la sorte pour des points :

P<sub>3</sub> distant de 3i du point central,

P<sub>4</sub> distant de 4i du point central,

P<sub>5</sub> distant de 5i du point central, ...

Nous arrivons à :

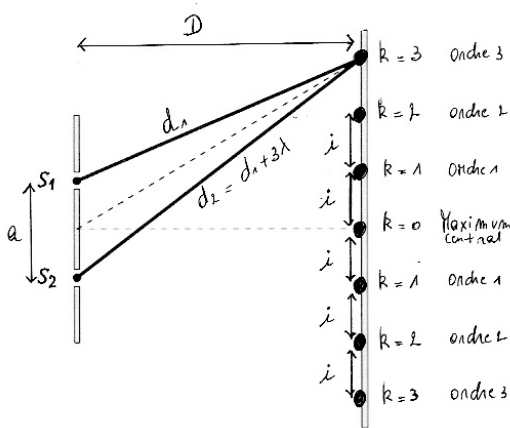


$$\sin \theta = \frac{k\lambda}{a}$$

FIG. 46 :

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

FIG. 47 :



Synthèse :

4) Applications

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

$$\left. \begin{array}{l} D = 1,75 \text{ m} \\ a = 10^{-3} \text{ m} \\ i = 10^{-3} \text{ m} \\ \lambda ? \end{array} \right| \lambda = \frac{i a}{D} = \frac{10^{-3} \cdot 10^{-3}}{1,75} = 5,71 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

OR  $1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$

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

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

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

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

FIG. 48 :

$D = 4,95 \text{ m}$   
 $a = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $i = 1,32 \cdot 10^2 \text{ m}$

$\lambda = \frac{ia}{D} = \frac{1,32 \cdot 10^2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{4,95} = 5,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}$   
 $\Rightarrow \lambda_{\text{vert}} = 533 \text{ nm}$

$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,33 \cdot 10^{-7}} = 5,63 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = f_{\text{vert}}$

Nous pouvons donc déterminer que :  $\lambda_{\text{jaune}} > \lambda_{\text{vert}}$   
 $f_{\text{jaune}} < f_{\text{vert}}$

$\lambda \leftarrow \text{jaune} \quad \text{vert} \rightarrow f$

FIG. 49 :

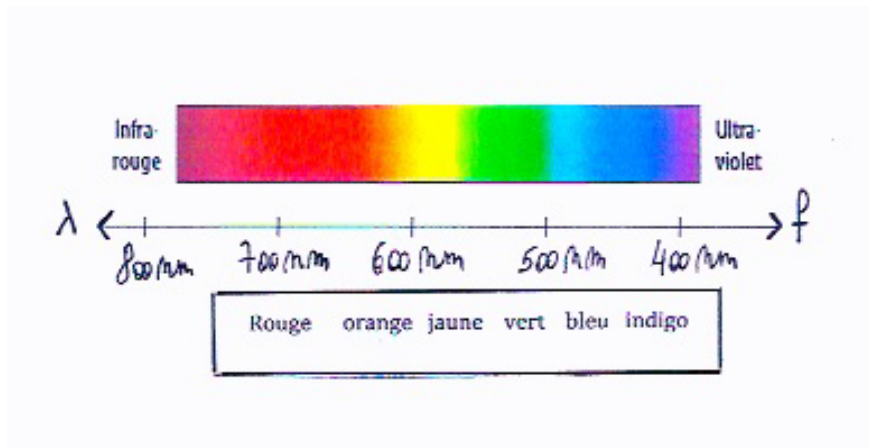


FIG. 50 :

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

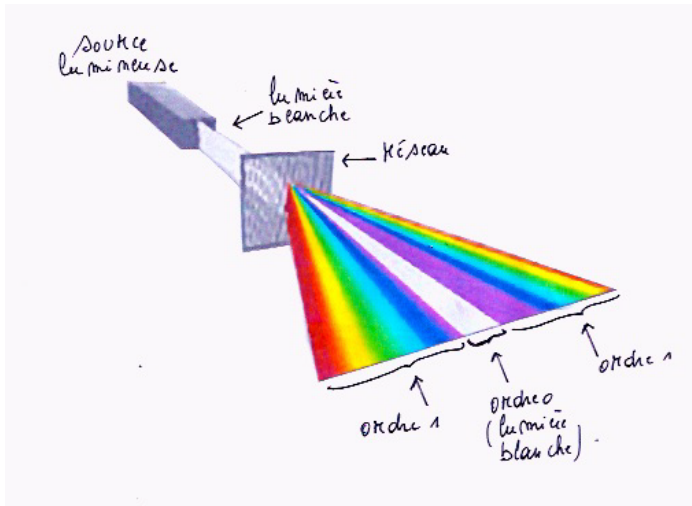
**c) Le spectre de la lumière blanche**

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  $f_{\text{jaune}}$   $f_{\text{vert}}$

Or la lumière blanche est composée de toutes les couleurs de l'arc en ciel. L'expérience de Young nous 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 ( $\theta = 0$ ) pour toutes les couleurs.

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}$$

☛ 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

### 21 Exercice 1

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

- Quelle est la position angulaire d'ordre 1 ? (Rép :  $0,34^\circ$ )
- 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.

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

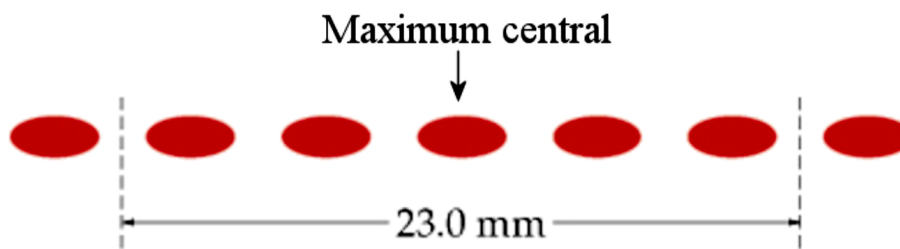
On remarque alors que le maximum d'ordre 4 est à 1 cm du maximum central sur un écran situé à 2 m des fentes. Quelle est la distance entre les fentes ? (Rép : 0,48 mm)

**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****22 Exercice 1**

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

- Quelle est la position angulaire du maximum d'ordre 1 ?
- 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.

- 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 :

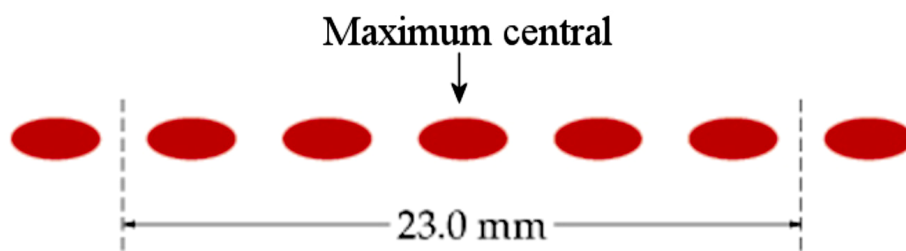
***Exercice 5***

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 :



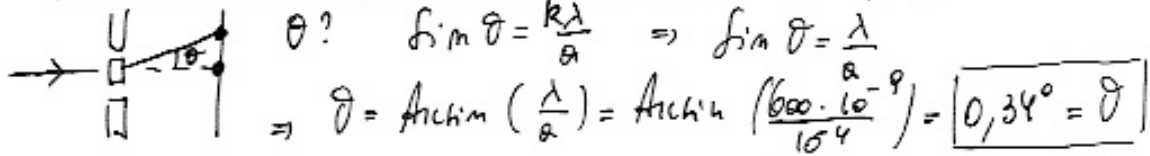
**EXERCICES**

**Exercice 1**

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

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

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



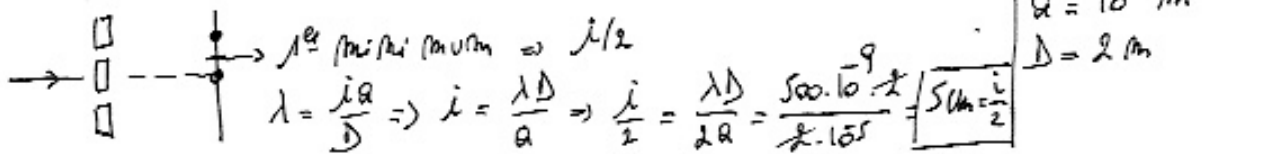
b) A quelle distance du point central se trouve ce maximum d'ordre 1 sur un écran situé à 3 mètres des fentes?

$\lambda?$   
 $D = 3 \text{ m}$   
 $\lambda = \frac{a\theta}{D} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda D}{a} = \frac{600 \cdot 10^{-9} \cdot 3}{10^{-4}} = 0,018 \text{ m} = \boxed{18 \text{ mm} = \lambda}$

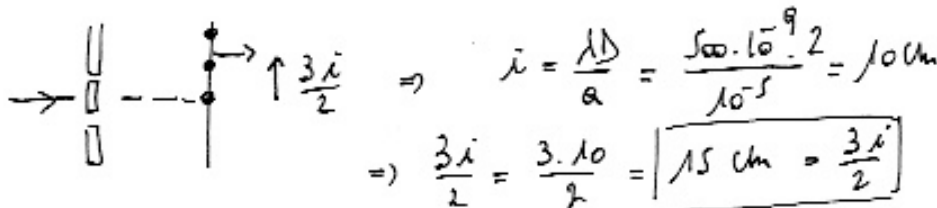
**Exercice 2**

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?

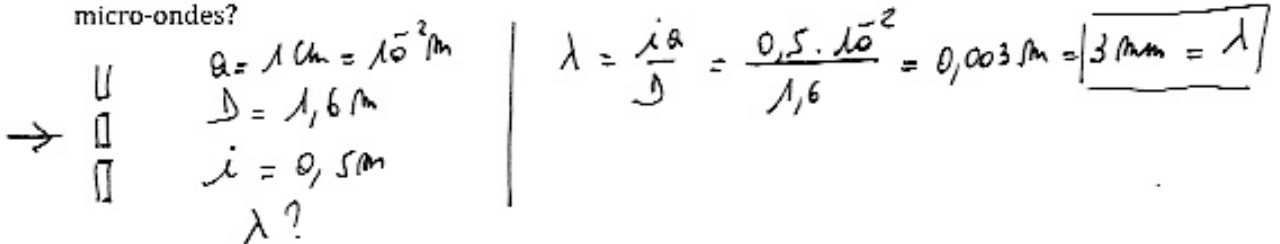


b) Quelle est la distance entre le maximum central et le deuxième minimum?



**Exercice 3**

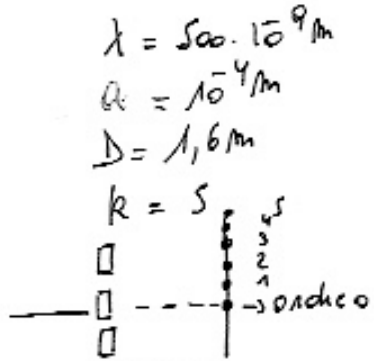
On fait passer des micro-ondes à travers deux fentes séparées de 1 cm. Sur un écran situé à 1,6 m de distance de la fente, on observe une interfrange de 50 cm. Quelle est la longueur d'onde des micro-ondes?





**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 :

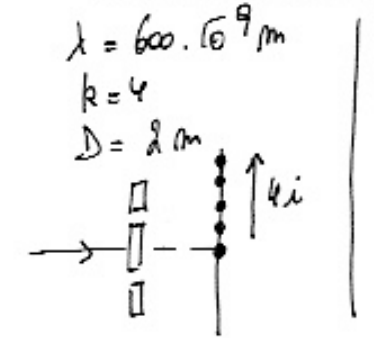


$\lambda = 500 \cdot 10^{-9} \text{ m}$   
 $a = 10^{-4} \text{ m}$   
 $D = 1,6 \text{ m}$   
 $k = 5$

$\theta$  pour  $5i$  ?  
 $\sin \theta = \frac{k\lambda}{a} \Rightarrow \sin \theta = \frac{5\lambda}{a}$   
 $\Rightarrow \theta = \text{Arcsin} \left( \frac{5\lambda}{a} \right) = \text{Arcsin} \left( \frac{5 \cdot 500 \cdot 10^{-9}}{10^{-4}} \right)$   
 $\theta = 1,43^\circ$

**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 :

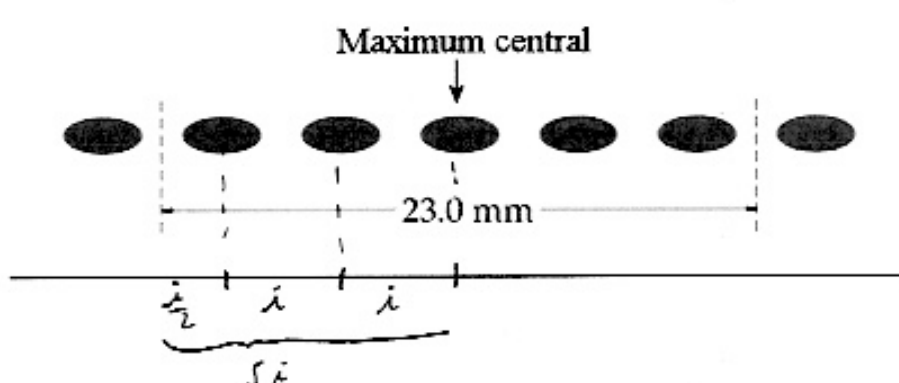


$\lambda = 600 \cdot 10^{-9} \text{ m}$   
 $k = 4$   
 $D = 2 \text{ m}$

$4i = 1 \text{ cm} \Rightarrow i = 2,5 \text{ mm} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $a = ?$   
 $a = \frac{\lambda D}{i} = \frac{600 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \boxed{0,48 \text{ mm} = a}$

**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 :



$\lambda = 632 \cdot 10^{-9} \text{ m}$   
 $a = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$   
 $D = ?$

$\Rightarrow 23 \text{ mm} \rightarrow \frac{10\lambda}{2} = 5i \Rightarrow i = \frac{23 \text{ mm}}{5} = 4,6 \text{ mm} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $\Rightarrow \lambda = \frac{i a}{D} \Rightarrow D = \frac{\lambda}{i a} = \frac{632 \cdot 10^{-9}}{4,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = \boxed{1,46 \text{ m} = D}$

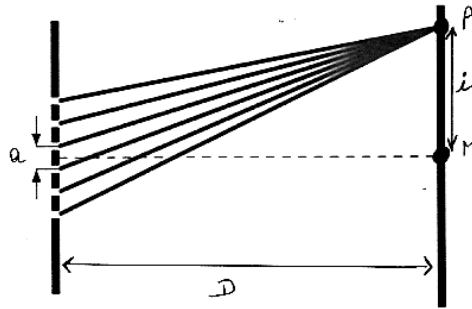


FIG. 51 :

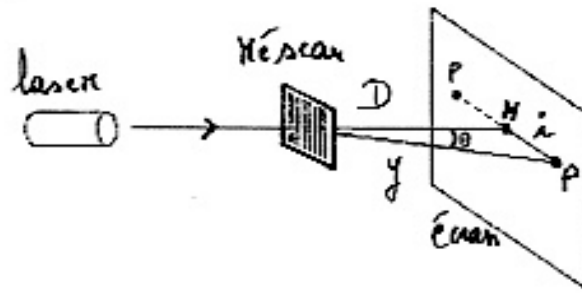
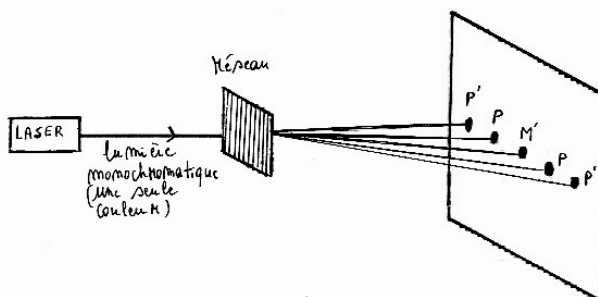


FIG. 52 :

### *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,  $P, P', \dots$  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  $i$ ,  $\theta$ ,  $a$  et  $D$ .*

Chaque fente étant très étroite, il y a une diffraction importante : on peut 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 entraîne 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 :

$i$  (l'interfrange),

$P$  est un point d'interférence constructive d'ordre  $n$  ( $k=n$ )  
 1)  $\Rightarrow \sin \theta = \frac{\lambda}{a}$   
 • Sur le schéma, nous voyons que :  
 $\sin \theta = \frac{i}{y}$  et  $y = \sqrt{D^2 + i^2}$   
 2)  $\Rightarrow \sin \theta = \frac{i}{\sqrt{D^2 + i^2}}$   
 En combinant 1) et 2)  $\Rightarrow \frac{\lambda}{a} = \frac{i}{\sqrt{D^2 + i^2}}$   
 $\Rightarrow \lambda = \frac{ia}{\sqrt{D^2 + i^2}}$   
 • Approximation : si  $i \ll d \Rightarrow D^2 + i^2 \approx D^2$   
 $\Rightarrow \lambda = \frac{ia}{\sqrt{D^2}} \Rightarrow \boxed{\lambda = \frac{ia}{D}}$  Et nous retrouvons l'expression démontrée suite à l'expérience de Young

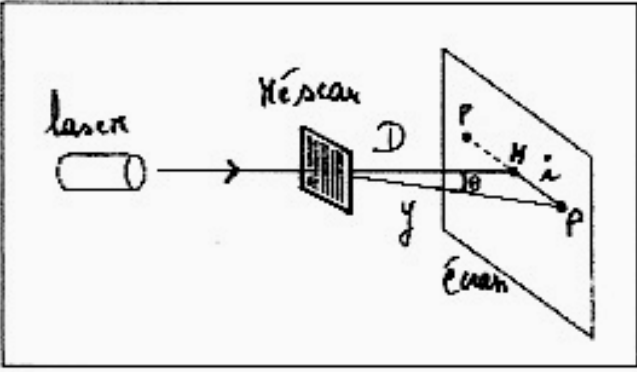


FIG. 53 :

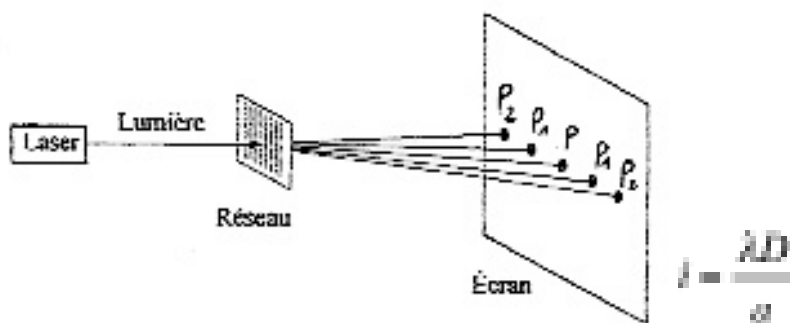
(l'angle de déviation)

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 de la lumière par un réseau - Synthèse



**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)

**23 Exercice 2**

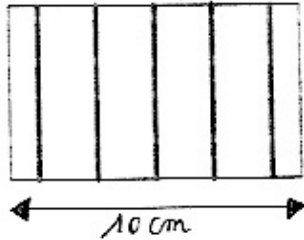
De la lumière de longueur d'onde égale à 550 nm éclaire selon la normale un réseau comprenant 400 traits par mm. Calcule l'angle sous lequel on observe les maxima pour les ordres 2 et 3.

(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 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  $\mu$ m.

- En déduire la longueur d'onde de la lumière monochromatique qui éclaire le réseau. (Rép : 435 nm)
- 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.

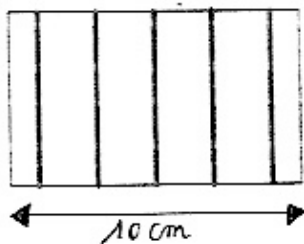
Quelle est la distance sur l'écran entre le maximum d'ordre 1 et le maximum central ?

**24 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  $\mu$ m.

- En déduire la longueur d'onde de la lumière monochromatique qui éclaire le réseau.
- 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?

$$\begin{aligned}
 300 \text{ fentes} &\rightarrow 10^{-3} \text{ m} \\
 1 \text{ fente} &\rightarrow \frac{10^{-3} \text{ m}}{300} \Rightarrow a = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m} \\
 \lambda &= 650 \cdot 10^{-9} \text{ m} \\
 \Delta ? \quad R = 1
 \end{aligned}
 \left| \begin{array}{l}
 \rightarrow \text{Diagramme} \\
 \lambda = \frac{i \cdot a}{\Delta} \Rightarrow i = \frac{\lambda \Delta}{a} \\
 \Rightarrow i = \frac{650 \cdot 10^{-9} \cdot 2,4}{3,33 \cdot 10^{-6}} = 0,468 \text{ m} = 468 \text{ mm} \\
 \boxed{i = 468 \text{ mm}}
 \end{array} \right.$$

**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.

$$\begin{aligned}
 \lambda &= 550 \cdot 10^{-9} \text{ m} \\
 400 \text{ traits} &\rightarrow 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m} \\
 1 \text{ trait} &\rightarrow \frac{10^{-3} \text{ m}}{400} \Rightarrow a = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}
 \end{aligned}
 \left| \begin{array}{l}
 \rightarrow \text{Diagramme} \\
 \text{ordre 2: } \sin \theta = \frac{2\lambda}{a} \Rightarrow \theta = \text{Arctan} \left( \frac{2\lambda}{a} \right) = \text{Arctan} \left( \frac{2 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{2,5 \cdot 10^{-6}} \right) = 26^\circ = \theta_2 \\
 \text{ordre 3: } \sin \theta = \frac{3\lambda}{a} \Rightarrow \theta = \text{Arctan} \left( \frac{3\lambda}{a} \right) = \text{Arctan} \left( \frac{3 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{2,5 \cdot 10^{-6}} \right) = 41,3^\circ = \theta_3
 \end{array} \right.$$

**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?

$$\begin{aligned}
 300 \text{ fentes} &\rightarrow 10^{-3} \text{ m} \Rightarrow 1 \text{ fente} \rightarrow \frac{10^{-3} \text{ m}}{300} \Rightarrow a = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m} \\
 D &= 2 \text{ m} \\
 \lambda_1 &= 589 \cdot 10^{-9} \text{ m} \\
 \lambda_2 &= 589,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}
 \end{aligned}
 \left| \begin{array}{l}
 \rightarrow \text{Diagramme} \\
 \Delta i = i_2 - i_1
 \end{array} \right.$$

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

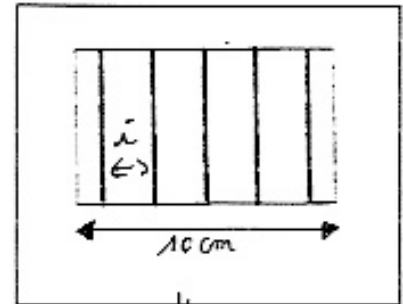
$$i_1 = \frac{\lambda_1 D}{a} = \frac{589 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{3,33 \cdot 10^{-6}} = 353,75 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 353,75 \text{ mm}$$

$$i_2 = \frac{\lambda_2 D}{a} = \frac{589,6 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{3,33 \cdot 10^{-6}} = 354,11 \text{ mm}$$

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

**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  $10 \mu\text{m}$ .



$$Si = 10 \text{ cm}$$

$$i = 2 \text{ cm} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

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

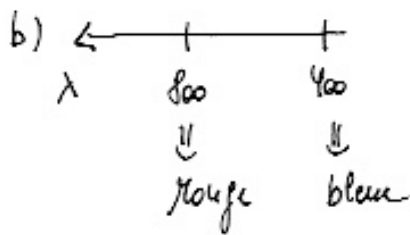
$$a) \quad d = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 10^{-5} \text{ m}$$

$$D = 0,46 \text{ m} = 46 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

a)  $\lambda$  ?

$$\lambda = \frac{d \cdot i}{D} = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-5}}{46 \cdot 10^{-2}} = 0,0435 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 435 \text{ nm}$$

$$\lambda = 435 \text{ nm}$$



$\Rightarrow$  C'est de la lumière bleue

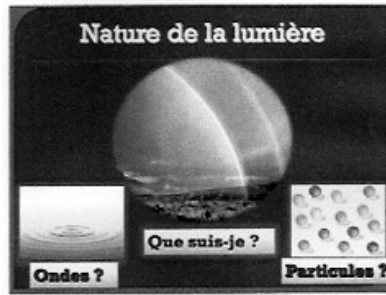


FIG. 54 :



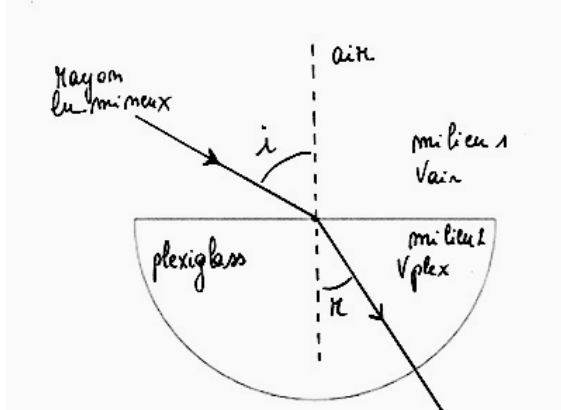
FIG. 55 :

### 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).

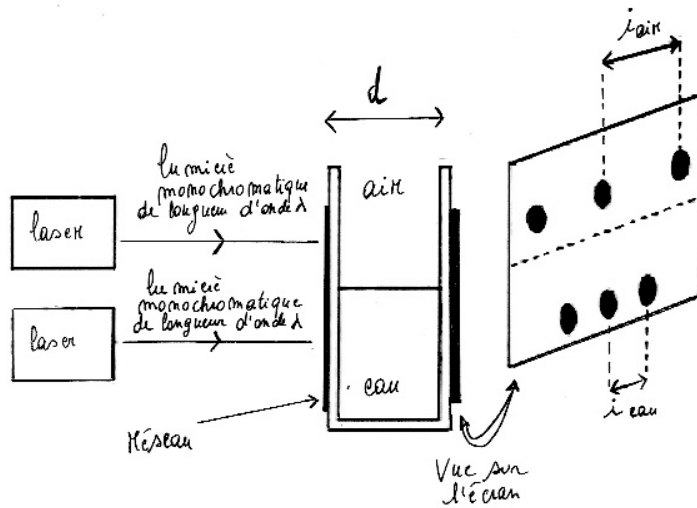
Il nous reste à savoir si  $v_1 > v_2$ , autrement dit, si la vitesse de la lumière dans l'air est plus grande que la vitesse de la lumière dans le plexiglas.

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 déterminé si la lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau (ou 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  $i_{\text{air}}$  et  $i_{\text{eau}}$ , nous pouvons calculer expérimentalement le rapport des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau ( $v_{\text{air}}/v_{\text{eau}}$ ).

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  $V = f \lambda$  et que

Conclusion : La lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau.

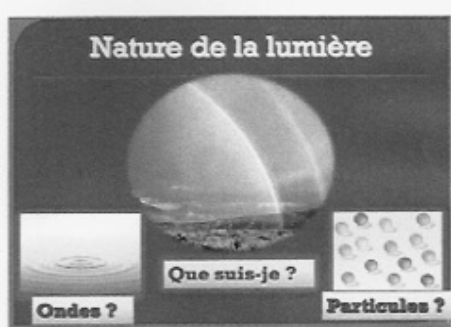
**La diffraction de la lumière par un réseau conduit à la conclusion que la lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau.**

### 2 . Réfraction de la lumière allant de l'air dans le plexiglas (ou dans l'eau)

## 25 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'avons réalisée dans l'air et dans l'eau), nous pouvons expérimentalement déterminer que *pour la lumière* :

$$v_{\text{air}} > v_{\text{plexiglas}} \quad (v_1 > v_2)$$

Et nous avons observé expérimentalement (voir figure ci-contre) :



$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{v_1}{v_2}$$

FIG. 56 :

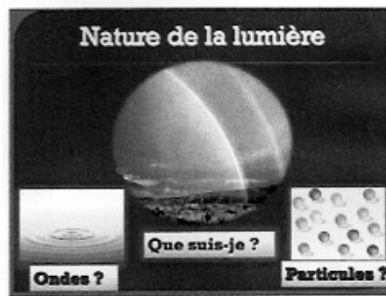
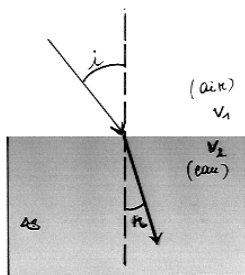


FIG. 57 :

$i$   $r$   
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  $v_{\text{air}} > v_{\text{eau}}$  ( $v_1 > v_2$ )

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<sup>e</sup> 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.

$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{V_1}{V_2}$$

FIG. 58 :

$$V = \frac{c}{n}$$

FIG. 59 :

### 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 :

$$n = \frac{c}{V} \frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

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.

Voici les indices de réfraction de quelques matériaux

(pour une onde lumineuse de longueur d'onde égale à 589 nm)

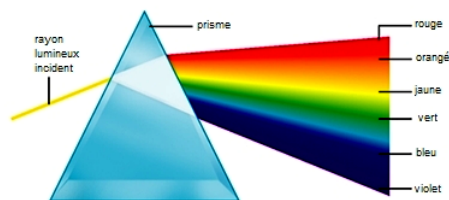
$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

FIG. 60 :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,33}{1}$$

FIG. 61 :

### Décomposition par réfraction de la lumière blanche dans un prisme



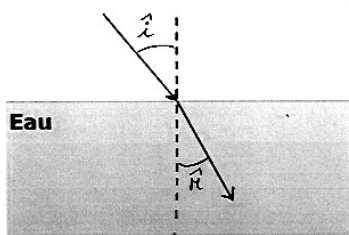
Décomposition par réfraction de la lumière blanche dans un prisme.

FIG. 62 :

26

27 *Exemple* : Comparer quantitativement la vitesse de la lumière dans l'air et celle dans l'eau

Air



$$n_{\text{air}} = 1$$

$$n_{\text{eau}} = 1,33$$

Donc, lorsque la lumière passe de l'air à l'eau :

$$\text{Donc } V_1 = 1,33 V_2$$

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.

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.

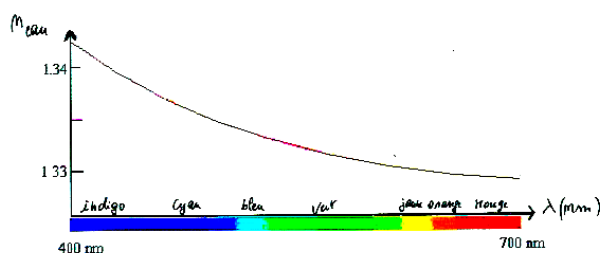


FIG. 63 :

$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

FIG. 64 :

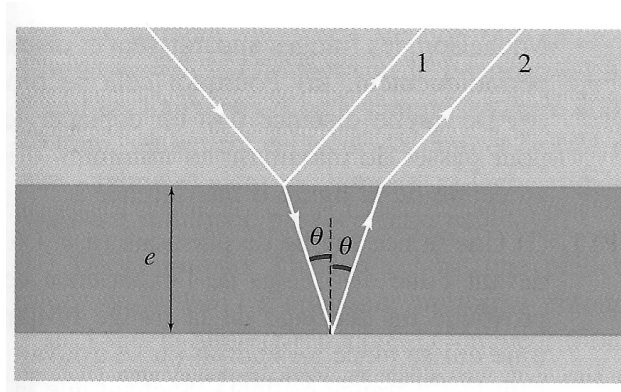


FIG. 65 :

$n_{\text{bleu}} > n_{\text{rouge}}$  pour un même milieu.

Chaque couleur de la lumière blanche possède une longueur d'onde qui lui est propre.

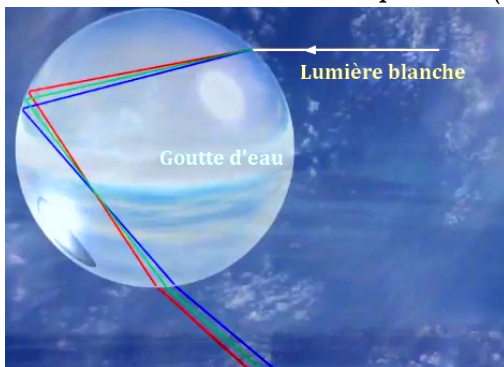
**Pour certaines longueurs d'onde, la lumière sera (très légèrement) plus lente que pour d'autres, ce qui explique que l'indice de réfraction dépende de la longueur d'onde.**

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  $n_{\text{bleu}} > n_{\text{rouge}}$  (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).**



#### 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 :*



FIG. 66 :

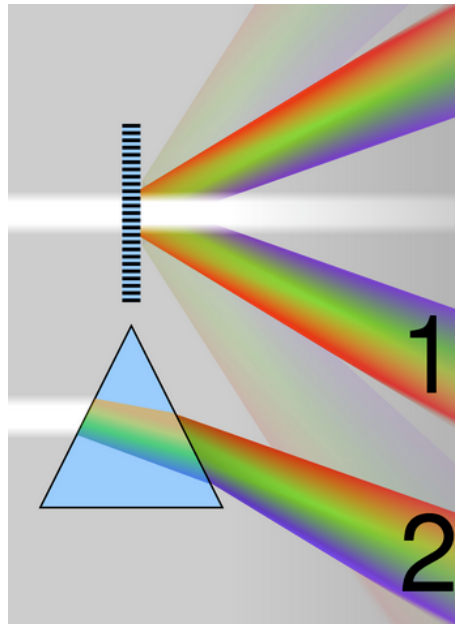


FIG. 67 :

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 réfléchiée par la première surface et l'autre partie par la seconde surface (après avoir subi deux réfractiions). (cfr schéma)

La première onde est réfléchiée par la partie supérieure de la surface. La seconde onde subit une réfractiion, une réflexion et une seconde réfractiion. 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 et constructives varient également, ce qui donne toute cette variété de couleurs.

**Application 3 - Différence entre diffraction de la lumière par un réseau et réfractiion de la lumière.**

**Figure 1 : diffraction de la lumière par un réseau**

Rappel : la diffraction de la lumière par un réseau et la décompositiion 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  $\lambda_{\text{bleu}} < \lambda_{\text{rouge}}$ ,  $\theta_{\text{bleu}} < \theta_{\text{rouge}}$

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 : réfractiion de la lumière par un prisme**

Rappel : la réfractiion 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 réfractiion inverse-

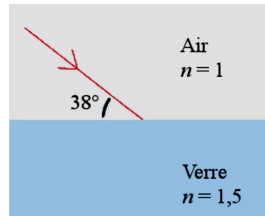


FIG. 68 :

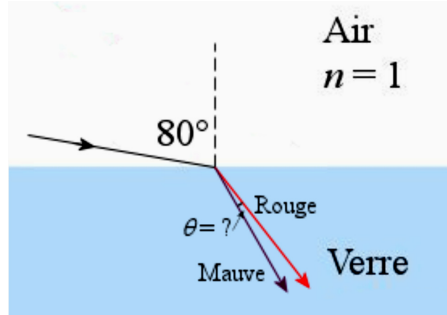
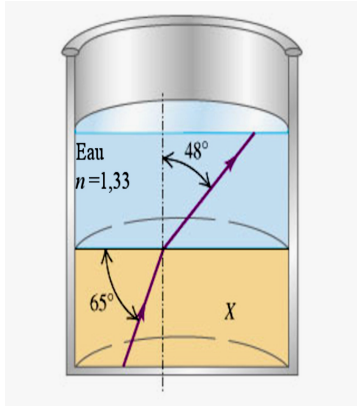


FIG. 69 :

ment proportionnel à son indice de réfraction.

$$n = \frac{c}{V} = \frac{c \sin(i)}{V \sin(r)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Comme  $n_{\text{bleu}} > n_{\text{rouge}}$  (pour un même milieu  $n_1$  et un même angle d'incidence  $i$ ),  $r_{\text{bleu}} < r_{\text{rouge}}$ .  
 La couleur bleue subira une plus grande déviation que la couleur rouge.



**EXERCICE 1**

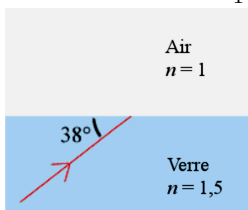
Un rayon lumineux passe d'une substance transparente X à l'eau telle qu'illustrée sur la figure.

- a) Quel est l'indice de réfraction de la substance X ? (Rép : 2,34)
- b) Quelle est la vitesse de la lumière dans la substance X ? (Rép :  $1,28 \cdot 10^8$  m/s)
- c) Quel sera l'angle limite de réflexion totale ? (Rép :  $34,5^\circ$ )

**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**

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,  $i > i_{\text{lim}}$ )

**EXERCICE 4**

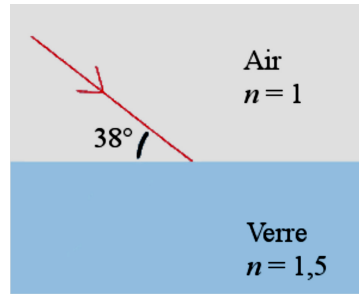


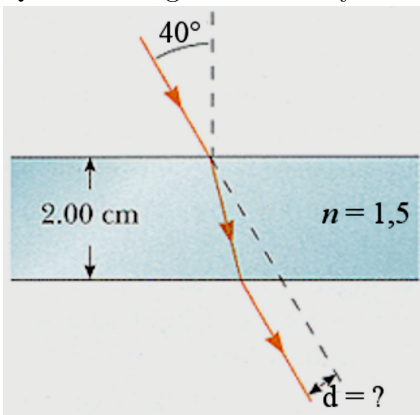
FIG. 70 :

De la lumière blanche se propageant dans l'air arrive avec un angle d'incidence de  $80^\circ$  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.

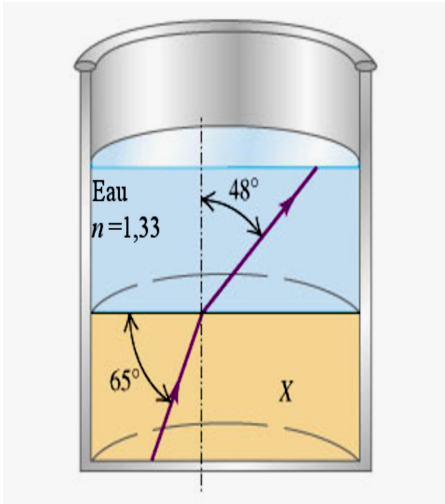
Quel est l'angle entre le rayon mauve et le rayon rouge dans le verre? (Rép :  $1,04^\circ$ )

**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 :  $5,6\text{ mm}$ )

**EXERCICE 1**

Un rayon lumineux passe d'une substance transparente X à l'eau telle qu'illustrée sur la figure.

- Quel est l'indice de réfraction de la substance X?
- Quelle est la vitesse de la lumière dans la substance X?
- 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.

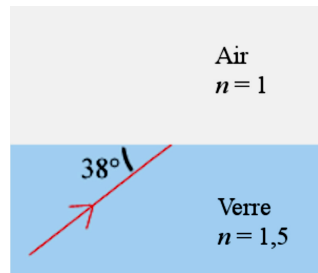


FIG. 71 :

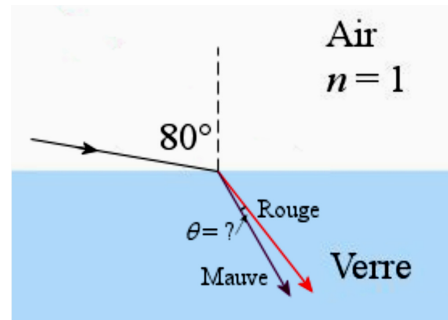


FIG. 72 :

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  $80^\circ$  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**

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  $d$  ?

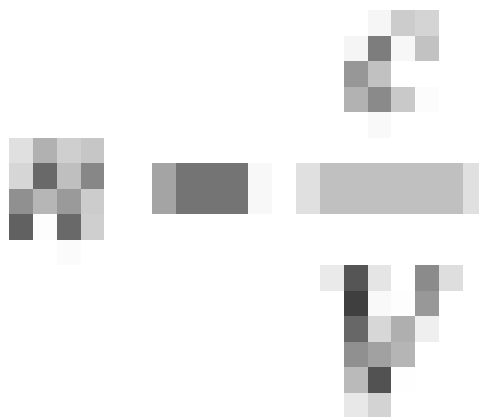


FIG. 73 :



**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 ?

$$i = 90^\circ - 65^\circ = 25^\circ$$

$$r = 48^\circ$$

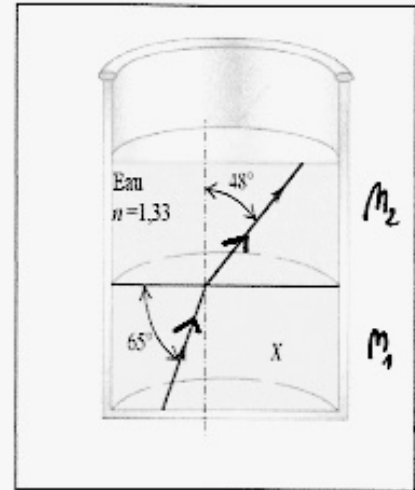
$$n_2 = 1,33$$

$$n_1 ?$$

$$\left. \begin{array}{l} i = 25^\circ \\ r = 48^\circ \\ n_2 = 1,33 \end{array} \right\}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 = n_2 \frac{\sin r}{\sin i}$$

$$\Rightarrow n_1 = 1,33 \cdot \frac{\sin 48^\circ}{\sin 25^\circ} = \boxed{2,34 = n_1}$$



b) Quelle est la vitesse de la lumière dans la substance X ?

la vitesse dans la substance X  $\Rightarrow v_1$  ?

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \Rightarrow v_1 = \frac{c}{n_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,34} = \boxed{1,28 \cdot 10^8 \text{ m/s} = v_1}$$

et si on veut bien calculer  $v_2$  ?

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow v_2 = \frac{n_1 v_1}{n_2} = \frac{2,34 \cdot 1,28 \cdot 10^8}{1,33}$$

$$\Rightarrow v_2 = 2,25 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

c) Quel sera l'angle limite de réflexion totale ?

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \text{si } r = 90^\circ \Rightarrow \sin i_{\text{lim}} = \frac{v_1}{v_2}$$

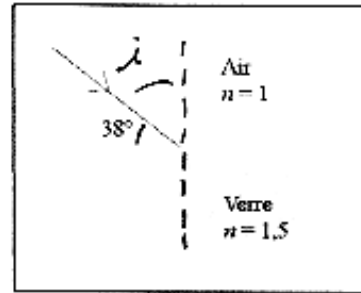
$$\Rightarrow i_{\text{limite}} = \text{Archim} \left( \frac{v_1}{v_2} \right) = \text{Archim} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) = \text{Archim} \left( \frac{1,33}{2,34} \right)$$

$$\Rightarrow i_{\text{limite}} = 34,6^\circ$$

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

$$\Rightarrow i_{\text{limite}} = \text{Arctan} \left( \frac{n_{\text{verre}}}{n_{\text{air}}} \right)$$

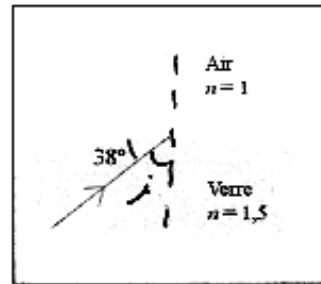
$$\left( \text{car } \frac{\sin i}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow i = \text{Arctan} \frac{n_2}{n_1} \right)$$

$$i_{\text{limite}} = \text{Arctan} \left( \frac{1,5}{1} \right) \Rightarrow i' \neq$$

Dans ce cas, il n'y a jamais de réflexion totale car  $n_1 < n_2 \Rightarrow v_1 > v_2 \Rightarrow i > \pi$   
 $\Rightarrow$  l'onde se rapproche 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 ?



Réflexion totale ?

$$i_{\text{limite}} = \text{Arcsin} \frac{n_2}{n_1} = \text{Arcsin} \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{verre}}}$$

$$i = 90 - 38 = 52^\circ$$

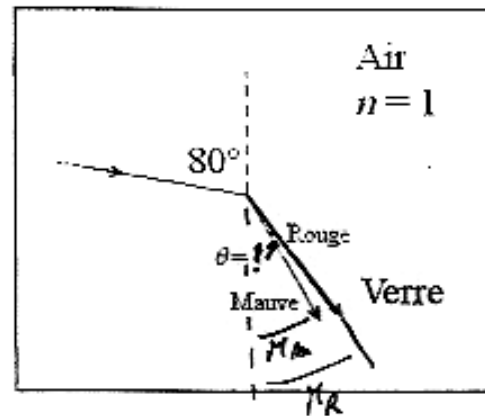
$$i_{\text{limite}} = \text{Arcsin} \frac{1}{1,5} = 41,81^\circ$$

$$\left( \text{car } \frac{\sin i}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow i_{\text{limite}} = \text{Arcsin} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \right)$$

OR  $i = 52^\circ \Rightarrow \text{car } 52^\circ > i_{\text{limite}} \Rightarrow$  il y a réflexion totale.

**EXERCICE 4**

De la lumière blanche se propageant dans l'air arrive avec un angle d'incidence de  $80^\circ$  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?



$$n_R = 1,62$$

$$n_m = 1,66$$

$$\theta ?$$

$$\theta = \alpha_R - \alpha_m$$

$$1) \alpha_R ? \quad \frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_R} = \frac{n_R}{n_{air}} \Rightarrow \sin \alpha_R = \frac{n_{air}}{n_R} \cdot \sin \alpha_i$$

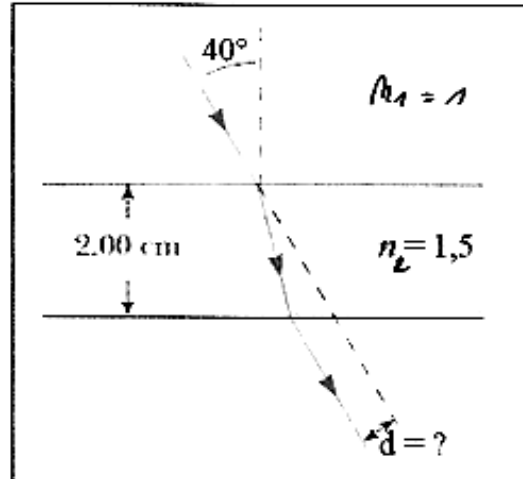
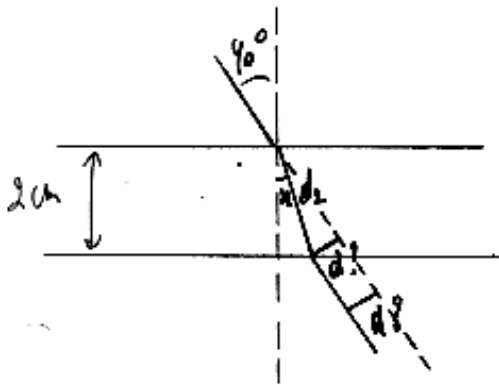
$$\Rightarrow \alpha_R = \arcsin \left( \frac{n_{air}}{n_R} \cdot \sin \alpha_i \right) = \arcsin \left( \frac{1}{1,62} \cdot \sin 80^\circ \right) = 37,43^\circ$$

$$\alpha_m = \arcsin \left( \frac{n_{air}}{n_m} \cdot \sin \alpha_i \right) = \arcsin \left( \frac{1}{1,66} \cdot \sin 80^\circ \right) = 36,39^\circ$$

$$\theta = \alpha_R - \alpha_m = 37,43^\circ - 36,39^\circ = \underline{1,04^\circ = \theta}$$

## 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  $d$ ?



$$1) \hat{n} ?$$

$$n_1 = 1$$

$$n_2 = 1,5$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin r = \frac{n_1}{n_2} \sin i \Rightarrow r = \text{Arctan} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin i \right)$$

$$\Rightarrow r = \text{Arctan} \left( \frac{1}{1,5} \sin 40^\circ \right) \Rightarrow \boxed{r = 25,4^\circ}$$

$$2) \begin{array}{c} \nearrow 40^\circ - \hat{n} \\ d_2 \end{array} \Rightarrow \sin(40^\circ - r) = \frac{d}{d_2} \Rightarrow d_2 ?$$

$$2 \text{ cm} \begin{array}{c} \nearrow r \\ d_2 \end{array} \cos r = \frac{2}{d_2} \Rightarrow d_2 = \frac{2}{\cos r}$$

$$\Rightarrow \sin(40^\circ - r) = \frac{d}{d_2} \Rightarrow d = d_2 \sin(40^\circ - r)$$

$$\Rightarrow d = \frac{2}{\cos r} \sin(40^\circ - r)$$

$$\Rightarrow d = \frac{2}{\cos 25,4} \cdot \sin(40^\circ - 25,4^\circ) = 0,56 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \boxed{d = 5,6 \text{ mm}}$$

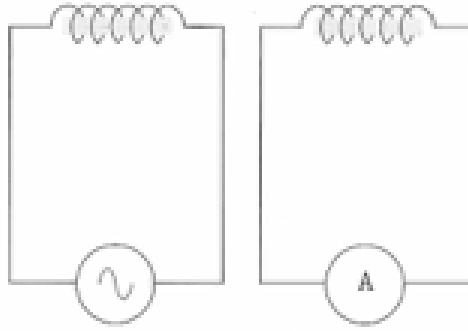


FIG. 74 :

## 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 :

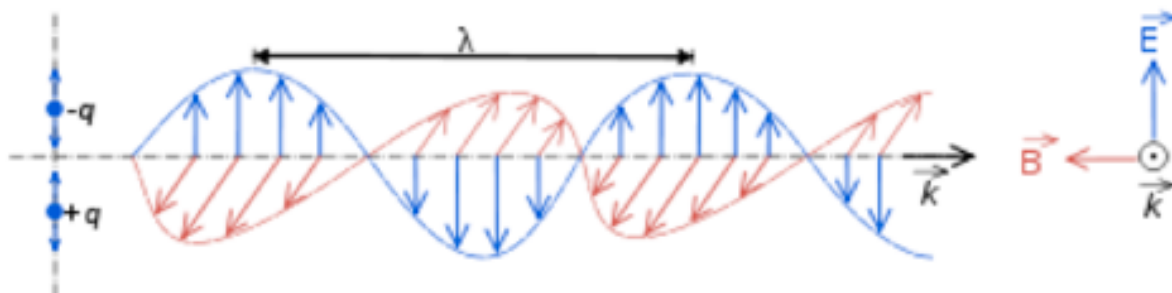
*Un courant électrique produit dans son environnement un champ magnétique.*

*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

$$\vec{E}$$

et le champ magnétique

$$\vec{B}$$

, 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.

**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).*

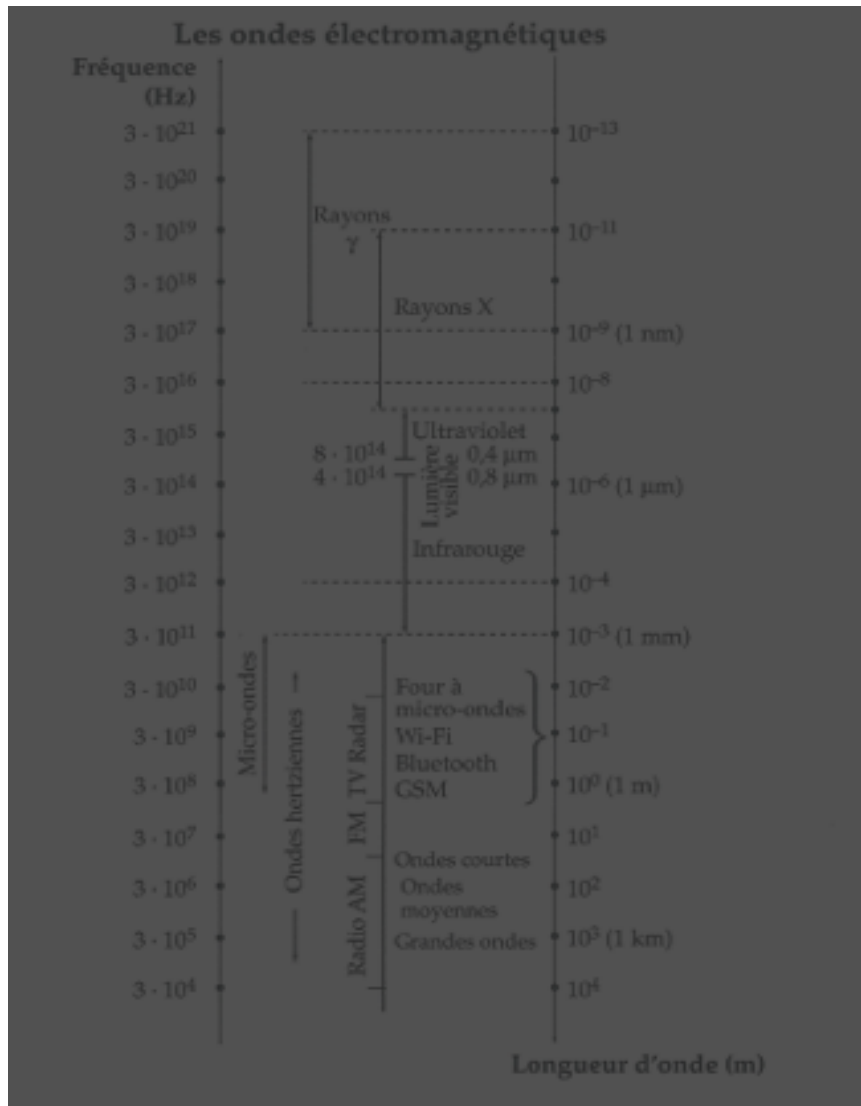


FIG. 75 :

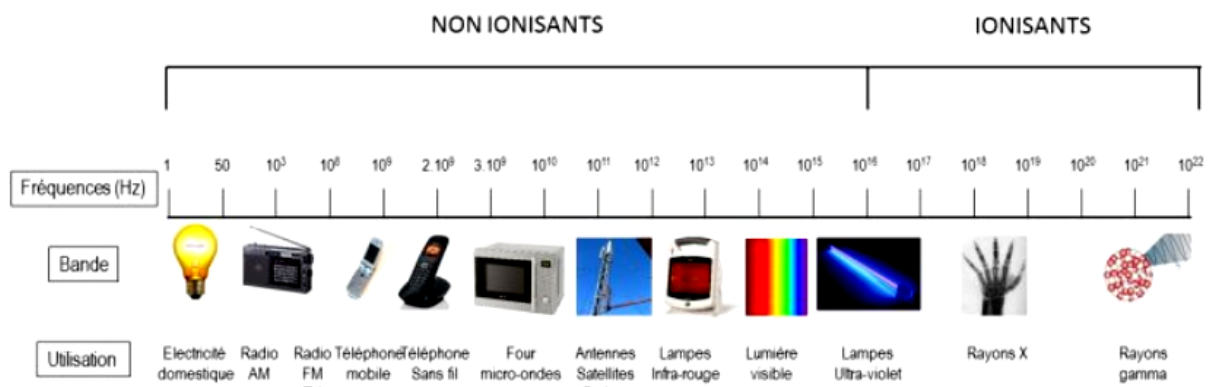


FIG. 76 :



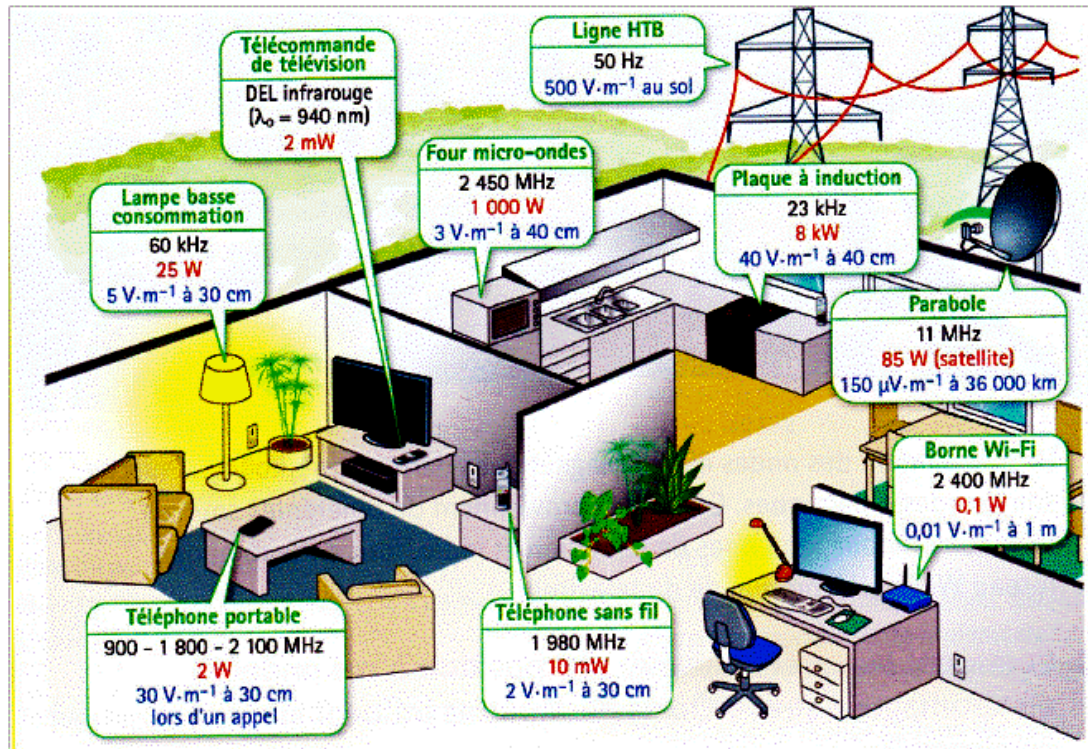


FIG. 77 :

- **L'infrarouge** : rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu ( $-273^\circ\text{C}$ ).  
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.

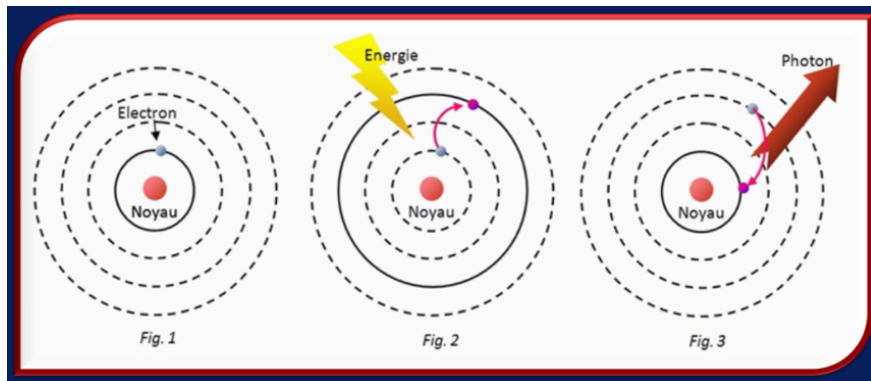


FIG. 78 :



FIG. 79 :

## L'EFFET PHOTOELECTRIQUE ET LA LUMIERE

### Théorie quantique

Pages 222 à 236 du livre

Nous savons à présent que la lumière visible est une onde électromagnétique, due à des oscillations de charges électriques à des fréquences comprises entre  $4 \cdot 10^{14}$  Hz et  $8 \cdot 10^{14}$  Hz (voir spectre électromagnétique).

### 1. PRODUCTION DE LUMIERE.

Quelles sont ces charges oscillantes responsables de l'émission de lumière ?

L'émission de lumière par un atome ou une molécule est un **phénomène électronique, provoqué par l'oscillation des électrons atomiques.**

Dans un atome chaque électron se trouve sur une orbitale et donc possède des niveaux d'énergie quantifiés (les niveaux d'énergie ont des valeurs précises). C'est le modèle de Bohr (fig. 1).

De l'énergie incidente sur la surface d'un objet excite certains électrons des atomes. L'électron peut passer d'un niveau inférieur vers un niveau d'énergie plus élevée en absorbant cette énergie (fig. 2). On parlera d'absorption.

Ces électrons excités retournent très rapidement à un état stable en perdant l'énergie accumulée sous forme de rayonnement qui est une onde électromagnétique à savoir un « paquet d'énergie électromagnétique » ou photon (fig. 3). On parlera d'émission.

Le rayonnement émis peut-être situé dans le visible, mais aussi dans l'**infrarouge** ou l'**ultraviolet**, tout dépend de la différence d'énergie entre les deux niveaux lors de la transition électronique.

L'énergie incidente peut provenir :

- de matériaux chauffés.
- d'un courant électrique appliqué entre des électrodes placées à chaque extrémité d'un tube (tube néon).

Chaque atome émet une couleur qui lui est propre car la répartition électronique en couches (modèle de Bohr) est caractéristique de chaque élément du tableau périodique.

### 2- INTERACTION LUMIERE-MATIERE - L'EFFET PHOTOELECTRIQUE

C'est 1887, à l'occasion de ses recherches pour prouver l'existence des ondes électromagnétiques, que le physicien allemand Hertz mis en évidence l'effet photoélectrique.

Dans cet effet, **de la lumière qui arrive sur un métal provoque l'éjection d'électrons présents dans le métal : il s'agit de l'effet photoélectrique.**

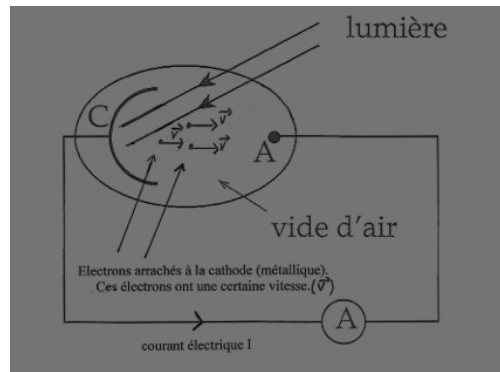


FIG. 80 :

C'est le principe de fonctionnement des cellules photoélectriques.

### A- La cellule photoélectrique

De la lumière (de fréquence  $f$ ) arrive sur un métal (la cathode C) et provoque l'éjection d'électrons présents dans le métal. Ces électrons animés d'une vitesse  $\vec{v}$  vont produire un courant électrique dans le circuit.

(Rappel : le sens conventionnel du courant est de sens opposé au sens de déplacement des électrons).

### B - Propriétés de l'effet photoélectrique.

On conçoit bien que la lumière, onde électromagnétique, puisse interagir avec la surface du métal en y faisant vibrer les électrons peu liés pour finalement en arracher.

#### a) Influence de l'intensité de la lumière :

L'intensité du courant électrique mesuré (et donc l'effet photoélectrique) est d'autant plus grand que l'intensité de la lumière incidente est grande. (L'intensité lumineuse est l'énergie reçue par unité de surface et par unité de temps. Elle se mesure en  $W/m^2$ .)

Eclairer plus intensément correspond à envoyer davantage d'énergie vers la surface du métal et permet logiquement d'augmenter l'intensité du courant électrique.

#### b) Influence de la nature du métal :

Chaque métal présente une force de cohésion caractéristique du métal et l'énergie nécessaire pour arracher un électron dépend logiquement du métal en présence.

#### c) Influence de la fréquence de la lumière :

Pour chaque métal éclairé, il existe une fréquence de seuil ( $f_0$ ) en dessous de laquelle l'effet photoélectrique ne se produit pas, **quelle que soit l'intensité lumineuse, même très intense.**

Le modèle ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer cela.

### C - Hypothèse du photon d'Einstein.

Albert Einstein proposa en 1905 une hypothèse révolutionnaire pour expliquer l'effet photoélectrique.

Selon Einstein, l'énergie lumineuse n'atteint pas une surface de manière continue, c'est-à-dire à tout moment et partout sur la surface (comme le prévoit le modèle ondulatoire) mais est cédée à la surface de manière discontinue, tant du point de vue spatial (au même instant, l'énergie n'arrive pas partout) que du point de vue temporel (en un point donné, l'énergie n'arrive qu'à certains instants).

L'absorption de l'énergie lumineuse par une surface peut être comparée à l'arrivée de projectiles. Elle ne peut se faire que par quantités indivisibles, appelées quanta ou encore photons.

L'énergie lumineuse transférée à la matière est toujours celle d'un nombre entier de photon. On dit que cette énergie est quantifiée (on parlera de la théorie quantique).

Cette énergie dépend de la fréquence comme le montre l'effet photoélectrique.

**Explication de l'effet photoélectrique :** lors de l'interaction lumière-matière, lorsque la lumière atteint la plaque métallique :

- un **photon** cède toute son énergie à un **électron**. Le photon, quanta d'énergie (« paquet d'énergie »), est complètement absorbé et disparaît.
- Un électron ne peut pas accumuler l'énergie de plusieurs photons.
- Pour arracher un électron de la plaque métallique, il faut lui communiquer au minimum une énergie  $W$  appelée travail d'extraction (énergie nécessaire pour rompre la liaison).

### Conclusion :

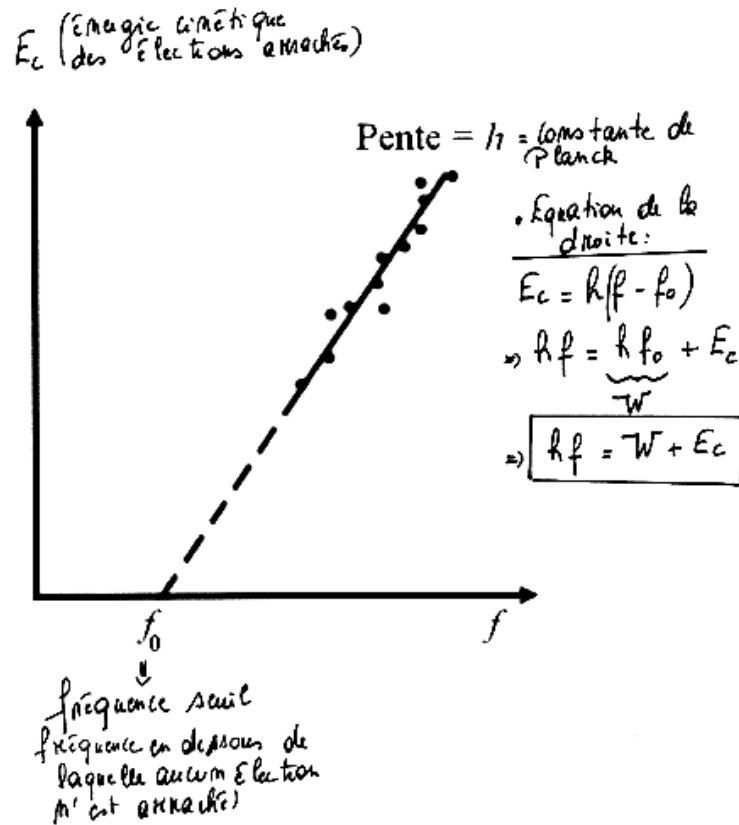


FIG. 81 :

- si  $hf < W$  (si l'énergie d'un photon est inférieure au travail d'extraction), l'énergie communiquée à l'électron est insuffisante, même si beaucoup de photons arrivent et aucun électron ne sera arraché. Ceci explique l'existence de la fréquence seuil.
- Si  $hf > W$ , des électrons sont éjectés de la surface métallique. Une partie de l'énergie  $hf$  est utilisée pour arracher l'électron hors du métal ; l'excédent d'énergie est emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique ( $E_c$ ).
- Le principe de conservation d'énergie nous permet d'écrire :

L'énergie incidente d'un photon se transforme en énergie d'extraction de l'électron plus l'énergie cinétique qu'aura l'électron.

$$hf = W + E_c$$

#### **D - CONFIRMATION EXPERIMENTALE**

#### **MESURE EXPERIMENTALE DE LA CONSTANTE DE PLANCK**

**(ET DEUX PRIX NOBEL : EINSTEIN EN 1921 ET PLANCK EN 1923)**

Le physicien américain Millikan apporta la confirmation expérimentale de l'hypothèse d'Einstein en déterminant pour un même métal, la variation de l'énergie cinétique des électrons arrachés en fonction de la fréquence de la lumière monochromatique incidente.

- L'équation de cette droite est bien :

$$E_c = h(f - f_0) \quad hf = W + E_c$$

où  $h$  est la pente et a été mesurée expérimentalement (constante de Planck)  $h$  :

- Chaque métal a une fréquence seuil qui lui est propre.

Nous pouvons remarquer sur le graphique que si  $f = f_0$ , alors  $E_c = 0$ .

L'énergie du photon incident sera juste suffisante pour arracher l'électron et ne sera pas suffisante pour encore lui communiquer une énergie cinétique.

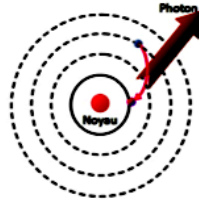


FIG. 82 :

### ***E - COMPORTEMENT QUANTIQUE DE LA LUMIERE***

Certains phénomènes (réfraction, diffraction, interférences) ne sont explicables que par le modèle ondulatoire, d'autres que par le modèle du photon qui a un comportement corpusculaire.

La lumière se comporte tantôt comme une onde, tantôt comme des particules.

Finalement, quel est le bon modèle ?

Il est incorrect de dire « la lumière est une onde » ou « la lumière est une particule ».

En réalité, il n'y a pas de modèle unique pour la lumière.

L'ensemble des comportements de la lumière ne peut s'expliquer ni par l'un, ni par l'autre des deux modèles. Les deux sont nécessaires, tantôt c'est l'un qui est efficace, tantôt, c'est l'autre.

### ***F - ENERGIE LUMINEUSE***

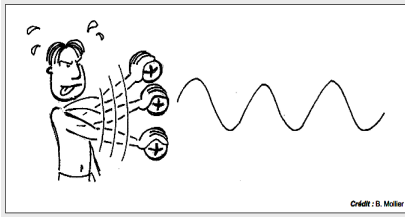
Les ondes électromagnétiques transportent de l'énergie, elles sont dites « rayonnantes ». C'est la seule forme d'énergie qui peut se propager dans le vide, en l'absence de matière.

L'énergie lumineuse fait partie des énergies dites « rayonnantes ».

L'énergie lumineuse est proportionnelle au nombre de photons émis (N).

Or chaque photon transporte une énergie qui est proportionnelle à sa fréquence ( $E=hf$ )

Donc, l'énergie lumineuse transportée sera :

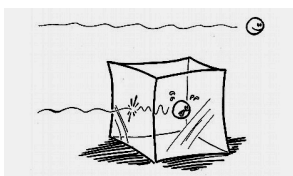


### ***3 - QU'EST CE QUE LA LUMIERE ?***

- La lumière est une onde électromagnétique, dont la longueur d'onde, comprise entre 400 et 800 nm, correspond à la zone de sensibilité de l'œil humain, entre l'ultraviolet et l'infrarouge.
- Elle est produite par l'oscillation des électrons atomiques.
- Elle constituée d'un ensemble de photons qui sont des quanta d'énergie électromagnétique.

L'énergie d'un photon dépend de la fréquence.

- L'énergie radiative de la lumière est :



- À l'inverse des ondes mécaniques (son, vagues,...), la lumière, comme toutes les ondes électromagnétiques, n'a pas besoin de support pour se propager. Elle peut se déplacer dans le vide et dans un milieu transparent (eau, verre, ...).

Dans un milieu transparent donc hors du vide, elle se propage moins vite (cfr. expérience de Young).

On définit l'indice de réfraction du milieu comme étant le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur sa vitesse dans le milieu. ( $n=c/v$ )

- La **lumière est composée** de photons (particules), mais elle possède les propriétés d'une onde. Elle a un comportement quantique, c'est-à-dire :

- La lumière **se propage comme une onde** : elle distribue son énergie dans l'espace de manière continue, comme une onde. Elle est soumise aux lois de la réflexion, réfraction, diffraction et interférences.

- La lumière **interagit avec la matière de façon discrète** : elle échange de l'énergie avec la matière de façon **discontinue**, un photon à la fois. L'énergie d'un photon est proportionnelle à la fréquence.

#### 4 – PHOTONS ET APPLICATIONS. ( Lire p 230 à 236)

- Cellule photoélectrique
- Panneaux photovoltaïques
- La diode LED

## 28 EXERCICES

### 29 Exercice 1

Une station de radio a une puissance émettrice de 400 kW à 100 MHz. Combien de photons par seconde sont émis ? (Rép :  $6.10^{30}$  photons/s)

#### Exercice 2

Le travail d'extraction d'un électron est de  $3,6.10^{-19}$  J pour le potassium. Soit un faisceau de longueur d'onde égale à 400 nm qui a une puissance de  $10^{-9}$  W. Calcule :

- L'énergie cinétique des électrons émis. (Rép :  $1,37.10^{-19}$  J)
- Le nombre d'électrons émis par mètre carré et par seconde à partir de la surface où se produit l'effet photoélectrique, en supposant que 3% des photons incidents parvient à éjecter des électrons. (Rép :  $6.10^7$  électrons/s)

#### Exercice 3

Le seuil photoélectrique de longueur d'onde pour le césium est de 686 nm. Si de la lumière de longueur d'onde égale à 470 nm éclaire la surface, quelle est la vitesse maximale des électrons émis ? (Rép :  $5,4.10^5$  m/s)

#### Exercice 4

Soit un rayonnement de longueur d'onde de 200 nm tombant sur du mercure pour lequel le travail d'extraction est de  $7,2.10^{-19}$  J. Quelle est l'énergie cinétique des électrons éjectés ? (Rép :  $2,74.10^{-19}$  J)

#### Exercice 5

Lorsqu'un métal est éclairé par de la lumière de fréquence  $f$ , l'énergie cinétique maximale des électrons est de  $2,08.10^{-19}$  J. Lorsqu'on augmente la fréquence de 50%, l'énergie cinétique maximale augmente jusqu'à  $5,77.10^{-19}$  J.

Quelle est la fréquence seuil de ce métal ? (Rép :  $7,9.10^{14}$  Hz)

#### Exercice 6

De la lumière bleue ( $\lambda = 470$  nm) ayant une intensité de  $200$  W/m<sup>2</sup> pénètre dans un œil. Combien de photons entrent dans l'œil par seconde si la pupille a un diamètre de 5 mm ? (Rép :  $9,3.10^{15}$  photons/s)

## 30

### 31 Exercice 7

Lors d'une expérience sur l'effet photoélectrique, on a recueilli les valeurs suivantes pour la longueur d'onde de la lumière incidente et l'énergie cinétique des électrons émis

(nm)	500	450	400	350	300
$E_c$ ( $10^{-19}$ J)	0,59	1,04	1,60	2,19	3,20

Utilise ces données pour calculer **graphiquement** la valeur de la constante de Planck.

**Exercice 8**

La longueur d'onde du seuil photoélectrique d'un matériau métallique est de 360 nm. Quelle est la vitesse maximale des électrons émis si on utilise des photons de 280 nm de longueur d'onde ? (Rép :  $6.10^5$  m/s)

**Exercice 9**

De la lumière ayant une longueur d'onde de 450 nm et une intensité de  $40 \text{ W/m}^2$  arrive sur un métal. Combien d'électrons sont éjectés par seconde et par centimètre carré de surface si seulement 3 % des photons qui arrivent sur le métal éjecte un électron ?

(Rép :  $2,7.10^{14}$  électrons/s)

**Exercice 10**

Lorsqu'un métal est éclairé par de la lumière de fréquence  $f$ , l'énergie cinétique maximale des électrons est de  $2,08.10^{-19}$  J. Lorsqu'on augmente la fréquence de 50%, l'énergie cinétique maximale augmente jusqu'à  $5,77.10^{-19}$  J.

a) Quelle est la fréquence de la source ? (Rép :  $1,1.10^{15}$  Hz)

b) Sachant que le spectre visible est situé entre 400 nm et 800 nm, la lumière utilisée est-elle dans le spectre visible, dans la gamme des ultraviolets ou dans la gamme des infrarouges ? (Rép : UV)

**Exercice 11**

Lorsqu'on éclaire une surface avec de la lumière d'une fréquence égale à  $7.10^{14}$  Hz, les électrons émis ont une vitesse de  $5,2.10^5$  m/s. Quelle est la fréquence seuil du métal ?

(Rép :  $5,14.10^{14}$  Hz)

**Exercice 12**

De la lumière jaune ( $\lambda = 585$  nm) ayant une intensité de  $50 \text{ W/m}^2$  arrive sur un mur ayant une surface de  $3 \text{ m}^2$ . Combien de photons arrivent sur le mur en 20 secondes ?

(Rép :  $8,8.10^{21}$  photons/s)

**Exercice 13**

Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ? Répondre à la question en indiquant V ou F .

A) Lorsqu'on augmente la puissance d'un faisceau laser sans modifier sa fréquence, l'effet photoélectrique qu'il produit sur une même surface métallique est tel que :

a) le nombre de photons émis par seconde augmente

a) l'énergie des photons émis augmente

a) le nombre d'électrons émis par seconde augmente

a) l'intensité du courant électrique détecté augmente

a) l'énergie cinétique des électrons augmente

A) Lorsqu'on augmente la fréquence d'un faisceau laser, l'effet photoélectrique qu'il produit sur une même surface métallique est tel que :

A) a) le nombre de photons émis par seconde augmente

A) a) l'énergie des photons émis augmente

c) le nombre d'électrons émis par seconde augmente

a) d) l'intensité du courant électrique détecté augmente

a) d) l'énergie cinétique des électrons augmente

(Rép : A) VFVVF, B) FVFVV)

**Exercice 14**

a) Quel est le seuil de longueur d'onde qui permet la photoémission du zinc ? Le travail d'extraction du zinc est de  $6,99.10^{-19}$  J. (Rép : 284 nm)



a) Cette radiation fait-elle partie du spectre visible de la lumière, Justifie. (Rép : Non)

a) Quelle sera alors l'énergie cinétique des électrons émis ? Justifie (Rép :  $1,35 \cdot 10^{-21}$  J)

### Exercice 15

Un bon niveau d'éclairage pour la lecture correspond à environ  $2 \cdot 10^{13}$  photons par seconde par centimètre carré. Si ces photons ont une longueur d'onde moyenne de 500 nm, quelle est l'intensité lumineuse correspondante sachant que l'intensité lumineuse est la puissance reçue par unité de surface. (Rép :  $7,96 \cdot 10^{-2}$  W/m<sup>2</sup>)

### Exercice 16

Quelle sera la vitesse des électrons émis par du mercure lorsqu'il est soumis à un rayonnement de longueur d'onde de 200 nm ? Le travail d'extraction du mercure est de  $7,2 \cdot 10^{-19}$  J.

(Rép :  $7,8 \cdot 10^5$  m/s)

## 32

### 33 QUESTION 1

Une station de radio a une puissance émettrice de 400 kW à 100 MHz. Combien de photons par seconde sont émis ?

#### QUESTION 2

Le travail d'extraction d'un électron est de  $3,6 \cdot 10^{-19}$  J pour le potassium. Soit un faisceau de longueur d'onde égale à 400 nm qui a une puissance de  $10^{-9}$  W. Calcule :

a) L'énergie cinétique des électrons émis.

b) Le nombre d'électrons émis par mètre carré et par seconde à partir de la surface où se produit l'effet photoélectrique, en supposant que 3% des photons incidents parvient à éjecter des électrons.

#### QUESTION 3

Le seuil photoélectrique de longueur d'onde pour le césium est de 686 nm. Si de la lumière de longueur d'onde égale à 470 nm éclaire la surface, quelle est la vitesse maximale des électrons émis ?

#### QUESTION 4

Soit un rayonnement de longueur d'onde de 200 nm tombant sur du mercure pour lequel le travail d'extraction est de  $7,2 \cdot 10^{-19}$  J. Quelle est l'énergie cinétique des électrons éjectés ?

#### QUESTION 5

Lorsqu'un métal est éclairé par de la lumière de fréquence  $f$ , l'énergie cinétique maximale des électrons est de  $2,08 \cdot 10^{-19}$  J. Lorsqu'on augmente la fréquence de 50%, l'énergie cinétique maximale augmente jusqu'à  $5,77 \cdot 10^{-19}$  J.

Quelle est la fréquence seuil de ce métal ?

#### QUESTION 6

De la lumière bleue ( $\lambda = 470$  nm) ayant une intensité de  $200$  W/m<sup>2</sup> pénètre dans un œil. Combien de photons entrent dans l'œil par seconde si la pupille a un diamètre de 5 mm ?

## 34

### 35 QUESTION 7

1) Lors d'une expérience sur l'effet photoélectrique, on a recueilli les valeurs suivantes pour la longueur d'onde de la lumière incidente et l'énergie cinétique des électrons émis

(nm)	500	450	400	350	300
$E_c$ ( $10^{-19}$ J)	0,59	1,04	1,60	2,19	3,20

Utilise ces données pour calculer *graphiquement* la valeur de la constante de Planck.

#### QUESTION 8

La longueur d'onde du seuil photoélectrique d'un matériau métallique est de 360 nm. Quelle est la vitesse



maximale des électrons émis si on utilise des photons de 280 nm de longueur d'onde ?

### QUESTION 9

De la lumière ayant une longueur d'onde de 450 nm et une intensité de 40 W/m<sup>2</sup> arrive sur un métal. Combien d'électrons sont éjectés par seconde et par centimètre carré de surface si seulement 3 % des photons qui arrivent sur le métal éjecte un électron ?

### QUESTION 10

Lorsqu'un métal est éclairé par de la lumière de fréquence  $f$ , l'énergie cinétique maximale des électrons est de  $2,08 \cdot 10^{-19}$  J. Lorsqu'on augmente la fréquence de 50%, l'énergie cinétique maximale augmente jusqu'à  $5,77 \cdot 10^{-19}$  J.

a) Quelle est la fréquence de la source ?

b) Sachant que le spectre visible est situé entre 400 nm et 800 nm, la lumière utilisée est-elle dans le spectre visible, dans la gamme des ultraviolets ou dans la gamme des infrarouges ?

### QUESTION 11

Lorsqu'on éclaire une surface avec de la lumière d'une fréquence égale à  $7 \cdot 10^{14}$  Hz, les électrons émis ont une vitesse de  $5,2 \cdot 10^5$  m/s. Quelle est la fréquence seuil du métal ?

### QUESTION 12

De la lumière jaune ( $\lambda = 585$  nm) ayant une intensité de 50 W/m<sup>2</sup> arrive sur un mur ayant une surface de 3 m<sup>2</sup>. Combien de photons arrivent sur le mur en 20 secondes ?

### QUESTION 13

Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ? Répondre à la question en indiquant V ou F .

A) Lorsqu'on augmente la puissance d'un faisceau laser sans modifier sa fréquence, l'effet photoélectrique qu'il produit sur une même surface métallique est tel que :

a) le nombre de photons émis par seconde augmente

a) l'énergie des photons émis augmente

a) le nombre d'électrons émis par seconde augmente

a) l'intensité du courant électrique détecté augmente

a) l'énergie cinétique des électrons augmente

B) Lorsqu'on augmente la fréquence d'un faisceau laser, l'effet photoélectrique qu'il produit sur une même surface métallique est tel que :

A) a) le nombre de photons émis par seconde augmente

A) a) l'énergie des photons émis augmente

c) le nombre d'électrons émis par seconde augmente

a) d) l'intensité du courant électrique détecté augmente

a) d) l'énergie cinétique des électrons augmente

### QUESTION 14

a) Quel est le seuil de longueur d'onde qui permet la photoémission du zinc ? Le travail d'extraction du zinc est de  $6,99 \cdot 10^{-19}$  J.

a) Cette radiation fait-elle partie du spectre visible de la lumière, Justifie.

a) Quelle sera alors l'énergie cinétique des électrons émis ? Justifie

**QUESTION 15**

Un bon niveau d'éclairage pour la lecture correspond à environ  $2 \cdot 10^{13}$  photons par seconde par centimètre carré. Si ces photons ont une longueur d'onde moyenne de 500 nm, quelle est l'intensité lumineuse correspondante sachant que l'intensité lumineuse est la puissance reçue par unité de surface.

**QUESTION 16**

Quelle sera la vitesse des électrons émis par du mercure lorsqu'il est soumis à un rayonnement de longueur d'onde de 200 nm ? Le travail d'extraction du mercure est de  $7,2 \cdot 10^{-19}$  J.

**QUESTION**

Une station de radio a une puissance émettrice de 400 kW à 100 MHz. Combien de photons par seconde sont émis ?

$$P = 400 \cdot 10^3 \text{ W}$$

$$f = 100 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 10^8 \text{ Hz}$$

$$\frac{N}{t} ?$$

$$P = \frac{N h f}{t} \Rightarrow \frac{N}{t} = \frac{P}{h f} = \frac{400 \cdot 10^3}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 10^8}$$

$$\Rightarrow \frac{N}{t} = 60 \cdot 10^{29} \frac{\text{photons}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow \frac{N}{t} = 6 \cdot 10^{30} \frac{\text{photons}}{\text{s}}$$

$$\boxed{\frac{N}{t} = 6 \cdot 10 \frac{\text{photons}}{\text{s}}}$$

**QUESTION**

Le travail d'extraction d'un électron est de  $3,6 \cdot 10^{-19}$  J pour le potassium. Soit un faisceau de longueur d'onde égale à 400 nm qui a une puissance de  $10^{-9}$  W.

Calcule :

a) L'énergie cinétique des électrons émis.

$$W_0 = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda = 400 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$P = 10^{-9} \text{ W}$$

$E_c$  !

$$hf = E_c + W_0 \Rightarrow E_c = hf - W_0$$

$$\text{or } c = \lambda f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$$

$$\Rightarrow E_c = \frac{hc}{\lambda} - W_0 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}} - 3,6 \cdot 10^{-19}$$

$$\Rightarrow E_c = 1,37 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_c = 1,37 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

b) Le nombre d'électrons émis par mètre carré et par seconde à partir de la surface où se produit l'effet photoélectrique, en supposant que 3% des photons incidents parvient à éjecter des électrons.

$$A = 1 \text{ m}^2$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$\frac{N}{A} \Rightarrow N ?$$

$$P = 10^{-9} \text{ W} \text{ or } P_{\text{effic}} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-9} \text{ W}$$

$$P = \frac{Nhf}{t} \Rightarrow \frac{N}{t} = \frac{P}{hf} = \frac{3 \cdot 10^{-11}}{6,63 \cdot 10^{-34}} \cdot \frac{400 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 10^8}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}} \quad \text{Pour } 1 \text{ s} \quad N = 6 \cdot 10^7 \text{ électrons}$$

$$N = 6 \cdot 10^7 \text{ électrons}$$

QUESTION

Le seuil photoélectrique de longueur d'onde pour le césium est de 686 nm. Si de la lumière de longueur d'onde égale à 470 nm éclaire la surface, quelle est la vitesse maximale des électrons émis ?

$$\lambda_0 = 686 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda = 470 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$V_{e^-} ?$$

$$E_{ce^-} = \frac{m_e v_{e^-}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0} = hc \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$$

$$V_{e^-} = \sqrt{\frac{2hc}{m_e} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{9,1 \cdot 10^{-31}} \left( \frac{1}{470 \cdot 10^{-9}} - \frac{1}{686 \cdot 10^{-9}} \right)}$$

$$= 5,4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

$$V_{e^-} = 5,4 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

QUESTION

Soit un rayonnement de longueur d'onde de 200 nm tombant sur du mercure pour lequel le travail d'extraction est de  $7,2 \cdot 10^{-19}$  J. Quelle est l'énergie cinétique des électrons éjectés ?

$$\begin{aligned}\lambda &= 200 \cdot 10^{-9} \text{ m} \\ W_0 &= 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ E_{\text{cor}} &= hf - W_0 = \frac{hc}{\lambda} - W_0 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{200 \cdot 10^{-9}} - 7,2 \cdot 10^{-19} \\ &= E_{\text{cor}} = 2,71 \cdot 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

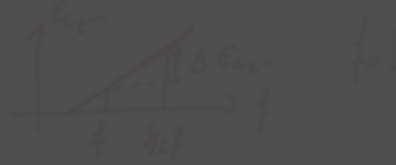
$$E_{\text{cor}} = 2,71 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

QUESTION

Lorsqu'un métal est éclairé par de la lumière de fréquence  $f$ , l'énergie cinétique maximale des électrons est de  $2,08 \cdot 10^{-19}$  J. Lorsqu'on augmente la fréquence de 50%, l'énergie cinétique maximale augmente jusqu'à  $5,77 \cdot 10^{-19}$  J. Quelle est la fréquence seuil de ce métal ?

$$f \rightarrow E_{\text{cin}} = 2,08 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1,5f \rightarrow E_{\text{cin}} = 5,77 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



$$h = \frac{\Delta E_{\text{cin}}}{\Delta f} = \frac{\Delta E_{\text{cin}}}{\frac{1}{2}f} \Rightarrow f = \frac{2\Delta E_{\text{cin}}}{h}$$

$$f = \frac{2(5,77 \cdot 10^{-19} - 2,08 \cdot 10^{-19})}{6,63 \cdot 10^{-34}} = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\Rightarrow \text{à cette } f, E_{\text{cin}} = 2,08 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{OR } E_{\text{cin}} = hf - hf_0 \Rightarrow f_0 = \frac{hf - E_{\text{cin}}}{h} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1,1 \cdot 10^{15} - 2,08 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}}$$

$$\Rightarrow f_0 = 7,9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_0 = 7,9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

**QUESTION**

De la lumière bleue ( $\lambda = 470 \text{ nm}$ ) ayant une intensité de  $200 \text{ W/m}^2$  pénètre dans un œil. Combien de photons entrent dans l'œil par seconde si la pupille a un diamètre de  $5 \text{ mm}$ ?

$$\lambda = 470 \cdot 10^{-9} \text{ m} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{470 \cdot 10^{-9}} = 6,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$I = \frac{P}{A} = 200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\phi = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Rightarrow A = \pi R^2 \quad \text{où } R = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

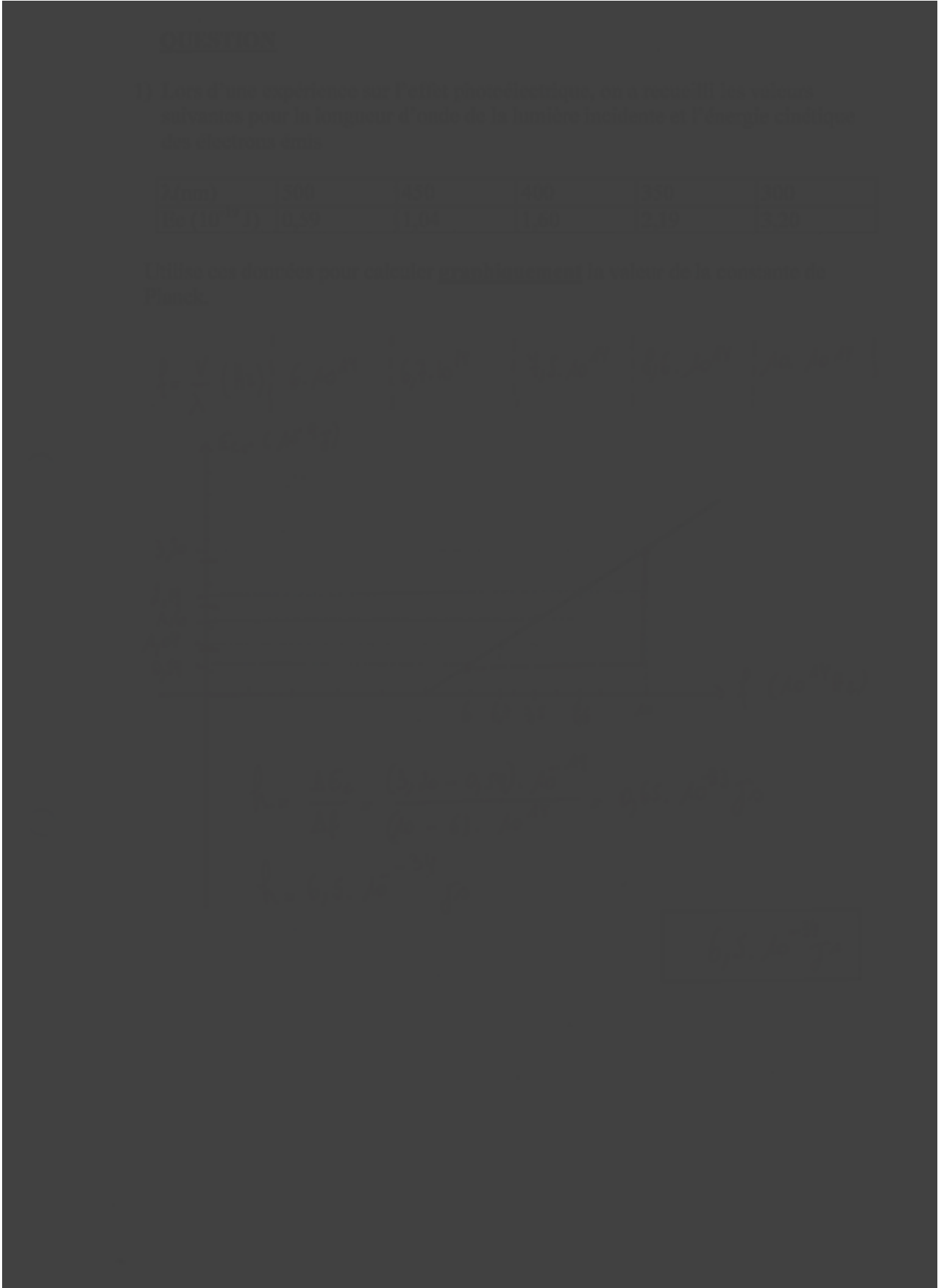
$$P = \frac{N h f}{t} = I \cdot A$$

$$\Rightarrow \frac{N}{t} = \frac{I \cdot A}{h f} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 2,5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 470 \cdot 10^{-9}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}$$

$$\frac{N}{t} = 9,3 \cdot 10^{15} \frac{\text{photons}}{\text{s}}$$

$$N = 9,3 \cdot 10^{15} \frac{\text{photons}}{\text{s}}$$









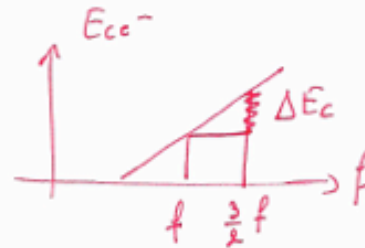
**QUESTION**

Lorsqu'un métal est éclairé par de la lumière de fréquence  $f$ , l'énergie cinétique maximale des électrons est de  $2,08 \cdot 10^{-19}$  J. Lorsqu'on augmente la fréquence de 50%, l'énergie cinétique maximale augmente jusqu'à  $5,77 \cdot 10^{-19}$  J.

a) Quelle est la fréquence de la source ?

$$E_{ce^-} = 2,08 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow f$$

$$E_{ce^-} = 5,77 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow \frac{3}{2} f$$



$$h = \frac{\Delta E}{\Delta f} = \frac{\Delta E}{\frac{1}{2} f} \Rightarrow f = \frac{2 \Delta E_c}{h}$$

$$\Rightarrow f = \frac{2(5,77 - 2,08) \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}}$$

$$\Rightarrow f = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

$$f = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

b) Sachant que le spectre visible est situé entre 400 nm et 800 nm, la lumière utilisée est-elle dans le spectre visible, dans la gamme des ultraviolets ou dans la gamme des infrarouges ?



$$f = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,1 \cdot 10^{15}}$$

$$\lambda = 0,273 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\Rightarrow \lambda = 273 \text{ nm}$$

↳ gamme des UV

UV

**QUESTION**

Lorsqu'on éclaire une surface avec de la lumière d'une fréquence égale à  $7 \cdot 10^{14}$  Hz, les électrons émis ont une vitesse de  $5,2 \cdot 10^5$  m/s. Quelle est la fréquence seuil du métal?

$$f = 7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$v = 5,2 \cdot 10^5 \text{ m/s} \Rightarrow E_c = \frac{(mv)^2}{2} = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (5,2)^2 \cdot 10^{10}}{2} = 1,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$f_0$ ?

$$E_c = hf - hf_0 \Rightarrow f_0 = \frac{hf - E_c}{h}$$

$$\Rightarrow f_0 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 7 \cdot 10^{14} - 1,23 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} = 5,14 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$5,14 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

**QUESTION**

De la lumière jaune ( $\lambda = 585 \text{ nm}$ ) ayant une intensité de  $50 \text{ W/m}^2$  arrive sur un mur ayant une surface de  $3 \text{ m}^2$ . Combien de photons arrivent sur le mur en 20 secondes?

$$\lambda = 585 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$I = 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \frac{P}{A}$$

$$A = 3 \text{ m}^2$$

$N?$

$$t = 20 \text{ s}$$

$$P = \frac{N h f}{t}$$

$$\Rightarrow N = \frac{P \cdot t}{h f} \quad \begin{array}{l} P? \quad P = A I \\ f? \quad f = \frac{v}{\lambda} \end{array}$$

$$8,8 \cdot 10^{21} \text{ photons}$$

$$\Rightarrow N = \frac{A I t \cdot \lambda}{h v} = \frac{3 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 585 \cdot 10^{-9}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}$$

$$\Rightarrow N = 8,8 \cdot 10^{21} \text{ photons en 20 s}$$

**QUESTION**

Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ? Répondre à la question en indiquant V ou F dans la case prévue à cet effet, **sans justification**

Réponse correcte : +2 points, pas de réponse : 0 point, réponse fausse : -1 point

$$P = \frac{Nhf}{t}$$

$$E = hf \text{ (en eV)}$$

$$1 \text{ photoe} \rightarrow 1 e^-$$

$$I_{\text{cour}} = \frac{Ne^-}{t}$$

$$E_c = hf - W_0$$

- A) Lorsqu'on augmente la puissance d'un faisceau laser sans modifier sa fréquence, l'effet photoélectrique qu'il produit sur une même surface métallique est tel que :
- a) le nombre de photons émis par seconde augmente
  - b) l'énergie des photons émis augmente
  - c) le nombre d'électrons émis par seconde augmente
  - d) l'intensité du courant électrique détecté augmente
  - e) l'énergie cinétique des électrons augmente

$$P = \frac{Nhf}{t}$$

$$E = hf$$

$$\frac{N}{t} = \omega$$
 ou  $E_c = hf - W_0$

- B) Lorsqu'on augmente la fréquence d'un faisceau laser, l'effet photoélectrique qu'il produit sur une même surface métallique est tel que :
- a) le nombre de photons émis par seconde augmente
  - b) l'énergie des photons émis augmente
  - c) le nombre d'électrons émis par seconde augmente
  - d) l'intensité du courant électrique détecté augmente
  - e) l'énergie cinétique des électrons augmente

$$P_{\text{laser}} = \frac{Nhf}{t}$$

$$I_{\text{courant}} = \frac{\text{flux d'e}^-}{\text{temps}} \Rightarrow \text{si } N \rightarrow \Rightarrow I_{\text{courant}} \rightarrow$$

$$1 \text{ h. } Ve^- \rightarrow \Rightarrow \text{flux d'e}^- \rightarrow \Rightarrow I_{\text{courant}} \rightarrow$$

**QUESTION**

- a) Quel est le seuil de longueur d'onde qui permet la photoémission du zinc ? Le travail d'extraction du zinc est de  $6,99 \cdot 10^{-19}$  J.

$\lambda_0$  ?

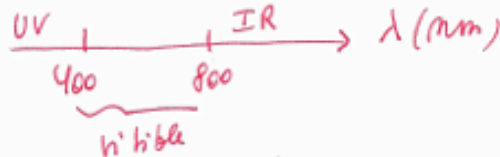
$$W_0 = hf_0 = h \frac{v}{\lambda_0}$$

$$\Rightarrow \lambda_0 = \frac{hv}{W_0} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{6,99 \cdot 10^{-19}}$$

$$\lambda_0 = 284 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 284 \text{ nm}$$

$$\lambda_0 = 284 \text{ nm}$$

- b) Cette radiation fait-elle partie du spectre visible de la lumière, Justifie.



Non

Non car cette longueur d'onde n'est pas dans l'intervalle du visible

- c) Quelle sera alors l'énergie cinétique des électrons émis ? Justifie

$E_{ce^-}$  ?

$$hf = W_0 + E_{ce^-}$$

$$\Rightarrow E_{ce^-} = hf - W_0 = h \frac{v}{\lambda_0} - W_0$$

$$\Rightarrow E_{ce^-} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{284 \cdot 10^{-9}} - 6,99 \cdot 10^{-19}$$

$$\Rightarrow E_{ce^-} = 1,35 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$E_{ce^-} = 1,35 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$



**QUESTION**

Un bon niveau d'éclairage pour la lecture correspond à environ  $2 \cdot 10^{13}$  photons par seconde par centimètre carré. Si ces photons ont une longueur d'onde moyenne de 500 nm, quelle est l'intensité lumineuse correspondante sachant que l'intensité lumineuse est la puissance reçue par unité de surface.

$$\frac{N}{t} = 2 \cdot 10^{13}$$

$$A = 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\lambda = 500 \cdot 10^{-9} \text{ m} \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{500 \cdot 10^{-9}} = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$I$  ?

$$I = \frac{P}{A} = \frac{\frac{N h f}{t}}{A} = \frac{N}{t} \frac{h f}{A}$$

$$7,96 \cdot 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\Rightarrow I = 2 \cdot 10^{13} \cdot \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14}}{10^{-4}}$$

$$\Rightarrow I = 0,0796 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 7,96 \cdot 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

**QUESTION**

Quelle sera la vitesse des électrons émis par du mercure lorsqu'il est soumis à un rayonnement de longueur d'onde de 200 nm ? Le travail d'extraction du mercure est de  $7,2 \cdot 10^{-19}$  J.

$V_{e^-}$  ?

$$\lambda = 200 \cdot 10^{-9} \text{ m} \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{200 \cdot 10^{-9}} = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

$$W_0 = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$hf = W_0 + \frac{m_{e^-} v_{e^-}^2}{2}$$

$$\Rightarrow \sqrt{\frac{(hf - W_0) \cdot 2}{m_{e^-}}} = v_{e^-}$$

$$v_{e^-} = 7,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow v_{e^-} = \sqrt{\frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1,5 \cdot 10^{15} - 7,2 \cdot 10^{-19}) \cdot 2}{9,11 \cdot 10^{-31}}}$$

$$\Rightarrow v_{e^-} = 7,8 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

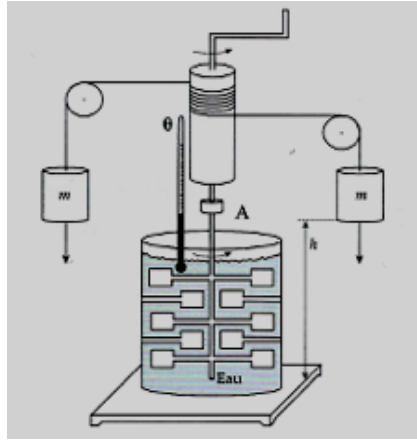


FIG. 83 :

## LA THERMODYNAMIQUE : CALORIMETRIE ET MACHINES THERMIQUES.

( UAA8-Chap 1-2-3-4, pages 162 à 185)

**Définition** : La thermodynamique est la partie de la physique qui étudie les transformations d'énergie impliquant l'énergie thermique. En particulier, elle étudie comment convertir cette énergie thermique en énergie mécanique (moteur à combustion, machine à vapeur, turbine, ...)

**A – Conservation de l'énergie et premier principe de la thermodynamique.**

**A1-Mise en situation**



- Frottez vous les mains : vous transformez de l'énergie mécanique en énergie thermique.
- Freinez en descendant une pente à vélo : les freins s'échauffent.
- Un engin spatial (la navette) effectue son retour dans l'atmosphère, il y a échauffement. L'engin doit être protégé pour éviter sa destruction.

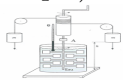
Nous voyons par ces exemples que de l'énergie mécanique (due au mouvement) se transforme en énergie thermique.

**A2-Rappels de calorimétrie (pages 162 à 167)**

a) *Expérience de Joule*

En 1850, James Prescott Joule réalise une expérience mettant en évidence de façon quantitative cet échange d'énergie mécanique en énergie thermique.

Un récipient, isolé et rempli d'eau, contient des roues à palettes. Comme le montre le schéma, les deux roues sont mises en rotation par la chute de deux masses égales (il y a donc diminution de l'énergie potentielle des deux masses). Joule observe une élévation de température de l'eau (il y a donc augmentation de l'énergie thermique) et observe expérimentalement que :



où cette constante notée  $c$  sera appelée la **chaleur massique** (ici de l'eau).

**L'énergie mécanique perdue par le système (  $E$  ) est transformée en énergie thermique qui se mesure par une élévation de température (  $\Delta T$  ).**

Ce rapport  $c$  dépend de :

- la **quantité du liquide** (ici de l'eau) dans le récipient.
- $c$  dépend de la **nature du liquide** (ici de l'eau, mais cela peut être de huile, de l'essence, ... )

$E$  est la variation d'énergie mécanique qui est égale à la variation d'énergie thermique. Nous noterons cette variation d'énergie thermique :  $Q$

**Equation de la calorimétrie (rappel) :**

$$c = \frac{Q}{m \Delta \theta}$$

FIG. 84 :

- Pour l'eau, si vous prenez 1 litre d'eau et que vous voulez augmenter sa température de 1°C, il faudra lui fournir une énergie thermique de 4 186 J.
- Si vous comparez les chaleurs massiques de l'eau et de l'huile, vous voyez que l'huile « chauffe plus facilement » que l'eau. Il faudra fournir moins d'énergie thermique à 1 litre d'huile pour élever sa température de 1°C qu'à 1 litre d'eau pour élever sa température de 1°C puisque la chaleur massique de l'huile est inférieure à celle de l'eau.
- Page 163 du livre , vous trouverez les chaleurs massiques de différentes substances.

a) *Premier principe de la thermodynamique : principe de conservation d'énergie.*

Définition : Un **système isolé** est un système qui n'échange ni matière, ni chaleur, ni travail avec l'extérieur.

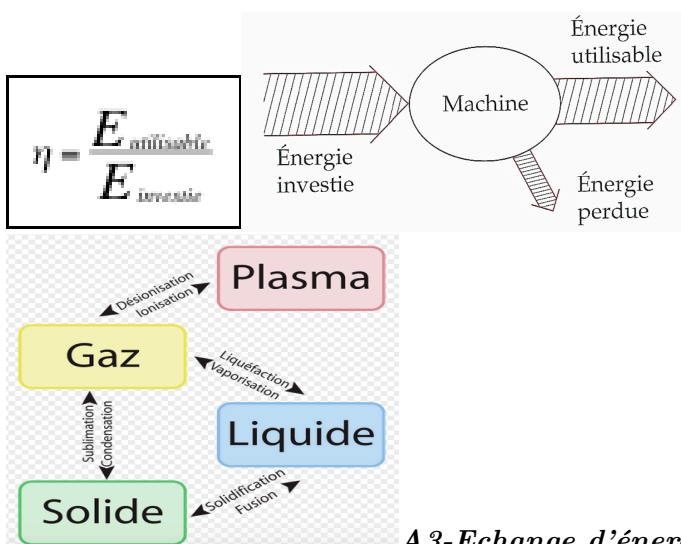
En conséquence, si une partie du système isolé perd de l'énergie, une autre partie du système en gagne une quantité identique.

*Illustrations :*

- Lorsqu'une voiture freine, elle perd de l'énergie cinétique. Il doit y avoir une augmentation d'énergie dans le système. C'est de l'énergie thermique par échauffement des freins.
- Dans l'expérience de Joule, les masses perdent de l'énergie potentielle gravifique. Il doit y avoir une augmentation d'énergie dans le système. C'est de l'énergie thermique traduite par l'augmentation de température de l'eau.

**EXERCICE RESOLU A REALISER : page 164-165 du livre.**

a) *Rendement d'une transformation énergétique*



**A3-Echange d'énergie lors d'un changement d'état.**

En **thermodynamique**, un **changement d'état** est le passage d'un **état** de la **matière** à un autre état. Les trois principaux états de la matière sont : **solide**, **liquide** et **gazeux**.

Lors des changements d'état, un corps doit prendre ou céder de la chaleur pour atteindre un autre état.

L'énergie échangée sous forme de chaleur lors d'un changement d'état résulte de la modification (rupture ou établissement) de liaisons intermoléculaires.

Lorsqu'il y a passage d'une substance **d'un état à l'autre**, il y a toujours échange d'énergie **alors que la température reste constante pendant toute la durée du changement**.

A titre d'exemple :

$$L = \frac{Q}{m}$$

FIG. 85 :

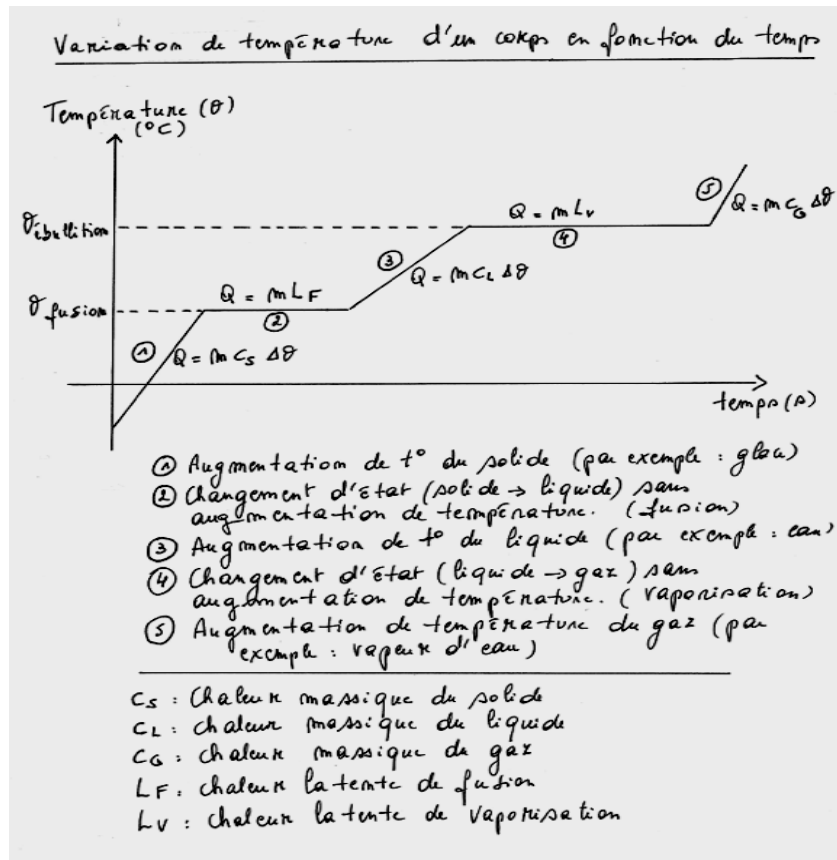
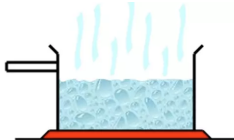


FIG. 86 :

- La fusion : lorsque la glace devient liquide, on dira que la glace fond, il faut donc *apporter de la chaleur* pour que la glace change d'état.



Le passage de l'état liquide à l'état gazeux.

- La liquéfaction : C'est le passage de l'état gazeux à l'état liquide. Ce changement d'état s'obtient en *cédant de la chaleur*. La vapeur devient liquide en *cédant de la chaleur*.
- La vaporisation : de l'eau qui bout dans une casserole ne verra pas sa température augmenter avant que toute la quantité d'eau ne soit vaporisée. Il faut *apporter de la chaleur* pour que l'eau change d'état.

Exemple : La chaleur latente de **vaporisation** est la quantité de chaleur qu'il faut *fournir* à 1 kg de liquide (à pression et température constantes) pour obtenir 1 kg de vapeur.

**EXERCICE RESOLU A REALISER page 167.**

**En résumé**

Le graphique ci-dessous représente la variation de température d'un corps en fonction du temps.

**Exemple : Calculer la quantité de chaleur pour transformer 10 g de glace à  $-40^\circ\text{C}$  en 10 g de vapeur d'eau à  $120^\circ\text{C}$ .**

La quantité de chaleur nécessaire pour transformer une masse d'eau solide à une température  $t_1$  en une masse d'eau gazeuse à une température  $t_2$  résulte des cinq transformations suivantes :

- Chauffage de la glace de  $-40$  à  $0^\circ\text{C}$  :  $Q_1 = M.C_s.(0-(-40)) = M.C_s.40$
- Transformation de la glace en eau liquide à  $0^\circ\text{C}$  :  $Q_2 = M.L_F$
- Chauffage de l'eau liquide de  $0$  à  $100^\circ\text{C}$  :  $Q_3 = M.C_L.(100-0) = M.C_L.100$
- Transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau à  $100^\circ\text{C}$  :  $Q_4 = M.L_V$

- Chauffage de la vapeur d'eau de 100 à 120 °C :  $Q_5 = M.C_G.(120-100)=M.C_G.20$

La quantité de chaleur totale est :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

$$Q = M.C_S(T_F - T_1) + M.L_F + M.C_L(T_E - T_F) + M.L_V + M.C_G(T_2 - T_E)$$

$$Q = 0,010. (2,09.10^3.40 + 334.10^3 + 4,18.10^3.100 + 2255.10^3 + 1,88.10^3.20) = \mathbf{31\ 282\ J}$$

Ce calcul peut se généraliser à n'importe quelle substance en faisant agir les températures de changement d'état.

## TABLEAUX

TABLEAU 1

Chaleurs massiques de quelques solides, liquides et gaz en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  à  $25^\circ\text{C}$  et à pression constante

Solides	$c$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Liquides	$c$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Gaz	$c$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Acier	0,45	Eau ( $15^\circ\text{C}$ )	4,18	Air ( $15^\circ\text{C}$ )	1,00
Aluminium	0,90	Eau ( $100^\circ\text{C}$ )	4,21	Ammoniac	2,17
Bois	1,7 - 2,5	Essence	2,09	Azote	1,04
Cuivre	0,38	Ethanol	2,42	Eau vapeur ( $100^\circ\text{C}$ )	1,88
Fer	0,44	Glycérine	2,26	Hydrogène	14,25
Glace ( $-10^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}$ )	2,09	Huile d'olive	1,96	Méthane	2,22
Paraffine	2,90	Mercure	0,14	Oxygène	0,92
Plomb	0,13	Méthanol	2,51		
Terre	0,8 - 0,9				
Verre ordinaire	0,84				
Zinc	0,39				

TABLEAU 2

Température de fusion et chaleur de fusion de quelques solides en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 

	$\theta$ . fusion ( $^\circ\text{C}$ )	$L_{fus}$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
Étain	232	59
Glace	0	334
Mercure	-39	12
Plomb	327	25
Zinc	420	117

TABLEAU 3

Température d'ébullition et chaleur de vaporisation de quelques liquides en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $p = 1\,013\text{ hPa}$ ).

	$\theta$ . ébullition ( $^\circ\text{C}$ )	$L_{vap}$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
Ammoniac	-33,4	1 367
Butane	-0,5	382
Ethanol	78,3	854
Ether	34,8	351
Eau	100	2 255
Plomb	1 620	912

Chaleurs massiques et latentes de quelques matériaux.

Voir exercice (résolu) en fin de dossier.

**B – Transformation d'énergie thermique et machines thermiques**

Les machines thermiques sont des machines qui transforment l'énergie thermique en énergie mécanique (moteur à essence, centrale électrique thermique, machine frigorifique, pompe à chaleur, tur-

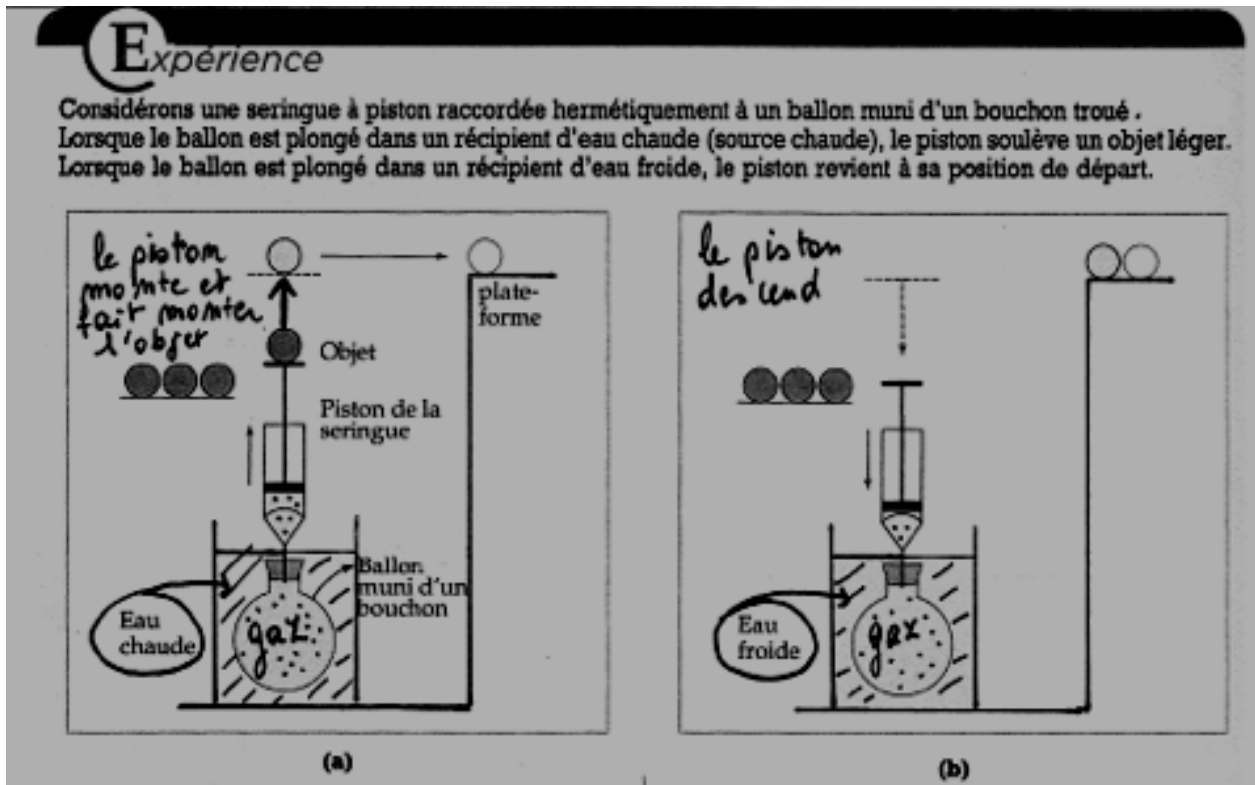


FIG. 87 :

boréacteurs des avions).

Les premières machines thermiques furent les machines à vapeur ( James Watt – 1770) qui contribuèrent à la révolution industrielle . Vinrent ensuite le moteur à essence (Otto – 1876) et le moteur diesel (Diesel - 1893).

### B.1 – MACHINES THERMIQUES

#### a) Fonctionnement simplifié d'une machine thermique.

Le ballon rempli de gaz relié hermétiquement à la seringue est appelé **le système**.

Ce dispositif servait à remonter le charbon dans les mines.

1<sup>er</sup> temps (fig.a) :

- Une source chaude chauffe le système. (source chaude :  $Q_1$ )
- Le gaz se dilate et l'augmentation de pression fait monter le piston. Il y a donc transformation d'énergie thermique en travail ( $W$ ).

2<sup>e</sup> temps (fig.b) :

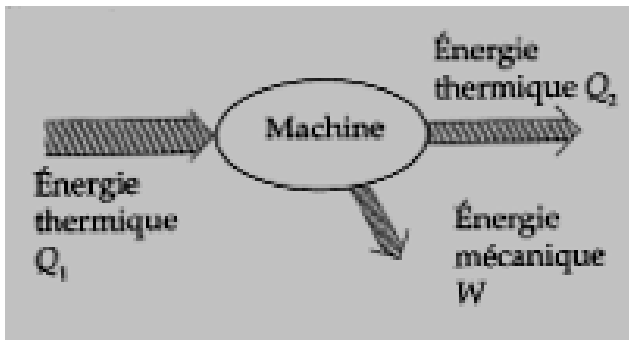
- Le système est refroidi (source froide :  $Q_2$ ). En effet, pour que la machine puisse monter d'autres objets, il faut faire redescendre le piston. Le système doit revenir à son état initial.

Le cycle de montée–descente peut recommencer. Nous avons donc un mouvement de va-et-vient : un cycle.

Pour qu'une machine thermique puisse fonctionner, il faut disposer de deux sources : une source chaude et une source froide.

Bilan des échanges d'énergie :  $Q_1 = W + Q_2$





b) Bilan des échanges d'énergie.

- $Q_1$  : énergie thermique que le système reçoit (source chaude).
- $W$  : travail effectué par le système.
- $Q_2$  : énergie thermique perdue par le système (source froide).

Si nous admettons qu'à la fin de son cycle, le système est revenu à son état initial :

**L'énergie thermique reçue par le système est égale à l'énergie cédée sous forme d'énergie mécanique et thermique :**

$$Q_1 = W + Q_2 \quad W = Q_1 - Q_2$$

### c) Rendement d'une machine thermique

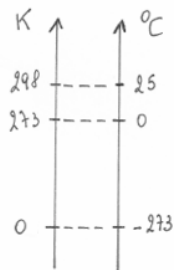
*Il apparaît donc qu'une machine thermique ne peut convertir la totalité de l'énergie thermique  $Q_1$  qui lui est fournie en énergie mécanique  $W$ . Il y a nécessairement une partie de l'énergie thermique qui part vers la source froide (sans quoi, il n'y a pas de cycle).*

Or, c'est bien l'énergie mécanique qui est recherchée par l'utilisateur.

*Rendement d'une machine thermique :*

*Remarques :*

- Si  $T_2$  est proche de  $T_1$ , le rendement tend vers 0. Pour augmenter le rendement d'une machine thermique, il faut une grande différence de température entre la source chaude et la source froide.



- Si  $T_1 \gg T_2$ , le rapport  $T_2/T_1$  tend vers zéro et le rendement vers 100%. Pour augmenter le rendement d'une machine thermique, il faut une grande différence de température entre la source chaude et la source froide.

*Rappel : conversion de degré Celsius en degré Kelvin :*

## B.2 – MOTEURS

### a) Le moteur à essence (pages 170-171).

Le moteur à essence est une machine thermique puisqu'il transforme une énergie thermique en énergie mécanique.

La source chaude résulte de la combustion du mélange air - essence.

La source froide est l'atmosphère. Le rendement d'un moteur est donc plus performant par temps froid.

Dans la grande majorité des cas, un moteur possède 4 cylindres.

Chaque cylindre est relié au vilebrequin (**dispositif mécanique** qui permet la transformation du mouvement linéaire rectiligne du piston en un **mouvement de rotation** continu).

Le moteur thermique d'une voiture fonctionne en quatre étapes. On dit donc qu'il s'agit d'un moteur à quatre temps.

Dans le moteur sont creusés des cylindres et à l'intérieur de chaque cylindre se trouve un piston.

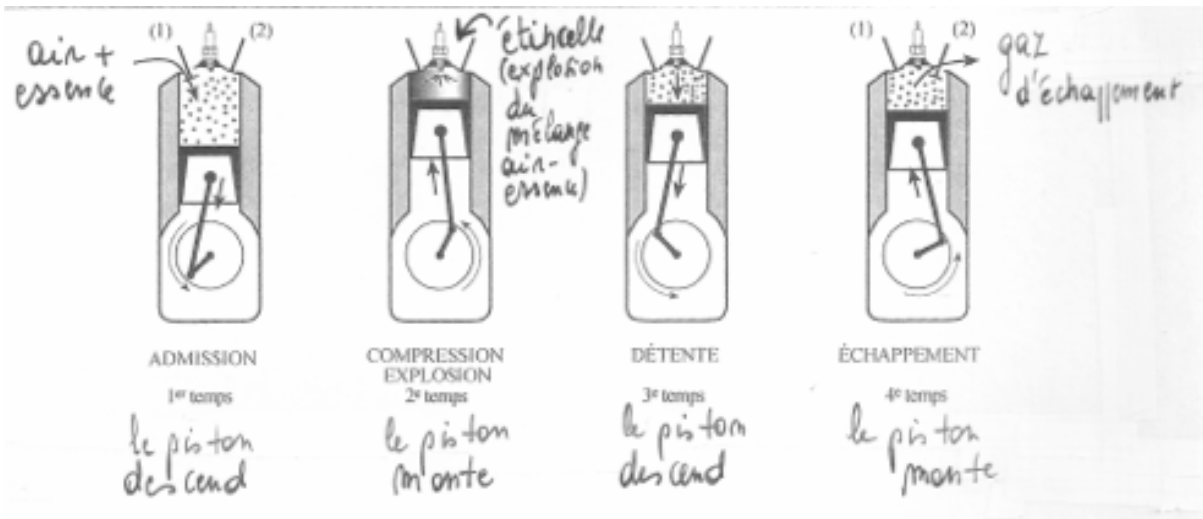
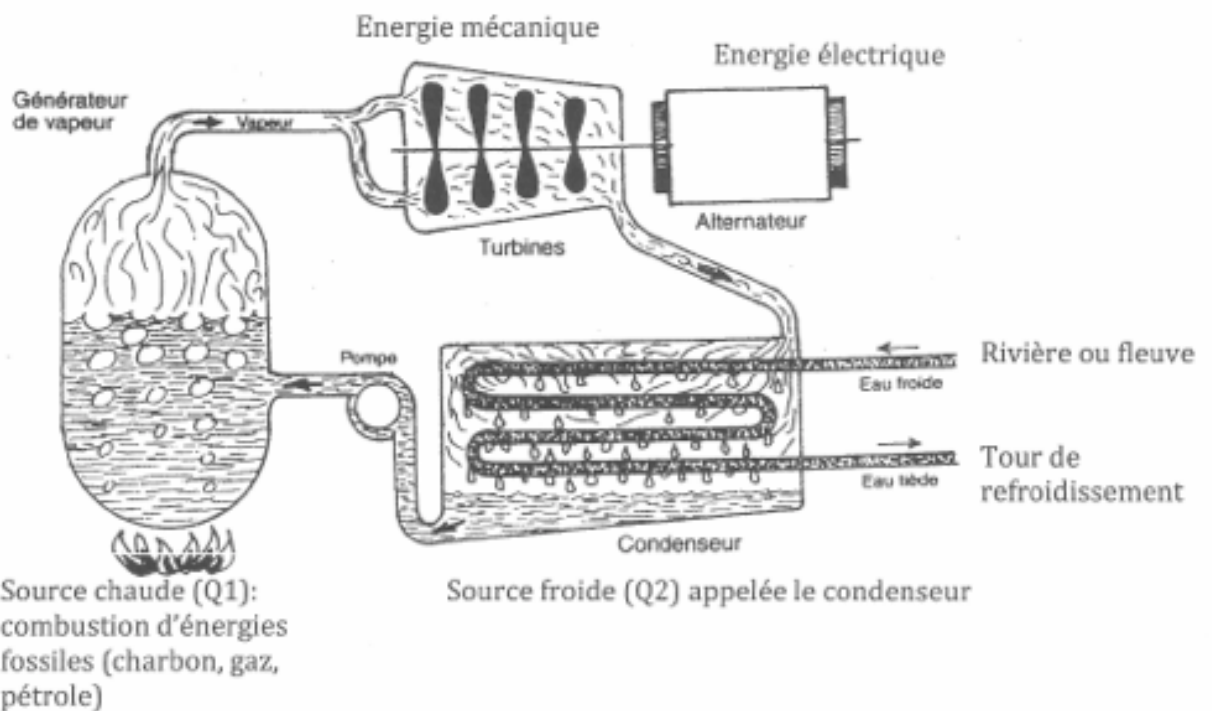


FIG. 88 :

1. **Admission** : les pistons descendent, aspirant du carburant et de l'air.
2. **Compression - explosion** : en remontant, tout ce mélange est comprimé dans les cylindres.
3. **Détente** : arrivé en haut, il se produit une combustion de ce mélange grâce à une étincelle. Cette explosion renvoie alors les pistons vers le bas.
4. **Echappement** : les pistons remonteront à nouveau pour pousser les gaz d'échappement vers l'extérieur du moteur. Le cycle recommencera alors de zéro.

Ce mouvement de va et vient fait tourner un axe qui sort du moteur pour aller jusqu'aux roues. Voici donc comment le moteur thermique d'une voiture permet son fonctionnement.

a) *La centrale thermique classique*



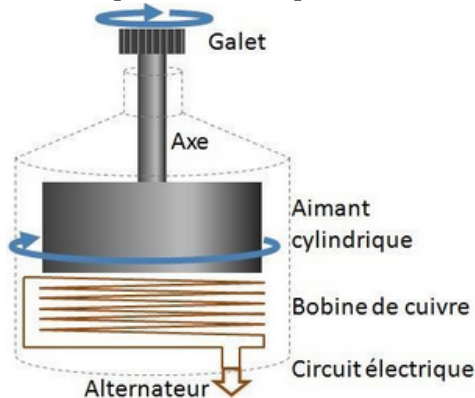
- 1) **combustion a lieu dans la chaudière** et chauffe de l'eau qui se transforme en vapeur.

Ces centrales brûlent des énergies fossiles (charbon, fioul, gaz et donc émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère) ( transformation d'énergie chimique en énergie thermique).

- 1) **La vapeur surchauffée fait tourner une turbine** (conversion d'énergie thermique en énergie mécanique). Cette turbine actionnera un alternateur pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.
- 2) **La vapeur est ensuite refroidie par de l'eau froide** dans le condenseur.
- 3) **L'eau de condensation est renvoyée dans la chaudière.** L'eau froide qui a servi à la condensation ressort tiède, (elle emporte  $Q_2$ ). Afin de ne pas rejeter une eau tiède dans l'environnement, elle est refroidie dans de gigantesques tours de refroidissement.

*Rappel : Fonctionnement de l'alternateur.*

Un aimant est mobile à proximité d'une bobine de fil de cuivre induit un courant électrique dans la bobine et on peut l'utiliser pour alimenter un circuit électrique.



Dans le cas d'une centrale thermique, c'est le mouvement de rotation de l'axe de la turbine qui génère le mouvement de l'aimant dans la bobine de l'alternateur.

Il y a production d'énergie électrique qui est envoyée sur le réseau.

#### a) *Machines frigorifiques et pompe à chaleur.*

Les machines frigorifiques refroidissent l'intérieur d'une enceinte en réchauffant le milieu dans lequel elles se trouvent et les pompes à chaleur font l'inverse.

Elles utilisent un fluide frigorigène (ou réfrigérant). C'est un **fluide** qui permet la mise en œuvre d'un **cycle thermique**. Ce fluide absorbe la chaleur à basse température et basse pression, puis libère la chaleur à une température et une pression plus élevées, généralement par un changement d'état. Les fluides frigorigènes sont utilisés dans les systèmes de **production de froid** (climatisation, congélateur, réfrigérateur, etc.), comme dans les systèmes de production de chaud par **pompes à chaleur**.

*Rappel :*

- La **vaporisation(ou évaporation)**, qui est le changement d'état d'un fluide **de l'état liquide à l'état gazeux**, est un phénomène **endothermique**. Le fluide prend de la chaleur à son environnement pour réaliser ce changement d'état. (Il faut chauffer de l'eau pour la vaporiser).
- La **liquéfaction**, qui est le changement d'état d'un fluide **de l'état gazeux à l'état liquide**, est un phénomène **exothermique**. Le fluide cède de la chaleur dans son environnement en réalisant ce changement d'état. (Il faut refroidir de la vapeur d'eau pour la liquéfier).

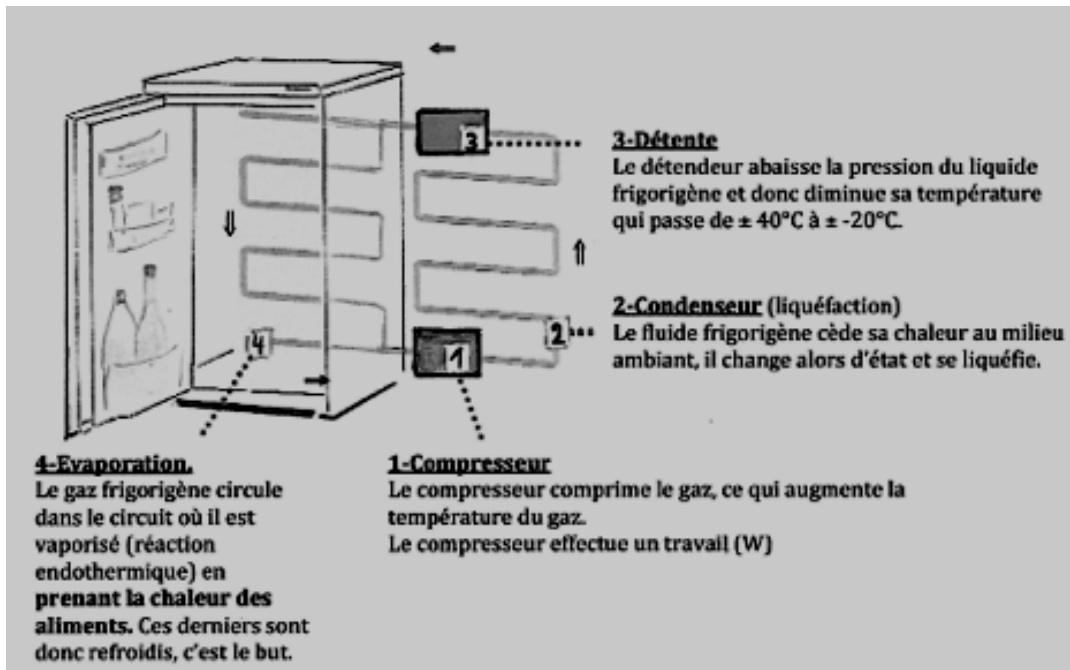
*Ces deux changements d'état, l'un exothermique, l'autre exothermique, sont la base du principe de fonctionnement des machines frigorifiques et pompes à chaleur.*

### c.1) Le réfrigérateur

#### Principe de fonctionnement du réfrigérateur

Principe de base : on refroidit l'intérieur de l'appareil et on réchauffe la pièce où se trouve le réfrigérateur.

Pour réaliser ces transferts de chaleur, on utilise un intermédiaire, un fluide que l'on fait passer alternativement de l'état gazeux à l'état liquide et inversement. On s'arrange pour que ce fluide réalise un circuit et s'évapore (et donc refroidisse l'environnement) à l'intérieur du réfrigérateur tout en se liquéfiant à l'extérieur (et donc chauffe l'environnement).



#### 1 - Compresseur.

Pour faire circuler le fluide de l'intérieur vers l'extérieur du réfrigérateur, on utilise un compresseur qui aspire d'abord le gaz, le comprime et le refoule à l'extérieur. Le gaz se transforme en vapeur à haute pression et haute température.

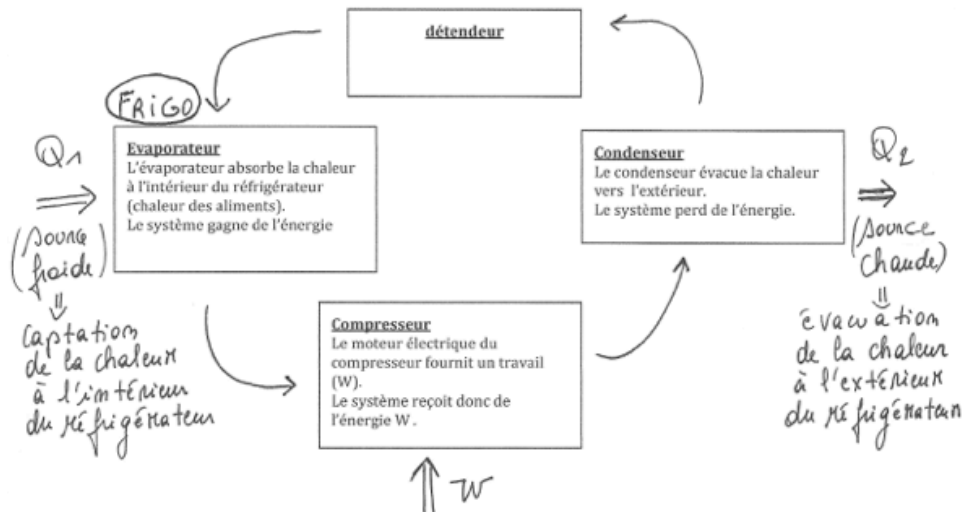


FIG. 89 :

Le compresseur fonctionne comme une pompe et fournit un travail ( $W$ ).

### 2- Condenseur.

Cette vapeur est dirigée vers le condenseur (un long serpentín en contact avec l'air ambiant plus froid (à l'extérieur du réfrigérateur)). La vapeur va donc se condenser sur les parois du serpentín tout en cédant de la chaleur à l'air extérieur. A la sortie du condenseur, le fluide est devenu liquide et s'est un peu refroidi. C'est le premier changement d'état.

### 3 - Détendeur.

Le fluide passe ensuite dans le détendeur : dispositif qui diminue brutalement la pression du fluide avec pour conséquence une baisse importante de la température en dessous de celle que l'on veut maintenir à l'intérieur du réfrigérateur.

Rappel : diminuer la pression d'un gaz diminue sa température.

### 4 - Evaporation.

Ce liquide entre dans le réfrigérateur et arrive dans l'évaporateur qui, comme le condenseur, est un long serpentín qui met le fluide en contact avec l'air à l'intérieur du frigo. Cet air est plus chaud que le fluide et donc ce fluide recevant de la chaleur (les aliments dans le frigo sont plus chauds que le fluide), va se transformer en gaz (il se vaporise) en extrayant la chaleur de l'air ambiant (provenant de la chaleur des aliments). L'intérieur du réfrigérateur se refroidit.

Et le cycle recommence.

### Bilan énergétique du réfrigérateur et rendement

En vertu du principe de conservation d'énergie, le système étant le fluide qui circule, les énergies reçues par le système sont égales à l'énergie cédée.

L'énergie utile est  $Q_1$  et l'énergie investie  $W$ . On peut donc exprimer **le rendement** sous la forme :

#### c.2. La pompe à chaleur

La pompe à chaleur est utilisée comme procédé d'énergie de chauffage.

La pompe à chaleur fonctionne de la même façon qu'un réfrigérateur.

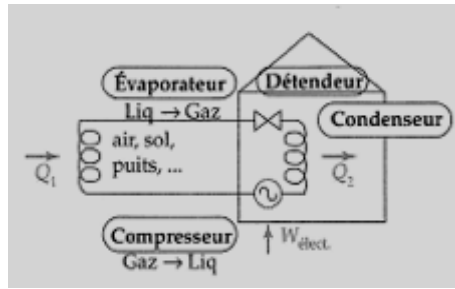


FIG. 90 :

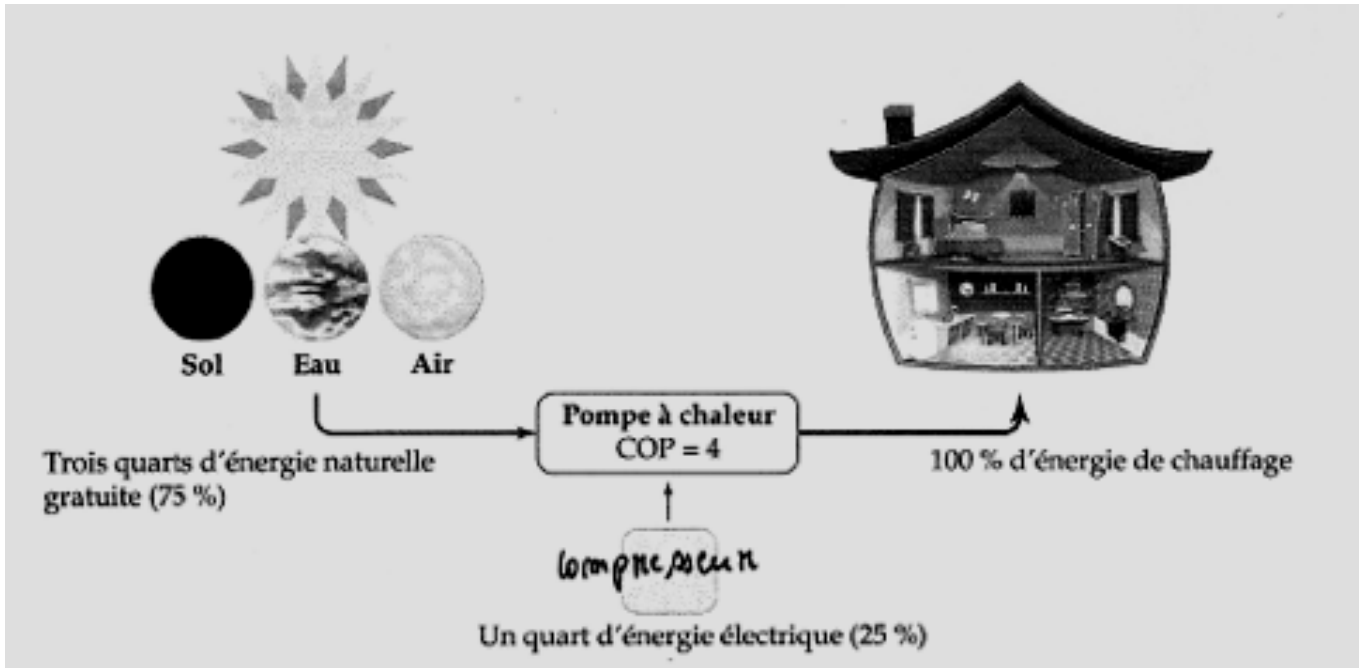


FIG. 91 :

Un fluide très volatil circule dans un circuit fermé. Dans ce cas, le condenseur est dans la maison et l'évaporateur à l'extérieur.

La partie à l'extérieur est en contact avec le sol, de l'eau ou de l'air.

### ***Bilan énergétique de la pompe à chaleur et rendement***

En vertu du principe de conservation d'énergie, le système étant le fluide qui circule, les énergies reçues par le système sont égales à l'énergie cédée (comme pour le réfrigérateur).

Puisque l'énergie thermique extérieure ( $Q_1$ ) est illimitée et que l'on paie moins d'énergie ( $W$ ) que l'on en reçoit ( $Q_2$ ), le rendement est supérieur à 1. Il est généralement appelé « COP », coefficient de performance.

Une pompe à chaleur de COP égal à 4 utilise 1 kWh électrique ( $W$ ) pour 4 kWh thermique ( $Q_2$ ). Ce qui signifie que trois quarts de l'énergie de chauffage ( $Q_1$ ) provient d'une source gratuite et renouvelable.

NB :  $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$

Le COP est d'autant plus grand que la température extérieure est faible. C'est pourquoi on utilise de préférence le sol extérieur en hiver (température constante de  $8^\circ\text{C}$  à 1 mètre de profondeur).

La pompe à chaleur est donc très intéressante d'un point de vue énergétique. Son inconvénient est le coût relativement élevé de l'installation par rapport au chauffage classique par combustion d'énergies fossiles (chaudières).

### ***Exercices de calorimétrie***

#### ***Exercice 1***

Quelle est la quantité d'énergie calorifique nécessaire pour faire fondre 300 g de glace, sachant que la chaleur latente de la glace est de  $334 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ? (rép. 100,2 kJ)

#### ***Exercice 2***

Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à une masse de 1 kg d'huile pour élever sa température de  $10^\circ\text{C}$  sachant que la chaleur massique de l'huile est de  $1960 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ?

(rép. 19,6 kJ)

**Exercice 3**

Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à une masse de 1 kg d'eau liquide pour élever sa température de  $10^\circ\text{C}$  sachant que la chaleur massique de l'eau liquide est de  $4186\text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$  ?

(rép. 41,9 kJ)

**Exercice 4**

On fournit 20 kJ à 200 g d'eau liquide qui a une température de  $20^\circ\text{C}$ . Quelle sera la température finale ? (rép.  $43,9^\circ\text{C}$ )

**Exercice 5**

Quelle est la quantité d'énergie calorifique nécessaire pour vaporiser 600 g d'éthanol sachant que la chaleur latente de l'éthanol est de  $850\text{ kJ/kg}$  ? (rép. 510 kJ)

**Exercice 6**

Quelle est la quantité d'énergie calorifique nécessaire pour transformer complètement 500 g de glace à  $-10^\circ\text{C}$  en vapeur à  $100^\circ\text{C}$  ? (rép. 1514,25 kJ).

## Exercices de calorimétrie

**Exercice 1**

Quelle est la quantité d'énergie calorifique nécessaire pour faire fondre 300 g de glace, sachant que la chaleur latente de la glace est de 334 kJ/kg.°C? (rép. 100,2 kJ)

$$\begin{array}{l}
 Q ? \\
 m = 0,3 \text{ kg} \\
 L_F = 334 \cdot 10^3 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 Q = L_F \cdot m = 334 \cdot 10^3 \cdot 0,3 \\
 Q = 100200 \text{ J} = 100,2 \text{ kJ}
 \end{array}
 \right.$$

**Exercice 2**

Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à une masse de 1 kg d'huile pour élever sa température de 10° C sachant que la chaleur massique de l'huile est de 1960 J/kg.°C? (rép. 19,6 kJ)

$$\begin{array}{l}
 Q ? \\
 m = 1 \text{ kg} \\
 \Delta\theta = 10^\circ\text{C} \\
 C_{\text{huile}} = 1960 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 Q = C m \Delta\theta \\
 Q = 1960 \cdot 1 \cdot 10 = 19600 \text{ J} \\
 = 19,6 \text{ kJ}
 \end{array}
 \right.$$

**Exercice 3**

Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à une masse de 1 kg d'eau liquide pour élever sa température de 10° C sachant que la chaleur massique de l'eau liquide est de 4186 J/kg.°C? (rép. 41,9 kJ)

$$\begin{array}{l}
 Q ? \\
 m = 1 \text{ kg} \\
 \theta = 10^\circ\text{C} \\
 C_{\text{eau}} = 4186 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 Q = C m \Delta\theta \\
 Q = 4186 \cdot 1 \cdot 10 = 41860 \text{ J} = 41,9 \text{ kJ}
 \end{array}
 \right.$$

**Exercice 4**

On fournit 20 kJ à 200 g d'eau liquide qui a une température de 20°C. Quelle sera la température finale? (rép. 43,9°C)

$$\begin{array}{l}
 Q = 20 \cdot 10^3 \text{ J} \\
 m = 0,2 \text{ kg} \\
 \theta_i = 20^\circ \\
 \theta_f ?
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 Q = C m \Delta\theta = C m (\theta_f - \theta_i) = C m \theta_f - C m \theta_i \\
 \Rightarrow \theta_f = \frac{Q + C m \theta_i}{C m} = \frac{20 \cdot 10^3 + 4186 \cdot 0,2 \cdot 20}{4186 \cdot 0,2} \\
 \Rightarrow \theta_f = 43,9^\circ\text{C}
 \end{array}
 \right.$$

**Exercice 5**

Quelle est la quantité d'énergie calorifique nécessaire pour vaporiser 600 g d'éthanol sachant que la chaleur latente de l'éthanol est de 850 kJ/kg? (rép. 510 kJ)

$$\begin{array}{l}
 Q ? \\
 L_v = 850 \cdot 10^3 \text{ J/kg.}^\circ\text{C} \\
 m = 0,6
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 Q = L_v \cdot m = 850 \cdot 10^3 \cdot 0,6 \\
 Q = 510000 \text{ J} = 510 \text{ kJ}
 \end{array}
 \right.$$



**Exercice 6**

Quelle est la quantité d'énergie calorifique nécessaire pour transformer complètement 500 g de glace à  $-10^{\circ}\text{C}$  en vapeur à  $100^{\circ}\text{C}$ ? (rép. 1514,25 kJ)

$Q$  ?

$$m = 0,5 \text{ kg}$$

$$\vartheta_i = -10^{\circ}\text{C}$$

$$\vartheta = 0^{\circ}\text{C}$$

$$\vartheta = 0^{\circ}$$

$$\vartheta = 0^{\circ}$$

$$\vartheta = 100^{\circ}$$

$$\vartheta = 100^{\circ}\text{C}$$

$$\vartheta = 100^{\circ}\text{C}$$

$\Rightarrow$  1) Augmenter la température de la glace de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $0^{\circ}\text{C}$

$$\Rightarrow Q_1 = c_{\text{glace}} m \Delta\vartheta$$

$$Q_1 = 2,09 \cdot 10^3 \cdot 0,5 (0 - (-10)) = 10450 \text{ J}$$

$\Rightarrow$  2) Faire fondre la glace

$$Q_2 = L_{\text{fus}} \cdot m = 334 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 167000 \text{ J}$$

$\Rightarrow$  3) Augmenter la température de l'eau de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $100^{\circ}\text{C}$

$$Q_3 = c_{\text{eau}} \cdot m \Delta\vartheta = 4186 \cdot 0,5 (100 - 0)$$

$$Q_3 = 209300 \text{ J}$$

$\Rightarrow$  4) Vaporiser complètement l'eau

$$Q_4 = L_v \cdot m = 2255 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 1127,5 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$\Rightarrow Q_{\text{total}} = 10450 + 167000 + 209300 + 1127,5 \cdot 10^3$$

$$\Rightarrow Q_{\text{total}} = 1514250 \text{ J} \Rightarrow Q_{\text{total}} = 1514,25 \text{ kJ}$$

Une machine thermique simple fonctionne avec deux sources de chaleur, une source chaude ( $Q_1$ ) et une source froide ( $Q_2$ ).

Si les températures respectives sont :  $t_1=70^\circ\text{C}$  et  $t_2=15^\circ\text{C}$ , calculer le rendement théorique de cette machine.

**Exercice 2 (N°3 page 184)**

Evaluer approximativement l'élévation de température d'une balle de fusil qui pénètre et s'arrête dans un paquet de sable si :

- la vitesse initiale de la balle est de 600 m/s,
- la masse de la balle est de 20 g,
- la chaleur massique du métal (fer, acier) est de 450 J/kg.°C,
- la température initiale est proche de 15°C.

**Exercice 3**

Un réchaud électrique possède une puissance de 1000 W. Il sert à chauffer un volume  $V=1\text{L}$  d'eau de  $14^\circ\text{C}$  à l'ébullition. Sachant que 60% de la chaleur dégagée par le réchaud est emmagasinée par l'eau, calculer la durée du chauffage.

**Exercice 4**

Combien de temps fait-il à un réchaud d'une puissance de 500 W pour faire passer 400 g d'eau de  $15^\circ\text{C}$  à  $98^\circ\text{C}$  ?

**Exercice 5**

Un camion de 25 tonnes roule à 90 km/h, lorsqu'il doit freiner brusquement jusqu'à l'arrêt. On suppose que 80% de l'énergie cinétique est convertie en énergie thermique des freins.

Quelle doit être la masse des disques de freins en fer ( $c_{\text{fer}}=450\text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ ) si l'échauffement ne doit pas dépasser  $\Delta T=400\text{ C}$  ?

**Exercice 6 (N°7 page 184)**

Pendant le week-end du premier mai, un voisin a remis en route le chauffage de sa piscine en utilisant sa nouvelle pompe à chaleur récupérant ainsi l'énergie de l'air extérieur à  $25^\circ\text{C}$ .

Comparer le gain énergétique de son installation par rapport à un autre moyen de chauffage de la piscine, par exemple un système de résistance chauffantes, si :

- Le rendement de l'installation électrique est de 95%.
- Le coefficient de performance de la pompe à chaleur est de 4.
- Le volume d'eau à chauffer est de  $72\text{m}^3$ .
- La température espérée pour l'eau de la piscine est de  $30^\circ$ .

**Exercice 7**

**Chauffage de l'eau du bassin d'une piscine avec une pompe à chaleur.**

Après remplissage d'une piscine d'un volume de  $560\text{ m}^3$  avec une eau initialement prise à l'extérieur à une température de  $17^\circ\text{C}$ , on souhaite augmenter la température de l'eau jusqu'à  $28^\circ\text{C}$ . On considérera que le transfert thermique depuis la pompe à chaleur sert intégralement à chauffer l'eau sans déperdition.

- 1) Calculer la valeur  $Q_2$ , énergie transférée par le fluide de la pompe à chaleur à l'eau de la piscine quand la température a atteint  $28^\circ\text{C}$ .
- 1) On a mesuré l'énergie thermique  $W_e$  consommée pendant ce transfert et trouvé une valeur égale à :  $W_e=8.10^9\text{ J}$ . déterminer la valeur de  $Q_1$ , l'énergie transférée par l'air extérieur.
- 1) Exprimer, puis calculer le coefficient de performance de la pompe à chaleur.
- 1) Montrer qu'avec une pompe à chaleur de coefficient de performance égal à 3, on réalise 67% d'économie sur la facture en énergie électrique par rapport à un chauffage direct utilisant, par exemple, une résistance électrique.

Machines thermiques - ExercicesExercice 1

Une machine thermique simple fonctionne avec deux sources de chaleur, une source chaude (Q1) et une source froide (Q2).

Si les températures respectives sont :  $t_1=70^\circ\text{C}$  et  $t_2=15^\circ\text{C}$ , calculer le rendement théorique de cette machine.

$$t_1 = 70^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 15^\circ\text{C}$$

$\eta$  ?

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \text{ où } T \text{ est la température en Kelvin}$$

$$T_1 = 273 + 70 = 343 \text{ K}$$

$$T_2 = 273 + 15 = 298 \text{ K}$$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{298}{343} = 0,16 \Rightarrow \boxed{\eta = 16\%}$$

Exercice (n°3 page 184)

Evaluer approximativement l'élévation de température d'une balle de fusil qui pénètre et s'arrête dans un paquet de sable si :

- La vitesse initiale de la balle est de 600 m/s.
- La masse de la balle est de 20 g.
- La chaleur massique du métal (fer, acier) est de 450 J/kg. $^\circ\text{C}$ .
- La température initiale est proche de 15 $^\circ\text{C}$ .



$$v_0 = 600 \text{ m/s}$$

$$m = 20 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$c = 450 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$t_i = 15^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta ?$$

La balle possède initialement une vitesse initiale de 600 m/s et donc une énergie cinétique  $E_c = \frac{mv^2}{2}$ .

Cette énergie cinétique va se transformer en énergie thermique (due au frottement)  $Q = cm\Delta\theta$

$\Rightarrow$  En vertu du principe de conservation d'énergie :

$$E_c = Q \Rightarrow \frac{mv^2}{2} = cm\Delta\theta$$

$$\Rightarrow \Delta\theta = \frac{v^2}{2c} = \frac{600^2}{2 \cdot 450} = 400^\circ\text{C} \Rightarrow \boxed{\Delta\theta = 400^\circ\text{C}}$$

La température finale de la balle sera de 415 $^\circ\text{C}$  (sans dissipation d'énergie dans le sable, ce qui n'est pas le cas dans la réalité)

**Exercice 3**

Un réchaud électrique possède une puissance de 1000 W. Il sert à chauffer un volume  $V=1\text{L}$  d'eau de  $14^\circ\text{C}$  à l'ébullition. Sachant que 60% de la chaleur dégagée par le réchaud est emmagasinée par l'eau, calculer la durée du chauffage.

$$\begin{array}{l}
 P = 1000\text{ W} \\
 V = 1\text{ l} \Rightarrow m = 1\text{ kg} \\
 \theta_i = 14^\circ\text{C} \\
 \theta_f = 100^\circ\text{C} \\
 W_{th} = 0,60 W \\
 t ?
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 P = \frac{W}{t} \Rightarrow t = \frac{W}{P} \text{ on } 60\% \text{ de la puissance} \\
 \text{sera utilisée thermiquement} \\
 \Rightarrow P_{th} = 60\% \cdot 1000 = 0,6 \cdot 1000 = 600\text{ W} \\
 \Rightarrow t = \frac{W_{th}}{P_{th}} = \frac{c m \Delta\theta}{P_{th}} = \frac{4186 \cdot 1 \cdot (100 - 14)}{600} \\
 \Rightarrow \boxed{t = 600\text{ s}}
 \end{array}
 \right.$$

**Exercice 4**

Combien de temps fait-il à un réchaud d'une puissance de 500 W pour faire passer 400 g d'eau de  $15^\circ\text{C}$  à  $98^\circ\text{C}$  ?

$$\begin{array}{l}
 P = 500\text{ W} \\
 m = 0,4\text{ kg} \\
 \theta_i = 15^\circ\text{C} \\
 \theta_f = 98^\circ\text{C}
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 P = \frac{W}{t} \Rightarrow t = \frac{W}{P} = \frac{c m \Delta\theta}{P} \\
 \Rightarrow t = \frac{4186 \cdot 0,4 \cdot (98 - 15)}{500} = 278\text{ s} = 4,6\text{ min} \\
 \boxed{t = 278\text{ s}}
 \end{array}
 \right.$$

**Exercice 5**

Un camion de 25 tonnes roule à 90 km/h, lorsqu'il doit freiner brusquement jusqu'à l'arrêt. On suppose que 80% de l'énergie cinétique est convertie en énergie thermique des freins. Quelle doit être la masse des disques de freins en fer ( $c_{fer} = 450\text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ) si l'échauffement ne doit pas dépasser  $\Delta\theta = 400^\circ\text{C}$  ?

$$\begin{array}{l}
 m_c = 25 \cdot 10^3\text{ kg} \\
 v_0 = 90\text{ m/s} = 25\text{ m/s}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 \boxed{m_c} & \boxed{\quad} \\
 \text{oo} & \text{oo}
 \end{array} \\
 v_0 = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad v = 0 \\
 \Downarrow \\
 E_c = \frac{m v_0^2}{2}
 \end{array}$$

80% de l'énergie cinétique initiale du camion sera convertie en énergie thermique due à l'échauffement des freins.

$$\begin{array}{l}
 \Rightarrow 0,80 \cdot \frac{m_c \cdot v_0^2}{2} = c_f m_f \Delta\theta \Rightarrow m_f = \frac{0,80 \cdot m_c \cdot v_0^2}{2 \cdot c_f \cdot \Delta\theta} \\
 \Rightarrow m_f = \frac{0,80 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 25^2}{2 \cdot 450 \cdot 400} = 34,7\text{ kg} \\
 \boxed{m_f = 34,7\text{ kg}}
 \end{array}$$



**Exercice (N°7 page 184)**

Pendant le week-end du premier mai, un voisin a remis en route le chauffage de sa piscine en utilisant sa nouvelle pompe à chaleur récupérant ainsi l'énergie de l'air extérieur à 25°C.

Comparer le gain énergétique de son installation par rapport à un autre moyen de chauffage de la piscine, par exemple un système de résistance chauffantes, si :

- Le rendement de l'installation électrique est de 95%.
- Le coefficient de performance de la pompe à chaleur est de 4.
- Le volume d'eau à chauffer est de 72m<sup>3</sup>
- La température espérée pour l'eau de la piscine est de 30°.

•  $\theta_1 = 25^\circ\text{C}$   
 •  $\theta_2 = 30^\circ\text{C}$  }  $\Delta\theta = 30 - 25 = 5^\circ\text{C}$

•  $W_{e \text{ fourni}} = 0,95 W_e$  (car 95% de l'énergie électrique fournie sera utilisable (car il y a des pertes))  
 ↓  
 Énergie électrique fournie      ↓  
 Énergie électrique utilisable

• COP = 4      (COP =  $\frac{Q_2}{W_e}$ )

•  $V = 72 \text{ m}^3 \Rightarrow m_{\text{H}_2\text{O}} = \rho \cdot \text{Vol} = 10^3 \cdot 72 = 72 \cdot 10^3 \text{ kg}$

$\rho_{\text{eau}}$   
 $\rho = \frac{m}{\text{Vol}}$   
 $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

• Comparer-① Énergie électrique fournie par un système de chauffage direct (que je vais noter  $W_{ed}$ ) (par exemple par des résistances chauffantes)



95% de l'énergie électrique se transforme en chaleur  $Q_2$  qui élève la température de l'eau de la piscine.

$\Rightarrow 0,95 W_{ed} = Q_2 \Rightarrow W_{ed} = \frac{Q_2}{0,95}$  ①

② Énergie électrique fournie par une pompe à chaleur (que je vais noter  $W_{ep}$ ) sachant que 95% de l'énergie fournie par le réseau sont utilisables.

COP =  $\frac{Q_2}{0,95 W_{ep}} \Rightarrow W_{ep} = \frac{Q_2}{0,95 \cdot 4}$  ②

$\Rightarrow \frac{W_{ep}}{W_{ed}} = \frac{\frac{Q_2}{0,95 \cdot 4}}{\frac{Q_2}{0,95}} = \frac{1}{4} = 0,25 \Rightarrow W_{ep} = 0,25 W_{ed} \Rightarrow W_{ep} = 25\% W_{ed}$

Commentaires:

$W_{ep} = 25\% W_{ed} \Rightarrow$  La pompe à chaleur consomme 4 fois moins d'énergie électrique qu'un chauffage électrique direct.

PS. Il n'y avait pas besoin d'utiliser toutes les données. Je vais à présent détailler le calcul en utilisant toutes les données:

①  $W_{ed}$ ? 95% de l'énergie électrique sera directement utilisée pour augmenter la température de l'eau de piscine  $Q_2 = cm\Delta\theta$

$$\Rightarrow 0,95 W_{ed} = Q_2 = cm\Delta\theta$$

$$\Rightarrow W_{ed} = \frac{Q_2}{0,95} = \frac{4186 \cdot 72 \cdot 10^3 (30 - 25)}{0,95} = \frac{1,5 \cdot 10^9}{0,95} = 1,58 \cdot 10^9 \text{ J}$$

$$\boxed{W_{ed} = 1,58 \cdot 10^9 \text{ J}}$$

②  $W_{ep}$ ?

$$\text{COP} = \frac{Q_2}{0,95 W_{ep}} = 4 \Rightarrow W_{ep} = \frac{Q_2}{4 \cdot 0,95} = \frac{cm\Delta\theta}{4 \cdot 0,95} = \frac{1,5 \cdot 10^9}{4 \cdot 0,95} = 3,97 \cdot 10^8 \text{ J}$$

$$\boxed{W_{ep} = 3,97 \cdot 10^8 \text{ J}}$$

Comparaison:  $\frac{W_{ep}}{W_{ed}} = \frac{3,97 \cdot 10^8}{1,58 \cdot 10^9} = 0,25 \Rightarrow W_{ep} = 25\% W_{ed}$



**Exercice****Chauffage de l'eau du bassin d'une piscine avec une pompe à chaleur.**

Après remplissage d'une piscine de volume  $V = 560 \text{ m}^3$  avec une eau initialement prise à l'extérieur à une température de  $17^\circ\text{C}$ , on souhaite augmenter la température de l'eau de piscine jusqu'à  $28^\circ\text{C}$ . On considérera que le transfert thermique depuis la pompe à chaleur sert intégralement à chauffer l'eau de la piscine sans déperdition.

- 1) Calculer la valeur de  $Q_2$ , énergie transférée par le fluide de la pompe à chaleur à l'eau du bassin de la piscine quand la température de l'eau a atteint  $28^\circ\text{C}$
- 2) On a mesuré l'énergie électrique  $W_e$  consommée pendant ce transfert et trouvé une valeur égale à  $W_e = 8,0 \times 10^9 \text{ J}$ . Déterminer la valeur de  $Q_1$ , l'énergie transférée par l'air extérieur.
- 3) Exprimer, puis calculer le coefficient de performance de la pompe à chaleur.
- 4) Montrer qu'avec une pompe à chaleur de coefficient de performance  $\eta = 3$ , on réalise 67 % d'économie sur sa facture en énergie électrique par rapport à un chauffage direct utilisant, par exemple, une résistance électrique. En conclusion, répondre en quelques lignes à la question suivante : en quoi l'utilisation de pompes à chaleur apporte-t-elle une réponse à des problématiques énergétiques contemporaines ?

$V = 560 \text{ m}^3$   
 $\theta_1 = 17^\circ\text{C}$  (source froide)  
 $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$  (source chaude)

1)  $Q_2$  ?

$Q_2 = m c \Delta\theta$

$m$  ?

$\rho = \frac{m}{\text{volume}}$   $\Rightarrow m = \rho \cdot \text{volume}$   $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$\Rightarrow m = 10^3 \cdot 560 \text{ kg}$

$\hookrightarrow$  masse de l'eau de la piscine

$\Rightarrow Q_2 = m c \Delta\theta = 560 \cdot 10^3 \cdot 4186 \cdot (28 - 17) = 2,6 \cdot 10^{10} \text{ J} = Q_2$

2)  $W_e = 8 \cdot 10^9 \text{ J}$

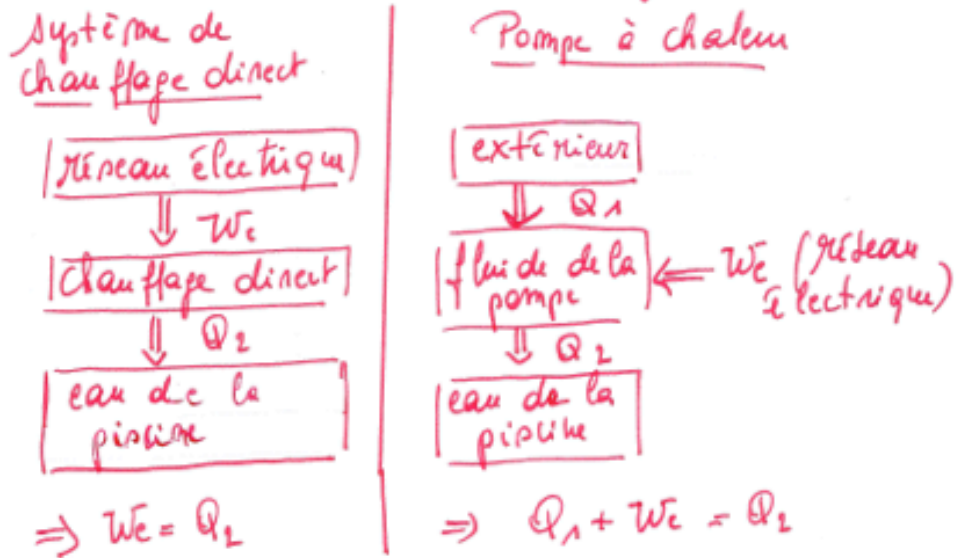
$Q_1$  ?

$Q_1 = Q_2 - W_e = 2,6 \cdot 10^{10} - 8 \cdot 10^9 = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ J}$

3) COP ?  $\text{COP} = \frac{Q_2}{W_e} = \frac{2,6 \cdot 10^{10}}{8 \cdot 10^9} = 3,2 = \eta$



4) Si  $\eta = 3 \Rightarrow$  On réalise 67% d'économie sur la facture électrique en comparaison avec un système de chauffage direct.



On constate donc que pour un même  $Q_2$ ,  $W_e$  en chauffage direct est plus grand que  $W_e$  avec pompe à chaleur.  $\Rightarrow$  la pompe à chaleur est bien plus intéressante au niveau de la facture d'électricité

Pompe à chaleur ( $W_{ep}$ )

$$\text{Si } \eta = 3 \Rightarrow \eta = \frac{Q_2}{W_e} = 3 \Rightarrow W_{ep} = \frac{Q_2}{3} = \frac{1}{3} Q_2$$

Chauffage direct ( $W_{ed}$ )

$$W_{ed} = Q_2$$

En comparant  $W_{ep}$  et  $W_{ed}$  sachant que  $Q_2$  est identique dans les deux cas (on veut la même élévation de température)

$$\Rightarrow 3 W_{ep} = W_{ed} \Rightarrow W_{ep} = \frac{W_{ed}}{3} = \frac{1}{3} W_{ed}$$

$\Rightarrow$  Une pompe à chaleur consomme trois fois moins qu'un chauffage classique  $\Rightarrow$  on économise  $\frac{2}{3}$  de l'énergie électrique, c'est-à-dire 67% = 67%

$\Rightarrow$  CQFD.

(En plus, une pompe à chaleur utilise une énergie renouvelable)



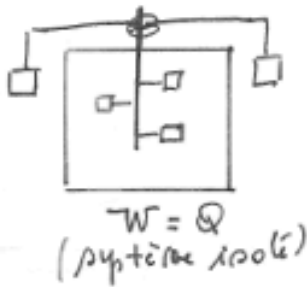
# Thermodynamique - Calorimétrie et machines thermiques

## A - Conservation de l'énergie et premier principe de la thermodynamique

A.1 - Mise en situation : de l'énergie mécanique se transforme en énergie thermique

### A.2 - Rappels de calorimétrie

a) Expérience de Joule (Échauffement d'un corps par apport d'énergie mécanique)



$$Q = c m \Delta \theta$$

$$c_{eau} = 4186 \text{ J/kg} \cdot \text{°C}$$

$c$ : chaleur massique (en  $\text{J/kg} \cdot \text{°C}$ )  
 $m$ : masse (en kg)  
 $\Delta \theta$ : variation de température ( $\text{°C}$ )

b) Premier principe de la thermodynamique

Dans un système isolé, l'énergie totale reste constante

c) Rendement d'une transformation énergétique

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

$$0 < \eta < 1$$

↓  
100%

### A.3 - Echange d'énergie lors d'un changement d'état.

Il n'y a pas de variation de température au cours d'un changement d'état

$$Q = L m$$

$L$ : chaleur latente ( $\text{J/kg}$ )  
 $m$ : masse (kg)  
 $Q$ : énergie thermique (en J)

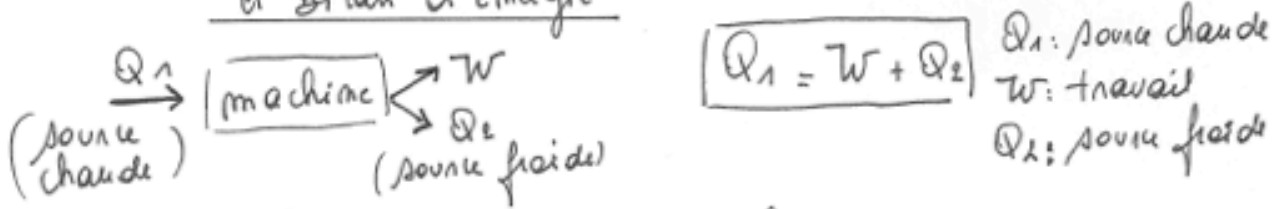
$$L_{fusion\ glace} = 334 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

FIG. 92 :

## B - Transformation d'énergie thermique et machines thermiques

### B-1 - Machines thermiques

a) b) Fonctionnement simple d'une machine thermique et bilan d'énergie



c) Rendement d'une machine thermique

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

T: ° en Kelvin  
 $T = t + 273$   
 K    °Celsius

### B-2 - Moteurs

a) Moteur à essence : 4 temps

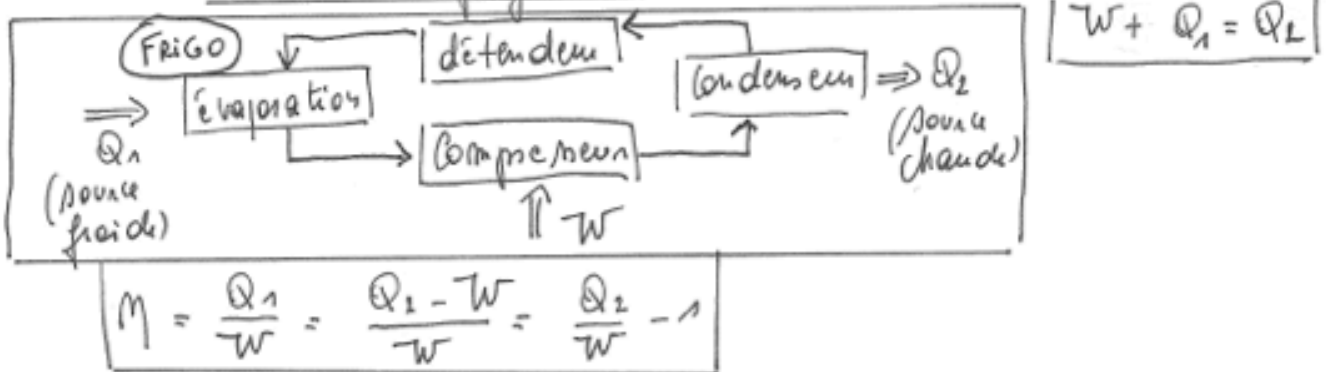
- admission
- compression - explosion
- détente
- échappement

b) Centrale thermique classique

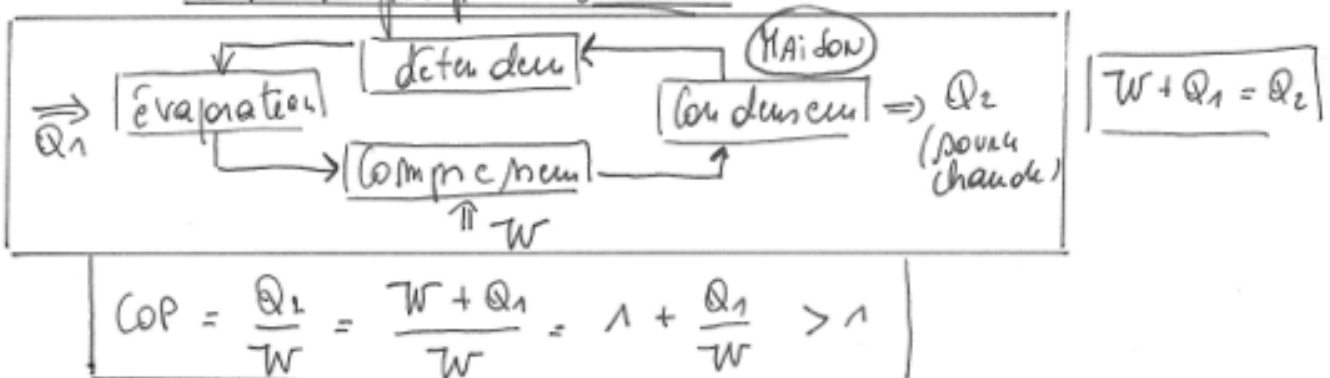
- Combustion → Vapeur (Q1)
- Turbine (+ alternateur) (W)
- Condenseur (Q2)

c) Machines frigorifiques et pompes à chaleur

#### c.1 - le réfrigérateur



#### c.2 - La pompe à chaleur



**QUESTION 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 deuxième maximum ?

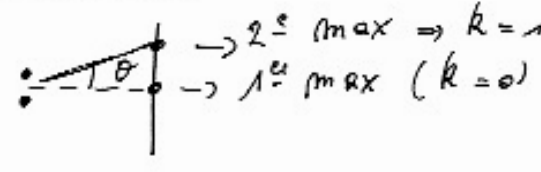
$$\lambda = 600 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$a = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 10^{-4} \text{ m}$$

$$\theta ?$$

$$k = 1$$

$$\sin \theta = \frac{k\lambda}{a} \Rightarrow \theta = \text{Arctan} \left( \frac{k\lambda}{a} \right)$$

$$\Rightarrow \theta = \text{Arctan} \left( \frac{1 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{10^{-4}} \right) = 0,34^\circ$$


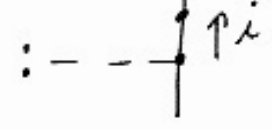
$\theta = 0,34^\circ$

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

$$i ?$$

$$d = 3 \text{ m}$$

$$i = \frac{\lambda d}{a} = \frac{600 \cdot 10^{-9} \cdot 3}{10^{-4}} = 0,018 \text{ m}$$

$$i = 18 \text{ mm}$$


$i = 18 \text{ mm}$

**QUESTION 2**

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.

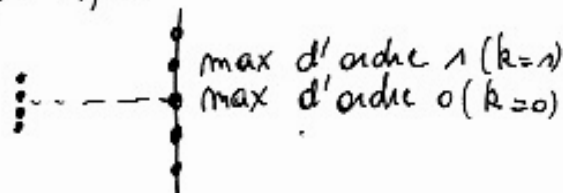
Quelle est la distance sur l'écran entre le maximum d'ordre 1 et le maximum central ?

$$300 \text{ fentes} \rightarrow 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rightarrow 1 \text{ fente} \rightarrow \frac{10^{-3}}{300} \text{ m} = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m} \Rightarrow a = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\lambda = 650 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$d = 2,4 \text{ m}$$



$\Rightarrow$  On demande  $i$

$$i = \frac{\lambda d}{a} = \frac{650 \cdot 10^{-9} \cdot 2,4}{3,33 \cdot 10^{-6}} = 0,468 \text{ m}$$

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

$i = 468 \text{ mm}$

**QUESTION 3**

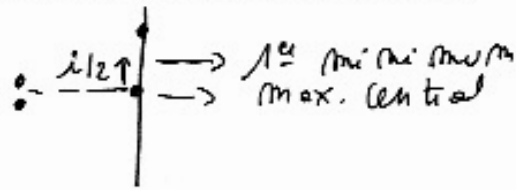
On fait passer de la lumière ayant une longueur d'onde de 500 nm à travers deux fentes séparées de 0,01 mm. On observe la figure de diffraction sur un écran situé à 2 m de la fente.

- a) Quelle est la distance entre le centre du maximum central et le premier minimum?  
 b) Quelle est la distance entre le centre du maximum central et le deuxième minimum?

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

$$a = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 10^{-5} \text{ m}$$

$$d = 2 \text{ m}$$



a)  $\frac{i}{2}$  ?  $\lambda = \frac{ia}{d} \Rightarrow i = \frac{\lambda d}{a}$

$$\Rightarrow i = \frac{500 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{10^{-5}} = \frac{10^3 \cdot 10^{-9}}{10^{-5}} = 10^{-1} \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \frac{i}{2} = 5 \text{ cm}$$

b)  $\frac{2^e \text{ minimum}}{\text{max central}} \Rightarrow i + \frac{i}{2} = \frac{3i}{2}$

$$\frac{3i}{2} = \frac{3 \cdot 10}{2} = 15 \text{ cm}$$

$$\frac{i}{2} = 5 \text{ cm}$$

$$\frac{3i}{2} = 15 \text{ cm}$$

**QUESTION 4**

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.

$$\lambda = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

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

$$\Rightarrow 1 \text{ trait} \rightarrow \frac{10^{-3}}{400} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\Rightarrow a = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$\theta$  ?

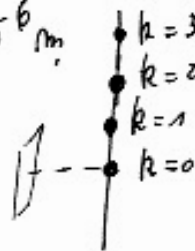
a) pour  $k=2$

$$\sin \theta = \frac{k\lambda}{a} \Rightarrow \theta = \text{Arctan} \left( \frac{k\lambda}{a} \right)$$

$$\Rightarrow \theta = \text{Arctan} \left( \frac{2 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{2,5 \cdot 10^{-6}} \right) = 26^\circ$$

b) pour  $k=3$

$$\theta = \text{Arctan} \left( \frac{3 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{2,5 \cdot 10^{-6}} \right) = 41,3^\circ$$



$$\theta_{(\text{ordre } 2)} = 26^\circ$$

$$\theta_{(\text{ordre } 3)} = 41,3^\circ$$

**QUESTION 5**

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?

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

$$d = 1,6 \text{ m}$$

$$i = 50 \text{ cm} = 50 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$\lambda ?$

$$\lambda = \frac{i a}{d} = \frac{50 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2}}{1,6} = 0,003 \text{ m} = 3 \text{ mm}$$

$$\lambda = 3 \text{ mm}$$

Remarque: que  $\lambda_{\text{micro-ondes}} \gg \lambda_{\text{lumière visible}}$

**QUESTION 6**

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?

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

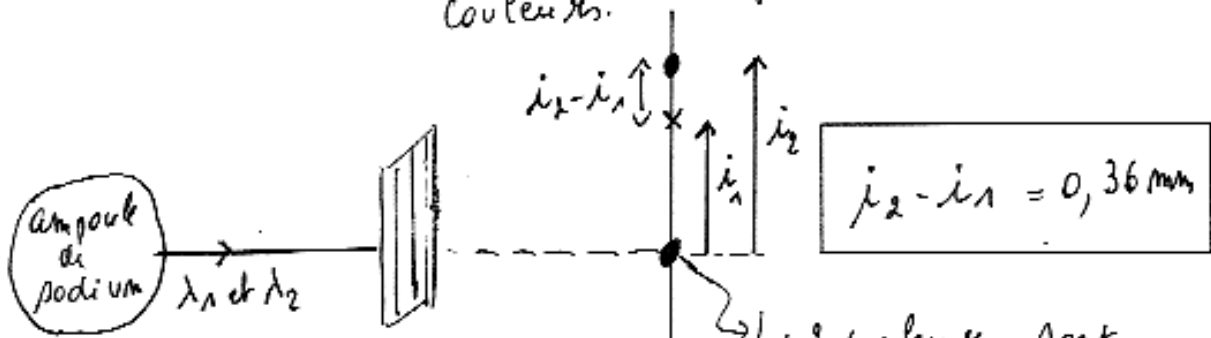
$$1 \text{ fente} \rightarrow \frac{10^{-3}}{300} = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m} = a$$

$$d = 2 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 589 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 589,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

La lumière blanche est constituée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.  
Par contre, une source de sodium émet (lors qu'on la chauffe) 2 couleurs ( $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ ).  
Un réseau va permettre de séparer ces couleurs.



$$i_1 = \frac{\lambda_1 d}{a} = \frac{589 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{3,36 \cdot 10^{-6}} = 353,8 \text{ mm}$$

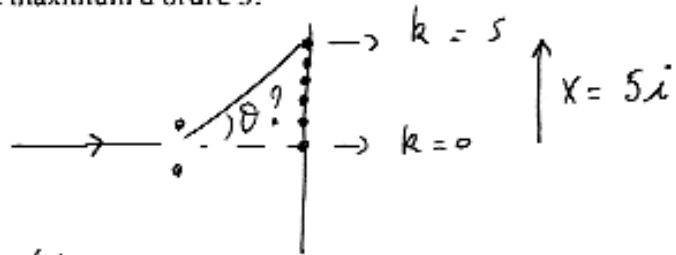
$$i_2 = \frac{\lambda_2 d}{a} = \frac{589,6 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{3,36 \cdot 10^{-6}} = 354,1 \text{ mm}$$

Les 2 couleurs sont superposées (elles ont le même point central)  
 $\Rightarrow \Delta = i_2 - i_1 = 0,36 \text{ mm}$

**QUESTION 7**

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?

$\lambda = 500 \cdot 10^{-9} \text{ m}$   
 $a = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$   
 $d = 1,6 \text{ m}$   
 $\theta ? \quad k = 5$



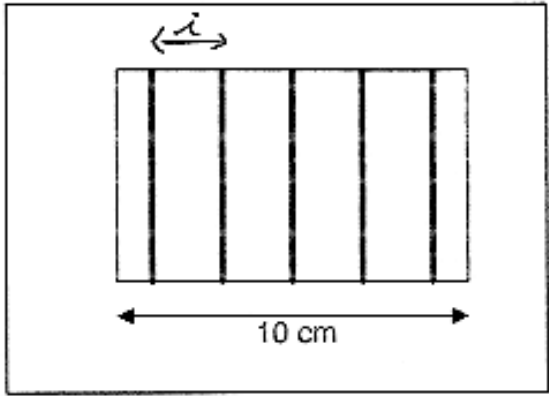
$\sin \theta = \frac{k\lambda}{a} \Rightarrow \theta = \text{Arctan} \left( \frac{k\lambda}{a} \right)$   
 $= \text{Arctan} \left( \frac{5 \cdot 500 \cdot 10^{-9}}{10^{-4}} \right)$

$\Rightarrow \theta = 1,43^\circ$

$\theta = 1,43^\circ$

**QUESTION 8**

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  $\mu$  m.



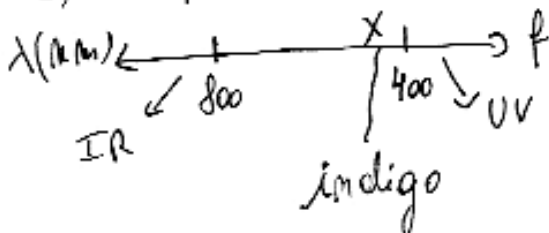
- a) En déduire la longueur d'onde de la lumière monochromatique qui éclaire le réseau.
- b) De quelle couleur s'agit-il ?

$d = 0,46 \text{ m}$   
 $a = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 10^{-5} \text{ m}$   
 a)  $\lambda ? \quad \lambda = \frac{ia}{d} < \lambda ?$

mais sur le schéma, on voit que  $5i = 10 \text{ cm} \Rightarrow i = 2 \text{ cm} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$   
 $\Rightarrow \lambda = \frac{ia}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-5}}{46 \cdot 10^{-2}} = 0,435 \cdot 10^{-5} \text{ m}$   
 $= 435 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 435 \text{ nm}$

$\lambda = 435 \text{ nm}$

b) le spectre de la lumière blanche.



indigo

**QUESTION 9**

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 ?

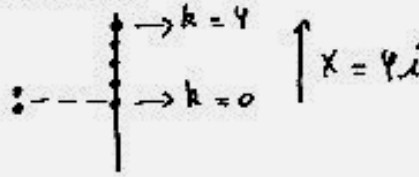
$$\lambda = 600 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$4i = 1 \text{ cm} \Rightarrow i = 0,25 \text{ cm}$$

$$i = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$d = 2 \text{ m}$$

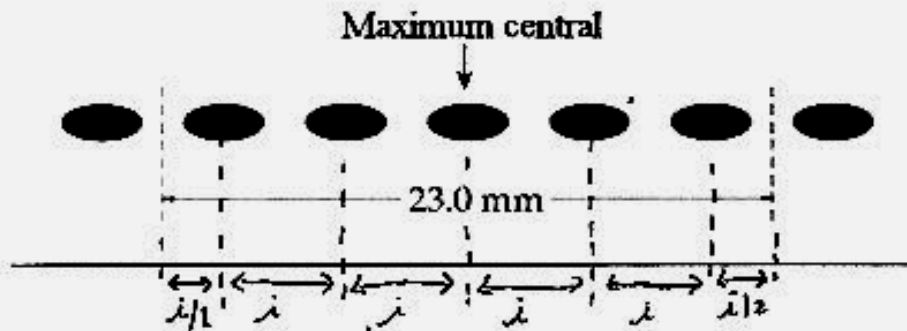
$$a ? \quad a = \frac{\lambda d}{i} = \frac{600 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,48 \text{ mm}$$



$$a = 0,48 \text{ mm}$$

**QUESTION 10**

Dans 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 ?



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

$$a = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$d ?$$

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

$$\text{or } \lambda = \frac{ia}{d} \Rightarrow d = \frac{ia}{\lambda} = \frac{4,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{632 \cdot 10^{-9}}$$

$$\Rightarrow d = 1,46 \text{ m}$$

$$d = 1,46 \text{ m}$$