Les Ondes :

Plan de cours :

Les ondes mécaniques progressives :

Définition d'une onde mécanique :

Onde mécanique : C'est le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel sans transport de la matière, mais avec le transport de l'énergie.
Milieu matériel élastique : (compressible et expansible) S'il est capable de reprendre sa forme initiale après avoir subit le passage d'une onde.

Les différents types d'ondes :

Onde transversale : Une onde est dite transversale si le vecteur de déplacement $\vec{u}$ est perpen- diculaire à la direction de propagation d'onde (le vecteur vitesse $\vec{v}$) $\vec{u} \perp \vec{v}$.
Comme l'onde le long d'une corde ou à la surface de l'eau.

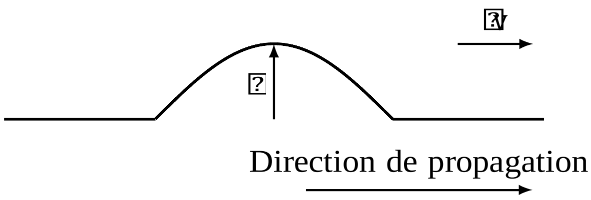
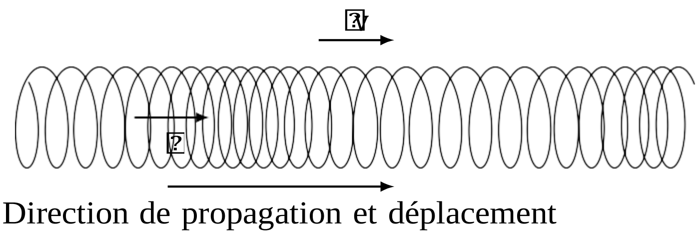


Figure 1: $\vec{u}$ est le vecteur de déplacement et $\vec{v}$ est le vecteur vitesse.

Onde longitudinale : Une onde est dite longitudinale, si la direction de déplacement est parallèle à celle de propagation de l'onde c'est à dire $\vec{u} \parallel \vec{v}$.
Comme l'onde le long d'un ressort ou l'onde sonore.



Propriétés des ondes mécaniques :

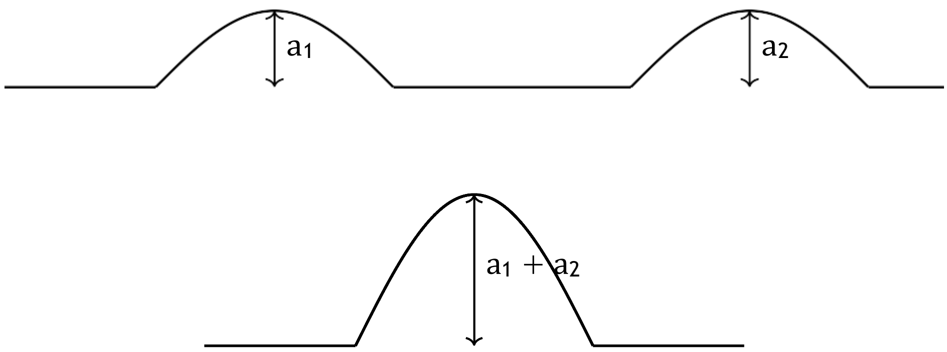
Dimension d'onde : Une onde mécanique se propage à partir de la source dans toutes les directions qui lui sont offertes.

L'onde à une dimension : si elle se propage selon un axe depuis sa source, à titre d'exemple le ressort.

L'onde à deux dimensions : si elle se propage selon deux axes depuis sa source, comme l'onde à la surface de l'eau.

L'onde à trois dimensions : si elle se propage selon trois axes (L'espace (x, y, z)) depuis sa source, par exemple l'onde sonore.

Superposition d'ondes : Lorsque plusieurs ondes de propagent dans la même région, elles se propagent en conservant leur intégrité, c-à-d leurs amplitudes s'ajoutent algébriquement, puis elles s'éloignent sans être altérées.



Réflexion : En réalité, le milieu dont l'onde se propage à partir d'une source S n'est jamais limité, quand une onde arrive à l'extrémité d'une corde on remarque qu'elle se propage en sens inverse. **Célérité :** Une onde mécanique se propage à vitesse constante dans un milieu donnée par :

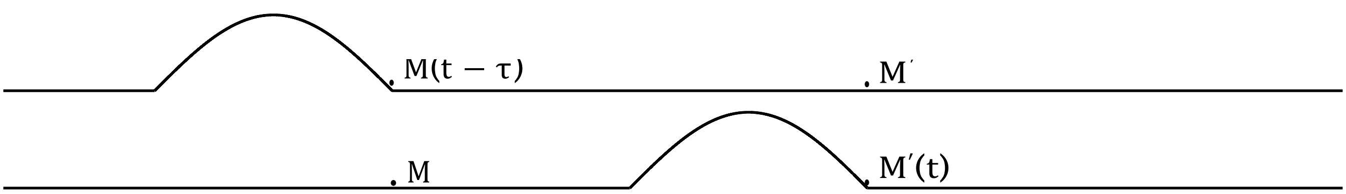
$$v = \frac{d}{\Delta t}$$

Où v est la vitesse en $m.s^{-1}$, d est la distance parcourue en m et $\Delta t = t_f - t_i$ la durée en s.
Les facteurs influençant la vitesse : La célérité d'une onde ne dépend que du milieu (sa densité, température...) et jamais de l'amplitude ou de la durée.
La vitesse de propagation d'une onde le long d'une corde peut être exprimée comme :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Où F la tension de la corde en N et μ la masse linéaire en $g.m^{-1}$, $\mu = \frac{m}{l}$.
Le retard temporel : Lorsque l'onde atteint un point M à un instant t_M, puis un point M′, on dit que M′ reproduit le mouvement de M avec un retard $\tau = t_M - t_{M'}$, la relation entre le retard tau et la distance MM′ est $\tau = \frac{MM'}{v}$.
M′ reproduit le mouvement de M après τ et on dit :

$$Y_{M'}(t) = Y_M(t - \tau) \quad ; \quad Y_M(t) = Y_{M'}(t + \tau)$$



Ondes mécaniques progressives

Exercices corrigés

Exercice 1 :

La relation V= $\sqrt{\frac{F}{\mu}}$donne la vitesse de propagation d'un signal transversal le long d'une corde tendue, dont F est la tension de la corde et μ sa masse linéaire.

1- Calculer la vitesse de propagation d'un signal le long d'une corde de longueur $L = 8\ m$ et de masse $m = 100\ g$ si sa tension est $F = 5N$.

2- Quelle est la durée que met le signal pour parcourir la corde toute entière.

Exercice 2 :

Pendant un coup de foudre, l'éclair et le bruit de tonnerre se produise en même temps. Mais comme la lumière va plus vite que le son, on voit l'éclair avant d'entendre le tonnerre.

1- Trouver l'expression de la durée Δt qui s'écoule entre l'éclair et le tonnerre en fonction de d, de V_{son} , la célérité du son dans l'air et c la célérité du la lumière de la lumière dans l'air.

2- En considérant que $V_{son} \ll c$, (V_{son} est négligeable devant c) montrer que l'expression de la durée Δt s'écrit : $\Delta t = \frac{d}{V_{son}}$.Déterminer la distance d si la durée qui s'écoule entre l'éclair et le bruit de tonnerre est 5s.

On donne : $V_{son}= 340\ m.s^{-1}$

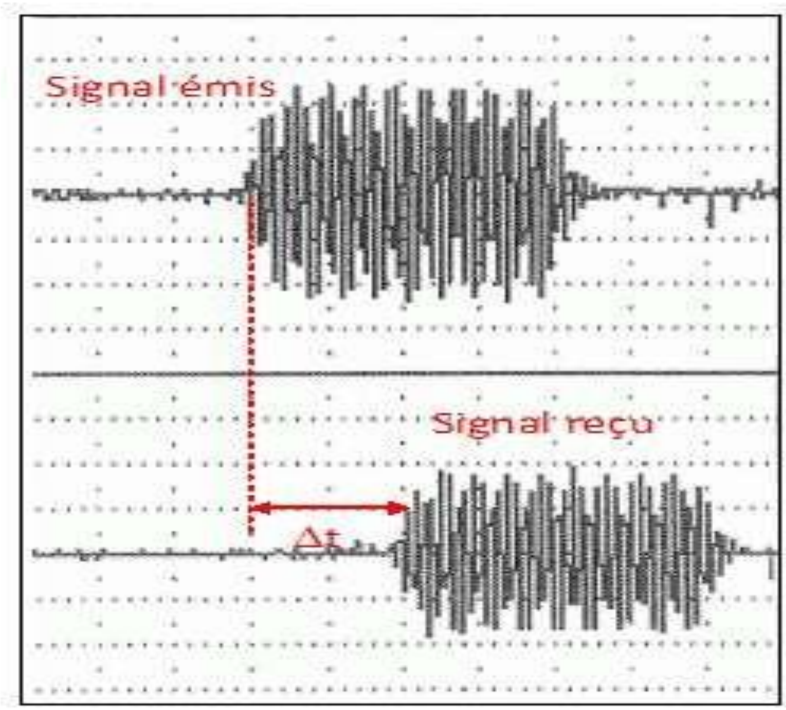
Exercice 3 :

Beaucoup d'animaux utilisent les ondes sonores ou ultrasonores pour communiquer entre eux, chasser leur proie ou se localiser. Pour illustrer quelques propriétés de telles ondes, on utilise des émetteurs et des récepteurs ultrasonores. Un émetteur et un récepteur d'ultrasons sont placés côte à côte face à une paroi réfléchissante. L'émetteur émet des ondes d'ultrasons. Les tensions de sortie de l'émetteur et du récepteur sont observées sur l'écran d'un oscilloscope et sont données ci-dessous. Balayage horizontal $V_H = 1{,}0\ ms/div$.

1- Pour quoi les ondes ultrasonores sont des ondes mécaniques ?

2- Déterminer le retard r entre l'émission et la réception.

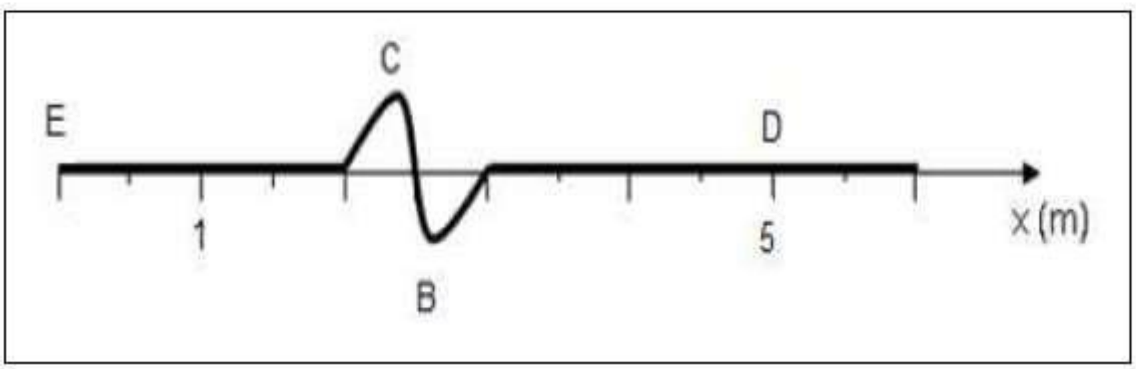
3- Déterminer la distance d qui sépare l'émetteur et le récepteur de la paroi réfléchissante.



Exercice 4 :

Au cours d'une manipulation de cours, un élève crée une perturbation qui se propage le long d'une corde élastique. La scène est filmée et un chronomètre est déclenché lorsque la perturbation quitte la main de l'élève repéré par le point S sur la corde.

A l'aide du logiciel qui permet d'analyser la vidéo obtenue on isole une image reproduite ci-dessous à l'instant $t_1 = 3s$.



1- L'onde est-elle transversale ou longitudinale ? L'onde transporte-t-elle de la matière ?

2- Représentez par un point A sur la corde, le front d'onde.

3- Déterminer la célérité de l'onde le long de la corde.

4- Décrire le mouvement du point D ? Quelle est la durée de son mouvement ?

5- Où se trouvent les points A, B et C à la date $t' = 4s$? Vous vous aidez d'un schéma pour répondre à la question.

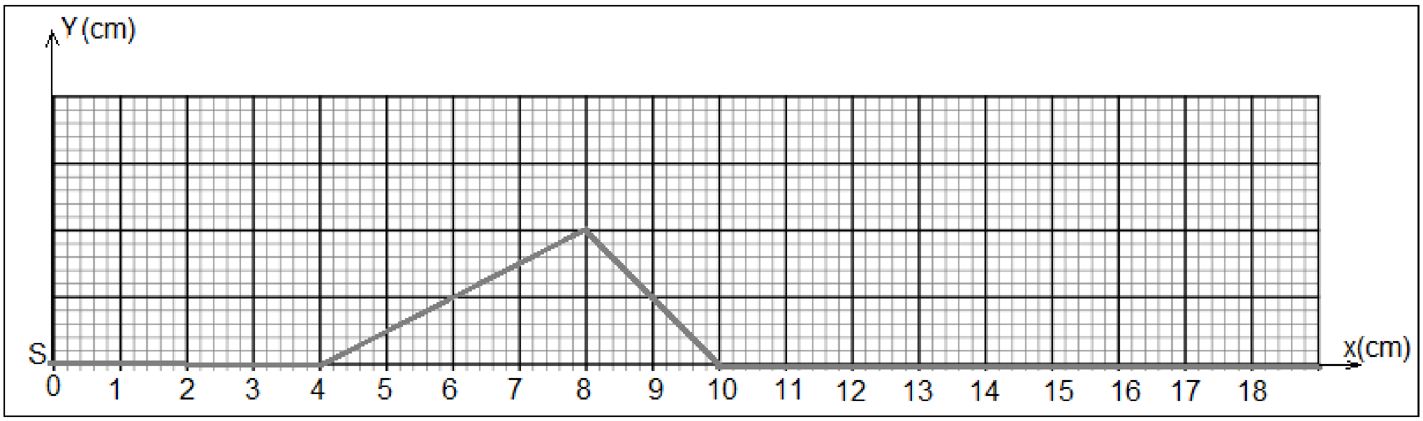
6- Considérons l'extrémité de la corde située au point noté F à 6,0 m de l'élève.

Avec quel retard r' par rapport au point E, le point F commence-t-il à bouger ? Quelle date F est au repos de nouveau ?

Exercice 5 :

Un signal transversal se propage le long d'une corde élastique avec une vitesse de propagation v= $2m.s^{-1}$.

L'aspect de la corde à l'instant t_1 est représenté sur la courbe ci-contre.



1- Il qu'il s'agit d'un signal transversal ou longitudinal ? Justifier votre réponse.

2- Déterminer, graphiquement, la longueur L du signal. Déduire sa durée r .

3- Déterminer l'instant t_1.

4- Représenter l'aspect de la corde à l'instant $t_2 = 7.10^{-2}$ s.

5- Déterminer l'instant au bout duquel le signal quitte le point Q situé à 16cm de la source S.

6- Représenter la variation de l'élongation Y_S de la source S en utilisant l'échelle :

1cm représente $10^{-2}\ s$

1cm représente $0{,}5\ cm$

En déduire la représentation de l'élongation Y_M du point M se trouvant à la distance $d = 8cm$ de la source S.

Exercice 6 :

Lors d'un séisme, la terre est mise en mouvement par des ondes de différentes natures, qui occasionnent des secousses plus ou moins violentes et destructrices en surface.

On distingue :

- Les ondes P, les plus rapides, se propageant dans les solides et les liquides.
- Les ondes S, moins rapides, es propagent dans les solides.

L'enregistrement de ces ondes par des sismographes à la surface de la terre permet de déterminer l'épicentre du séisme (lieu de naissance de la perturbation).

Les schémas A et B modélisent la propagation des ondes sismiques dans une couche terrestre.

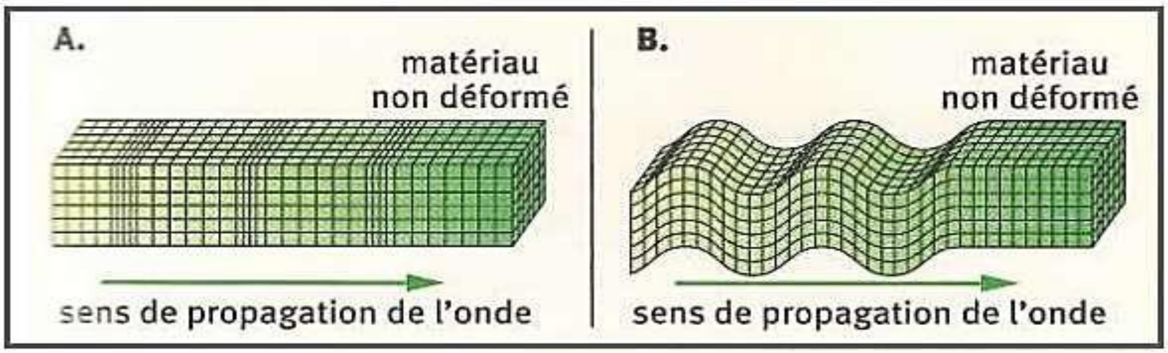


Schéma 1 Schéma 2

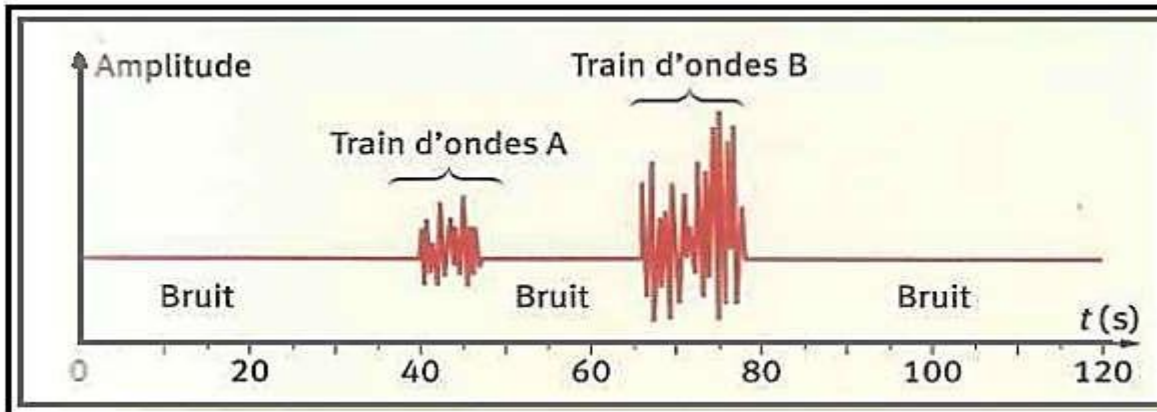
1- Les ondes P, appelés aussi ondes de compression, sont des ondes

Les ondes S, appelés aussi ondes de cisaillement, sont des ondes transversales.

1.1- Définir une onde transversale.

1.2- Indiquer le schéma correspondant à chaque type d'onde.

2- Un séisme s'est produit à San Francisco (Californie) en 1989. Le document ci-dessous présente le sismogramme obtenu lors de ce séisme à la station $\{Eurika\}$, station sismique située au nord de la Californie. L'origine des temps (t=0) a été choisie à la date du début du séisme à San Francisco.



Le séisme présent deux tains d'ondes repérées par A et B.

2-1- A quel type d'onde (S ou P) correspond chaque train ?

2-2- Justifier la réponse à l'aide du texte de l'introduction.

2-3- Sachant que le début du séisme a été détecté à Eureka à 8h 15min 20s au Temps universel, Déterminer l'heure TU (h ; min ; s) à laquelle le séisme s'est déclenché à l'épicentre.

2-4- Sachant que les ondes P se propagent à une vitesse moyenne de 10 km.s^{-1}, calculer la distance séparant l'épicentre du séisme de la station Eureka.

2-5- En déduire la vitesse moyenne des ondes S.

Correction des exercices

Exercice 1 :

1- Calcul de la vitesse de propagation :

$$V = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

La masse linéaire de la corde est égale : $\mu = \frac{m}{L}$ d'où $V = \sqrt{\frac{F.L}{m}}$

A.N : $V = \sqrt{\frac{5\times 8}{0,1}} \Longrightarrow V = 20\ m/s$

2- Calcul de la durée de parcours :

La propagation se fait avec vitesse constante : $V = \frac{L}{\Delta t} \Longrightarrow \Delta t = \frac{L}{V}$

A.N : $\Delta t = \frac{8}{20} \Longrightarrow V = 0,4\ s$

Exercice 2 :

Solution :

1- Expression de la durée Δt :

L'éclair parcourt la distance d en une durée : t_1 à la vitesse V_{son} tel que :

$$V_{son} = \frac{d}{t_{son}} \Longrightarrow t_{son} = \frac{d}{V_{son}}$$

Le tonnerre parcourt la distance d en une durée : t_2 à la vitesse c tel que :

$$c = \frac{d}{t_{éclair}} \Longrightarrow t_{écalir} = \frac{d}{c}$$

La durée qui s'épare la réception de l'éclair et la réception de tonnerre est :

$$\Delta t = t_{son} - t_{écalir} \Longrightarrow \Delta t = d\left(\frac{1}{V_{son}} - \frac{1}{c}\right)$$

2- Montrons l'expression :

On a : $V_{son} \ll c \Longrightarrow \frac{1}{V_{son}} \gg \frac{1}{c}$

Expression $\Delta t = d\left(\frac{1}{V_{son}} - \frac{1}{c}\right)$ devient :

$$\Delta t = \frac{d}{V_{son}} \Longrightarrow d = \Delta t.\ V_{son}$$

$$d = 5 \times 340 = 1700\ m$$

Exercice 3 :

1- Pour quoi les ondes ultrasonores sont des ondes mécaniques ?

Les ondes ultrasonores sont des ondes mécaniques car elles nécessitent un milieu matériel pour se propager : déplacement de zones de compression et de zone de dilatations de l'air.

2- Le retard r entre l'émission et la réception :

D'après l'écran de l'oscilloscope le retard est :

$$r = V_H . x = 1,0 \ ms/div \times 2iv = 2,0 \ ms$$

3- la distance d qui sépare l'émetteur et le récepteur de la paroi réfléchissante :

Le son parcourt 2 fois la distance d pour aller de l'émetteur au récepteur pendant une durée de $r = 2ms$.

$$V = \frac{2d}{r} \Rightarrow d = \frac{V.r}{2}$$

$$d = \frac{340 \times 1,0 \times 10^{-3}}{2} = 0,34 \ m = 34 \ cm$$

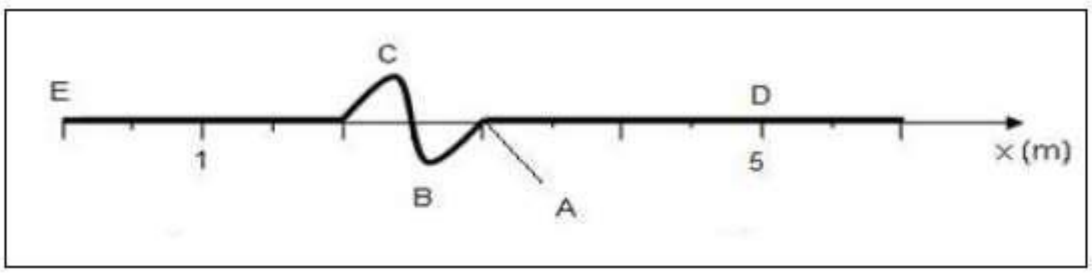
Exercice 4 :

1- L'onde est transversale:

car les points de la corde se déplacent perpendiculairement par rapport à la direction de propagation de la perturbation.

De plus l'onde étudiée est une onde progressive. Elle transporte de l'énergie et ne déplace pas la matière.

2- Représentation du point A sur la corde :



3- La célérité de l'onde le long de la corde a pour expression :

$$V = \frac{d}{\Delta t}$$

Où d désigne la distance parcourue en mètre pendant la durée Δt en secondes.

Dans ce cas le front d'onde se situe à 3 m de la source au bout de 3s, donc $V = \frac{3}{3} = 1 \ m/s$

4- Description du mouvement du point D :

Une fois l'onde arrive au point D, il commence à descendre puis remonter et redescend et enfin sur sa position de repos : il se déplace sur une droite perpendiculaire à l'axe des x dessiné.

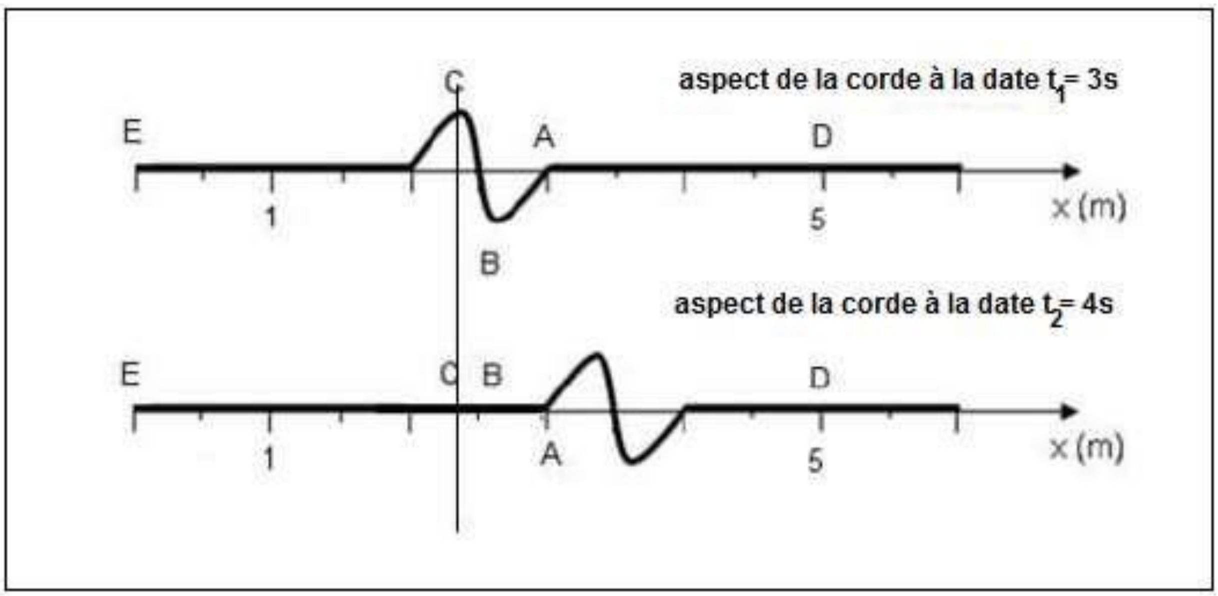
La longueur d'onde sur le schéma est de 1m donc on utilise la formule :

$$V = \frac{L}{\Delta t'} \Longrightarrow \Delta t' = \frac{L}{V} \Longrightarrow \Delta t' = \frac{1}{1} = 1s$$

5- Localisation des points A, B et C à la date $t' = 4s$ sur la corde :

A la date $t_2 = 4s$, le front d'onde se trouve à une distance d_2 lel que :

$$V = \frac{d_2}{t_2} \Longrightarrow d_2 = V.t_2 \Longrightarrow d_2 = 1 \times 4 = 4m$$



6- Le retard r' du point F par rapport à E :

Considérons l'extrémité de la corde située au point noté F à 6,0 m de l'élève.

Calculons le retard du point F par rapport au point A :

$$V = \frac{AF}{r'} \Longrightarrow r' = \frac{AF}{V} \Longrightarrow r' = \frac{6}{1} = 6s$$

Le point F commence son mouvement à la date $t_F = r' = 6s$, son mouvement va durer $t = 1s$, F s'arrête à la date $t'_F = t_F + t = 7s$, à partir de $t'_F = 7s$ le point F est au repos du nouveau.

Exercice 5 :

1- Le signal est transversal : car la direction de propagation est perpendiculaire à la direction de déformation.

2- Graphiquement la longueur du signal est L :

$$L = 10 - 4 = 6cm$$

La durée r du signal :

$$\text{V}= \frac{\boldsymbol{L}}{r} \Longrightarrow r = \frac{\boldsymbol{L}}{\text{V}} \Longrightarrow r = \frac{\mathbf{6.10^{-2}}}{\mathbf{2}} = \mathbf{3.10^{-2}}\ \boldsymbol{s}$$

3- Détermination de l'instant t_1 :

Le signal quitte le point S à l'instant t=0, à l'instant t_1 il arrive à un point M de la corde dont l'aspect est représenté dans la figure 1.

$$\text{V}= \frac{SM}{\Delta t} = \frac{d}{t_M - t_0} = \frac{d}{t_M}$$

$$t_M = \frac{d}{\text{V}} \Longrightarrow t_M = \frac{10 \times 10^{-2}}{2} = 5.10^{-2}\ s$$

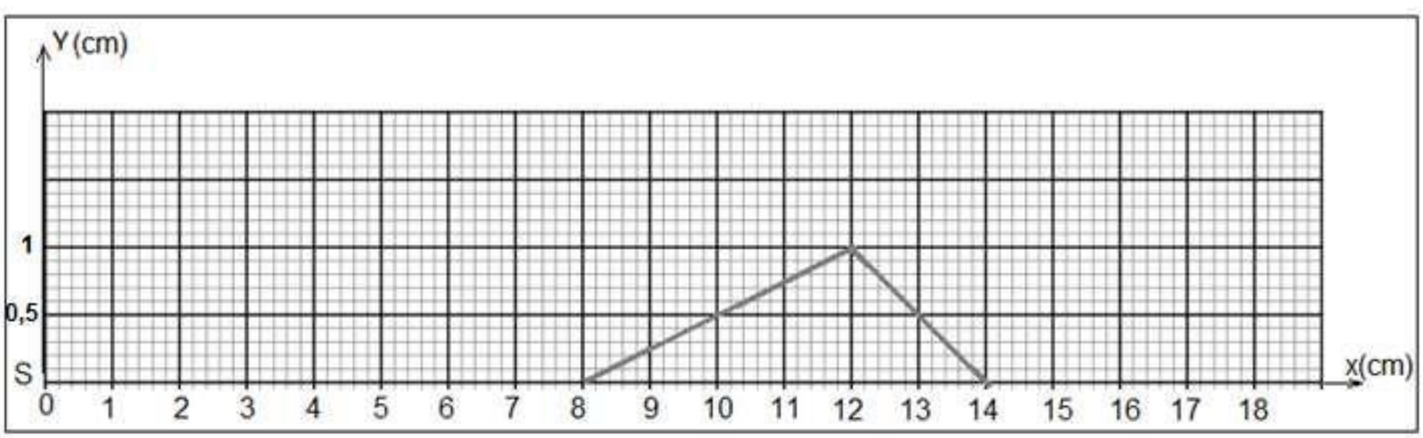
4- Représentation de l'aspect de la corde à l'instant t_2=7.10^{-2} s :

Le signal parcourt la distance d' pendant la durée $\boldsymbol{t_2 = 7.10^{-2}s}$ tel que :

$$\text{V}= \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{t_2}} \Longrightarrow \boldsymbol{d} = \text{V}.\boldsymbol{t_2} = \mathbf{2 \times 7 \times 10^{-2} = 14.10^{-2}}\ \boldsymbol{m} = \mathbf{14}\ \boldsymbol{cm}$$

Le front du signal est à la distance $d' = 14\ cm$ de la source S ; l'arriére du signal est à la distance :

$$d'' = d' - L = 14 - 6 = 8cm$$



5- Déterminer l'instant t'_Q au bout duquel le signal quitte le point Q situé à 16cm de la source S.

Le point Q commence sa vibration à l'instant $t_Q = \frac{SQ}{V} = \frac{0,16}{2} = 8.10^{-2}s$

Son mouvement dure pendant une durée $r = 3.10^{-2}\ s$

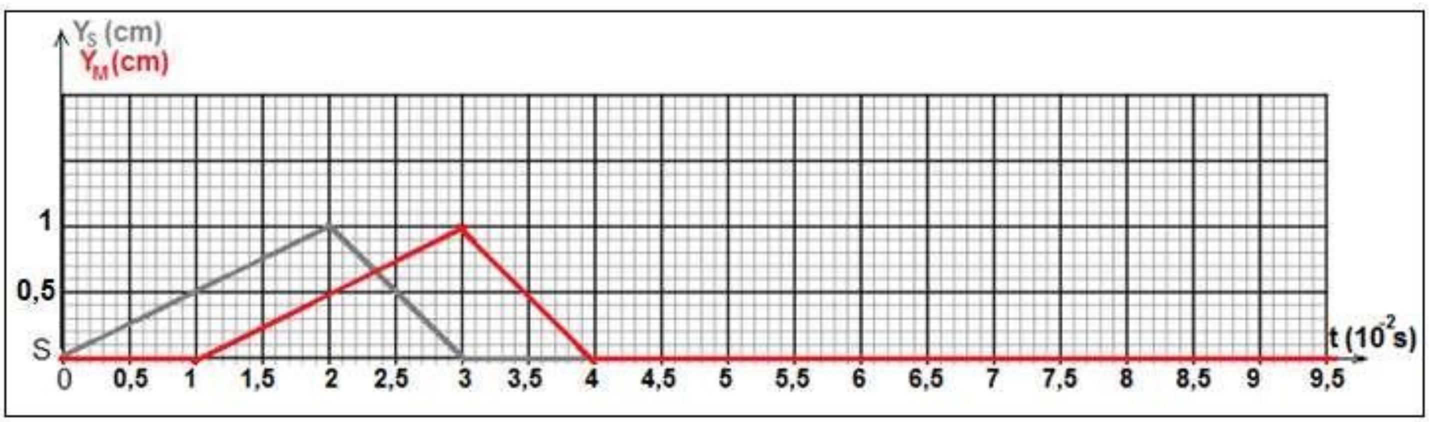
Le point Q termine son mouvement à la date $t'_Q = t_Q + r = 11.10^{-2}\ s$

6- Représentation de la variation de l'élongation Y_S de la source S en fonction du temps :

Pour déterminer l'élongation de la source S il faut déterminer l'amplitude Y_S du point S à quelques instants remarquable :

Distance SM_i (cm)	$SM_0 = 0$	$SM_1 = 1$	$SM_2 = 2$	$SM_3 = 3$	$SM_4 = 4$	$SM_5 = 5$	$SM_6 = 6$	$SM_7 = 7$
Instant t_i ($10^{-2}s$)	$t_0 = 0$	$t_1 = 0,5$	$t_2 = 1$	$t_3 = 1,5$	$t_4 = 2$	$t_5 = 2,5$	$t_6 = 3$	$t_7 = 3,5$
Amplitude Y_S (cm)	$Y_S = 0$	$Y_S = 0,25$	$Y_S = 0,5$	$Y_S = 0,75$	$Y_S = 1$	$Y_S = 0,5$	$Y_S = 0$	$Y_S = 0$

On obtient l'élongation Y_M du point M en faisant une translation de l'élongation Y_S du point S selon l'axe de temps avec le retard r (voir figure ci-dessus).



Exercice 6 :

1-

1-1- Définition de l'onde transversale :

Une onde est transversale si la direction déformation d'un point est perpendiculaire à celle de la propagation de l'onde.

1-2- Types d'ondes :

-Le schéma 1 correspond à la propagation d'une onde longitudinale.

-Le schéma 2 correspond à la propagation d'une onde transversale.

2-

2-1- D'après Le texte, les ondes P sont plus rapides que les ondes S.

L'origine des temps (t=0) a été choisie comme instant du début du séisme à San Francisco.

Le train d'ondes A est détecté en premier (t=40s) puis le train d'ondes B arrive ensuite à la station d'Eureka.

2-2- Justification de la réponse :

La détection du séisme à la station d'Eureka est obtenue à la date **t_2 = 8h 15min 20s.**

Pour que les ondes P parcourent la distance d épicentre- station Eureka, il a fallu environ

$$\Delta \boldsymbol{t} = \boldsymbol{t_2} - \boldsymbol{t_1} = \mathbf{40}\ \boldsymbol{s}.$$

Le séisme s'est donc produit à l'épicentre à la date $\boldsymbol{t_1} = \boldsymbol{t_2} - \Delta \boldsymbol{t}$

$$\boldsymbol{t_1} = \mathbf{8}\boldsymbol{h}\mathbf{15\ min\ 20}\boldsymbol{s} - \mathbf{40}\boldsymbol{s} = \mathbf{8}\boldsymbol{h}\mathbf{14\ min\ 20}\boldsymbol{s}$$

2-3- Distance entre l'épicentre du séisme de la station Eureka :

$$d = \mathrm{V}.\Delta t$$

$$d = 10 \times 40 = 400\ km$$

2-4-- vitesse moyenne des ondes S :

Le parcourt de la distance d par les ondes S nécessite une durée de $\Delta t' = 66\ s$

$$\mathrm{V}_s = \frac{400}{66} = 6{,}1\ \ km/h$$

série 1 : Ondes mécaniques progressives

Exercice n°1 :

Sur une canalisation en acier dans laquelle circule de l'eau, on provoque un choc à l'instant t_0.

Un capteur situé à une distance d détecte deux signaux sonores brefs séparés par une durée τ = 1,8 s , un à l'instant t_1 et l'autre à l'instant t_2.

1- A quoi correspond le premier signal reçu.

2- Exprimer la distance d en fonction de t_0 , t_1 et la célérité du son dans l'acier c_{acier}.

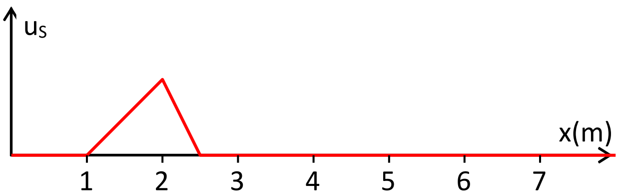
3- Exprimer la distance d en fonction de t_0 , t_2 et la célérité du son dans l'eau c_{eau}.

4- Déterminer la distance d.

Données : célérité du son dans l'acier : c_{acier} = 5,0 $km.s^{-1}$; dans l'eau : c_{eau} = 1,5 $km.s^{-1}$

Exercice n°2 :

On a modélisé, à l'instant t_1 = 0,20 s, l'aspect d'une corde parcourue par une onde transversale de célérité c = 20 $m.s^{-1}$.



1- Quelles sont les abscisses des points correspondant au début et à la fin du signal ?

2- Quelle est l'étendue spatiale l de l'onde, c'est-à-dire la longueur de la corde affectée par l'onde ?

3- À quelle date l'onde va-t-elle arriver en un point M d'abscisse 5,0 m ? En déduire à quelle date la fin de l'onde va-t-elle arriver en M ?

4- Déterminer les abscisses du début et de la fin de l'onde 0,20 seconde plus tard.

5- Représenter l'aspect de la corde 0,20 seconde plus tard.

6- A l'instant choisi comme origine, le front d'onde se situe-t-il au point choisi comme origine ?

Exercice n°3 :

Les ondes émises par un séisme sont de trois types :

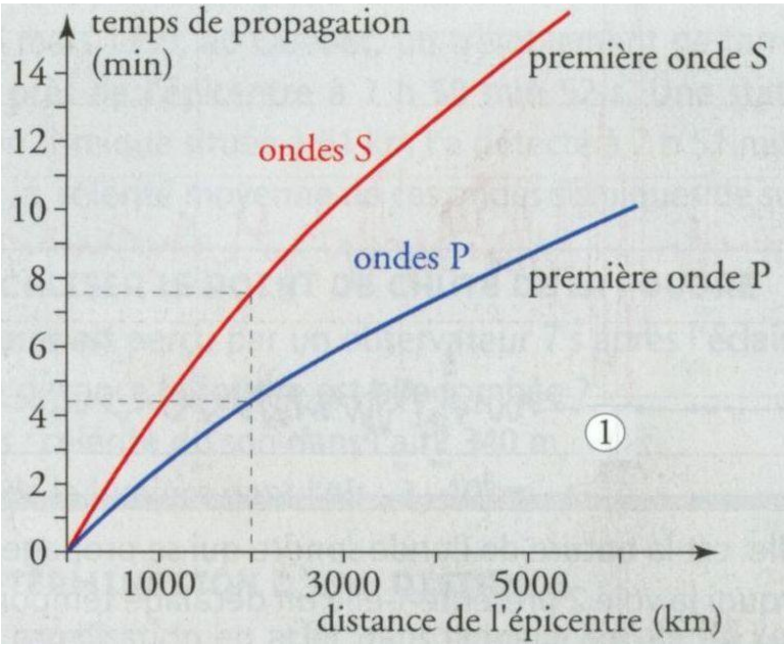
- les ondes P sont des vibrations longitudinales de compression ; ce sont les plus rapides, leur vitesse de propagation atteignant 3,5 à 14 $km.s^{-1}$, suivant la nature des roches et la profondeur de propagation ;

- les ondes S sont des ondes transversales de cisaillement, perpendiculaires à la direction de propagation ; elles sont moins rapides que les ondes P (la valeur de la vitesse des ondes P est environ 1,7 fois celle des ondes S) ;

- les ondes L sont des ondes superficielles ; elles sont plus lentes encore que les ondes S.

Les ondes sismiques sont enregistrées en plusieurs points du globe par des sismographes. En un lieu donné, il y a, sur l'enregistrement sismographique, un décalage entre le début d'enregistrement des deux types d'ondes P et S.

Les vitesses de propagation de ces deux types d'ondes dans la croûte terrestre sont connues et on possède des courbes étalonnées, comme ci-dessous (doc. 1).

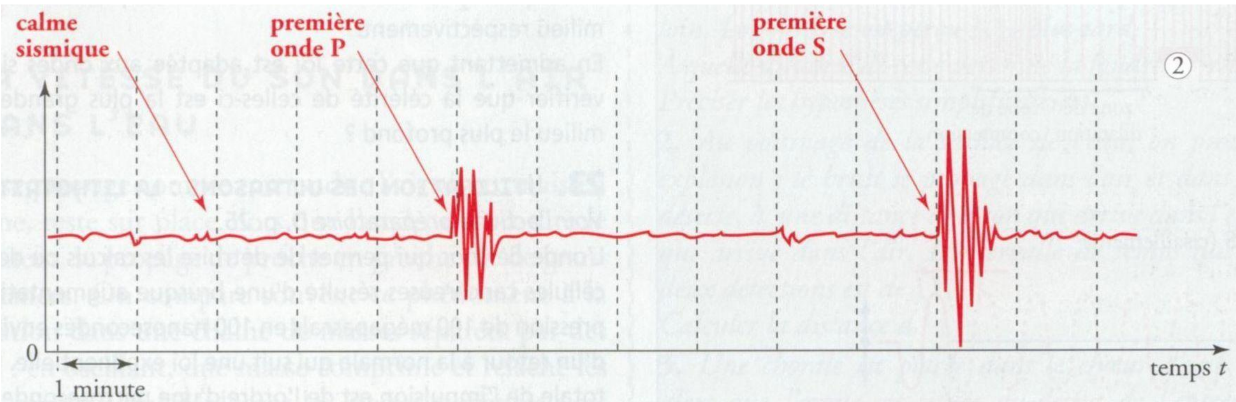


1. En examinant le document précédent, dire si les vitesses des ondes S ou P sont constantes.

Si elles ne sont pas constantes, dire pourquoi ?

2. Calculer la vitesse moyenne des ondes S et P lors d'un parcours de 2000 km.

3. Lors d'un séisme, on a détecté le signal ci-dessous (doc. 2).



a. Quelle est l'onde détectée en premier ?

b. Quel est l'intervalle de temps séparant les débuts des détections des deux ondes ?

c. A l'aide du document 1, déterminer la distance à l'épicentre.

EXERCICE 1 :

1- Le premier signal reçu correspondant au son qui s'est propagé dans l'acier car la célérité du son y est supérieure à celle dans l'eau.

2- Le signal qui se propage dans l'acier à la vitesse c_{acier} parcourt la distance d dans une durée t_1-t_0. :

$d = c_{acier} . (t_1-t_0)$

3- Le signal qui se propage dans l'eau à la vitesse c_{eau} parcourt la même distance d dans une durée t_2-t_0 : $d = c_{eau} . (t_2-t_0)$

4- la donnée τ est évidemment liée aux instants t_1 et t_2 par la relation : $\tau = t_2-t_1$

les relations écrites deviennent des équations qu'il faut résoudre :

$$\begin{cases} d = c_{acier}.(t_1 - t_0) \\ d = c_{eau}.(t_2 - t_0) \\ \tau = t_2 - t_1 \end{cases}$$

Des deux premières relations on peut faire apparaître explicitement la donnée τ :

$$\frac{d}{c_{eau}} - \frac{d}{c_{acier}} = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0) = (t_2 - t_1) = \tau$$

On en déduit : $\boxed{d = \frac{\tau}{\frac{1}{c_{eau}} - \frac{1}{c_{acier}}}}$

l'application numérique (A.N.) : $d = \frac{1,8}{\frac{1}{1,5} - \frac{1}{5}}$ on a arrondi le résultat avec deux chiffres significatifs seulement car les données sont fournies : d = 3,9 Km

EXERCICE 2 :

1- Le graphique proposé est une photographie donnant l'aspect de la corde partout à l'instant t_1.

Une lecture directe du graphique montre qu'à cet instant, le début de la déformation (le front d'onde) a déjà atteint l'abscisse 2,5 m alors que la fin de cette déformation n'a atteint que l'abscisse 1 m.

2- La déformation qui se propage le long de la corde s'étend sur une distance de 1,5 m.

3- Plus tard, à un instant noté t_2, le front d'onde atteindra l'abscisse 5 m. Entre les instants t_1 et t_2, la déformation a progressé de 2,5 m à la vitesse de 20 $m.s^{-1}$. Cette phase a donc duré 2,5 m / 20 $m.s^{-1}$ soit 0,125 s.

Autrement dit, le front d'onde atteindra l'abscisse 5,0 m à l'instant t_2 = 0,20 s + 0,125 s soit 0,325 s.

4- La fin de la perturbation arrive en ce point d'abscisse 5 m encore plus tard puisqu'elle doit encore se déplacer de 1,5 m à la vitesse de 20 $m.s^{-1}$; ce qui prend 0,075 s supplémentaire. Autrement dit, la fin de l'onde arrive en ce point à l'instant t_3 = 0,325 s + 0,075 s soit 0,40 s. A cet instant, le front d'onde a atteint l'abscisse 6,5 m.

5- Après 0,20 s plus tard (donc à l'instant t_4 = 0,60 s), l'onde a progressé globalement de 20 $m.s^{-1}$ x 0,20 s soit 4,0 m.

Autrement dit, à cet instant, le front d'onde se trouve à l'abscisse 6,5 m + 4,0 m soit 10,5 m tandis que la fin de l'onde se trouve 1,5 m derrière soit à l'abscisse 9,0 m.

Cela peut se traduire graphiquement :

6 - A la vitesse de 20 $m.s^{-1}$, le front d'onde a mis 0,125 s pour parvenir à l'abscisse 2,5 m (instant de la photo). Ainsi, le front d'onde se trouvait à l'abscisse 0 à l'instant 0,20 s – 0,125 s soit 0,075 s : le front d'onde ne se trouvait donc pas au point choisi comme origine à l'instant choisi comme origine.

Cela peut s'interpréter par le déclenchement du chronomètre à l'instant précis où la source a commencé à bouger mais on choisissant l'origine des abscisses en un point situé plus loin que la source sur la corde.

EXERCICE 3 :

1- En examinant le graphique fourni, on constate que les courbes représentatives de la distance parcourue en fonction de la durée de propagation ne sont pas des droites. Autrement dit, il n'y a pas proportionnalité entre la distance parcourue par une onde S et la durée de propagation. On constate la même chose pour une onde P.

Autrement dit, les vitesses de propagation (célérités) ne sont pas des constantes .

L'interprétation est délicate : les célérités dépendent en fait des densités des matériaux rencontrés (plus le milieu est dense, plus l'onde se propage rapidement) et des propriétés élastiques des matériaux. La Terre dans son ensemble n'est pas un milieu homogène .

2- Pour une distance de propagation de 2000 km, la célérité des ondes P vaut alors environ

2000 km / 4,3 min soit 2000 km / (4,3/60) h c'est à dire $2{,}8.10^{4}$ $km.h^{-1}$ environ.

On obtient de même pour les ondes S une célérité de 2000 km / 7,7 min c'est à dire

$1{,}6.10^{4}$ $km.h^{-1}$ environ.

3- a- Les ondes P progressent plus rapidement donc elles sont détectées en premier.

b- le document n°2 nous informe qu'il s'écoule environ 6 minutes entre les débuts de détection des ondes P et S par le récepteur.

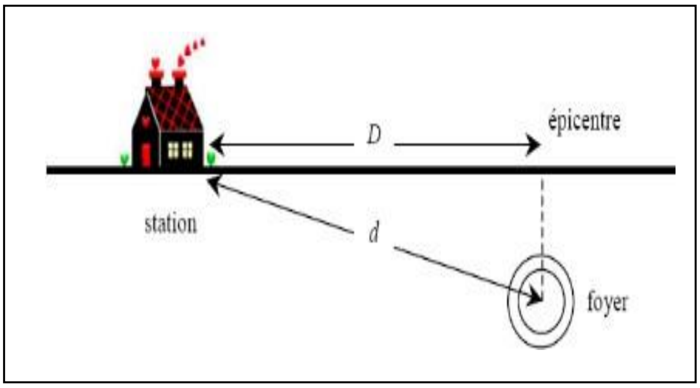
c- Sur le document n°1, cette situation correspond à un écart vertical de 6 minutes entre les deux courbes : on y lit une distance commune de propagation d'environ 5000 km.

Ondes mécaniques progressives : EXERCICE

<u>Comment les ondes sismiques se propagent-elles?</u>
Quand la Terre tremble, les vibrations se propagent dans toutes les directions à partir du foyer du tremblement de terre situé dans les profondeurs de la couche terrestre. Les vibrations sont initialement de deux types : celles qui compriment et détendent alternativement les roches, à la manière d'un accordéon, et celles plus destructrices qui les cisaillent. Les premières, les plus rapides (appelées ondes P), voyagent dans la croûte à une vitesse de 6 km/s environ, mais peuvent être ralenties dans les roches peu consolidées. Les secondes (appelées ondes S) sont, à cause des propriétés élastiques des roches, systématiquement deux fois plus lentes mais environ cinq fois plus fortes que les premières.
Ainsi, lors d'un séisme lointain, ayant ressenti l'onde P, on peut anticiper l'arrivée des ondes S.
<u>Peut-on les distinguer quand un séisme a lieu sous nos pieds?</u>
Oui : les ondes P vibrent dans leur direction de propagation, elles soulèvent ou affaissent le sol, tandis que les ondes S vibrent perpendiculairement et nous secouent horizontalement.
Heureusement, lors de leur voyage à travers le sous-sol, les ondes perdent de leur énergie. En s'éloignant du foyer, elles s'amortissent et leurs effets s'atténuent. Voilà pourquoi les séismes superficiels, trop proches pour être affaiblis, sont les plus destructeurs.

1. Les ondes sismiques peuvent être, selon les cas, qualifiées par les termes suivants :
ondes longitudinales, ondes de cisaillement, ondes transversales, ondes de compression.
Sans justifier, caractériser chaque type d'onde (P et S) par deux termes de la liste ci-dessus.

2. Une onde sismique commence à se propager à partir du foyer à la date t = 0. Une station enregistreuse est située à une distance D de l'épicentre et à une distance d du foyer. On note v_P la célérité de l'onde P et v_S la célérité de l'onde S dans la croûte terrestre.
Donner les expressions littérales de t_P et t_S, dates d'arrivée respectivement des ondes P et S à la station enregistreuse.



3. Les vitesses v_P et v_S. obéissent à la relation : $\left(\dfrac{1}{v_S}-\dfrac{1}{v_P}\right)=\dfrac{1}{x}$

avec $x = 8{,}00\ \text{km.s}^{-1}$.
a)- Etablir l'expression de la distance d enfonction de t_P et t_S.
b)- Un capteur de la station mesure l'intervalle de temps séparant l'arrivée des deux ondes à la station: $\Delta t = 25{,}0$ s. En déduire la valeur de la distance d de la station au foyer du séisme.

4. On appelle foyer superficiel un foyer très proche de la surface terrestre. Dans ce cas, on peut considérer que d = D.

Une des méthodes utilisées pour localiser l'épicentre du séisme dans ce cas est la méthode dite des trois cercles : trois stations S_1, S_2 et S_3 mesurent la distance à laquelle elles se trouvent du foyer d'un séisme. On note des distances respectivement d_1, d_2 et d_3.
On suppose que le milieu est isotrope, c'est à dire que les ondes se propagent à la même vitesse dans toutes les directions.
A l'aide d'un schéma, expliquer le principe de la méthode dite « des trois cercles ».

CORRECTION :

1. *Sans justifier, caractériser chaque type d'onde (P et S) par deux termes de la liste ci-dessus.*

P : ondes longitudinales de compression.
S : ondes transversales de cisaillement.

2. *Donner les expressions littérales de t_P et t_S, dates d'arrivée respectivement des ondes P et S à la station enregistreuse.*

Les ondes P se propagent du foyer à la station enregistreuse pendant la durée t_P telle que :

$d = v_P.t_P \Rightarrow \boxed{t_P = \frac{d}{v_P}}$. De même : $\boxed{t_S = \frac{d}{v_S}}$

3. *On ne peut pas connaître précisément v_P et v_S. Cependant, on sait qu'elles obéissent à la relation :*

$$\left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P}\right) = \frac{1}{x}$$

a) *Etablir l'expression de la distance d en fonction de t_P et t_S.*

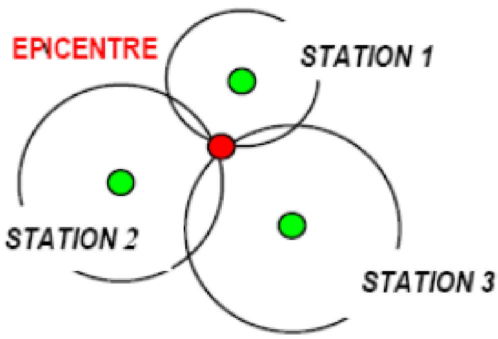
$v_P = \frac{d}{t_P}$ et $v_S = \frac{d}{t_S} \Rightarrow \left(\frac{t_S}{d} - \frac{t_P}{d}\right) = \frac{1}{x}$ et $\frac{t_S - t_P}{d} = \frac{1}{x} \Rightarrow \boxed{d = x.(t_S - t_P)}$

b) *Un capteur de la station mesure l'intervalle de temps séparant l'arrivée des deux ondes à la station : $\Delta t = 25{,}0$ s. En déduire la valeur de la distance d de la station au foyer du séisme ($x = 8{,}00\ km.s^{-1}$)*

$\Delta t = t_S - t_P \Rightarrow \boxed{d = x.\ \Delta t}$ soit : **d** = 8,00 × 25,0 = **200 km**

4. *A l'aide d'un schéma, expliquer le principe de la méthode dite « des trois cercles ».*

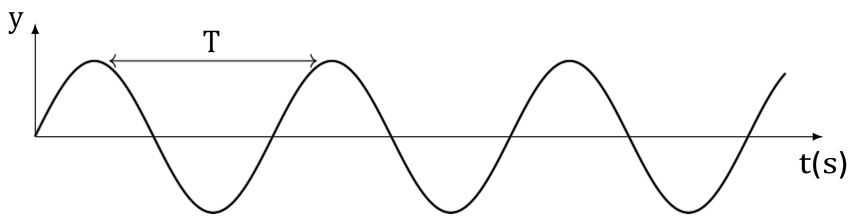
A partir de la position de la station 1, on trace un cercle dont le rayon d_1 correspond à peu près à la distance épicentrale D_1. On fait de même pour les stations 2 et 3. Le point d'intersection des 3 cercles donne la position de l'épicentre.

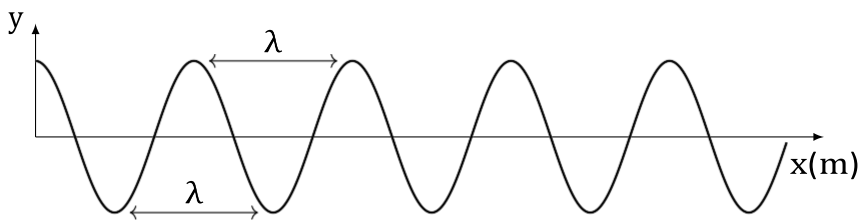


L'onde mécanique progressive périodique :

Définition : Une onde progressive est dite périodique si l'évolution temporelle de chaque point du milieu de propagation est périodique.

- Elle se caractérise par une périodicité temporelle (Période T) : La durée minimale nécessaire pour qu'un point du milieu retrouve le même état de vibration.
- Elle se caractérise aussi par une périodicité spatiale (Longueur d'onde λ) : La distance constante séparant deux motifs identiques consécutifs.





Onde sinusoïdale :

Une onde mécanique progressive périodique est dite sinusoïdale si l'évolution temporelle de la source peut être associée à une fonction sinusoïdale.

Caractéristiques de l'onde sinusoïdale :

Longueur d'onde λ :
La distance constante qui sépare deux perturbations.
La distance parcourue pendant un intervalle de temps égale à la période T.
La distance qui sépare deux crêtes consécutifs ou entre deux creux.
La distance entre deux points qui vibrent de la même manière à un instant donné.
La période T :
La durée nécessaire pour parcourir une distance λ.
La durée séparant l'arrivée de deux points successives en un point.
La vitesse de propagation :
La vitesse de propagation est donnée par la relation suivante :

$$v = \frac{d}{\Delta t}$$

On ajoute une autre relation :

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Or $T = \frac{1}{f}$ alors la relation devient :

$$v = \lambda \times f$$

Remarque : On sait que :

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$

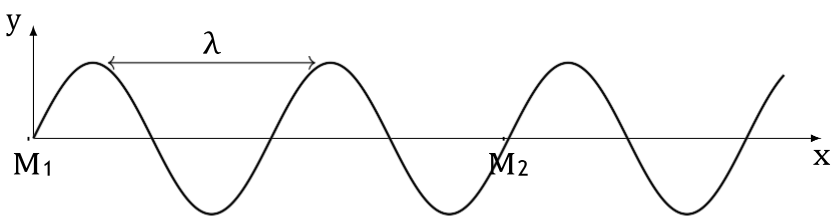
Donc :

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{\Delta t}{T} = k^{Cte}$$

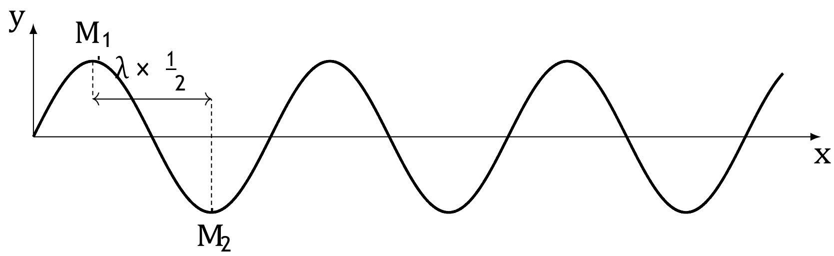
Le nombre k est le nombre de répétition de λ dans d, ou bien de T dans Δt.

Comparaison du mouvement de deux points :

On considère 2 points M_1 et M_2 d'un milieu à une dimension (corde, ressort...).
On dit que M_1 et M_2 vibrent en phase :



Entre M_1 et M_2 il s'agit d'une distance, c-à-d $M_1M_2 = d$, cette distance peut être exprimé en fonction de λ : $d = k.\lambda$ avec k est le nombre précisé ultérieurement ($k \in \mathbb{Z}^*$).
Les deux points M_1 et M_2 vibrent au même instant et de la même manière $Y(M_1) = Y(M_2)$.



On dit que M_1 et M_2 vibrent en opposition de phase si :
Ils vibrent en opposition de phase, c-à-d : $Y(M_1) = -Y(M_2)$. La distance d égale à : $d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$

Donc :

Si k est un nombre entier, alors les points vibrent en phase.
Si k est un nombre décimal, alors les points vibrent en opposition de phase.

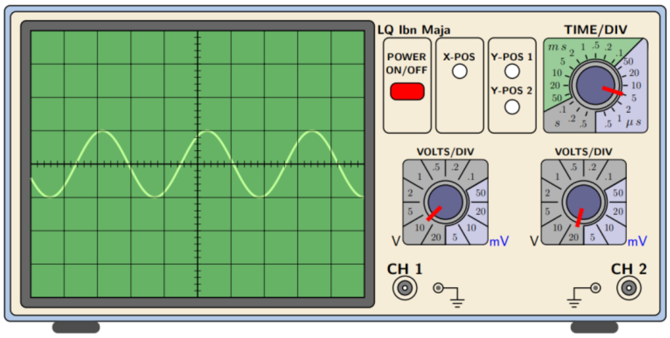


Figure 1: Oscilloscope :

Sur un oscilloscope le retard temporel τ peut être exprimé en fonction de division et le balayage: $\tau = V_H.x$, où V_H balayage horizontal et x le nombre de divisions.

Le phénomène de diffraction :

Une plane périodique rencontre un obstacle ou une fente d'épaisseur a :
On distingue deux cas :

Figure 1

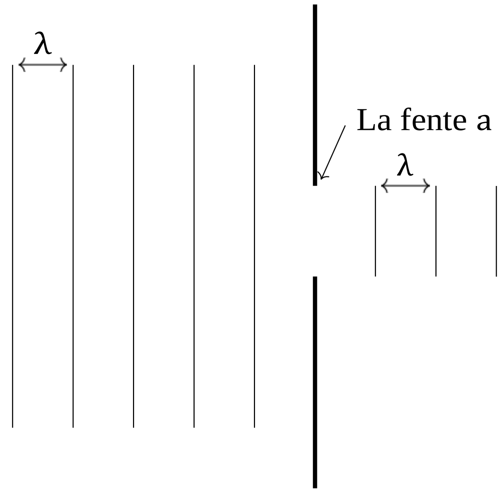
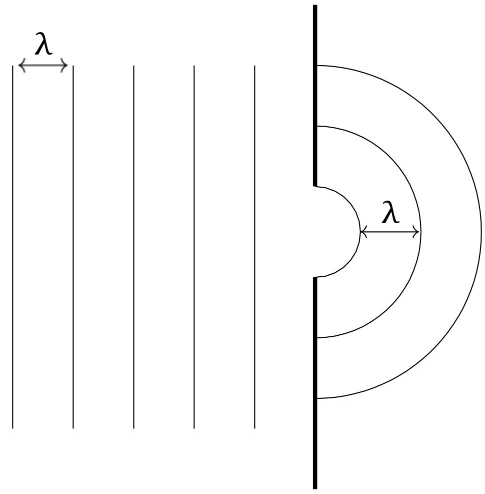


Figure 2

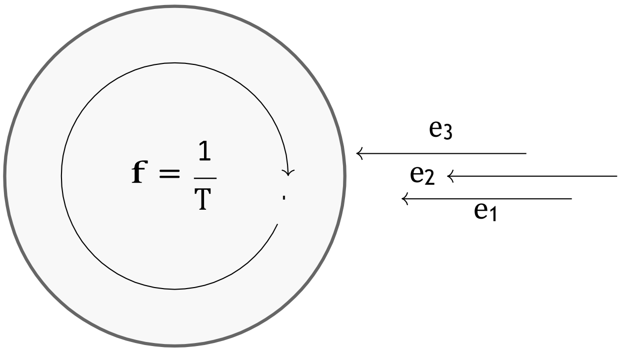


Dans la figure 1 on a a > λ, on remarque que l'onde traverse la fente sans changer la forme, fréquence, vitesse, seulement une partie bloquée. L'onde est dite diaphragmée.
Dans la figure 2 on a a$\leq\lambda$, on remarque le changement de la forme de l'onde, elle devient circulaire, mais elle conserve la fréquence, la période, la longueur λ et la vitesse. L'onde est dite diffractée.
Définition :
Le phénomène, qui subit la partie de l'onde plane qui traverse la fente fine a (Figure 2), est appelé le phénomène de diffraction.
L'onde se diffracte si et seulement si a$\leq$ λ. Cette dernière conserve la célérité, la longueur d'onde, la fréquence et par conséquent la période. Ce phénomène est plus notable lorsque a est plus petite que λ, autrement a <<< λ.

Étude stroboscopique des phénomènes ondulatoires :

Le stroboscope est un appareil qui émet des éclairs brefs de fréquence f_e réglable, cet appareil est utilisé afin d'étudier les phénomènes ondulatoires entretenus, et déterminer leurs fréquences f.

Cas 1 : L'immobilité apparente :



Lorsque : $f = k.f_e$ où $k \in \{1, 2, 3, ...\}$, on observe l'onde entretenue en immobilité apparente. La fréquence maximale des éclairs est atteinte lorsque k = 1 on aura donc $f = f_e$.
Disons alors que la fréquence de l'onde progressive est égale à la fréquence maximale des éclairs pour laquelle on observe l'immobilité apparente du phénomène.

Cas 2 : Mouvement ralenti apparent :

Lorsque la fréquence des éclairs f_e diffère peu de la fréquence f du phénomène, on observe un mouvement ralenti apparent de l'onde progressive entretenue de fréquence apparente f_a,
tel que $f_a = f - f_e$:

a) Si $f > f_e \Longrightarrow f_a > 0$ alors le mouvement ralenti apparent de l'onde progressive entretenue est dans le sens direct, c'est-à-dire dans le sens réel de propagation.

b) Si $f < f_e \Longrightarrow f_a < 0$ alors le mouvement ralenti apparent de l'onde progressive entretenue est dans le sens inverse de celui de propagation.

Milieu dispersif :

Un milieu est dit dispersif si la vitesse de propagation de l'onde dépend de sa fréquence.
Exemples :
La surface de l'eau est un milieu dispersif.
l'air est un milieu non-dispersif pour les ondes sonores.

SERIE 3 : EXERCICES RESOLUS (Ondes mécaniques progressives périodiques)

Exercice n°1 :

Un vibreur, de fréquence 60 Hz émet des ondes circulaires à la surface le l'eau d'une cuve à ondes. On provoque l'immobilité apparente du phénomène observé, avec un stroboscope.

On choisit la plus grande des fréquences trouvées et on profite de l'immobilisation apparente pour faire une mesure approchée de la distance qui sépare la deuxième crête de la douzième. On trouve 5,0 cm.

1. Quelle est la longueur d'onde ?

2. Quelle est la célérité de l'onde progressive ?

3. Dans quelle condition les ondes émises par un vibreur à la surface de l'eau ne seraient-elles plus circulaires ? Proposer une expérience dans laquelle les ondes ne seraient plus circulaires.

Exercice n°2 :

Un haut-parleur assimilé à une source ponctuelle S est alimenté par un générateur basse fréquence. La fréquence des vibrations électriques appliquées à l'entrée du haut-parleur est réglable.

Les ondes sonores émises sont assimilées à des ondes sphériques. La célérité du son est égale à $340\ m.s^{-1}$.

1. En un point M situé à une distance d = 2,0 m de S, on place un microphone, lui aussi considéré comme ponctuel.

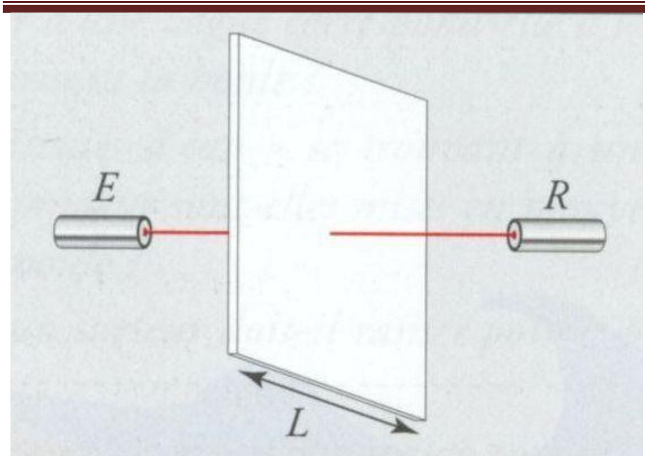
Pour quelles valeurs de la fréquence, les vibrations du haut-parleur et du microphone sont-elles en phase ? en opposition de phase ?

2. On fixe la fréquence à 510 Hz. Préciser les positions des points vibrant en phase avec M ? Quel en est le nombre sur le segment SM ?

3. On fixe la fréquence à 550 Hz. De quelle distance minimale faut-il éloigner ou rapprocher le microphone sur le segment SM pour détecter une vibration sonore en phase avec la source ?

Exercice n°3 :

Entre un émetteur E et un récepteur R d'ondes ultrasonores on interpose différents écrans rectangulaires de hauteur 40 cm et de largeur L variable, comme l'indique le schéma ci-dessous.



On enregistre l'amplitude u_m du signal détecté par R.

L (cm)	0	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16
u_m (V)	0,35	0,31	0,28	0,25	0,25	0,10	0,02

1. Avec quel appareil a-t-on mesuré u_m ?

2. Quel est le phénomène mis en évidence ?

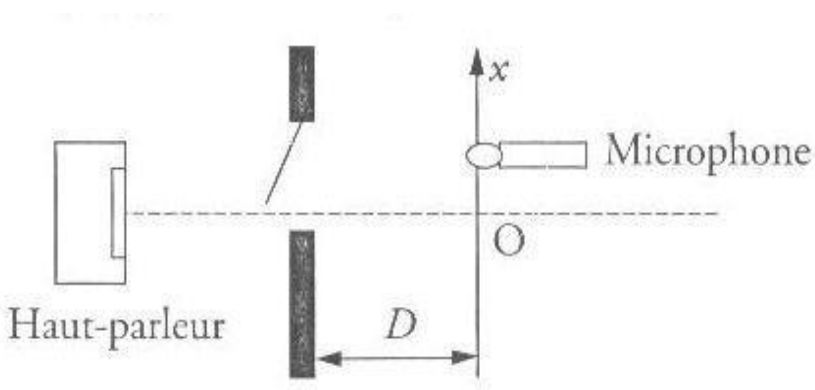
3. Pour quelle valeur de L, indiquée dans le tableau, le phénomène de diffraction est-il négligeable ?

En déduire l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des ondes ultrasonores .

4. Quel est l'ordre de grandeur de la fréquence de ces ondes ?

Exercice n°4 : POUR LES SM

On peut entendre une conversation en se plaçant derrière une porte entrouverte. Cependant, le son est souvent déformé. L'étude suivante s'intéresse à la diffraction du son à travers l'ouverture. Afin de simplifier l'étude, on étudie le comportement d'une onde sonore à la traversée de l'ouverture selon sa fréquence. Le dispositif est le suivant :



- Un haut-parleur relié à un générateur de tension sinusoïdale de fréquence variable est placé d'un côté de la porte.

- On place un microphone de l'autre côté de la porte à une distance D = 2,0 m.

- Ce micro peut être déplacé parallèlement à la porte. Sa position est repérée sur un axe (O, x) comme indiquée sur le schéma du montage.

On utilise successivement les quatre fréquences suivantes : 500 Hz , 5 000 Hz , 10 000 Hz et 15 000 Hz .

Pour chacune de ces fréquences, on mesure le niveau sonore I (exprimé en décibels dB) au niveau du microphone en fonction de sa position x.

Pour des raisons de symétrie, on n'étudie que le niveau sonore pour des positions x positives.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

f=500 Hz	x (m)	0,00	0,20	0,50	1,00	5,00	7,00	10,0
	I (dB)	50	50	50	50	50	50	50

f=5000 Hz	x (m)	0,00	0,20	0,50	1,00	1,60	5,00	10,0
	I (dB)	50	50	50	50	45	10	10

f=10000 Hz	x (m)	0,00	0,20	0,50	0,70	2,00	5,00	10,0
	I (dB)	50	50	47	45	10	10	10

f=15000 Hz	x (m)	0,00	0,20	0,45	1,00	2,00	5,00	10,0
	I (dB)	50	50	45	10	10	10	10

1- La célérité des ondes sonores dans l'air est $v = 340\ m.s^{-1}$. Calculer les longueurs d'ondes des quatre sons utilisés dans cette expérience.

2- Sur un même schéma, identique au schéma du montage, délimiter approximativement les zones de l'espace dans lesquelles chaque fréquence est respectivement audible. On supposera que le son est bien audible si son niveau sonore est supérieur à 45 dB.

Déterminer, pour chaque fréquence, l'angle α du cône de diffraction exprimé en radian.

3- Tracer la courbe représentant l'angle α en fonction de la longueur d'onde λ.

4- On rappelle que l'angle α a pour expression théorique $\alpha = 2.\lambda/a$ où a est la taille de l'ouverture.

Déterminer la taille de l'ouverture de la porte.

CORRECTION

EXERCICE 1 :

1- Si on éclaire le milieu de propagation avec une fréquence d'éclairs égale à la fréquence de l'onde (60 Hz), on observera une immobilité apparente puisqu'on éclaire à chaque fois qu'une crête de vague a exactement remplacé la précédente à un endroit donné.

A la fréquence de 60 Hz, la distance entre deux crêtes de vagues apparemment immobiles est pratiquement égale à la longueur d'onde. Si on a mesuré 5,0 cm pour une distance égale à 10 longueurs d'onde, on en déduit que la longueur d'onde vaut environ 5,0 mm.

2- On a $v = \lambda N$ Par conséquent, la célérité de l'onde vaut $v = 5\ 10^{-3} \times 60$ soit $v = 0{,}30\ m.s^{-1}$.

3- La géométrie circulaire des vagues est due au caractère quasi ponctuel de la source.

Ainsi, par exemple, si on remplace le vibreur quasi ponctuel par une source rectiligne, on obtiendra des vagues rectilignes.

EXERCICE 2 :

- On rappelle que, par définition, deux vibrations (périodiques) sont en phase si lorsqu'aux moments où une vibration prend une valeur maximale, l'autre a aussi une valeur maximale.

NB : on pourrait dire aussi bien que, par définition, deux vibrations (périodiques) sont en phase si lorsqu'aux moments où une vibration prend une valeur minimale, l'autre a aussi une valeur minimale.

Pour que la tension du récepteur soit en phase avec celle de l'émetteur malgré le retard due à la propagation, il faut que la durée de propagation entre l'emetteur et le récepteur soit précisément égale à un nombre entier de période T de l'onde.

En terme de distance, cela correspond aussi à un éloignement d du récepteur qui doit être un multiple entier de la longueur d'onde λ : $d = n\lambda = n\,c\,T = n\,c / f$ où n est un entier positif, c la célérité de l'onde dans le milieu considéré et f la fréquence .

Numériquement, la fréquence doit être un multiple entier de c/d c'est à dire de $340 / 2 = 170$ Hz.

- Par ailleurs, on rappelle que, par définition, deux vibrations (périodiques) sont en opposition de phase si lorsqu'aux instants où une vibration prend une valeur maximale, l'autre a une valeur minimale.

Pour que la tension du récepteur soit en opposition de phase avec celle de l'émetteur, il faut que la durée de propagation correspondante soit égale à un nombre entier de période T de l'onde plus une demi-période.

En terme de distance, cela correspond aussi à un éloignement d du récepteur qui doit être un multiple entier de la longueur d'onde λ plus une demi longueur d'onde.

En terme de fréquence : $f = \frac{c}{d}(n + \frac{1}{2})$.

Numériquement, toutes les fréquences augmentant par bond de 170 Hz à partir de 170 + 170/2 = 255 Hz conviennent : 255 Hz, 425 Hz, 595 Hz etc.

2- La fréquence de 510 Hz correspond à 3 fois 170 Hz. Le récepteur vibre en phase avec l'émetteur ainsi que tous les points situés entre la source et le récepteur séparés d'une longueur d'onde. A cette fréquence, la longueur d'onde vaut $\lambda = c / f$

$$\lambda = 340 / 510 = 0{,}667 \text{ m}$$

Autrement dit, les points M situés à 0,667 m ; à 1,33 m et à 2,0 m de la source vibrent en phase avec la source.

3- A la fréquence de 550 Hz, la longueur d'onde vaut environ 340 $m.s^{-1}$ / 550 Hz soit 61,8 cm. Le récepteur, toujours à 2,0 m de la source, se trouve à donc à une distance légèrement supérieure à 3 longueurs d'onde (3 x 0,618 = 1,85 m environ). Pour retrouver une situation où les tensions de l'émetteur et du récepteur sont en phase, il faut au minimum rapprocher le récepteur de 15 cm environ.

EXERCICE 3 :

1- Le récepteur d'ultrasons est un microphone dont la membrane vibrante est adaptée pour être sensible aux variations de pression de l'air très fréquentes qui caractérisent ce type d'ondes.

Comme tout microphone, on utilise un système de bobine mobile par rapport à un aimant permanent pour générer une tension électrique qui change au même rythme que la pression de l'air.

L'appareil adapté à la visualisation d'une tension électrique périodique est l'oscilloscope.

2- Le fait d'obtenir une tension d'amplitude de plus en plus grande au fur et à mesure qu'on réduit l'une des dimensions de l'écran est une manifestation du phénomène de diffraction : quand on cherche à empêcher ou limiter la propagation d'une onde en intercalant un écran dont la taille est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde alors on observe un effet d'étalement de l'onde autour de l'écran. On observe ainsi l'existence d'une onde qui se propage aussi derrière l'écran (dans « l'ombre » de ce dernier). Ce phénomène est encore plus net si la petite dimension de l'écran est plus petite que la la longueur d'onde.

3- Dans le tableau de mesures fourni, on constate une très faible réception pour une taille horizontale d'écran de 16 cm : avec cet écran, le phénomène de diffraction est pratiquement inexistant. C'est le signe que la longueur d'onde des ultrasons est nettement inférieure à 16 cm.

4- Les ultrasons sont caractérisés par des fréquences supérieures à 20 kHz (soit des périodes inférieures à 50 μs). Dans l'air, à la température ordinaire, la célérité des sons étant de l'ordre de 340 $m.s^{-1}$, les ultrasons ont des longueurs d'onde inférieures à $v \, . \, T = 340 \, m.s^{-1} \, . \, 5{,}0.10^{-5}$ s soit inférieures à 1,7 cm.

EXERCICE 4 :

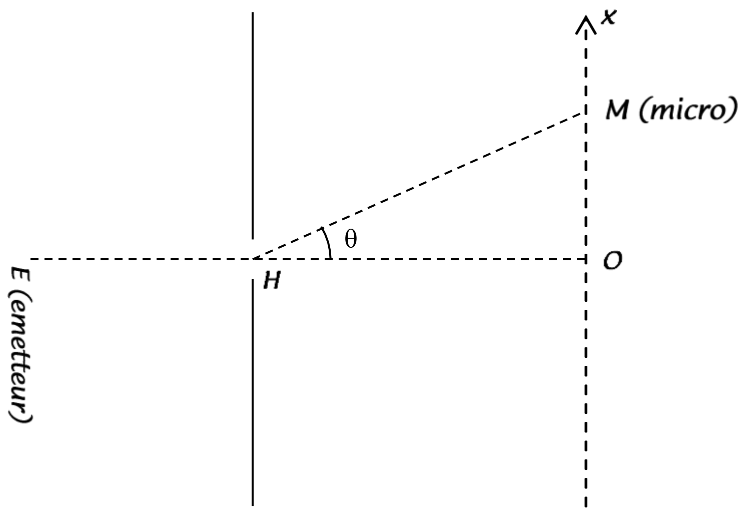
1- L'air étant un milieu de propagation faiblement dispersif pour les sons, on suppose que la vitesse de propagation c du son dans l'air ne dépend pratiquement pas de sa fréquence (ou de sa période).

Autrement dit, le rapport de la période et de la longueur d'onde d'un son a pratiquement la même valeur pour un son aigu ou un son grave, de même pour des sons inaudibles pour l'oreille humaine (infrasons ou ultrasons).

On peut calculer ainsi la longueur d'onde λ d'un son de fréquence f par la relation $\lambda = c / f$

où $c \approx 340\ m.s^{-1}$. Les résultats des calculs sont groupés dans le tableau suivant :

fréquence du son en Hz	500	5000	10000	15000
longueur d'onde du son en m	0,68	0,068	0,034	0,023



2- Dans le triangle rectangle HOM, l'angle θ est tel que : $\tan\theta = \frac{OM}{OH} = \frac{x}{D}$

.

Le tableau suivant donne les valeurs approximatives de θ calculées selon les valeurs de x repérant les diverses positions du microphone :

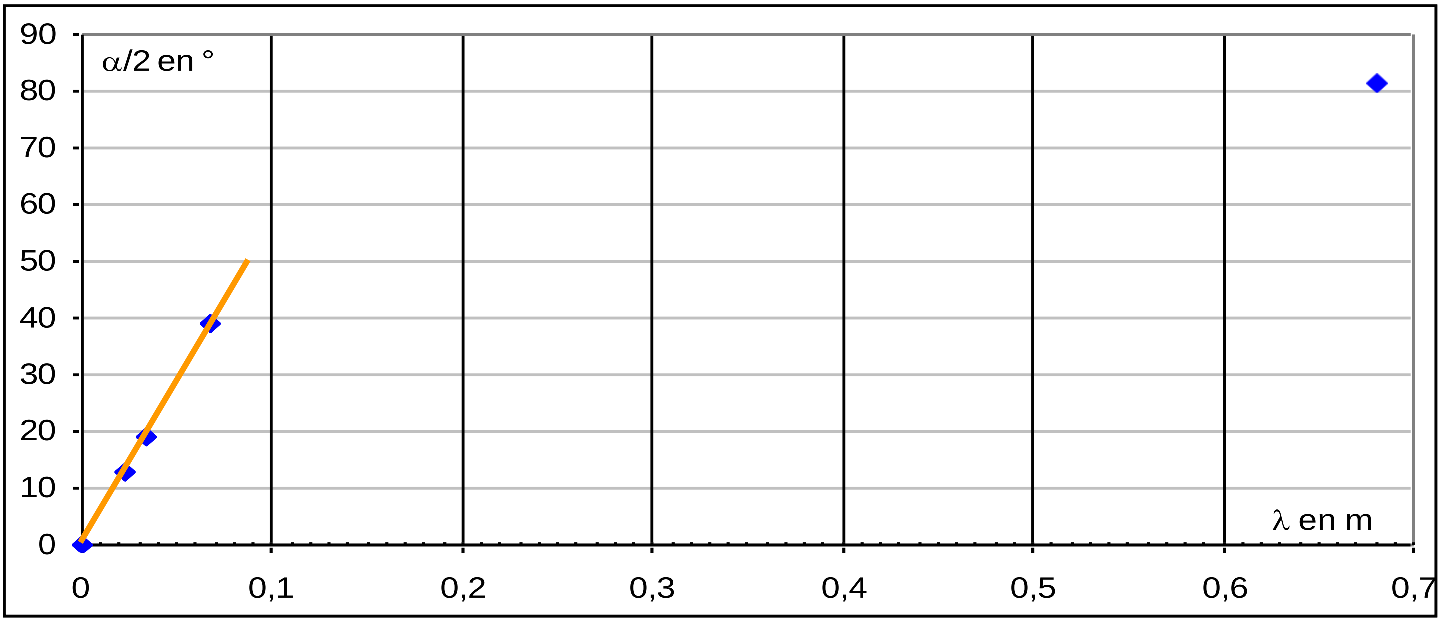
x (en m)	0,00	0,20	0,45	0,50	0,70	1,00	1,60	2,00	5,00	7,00	10,0
θ (en °)	0	6	13	14	19	27	39	45	68	74	79

- Pour une fréquence de 500 Hz, le son est perçu de l'autre côté de l'ouverture pratiquement partout avec la même intensité (faible). Il y a un phénomène d'étalement de l'onde sonore bien au delà des limites géométriques correspondantes au cône partant de l'émetteur E et limité par les extrémités de l'ouverture (phénomène général de diffraction des ondes, notamment sonores).

Le cône de diffraction, c'est à dire la région de l'espace à droite de la porte où on perçoit le son est tel que le demi angle au sommet $\alpha/2$ est supérieur à 79° (x > 10,0 m).

- *Pour une fréquence de 5 000 Hz, le microphone enregistre un son nettement audible dans un cône de diffraction d'angle α tel que α/2 ≈ 39° (x ≈ 1,60 m).*
- *Pour une fréquence de 10 000 Hz, le microphone enregistre un son nettement audible dans un cône de diffraction d'angle α tel que α/2 ≈ 19° (x ≈ 0,70 m).*
- *Enfin, pour une fréquence de 15000 Hz, le microphone enregistre un son nettement audible dans un cône de diffraction d'angle α tel que α/2 ≈ 13° (x ≈ 0,45 m).*

3- Voici ci-contre, la courbe expérimentale donnant l'angle α/2 en fonction de la fréquence :



4- On peut faire passer approximativement une droite passant par l'origine au plus près des trois premiers points ; cette droite moyenne a pour coefficient directeur environ $5{,}7.10^2$ °/m ou encore 10 rd/m (valeur déterminée graphiquement) pour α/2 = f(λ). Le coefficient directeur vaut donc environ 20 rd/m pour la fonction α = g(λ).

Ceci correspond effectivement à une relation de proportionnalité compatible avec α = 2.λ/a où a est la largeur de l'ouverture diffractante (porte entrouverte).

On en déduit que 2 / a ≈ 20 m^{-1} d'où a ≈ 10 cm.

Remarque : le $4^{ème}$ segment d'incertitude s'écarte notablement du comportement moyen des autres. La longueur d'onde λ est alors nettement supérieure à a et la relation entre λ, α et a est plus compliquée que celle qui a été proposée en cours (qui est obtenue dans l'hypothèse où l'angle α ,exprimé en radian, est suffisamment petit pour qu'on puisse faire l'approximation

sin α ≈ tan α ≈ α. Les limites de validité de cette approximation sont illustrées par le tableau numérique suivant :

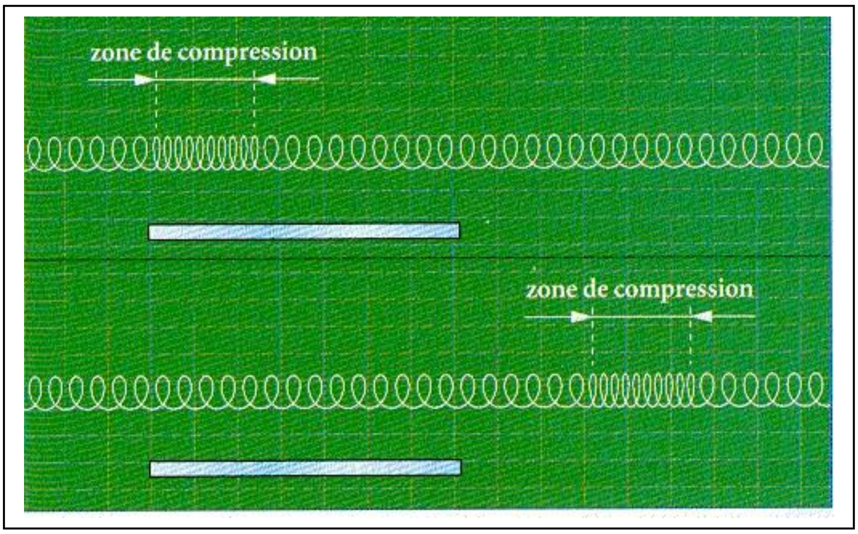
α en °	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
α en rd	0	0,09	0,17	0,26	0,35	0,44	0,52	0,61	0,70	0,79
sin α	0	0,09	0,17	0,26	0,34	0,42	0,50	0,57	0,64	0,71
tan α	0	0,09	0,18	0,27	0,36	0,47	0,58	0,70	0,84	1,00

SERIE 2 :

Exercice 1 :

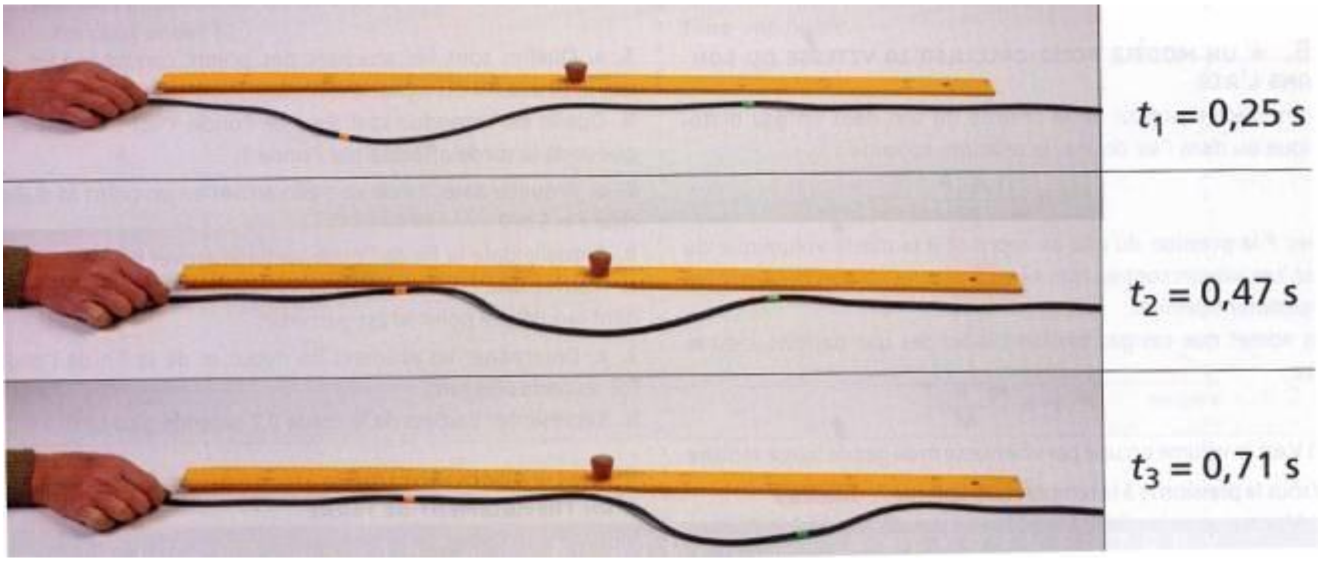
On a réalisé deux prises de vue séparées par une durée Δt de 100 ms.
Une règle blanche de 100 cm de longueur est disposée près du ressort pour donner une échelle des distances.

1. Le phénomène présenté constitue une onde. Est-elle transversale ou longitudinale ? Expliquer.
2. Quelle est la célérité de l'onde le long du ressort ?



Exercice 2 :

Soit une règle de 1 mètre de long, et une corde posée sur un sol lisse.
On imprime une secousse brève à l'un des extrémités de la corde.
A l'aide d'un caméscope, on filme la propagation de la perturbation le long de la corde. On obtient à différents instants, l'aspect de la corde (voir ci-dessous).



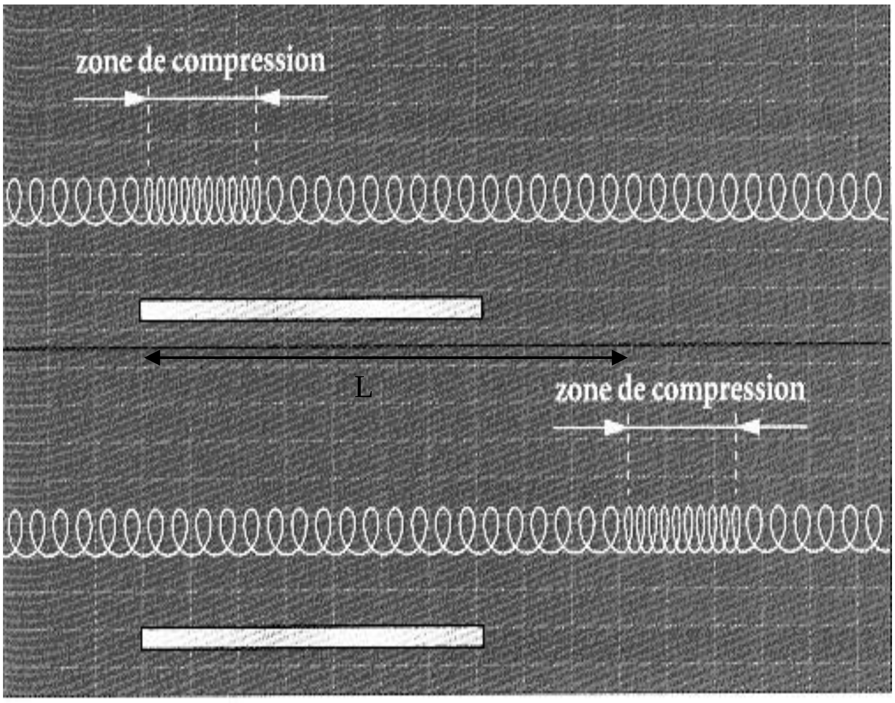
1. Qu'est ce qu'une onde mécanique progressive ?
2. S'agit-il d'une onde transversale ou longitudinale ?
3. Sur quelle distance l'onde s'est-elle propagée entre les instants t_1 et t_3 ? En déduire la célérité de l'onde. Expliquer.

Correction de l'exercice 1 :

1°) L'onde qui se propage le long du ressort est une onde longitudinale. La propagation de cette onde s'accompagne d'un déplacement provisoire de matière dans une direction parallèle à la direction de propagation.

2°) On cherche à déterminer v la célérité de l'onde :

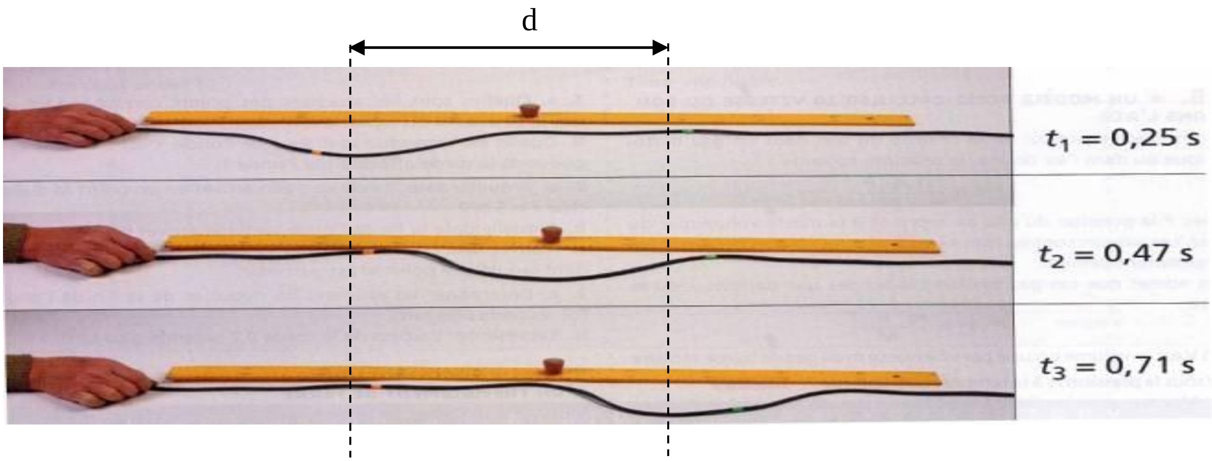
On connaît la durée séparant deux photos : $\Delta t = 100$ ms = $1{,}00.10^{-1}$ s.
On mesure la distance L sur laquelle l'onde s'est propagée entre les deux photos :



Sur la photo la distance L est représentée par un segment de longueur 4,2 cm. La règle de 1,0 m est représentée par un segment de longueur 3,0 cm. On en déduit L = 1,4 m.
La célérité de l'onde est alors $v = L/\Delta t = 1{,}4/10^{-1} = 14$ m/s
V = 14 m/s.

Correction de l'exercice 2 :

1°) On nomme onde mécanique progressive le phénomène de propagation de proche en proche d'une perturbation dans un milieu matériel sans transport de matière.
2°) Il s'agit d'une onde transversale puisque la perturbation correspond à un déplacement provisoire de matière dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation.
3°) On repère la position d'un point de la perturbation sur la première et sur la troisième photo. On mesure alors sur les photos la distance d parcourue par la perturbation entre les instants t_1 et t_3. On



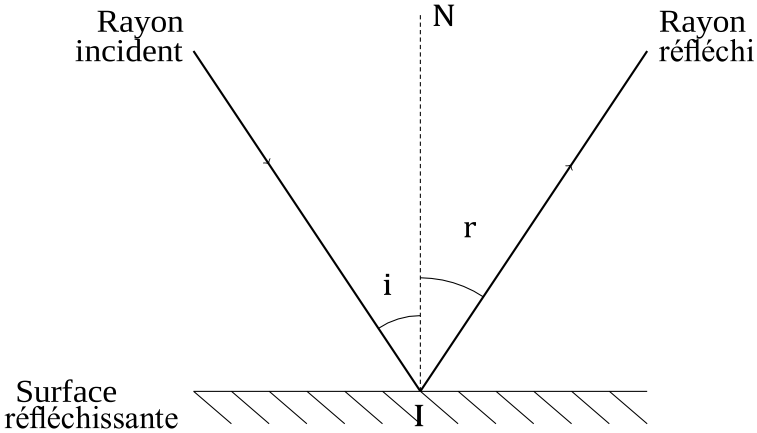
trouve une distance de 4,6 cm.

Propagation d'onde lumineuse :

Rappel sur la réflexion et réfraction :

Réflexion :

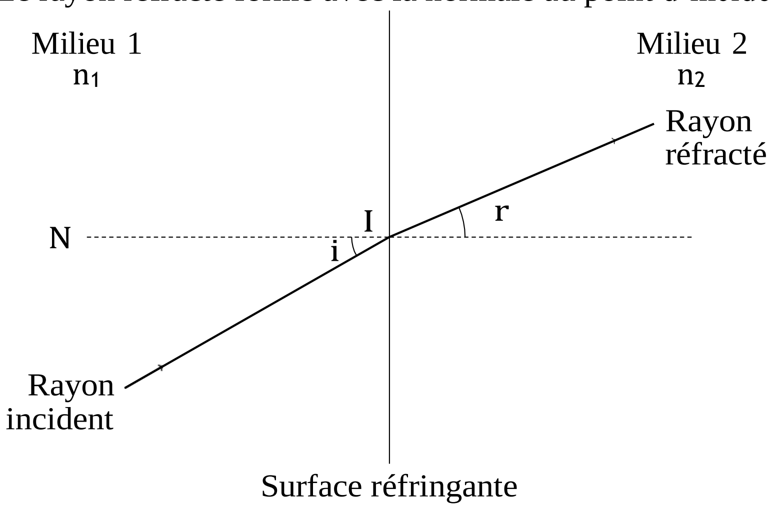
La réflexion : est la déviation d'un rayon lumineux en suivant une direction bien déterminée, lorsque ce rayon arrive sur une surface réfléchissante.
Cette déviation se fait dans le même milieu d'où provient le rayon incident.



Les lois de Descartes :
Loi 1 : le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale sur la surface au point d'incidence sont situés sur le même plan.
Loi 2 : L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux : $i = r$

Réfraction :

La réfraction : est le changement de direction que subit un rayon lumineux lorsqu'il traverse la surface qui sépare deux milieux différents, transparents et homogènes.
On appelle la surface qui sépare les deux milieux : surface réfringente.
Le rayon incident forme avec la normale au point d'incidence une angle dite angle d'incidence i.
Le rayon réfracté forme avec la normale au point d'incidence une angle dite angle de réfraction r.



Les lois de Descartes :
Loi 1 : Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale sur la surface réfringente au point d'incidence sont situés sur un même plan.
Loi 2 :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

avec n_i l'indice du milieu i.

Phénomène de diffraction de la lumière :

Expérience :

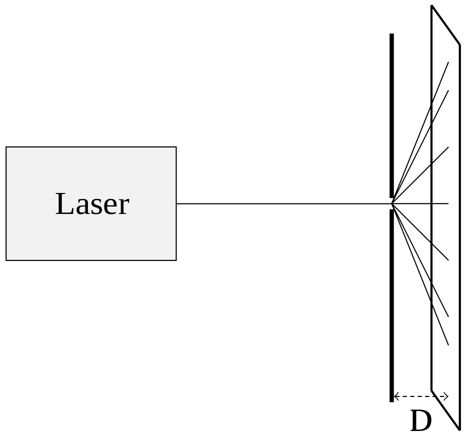


Figure 1: Montage expérimentale :

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une fente fine, la lumière ne se propage plus en une ligne droite. Elle est diffractée par la fente dans un plan perpendiculaire à son axe. On obtient des tâches sur l'écran.

Définition :

La diffraction : est le phénomène au cours duquel une onde qui traverse une petite ouverture ou rencontre un petit objet change de direction sans modification des propriétés de l'onde (la fréquence, la période et la longueur d'onde).
Ce phénomène est d'autant plus important lorsque la fente a est faible.
De cette expérience on peut déduire que la lumière a un aspect ondulatoire, c'est une onde électromagnétique qui se propage dans les milieux transparents et le vide.

Propriétés des ondes lumineuses :

Onde lumineuse monochromatique :

. La lumière blanche est une lumière polychromatique.
. La lumière monochromatique est celle qui ne peut pas être décomposée par le prisme, à titre d'exemple le rayonnement laser.
. Une onde lumineuse monochromatique est une onde progressive sinusoïdale caractérisée par :
  . La fréquence ν et la période T imposées par la source de l'onde.
  . La vitesse v qui dépend du milieu dans lequel l'onde se propage.

Célérité de la lumière :

. La vitesse de la lumière dans le vide est $c \approx 3 \times 10^8$m/s.
. Dans un milieu matériel, l'onde lumineuse se propage avec une vitesse v tel que $v < c$.
. On définit l'indice de réfraction n dans un milieu transparent pour une lumière monochromatique par la relation :

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

D'où le rapport n est sans dimension.

La fréquence ν et la longueur d'onde λ :

. La couleur de la lumière monochromatique dépend de la fréquence.
. L'onde lumineuse monochromatique est caractérisée par sa fréquence ν qui ne dépend pas du milieu de propagation.
. On exprime la longueur d'onde λ_0 de la lumière monochromatique dans le vide par la relation :

$$\lambda_0 = c \times T = \frac{c}{\nu}$$

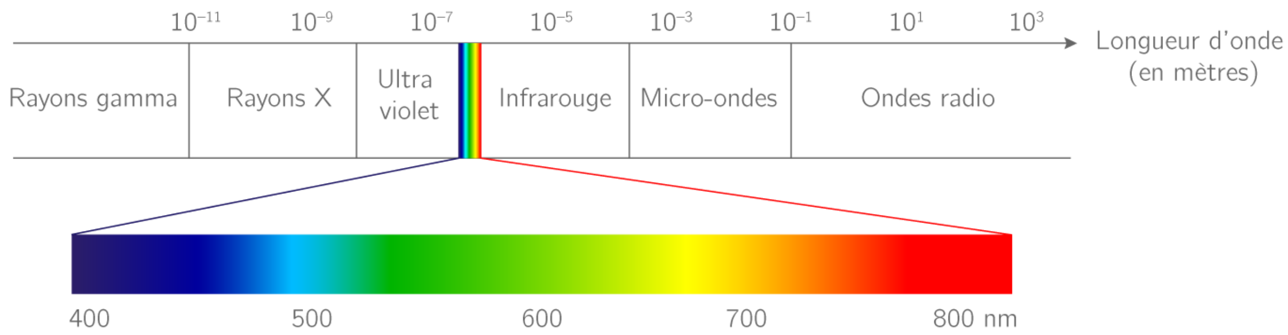
. Dans un milieu matériel, on exprime la longueur d'onde λ de la lumière par

$$\lambda = c \times T = \frac{v}{\nu}$$

. La longueur d'onde λ de la lumière monochromatique de fréquence ν, dépend de la nature du milieu de propagation.

Domaine des ondes lumineuse visibles :

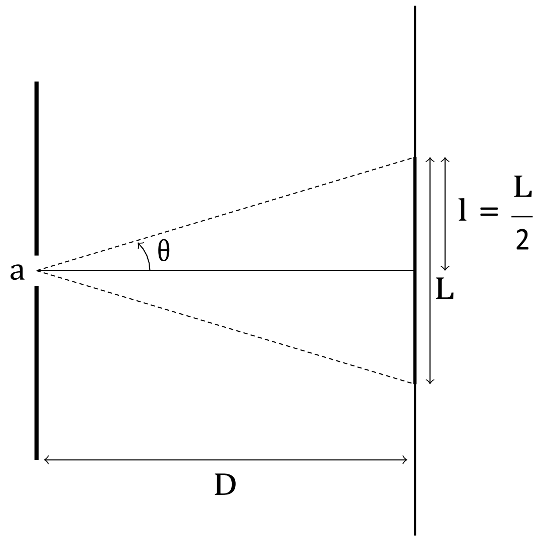
Le domaine de la lumière visible est celui dont la longueur d'onde est compris entre 400nm et 800nm ($400nm \leq \lambda \leq 800nm$).



Spectre visible

Diffraction d'une onde monochromatique :

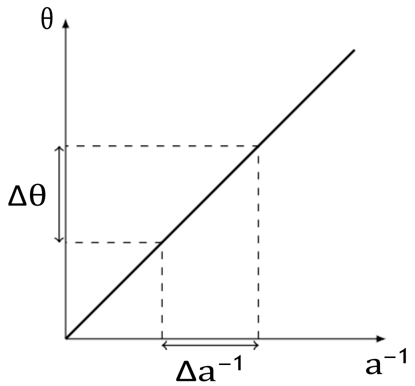
L'écart angulaire θ :



La direction de la fente est perpendiculaire à la direction des tâches lumineuses :

D'après le schéma on a : $\tan\theta = \frac{L}{2D}$, or dans ce cas θ est faible alors $\tan\theta \approx \theta$, donc :

$$\theta = \frac{L}{2D}$$



On a $\theta \propto a^{-1}$, et d'après l'allure de la courbe ci-dessus, on peut déduire que :

$$\theta = k.\frac{1}{a}$$

Où k est la longueur d'onde (On peut la déduire d'après l'homogénéité de la relation)

$$k = \lambda = \frac{\Delta\theta}{\Delta a^{-1}}$$

Par suite :

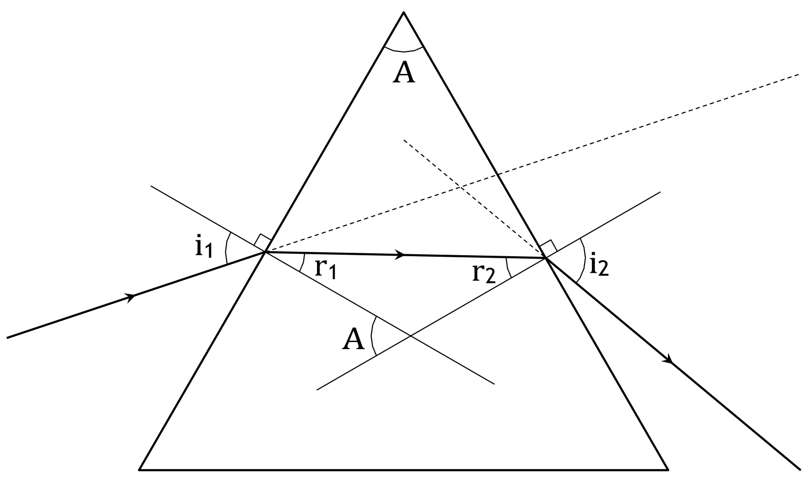
$$\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$$

La condition de diffraction : $10\lambda \leq a \leq 100\lambda$.

Dispersion de la lumière blanche par un prisme :

Le prisme dévie et décompose la lumière blanche, c'est le phénomène de la dispersion de la lumière blanche.
L'ensemble des couleurs obtenus constitue le spectre de la lumière blanche.

Les relations du prisme :



Lorsqu'un rayon lumineux atteint la face plane d'un prisme, il subit deux réfractions.
À partir les lois de Descartes on en déduit les relations suivantes :

$$\sin i_1 = n \sin r_1$$
$$\sin i_2 = n \sin r_2$$

Et en utilisant la géométrie élémentaire, on peut déduire les relations suivantes :

$$A = r_1 + r_2$$
$$D = i_1 + i_2 - A$$

Propagation d'une onde lumineuse
Exercices corrigés

Exercice 1 .

Un professeur de physique désir, avec ses élèves, de connaitre la longueur d'onde d'un faisceau laser.

Il utilise un fil calibré (a=0,180mm) pour réaliser le montage de diffraction étudié en classe.

Il place un écran de distance $D = 2{,}00m$ et mesure la longueur pour la tache centrale $L = 1{,}10\ cm$.

1- Donner la relation liant la longueur d'onde λ et la dimension de l'obstacle a qui caractérise la diffraction.

2- A l'aide d'un schéma, établir la relation exprimant L en fonction de λ, D et a.

Pour les petits angles on a : $tan\theta \approx \theta$

3- Comment varie la longueur L de la tache centrale si on diminue l'épaisseur du fil ? Justifier ta réponse.

4- Calculer la longueur d'onde λ du faisceau laser utilisé.

5- Comment varie la longueur L de la tache centrale si on diminue l'épaisseur du fil ? Justifier ta réponse.

5- La valeur indiquée par le constructeur : $\lambda_{théo} = 480\ nm$. Calculer l'écart relatif avec la valeur trouvée par le prof. Expliquer d'où provient cette erreur et proposer une méthode qui aura donné une meilleure précision.

Donnée : écart relatif sur la mesure de X : $r = \frac{|X_{mesuré} - X_{théoorique}|}{X_{théoorique}}$

Exercice 2 .

Le laser (acronyme de l'anglais light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) set depuis 50 ans, un outil indispensable utilisé dans de nombreux domaines (transfert d'information par fibre optique, métrologie, applications médicales, nucléaires….). Le contrôle de la valeur de la longueur d'onde de la radiation émise est indispensable, sa précision peut même atteindre $10^{-5}\ nm$ dans certains cas.

Objet : Diffraction de la lumière pour déterminer la longueur d'onde d'un Laser

Le faisceau LASER éclaire une fente de la largeur a (voir le schéma ci-contre). Sur un écran placé à la distance $D = 1{,}50\ m$ de la fente, on observe une figure de diffraction constituée de taches lumineuses.

En modifiant la largeur a de la fente, on mesure la largeur P de la tache centrale observée. Les résultats expérimentaux permettent de tracer la courbe $P = f(1/a)$ donnée sur la figure 2.

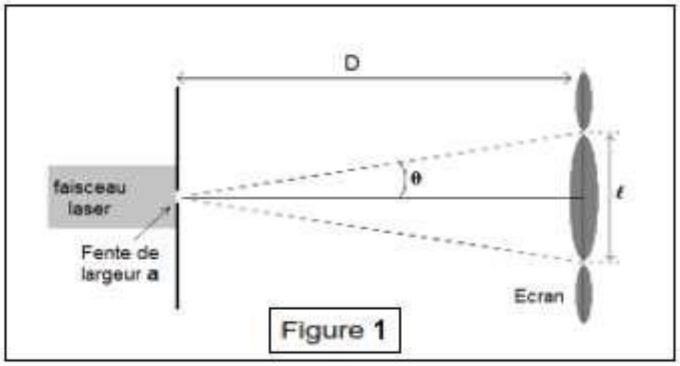


Figure 1

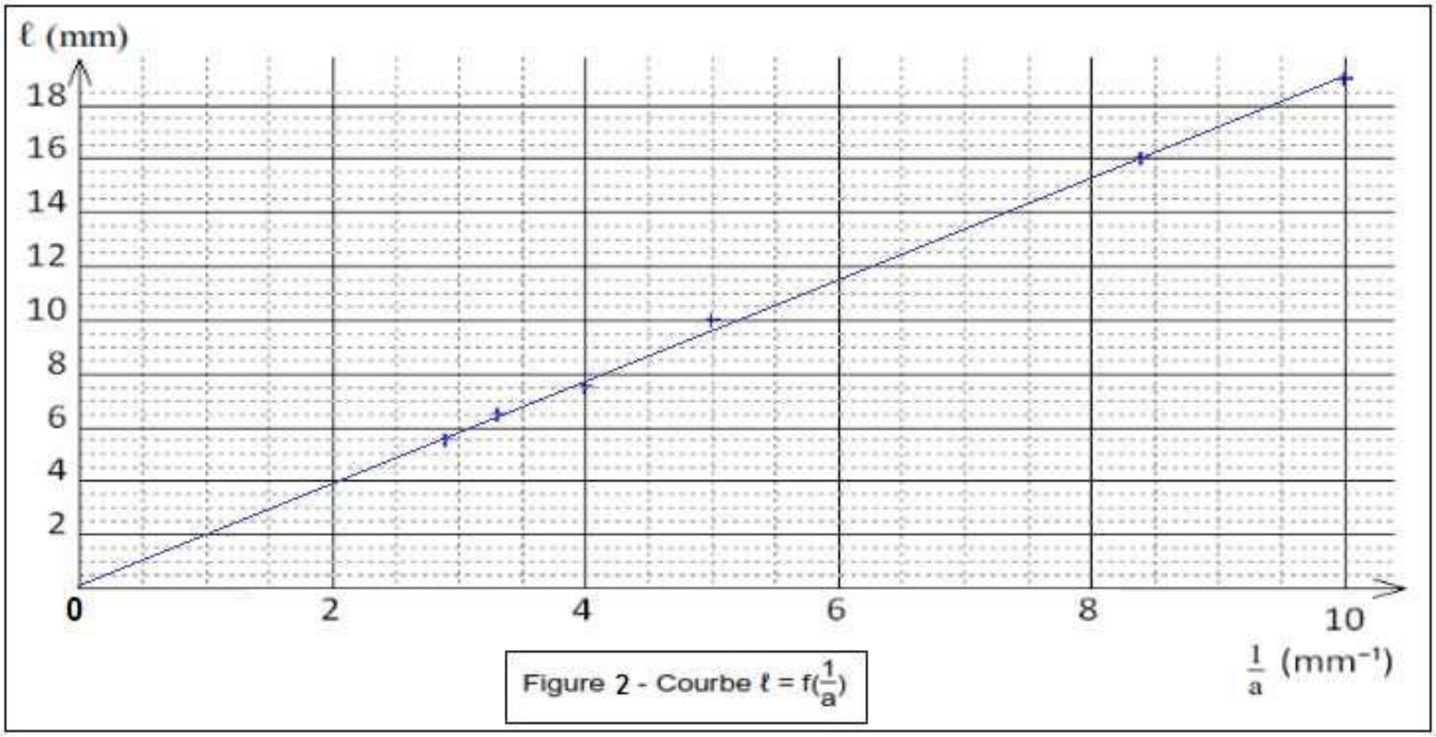


Figure 2 - Courbe $\ell = f(\frac{1}{a})$

1- A quelle condition le phénomène de diffraction est-il observé ?

2- En supposant l'angle θ petit, démontrer que $P = (2 \times \lambda \times \mathrm{D}) \times \frac{1}{a}$. Pour des petits angles, $tan\theta \approx \theta$ (en rad)

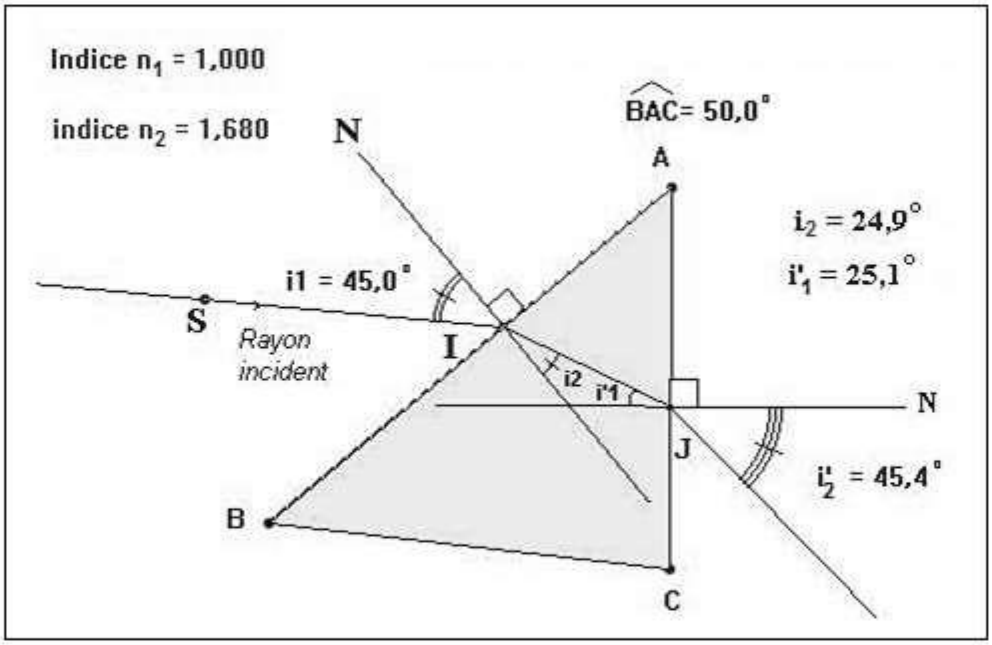
3- A partir de la courbe $P = f(1/a)$ donnée sur la figure 2, déterminer la valeur de la longueur d'onde λ en m puis en nm.

4- Montrer que l'approximation fait sur l'angle θ est exacte. ($\theta\ est\ petit$)

Exercice 3

On dispose d'étudier les conditions de dispersion de la lumière blanche par un prisme pour lequel la réfraction est $1{,}680$ à $470\ nm$ (radiation bleue) et $1{,}596\ nm$ (radiation rouge).

Les notations adaptées pour les angles sont données sur le schéma ci-après.



On envoie sur une face du prisme d'angle $\hat{A} = 50°$ un mince faisceau de lumière blanche d'indice $i_1 = 45\ °$.

1- Calculer l'angle de réfraction i_{2B} pour la radiation bleue puis l'angle de réfraction $i_{2\,R}$

Pour la radiation rouge.

2- Pour les deux radiations, en déduire la déviation due à la première surface de séparation traversée.

3- Dans le cas de la radiation bleue, l'angle d'indice sur la face de sortie du prisme, i'_1 vérifie la relation : $\hat{A} = i_2 + i'_1$. En déduire la valeur numérique de i'_1 pour chaque radiation étudiée.

4- Quels sont les valeurs des angles de sortie du prisme i'_{2B} et i'_{1R} pour chaque radiation.

5- Calculer la déviation D subie par le pinceau incident à sa sortie du prisme en fonction de i_1 , $i'_2 et\ A$.

En déduire les déviations subies respectivement par la lumière bleue et par la lumière rouge.

Exercice 4

Propagation d'une onde lumineuse

1- Phénomène de diffraction :

On réalise une expérience de diffraction à l'aide d'un laser émettant une lumière monochromatique de longueur d'onde λ.

A quelques centimètres du laser, on place successivement des fils verticaux de diamètres connus.

On distingue par a le diamètre d'un fil.

La figure de diffraction obtenue est observée sur un écran blanc situé à une distance $D = 1{,}60\ m$ des fils.

Pour chacun des fils, on mesure la largeur L de la tache centrale.

A part

R de ces mesures et des données, il est possible de calculer l'écart angulaire θ du faisceau diffracté (voir figure 1 ci-après).

Figure 1
(Vue de dessus)

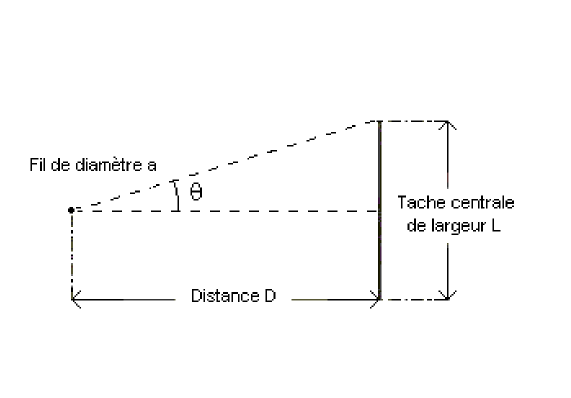
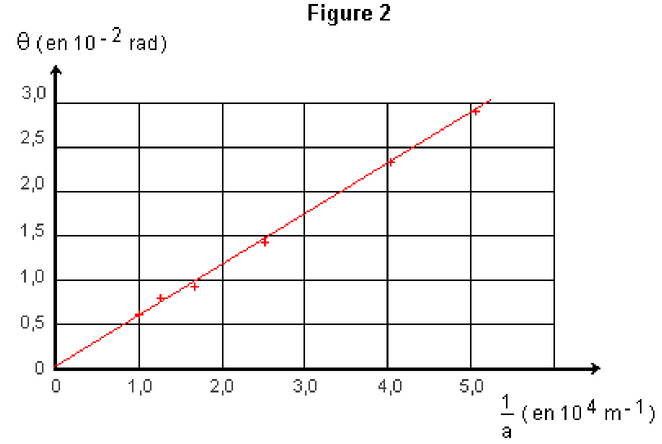


Figure 2



1-1- L'angle θ étant petit, θ étant exprimé en radian, on a la relation: $tan\theta \approx \theta$.

Donner la relation entre L et D qui a permis de calculer θ pour chacun des fils.

1-2- Donner la relation liant θ , λ et a .

1-3- On trace la courbe $\theta = f(1/a)$. Celle-ci est donnée sur la figure 2 ci-dessus.

Montrer que la courbe obtenue est en accord avec l'expression de θ donnée à la question 2.2.

1-4- Comment, à partir de la courbe précédente, pourrait-on déterminer la longueur d'onde λ de la lumière monochromatique utilisée ?

1-5- En utilisant la figure 2, préciser parmi les valeurs de longueurs d'onde proposées ci-dessous, quelle est celle de la lumière utilisée.

$560\ cm$; $560\ mm$; $560\mu m$; $560\ nm$

1-6- Si l'on envisageait de réaliser la même étude expérimentale en utilisant une lumière blanche, on observerait des franges irisées.

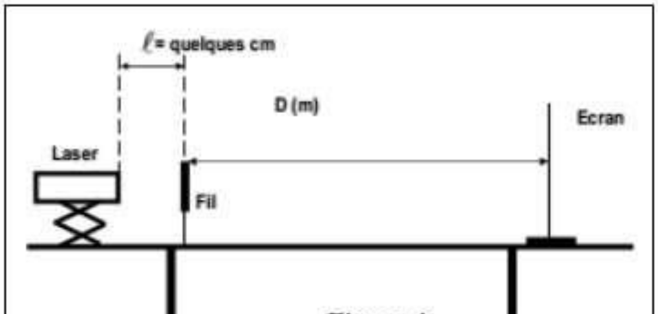


Figure 1

En utilisant la réponse donnée à la question 2.2, justifier l'aspect de la figure observée.

2- Phénomène de dispersion

Un prisme est un milieu dispersif : convenablement éclairé, il décompose la lumière du faisceau qu'il reçoit.

2-1- Quelle caractéristique d'une onde lumineuse monochromatique est invariante quel que soit le milieu transparent traversé ?

2-2- Donner la définition de l'indice de réfraction n d'un milieu homogène transparent, pour une radiation de fréquence donnée.

2-3- Rappeler la définition d'un milieu dispersif.

Pour un tel milieu, l'indice de réfraction dépend-il de la fréquence de la radiation monochromatique qui le traverse ?

2-4- A la traversée d'un prisme, lorsqu'une lumière monochromatique passe de l'air (d'indice $n_a = 1$) à du verre (d'indice $n_V > 1$) , les angles d'indices (i_1) et de réfraction (i_2), sont liés par la relation de Descartes : $sin i_1 = n_V sin i_2$

Expliquer, sans calcul, la phrase : « Un prisme est un milieu dispersif : convenablement éclairé, il décompose la lumière du faisceau qu'il reçoit ».

Exercice 5

Un faisceau de lumière, parallèle monochromatique, de longueur d'onde λ, produit par une source laser, arrive sur un fil vertical, de diamètre a (a est de l'ordre du dixième de millimètre). N place un écran à une distance D est grande devant a (voir document1).

La figure 2 présente l'expérience vue de dessus : le fil est perpendiculaire au plan de la figure.

1- Quel enseignement sur la nature de la lumière ce phénomène apport-t-il ?

2- La lumière émise par la source laser est dite monochromatique. Quelle est la signification de ce terme ?

3- Faire apparaitre sue la figure 2, l'écart angulaire θ et la distance D entre le fil est l'écran.

4- En utilisant la figure 2, exprimer l'écart angulaire θ en fonction des grandeurs L et D sachant que pour de petits angles exprimés en radian : $\tan\theta \approx \theta$.

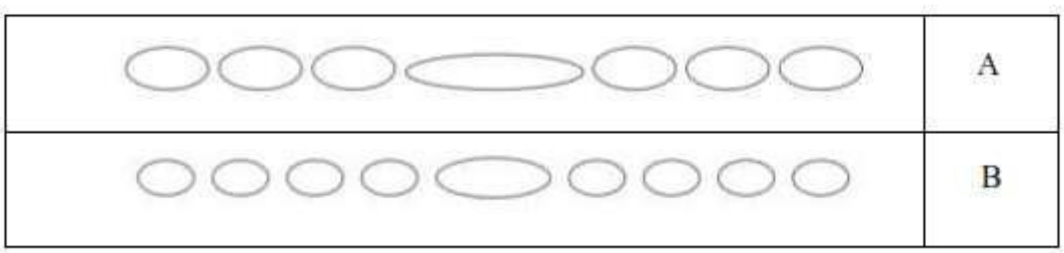
5- Quelle expression mathématique lie les grandeurs $\theta, \lambda\ et\ a$? (On suppose que la loi est la même que pour une fente de largeur a). Préciser les unités respectives de ces grandeurs physiques.

6- En utilisant les résultats précédent montrer que la largeur L de la tache centrale de diffraction s'exprime par : $L = \frac{2\times\lambda\times D}{a}$

* On dispose de deux fils calibrés de diamètres respectifs $a_1 = 60\ pm$ et $a_2 = 80\ pm$.

7- On place successivement ces deux fils verticaux dans le dispositif présenté par la figure 1. On obtient sur l'écran deux figures de diffraction distinctes notées A et B ci-dessous.

Associer, en justifiant à chacun des deux fils la figure de diffraction qui lui correspond.



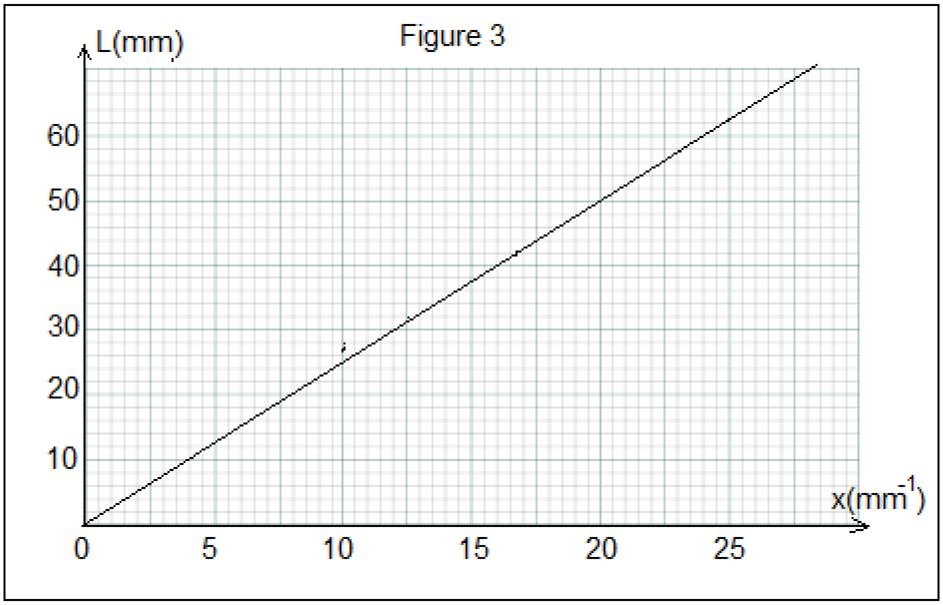
* On cherche maintenant à déterminer expérimentalement la longueur d'onde dans la vide λ_0 de la lumière monochromatique émise par la source laser utilisée. Pour cela, on place devant le faisceau laser des fils calibrés verticaux. On désigne par « a » le diamètre d'un fil. La figure de diffraction obtenue est observée sur l'écran situé à une distance $D = 2{,}50\ m$ des fils. Pour chacun des fils, on mesure la largeur L de la tache centrale de diffraction.

On obtient les résultats suivants :

$a(mm)$	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120
$L(mm)$	63	42	32	27	22
$x = \frac{1}{a}\,(mm^{-1})$					

8- Compléter la 3éme ligne du tableau en calculant la valeur de x en mm^{-1}.

9- La figure 3 représente la courbe $L = f(x)$, monter que l'allure de la courbe est en accord avec l'expression de L donnée à la question 6.



10- Donner l'équation de la courbe $L = f(x)$et en déduire la longueur d'onde λ (en m puis en nm) dans le vide de la lumière monochromatique de la source laser.

11- Calculer la fréquence f de la lumière monochromatique de la source laser.

12- On éclairs avec cette source laser un verre d'indice de réfraction $n = 1{,}64$.

A la traversée de ce milieu transparent dispersif, les valeurs de la fréquence, de longueur d'onde et de la couleur associées à cette radiation varient-elles ?

13- compléter le tableau suivant :

Milieu de propagation	Fréquence (Hz)	Longueur d'onde (nm)	Vitesse de propagation $(m.s^{-1})$
Air			
verre			

Données : Célérité de la lumière dans le vide ou dans l'air $c = 3{,}00.10^{8}\ m.s^{-1}$

Indice de réfraction $n = \frac{c}{V}$

Correction des exercices

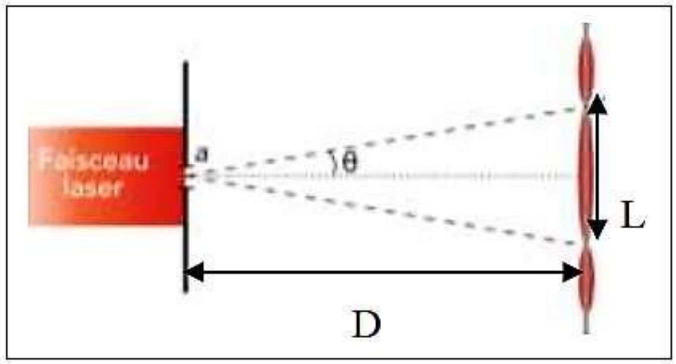
Exercice 1 :

1- Relation caractéristique de la diffraction :

$\theta = \frac{\lambda}{a}$ avec θ l'écart angulaire et a la dimension de l'obstacle.

2- Relation exprimant L en fonction de λ, D et a :

Voir schéma :



Pour les petits angles on a : $tan\theta \approx \theta$

D'après le schéma : $tan\theta = \frac{\frac{L}{2}}{D} = \frac{L}{2D}$

$$\begin{cases} \theta = \frac{\lambda}{a} \\ \theta = \frac{L}{2D} \end{cases} \Longrightarrow \frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a} \Rightarrow L = \frac{2\lambda D}{a}$$

3- comment varie L en fonction de a :

Dans la relation $L = \frac{2\lambda D}{a}$ on constate que L est inversement au diamètre a du fil.

Donc plus a est petit plus le largueur de la tache centrale est grande (diffraction est plus intense).

4- Calcul de la longueur d'onde λ :

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D} \Longrightarrow \lambda = \frac{a.L}{2D}$$

$$\lambda = \frac{1,10.10^{-2} \times 0,180.10^{-3}}{2 \times 2,00} = 4,95.10^{-7}m$$

$$\lambda = 495\ nm$$

5- Calcul de l'écart relatif :

$$r = \frac{|\lambda_{mesuré} - \lambda_{théoorique}|}{\lambda_{théoorique}} = \frac{|495 - 480|}{480} = 0,031 = 3,1\%$$

L'erreur provient d'un manque de précision lors de la mesure de L et D.

Pour une meilleur précision il réaliser plusieurs mesures et traiter les résultats d'une manière graphique pour calculer λ.

Exercice 2 :

1- condition de phénomène de diffraction :

Le phénomène de diffraction est observé si la longueur d'onde λ est du même ordre de grandeur que la largeur de la fente a.

2- Démontrons la relation $P = (2 \times \lambda \times D) \times \frac{1}{a}$. :

D'après la figure 1 on a : $\boldsymbol{tan\theta = \frac{\frac{P}{2}}{D} = \frac{P}{2D}}$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta = \frac{\lambda}{a}} \\ \boldsymbol{\theta = \frac{P}{2D}} \end{cases} \Longrightarrow \frac{P}{\boldsymbol{2D}} = \frac{\boldsymbol{\lambda}}{\boldsymbol{a}} \Rightarrow P = (\mathbf{2} \times \lambda \times \mathbf{D}) \times \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{a}}$$

3- La courbe $P = f(1/a)$ est une fonction linéaire. La droite doit passer par l'origine.

Le coefficient directeur de la droite est $\boldsymbol{k = 2 \times \lambda \times D}$

Graphiquement, $\boldsymbol{k = \frac{\Delta P}{\Delta(\frac{1}{a})} = \frac{11{,}5\ mm}{6{,}0\ mm^{-1}} = 1{,}9\ mm^2 = 1{,}9.10^{-6}\ m^2}$

$$\boldsymbol{k = 2 \times \lambda \times D \Longrightarrow \lambda = \frac{k}{2D} = \frac{1{,}9.10^{-6}}{2 \times 1{,}50} = 6{,}3.10^{-7} m = 6{,}3.10^{-7} \times 10^{9} nm}$$

$$\boldsymbol{\lambda = 630\ nm}$$

4- Montrons que θ est petit :

On calcule la valeur de θ pour la valeur de a la plus petite (soit $1/a$ la plus grande) :

$\boldsymbol{\theta = \frac{\lambda}{a} = 640 \times 10^{-9} \times (10 \times 10^3) = 6{,}4 \times 10^{-3}\ rad}$ soit $\boldsymbol{\theta = 0{,}37}\ °$ qui bien un angle faible.

Exercice 3 :

1- Angle de réfraction i_{2B} pour la radiation bleue puis l'angle de réfraction i_{2R} pour la radiation rouge :

-- Angle de réfraction i_{2B} pour la radiation bleue :

On applique la deuxième loi de Descartes au point I :

$$n_1 . \sin i_{1B} = n_{2B} . \sin i_{2B}$$

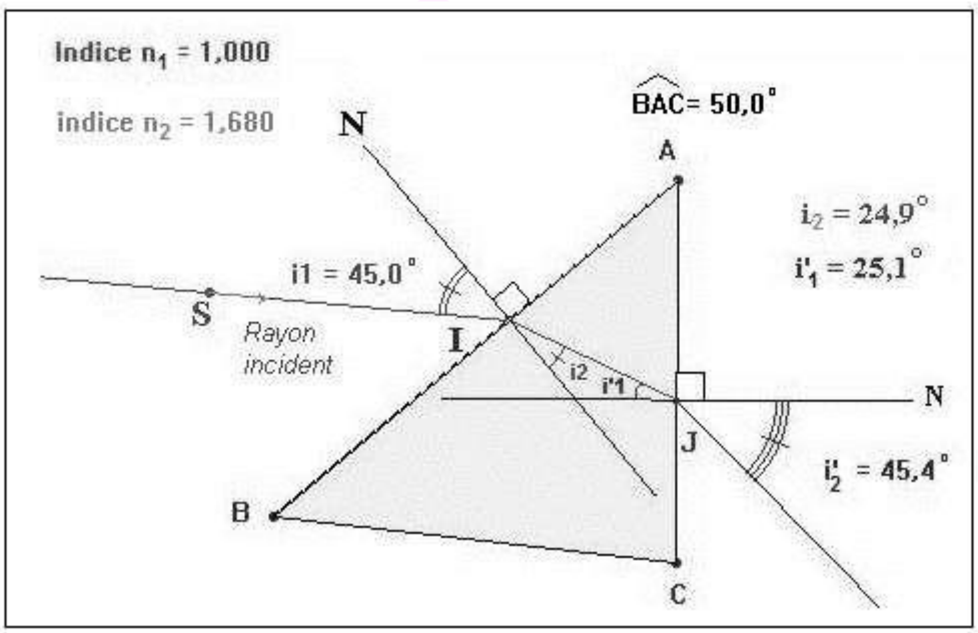
$$\sin i_{2B} = \frac{n_1}{n_{2B}} . \sin i_{1B}$$

$$i_{2B} = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_{2B}} . \sin i_{1B}\right)$$

$$i_{2B} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{1,680} \times \sin 45,0\right)$$

$$i_{2B} \approx 24,9°$$

$$i_{2B} \approx 25°$$



- Angle de réfraction i_{2R} pour la radiation rouge :

De la même façon on trouve :

$$n_1 \sin i_{1R} = n_{2R} \sin i_{2R}$$

$$i_{2R} = sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_{2R}}.sini_{1R}\right)$$

$$i_{2B} = sin^{-1}\left(\frac{1}{1,596} \times sin45,0\right)$$

$$i_{2B} \approx 26,3°$$

2- Déviation due à la première surface de séparation traversée :

-Pour la radiation bleue :

$$D_B = i_{1B} - i_{2B}$$

$$D_B = 45 - 25$$

$$D_B \approx 20°$$

-Pour la radiation rouge :

$$D_R = i_{1R} - i_{2R}$$

$$D_R = 45 - 26$$

$$D_R \approx 19°$$

3- Valeur numérique de i'_1 pour chaque radiation étudiée :

-Pour la radiation bleue :

$$\hat{A} = i_{2B} + i'_{1B} \Longrightarrow i'_{1B} = \hat{A} - i_{2B}$$

$$i'_{1B} = 50 - 25$$

$$i'_{1B} \approx 25°$$

-Pour la radiation rouge :

$$\hat{A} = i_{2R} + i'_{1R} \Longrightarrow i'_{1R} = \hat{A} - i_{2R}$$

$$i'_{1R} = 50 - 26$$

$$i'_{1B} \approx 24°$$

4- Valeurs des angles de sortie du prisme i'_{2B} et i'_{1R} pour chaque radiation :

-Pour la radiation bleue :

On applique la deuxième loi de Descartes au point J :

$$n_1.sini'_{1B} = n_{2B}.sini'_{2B}$$

$$sini'_{2B} = \frac{n_{2B}}{n_1}.sini'_{1B}$$

$$i'_{2B} = sin^{-1}\left(\frac{n_{2B}}{n_1} . sini'_{1B}\right)$$

$$i'_{2B} = sin^{-1}\left(\frac{1,680}{1,00} \times sin25,1\right)$$

$$i_{2B} \approx 45,5°$$

$$i_{2B} \approx 45°$$

-Pour la radiation rouge :

On applique la deuxième loi de Descartes au point *J* :

$$n_1 . sini'_{1R} = n_{2R} . sini'_{2R}$$

$$i'_{2R} = sin^{-1}\left(\frac{n_{2B}}{n_1} . sini'_{1R}\right)$$

$$i'_{2R} = sin^{-1}\left(\frac{1,596}{1,00} \times sin23,7\right)$$

$$i_{2B} \approx 39,9°$$

$$i_{2B} \approx 40°$$

5- Déviations subies respectivement par la lumière bleue et par la lumière rouge :

-Déviation subie par le pinceau incident bleue :

$$D_B = i_{1B} + i'_{2B} - A$$

$$D_B = 45 + 45 - 50$$

$$D_B \approx 40°$$

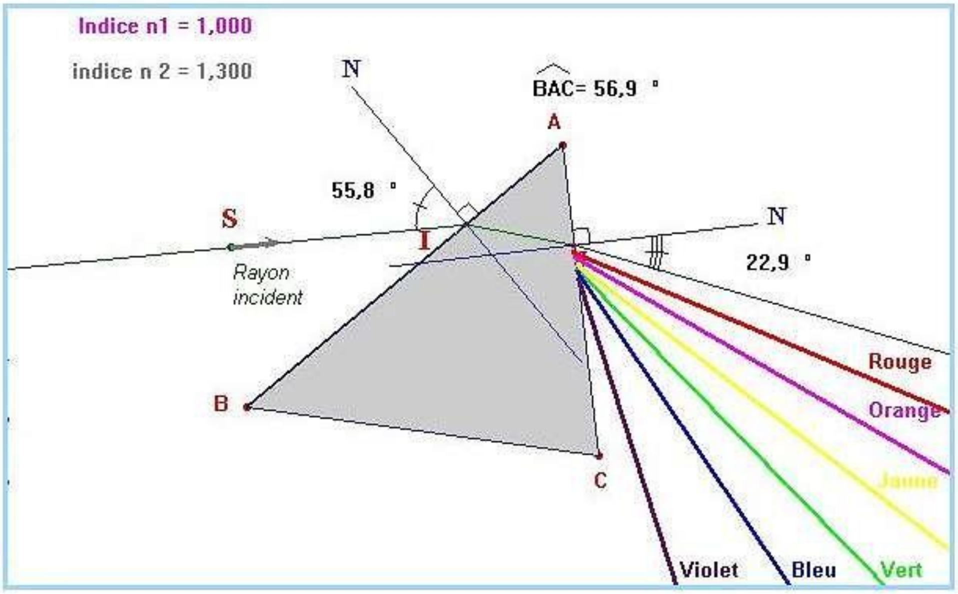
-Déviation subie par le pinceau incident rouge :

$$D_R = i_{1R} + i'_{2R} - A$$

$$D_B = 45 + 40 - 50$$

$$D_B \approx 35°$$

-La lumière bleue est plus déviée que la lumière rouge.



Exercice 4 :

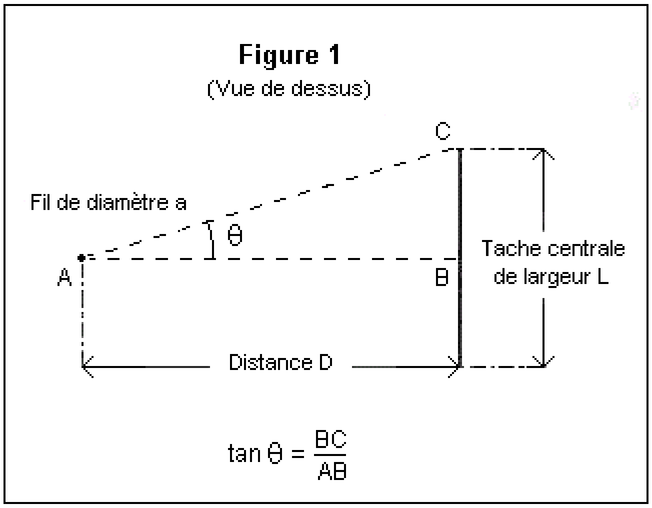
1-Phénmène de diffraction :

1-1- Exprimons la relation entre L et D :

Le triangle rectangle ABC, on a **:** $\boldsymbol{tan\theta = \frac{BC}{AB} = \frac{1/2L}{D}}$

Comme l'angle θ est petit, on peut écrire : $\boldsymbol{tan\theta \approx \theta}$

soit : $\boldsymbol{\theta = \frac{L}{2D}}$



2-2- Relation entre l'écart angulaire θ est lié à la longueur d'onde λ de la lumière monochromatique par la relation :

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

1-3- Montrons que la courbe obtenue est en accord avec l'expression de θ donnée à la question 2.2 :

$$\theta = \frac{\lambda}{a} \quad (\theta \text{ en radian}, \lambda \text{ et } a \text{ sont en mètre})$$

$$\theta = \lambda . \left(\frac{1}{a}\right)$$

Cette expression montre que θ est proportionnelle à $\left(\frac{1}{a}\right)$ et que le graphe associé à $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$ doit être une droite passant par l'origine. C'est ce qui présente la figure 2.

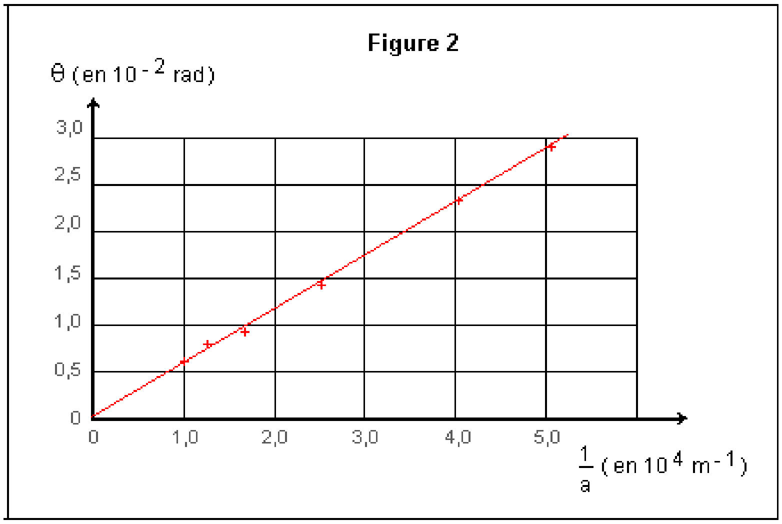
1-4- Détermination de la longueur d'onde λ de la lumière monochromatique :

λ Représente le coefficient directeur de la droite :

$$\lambda = \frac{\Delta\theta}{\Delta\left(\frac{1}{a}\right)} = \frac{2,8 \times 10^{-2}}{5 \times 10^{4}}$$

$$\lambda = 560 \times 10^{-9} m$$

$$\lambda = 560 nm$$



1-5- Parmi les propositions proposées :

$$560\ cm \ ; \quad 560\ mm \ ; \quad 560 \mu m \ ; \quad 560\ nm$$

La dernière valeur $\lambda = 560nm$ qui est bonne.

1-6- l'aspect de la figure observée :

En utilisant une lumière blanche (limites : $\lambda_{violet} = 400\ nm$; $\lambda_{rouge} = 800\ nm$).

Chaque radiation de la lumière blanche donne son propre système de diffraction. La largeur de la tache centrale est proportionnelle à la longueur d'onde λ.

Elle sera minimale pour le violet et maximale pour le rouge. Au milieu de cette tache toutes les radiations sont présentes (aspect blanc), le bord de la tache centrale est rouge (les autres couleurs sont absentes).

2- Phénomène de dispersion

2-1- caractéristique d'une onde lumineuse monochromatique :

La fréquence d'une onde monochromatique est invariable quel que soit le milieu transparent traversé.

La longueur d'onde, dépend du milieu dans lequel l'onde se propage.

2-2- définition de l'indice de réfraction n :

Pour une radiation de fréquence donnée, l'indice de réfraction d'un milieu homogène et transparent est égal au rapport de la célérité de la lumière dans le vide ($c = 3 \times 10^8\, m/s$) à la célérité de la lumière dans ce milieu transparent.

Par exemple, la radiation rouge qui, dans le milieu étudié se propage à la vitesse V_{rouge} , on a :

$$n_{rouge} = \frac{c}{V_{rouge}} = \frac{3 \times 10^8}{V_{rouge}}$$

Remarque : Dans le verre, on a $V_{rouge} > V_{bleue}$ cela implique que $n_{rouge} > n_{bleue}$

2-3- Définition du milieu dispersif :

Un milieu est dispersif lorsque la vitesse V de l'onde qui se propage dans ce milieu dépend de la fréquence f de l'onde.

Par conséquence l'indice de réfraction qui fait intervenir la vitesse de propagation V de l'onde ($n = 3 \times 10^8 / V_{rouge}$) dépend également de la fréquence de l'onde.

3-4- décomposition de la lumière chromatique par le prisme :

Sur la face d'entrée d'un prisme de verre, le faisceau incident, formé de la lumière blanche, possède un angle incidence i_1.

La loi de Descartes s'écrit pour les radiations bleue et rouge :

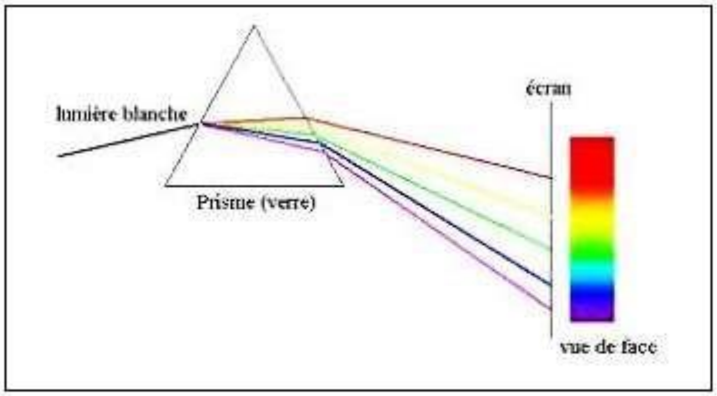
$$1 \sin i_1 = n_{rouge} \sin(i_{2\ rouge})$$

$$1 \sin i_1 = n_{bleue} \sin(i_{2\ bleue})$$

Dans le verre $n_{rouge} > n_{bleue}$ donc : $\sin(i_{2\,rouge}) < \sin(i_{2\,bleue})$

$$i_{2\,bleue} < i_{2\,rouge}$$

Au passage air / verre, la radiation bleue est plus déviée que la radiation rouge.



Remarque : Sur la face de sortie verre / air du prisme, une seconde réfraction a lieu et sépare davantage les radiations.

Exercice 5 :

1- Quel enseignement sur la nature de la lumière ce phénomène apport-t-il ?

Le phénomène observé est caractéristique d'une onde. Donc la lumière a un aspect ondulatoire. Le phénomène étudié est ka diffraction.

2- La lumière émise par la source laser est monochromatique : cela signifie que la lumière laser est constituée d'une seule radiation de fréquence fixée par la source (ou une longueur d'onde dans le vide fixée). Le spectre de cette lumière laser est constitué d'une seule raie colorée.

3- Faire apparaitre sue la figure 2, l'écart angulaire θ et la distance D entre le fil est l'écran :

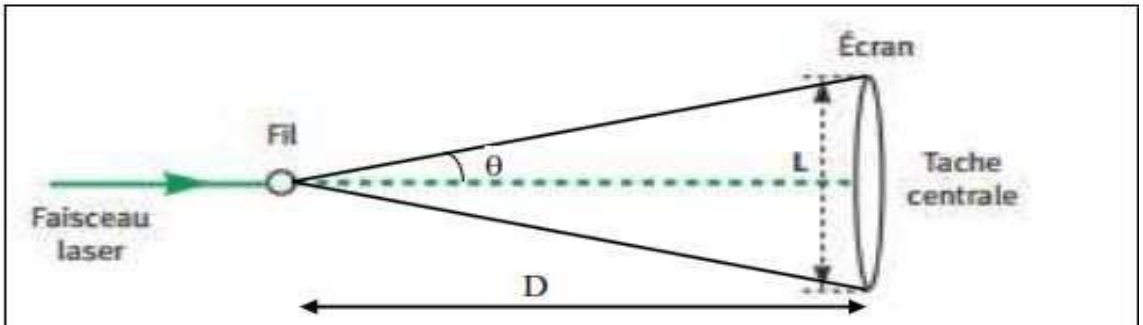


Figure 2 : vue de dessus : le fil est perpendiculaire au plan de la

4- Exprimons l'écart angulaire θ en fonction des grandeurs L et D :

Pour les petits angles on a : $\boldsymbol{tan\theta \approx \theta}$

D'après le schéma : $\boldsymbol{tan\theta = \frac{\frac{L}{2}}{D} = \frac{L}{2D}}$

5- Expression mathématique qui lie les grandeurs θ, λ et a :

Pour la diffraction, $\boldsymbol{\theta = \frac{\lambda}{a}}$ avec θ l'écart angulaire en radian et a la dimension de l'obstacle en m et λ en m.

6- Montrons la relation $\boldsymbol{L = \frac{2 \times \lambda \times D}{a}}$:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta = \frac{\lambda}{a}} \\ \boldsymbol{\theta = \frac{L}{2D}} \end{cases} \Longrightarrow \boldsymbol{\frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a} \Rightarrow L = \frac{2 \times \lambda \times D}{a}}$$

7- La figure correspondant à chaque fil :

Pour λ et D fixés, la largeur L « de la tache centrale » est inversement proportionnelle au diamètre du fil. Donc la tacha centrale la plus grande correspond au fil de diamètre le plus petit :

Figure **A** $\leftrightarrow$ $\boldsymbol{a_1 = 60\ \mu m}$; Figure **B** $\leftrightarrow$ $\boldsymbol{a_2 = 80\ \mu m}$

8- Complétons la 3^{éme} ligne du tableau :

$a(mm)$	$0,040$	$0,060$	$0,080$	$0,100$	$0,120$
$L(mm)$	63	42	32	27	22
$x = \frac{1}{a}(mm^{-1})$	25	$16,7$	$12,5$	10	$8,33$

9- Montons que l'allure de la courbe est en accord avec l'expression de L donnée à la question 6 :

Le graphe $\boldsymbol{L = f(x)}$ montre une droite qui passe par l'origine : donc la largeur L de la tache centrale est proportionnelle à l'inverse du diamètre du fil, car $\boldsymbol{x = \frac{1}{a}}$.

L'équation modélisant la droite est de la forme : $\boldsymbol{L = k.x}$ avec k le coefficient directeur de cette droite.

Ceci est en accord avec l'expression $\boldsymbol{L = \frac{2 \times \lambda \times D}{a}}$ car D et λ sont constantes. On obtient $\boldsymbol{k = 2\lambda.D}$

10- l'équation de la courbe $L = f(x)$et en déduire λ (en m puis en nm) :

$$\boldsymbol{k = \frac{\Delta L}{\Delta x} = \frac{51\ mm}{20\ mm^{-1}} = 2,55\ mm^2}$$

$$\boldsymbol{k = 2\lambda.D \Longrightarrow \lambda = \frac{k}{2D} = \frac{2,55 \times 10^{-6}}{2 \times 2,50} = 5,10 \times 10^{-7}\ m = 510\ nm}$$

11- Calcul de la fréquence f_0 de la lumière monochromatique :

La fréquence est indépendante du milieu de propagation traversé donc la fréquence de la lumière de laser ne change pas à la traversé du verre.

$$\boldsymbol{f = \frac{c}{\lambda(vide)} = \frac{3,00.10^8}{5,10 \times 10^{-7}}}$$

$$\boldsymbol{f = 5,88.10^{14}}$$

12- A la traversée du verre, les valeurs de la fréquence, de longueur d'onde et de la couleur associées à cette radiation varient-elles ?

La fréquence est indépendante du milieu de propagation traversé donc la fréquence de la lumière de laser ne change pas à la traversé du verre.

Pour la longueur d'onde λ : $\boldsymbol{n} = \frac{c}{V}$ où c est la célérité de la lumière dans le vide et V est la célérité de la lumière dans le milieu d'indice n ;

$$\begin{cases} \boldsymbol{c = \lambda(vide).f} \\ \mathrm{V} = \boldsymbol{\lambda.f} \end{cases} \Longrightarrow \boldsymbol{n = \frac{c}{\mathrm{V}} = \frac{\lambda(vide).f}{\lambda.f} = \frac{\lambda(vide)}{\lambda} \Longrightarrow \lambda = \frac{\lambda(vide)}{n}}$$

Donc la longueur d'onde λ varie avec le milieu de propagation.

Pour la couleur : ce qui caractérise la couleur de la radiation est la fréquence et non pas la longueur d'onde, donc la couleur de la radiation ne change pas à la traversé du verre.

13- complétons le tableau :

Milieu de propagation	**Fréquence (Hz)**	**Longueur d'onde (nm)**	**Vitesse de propagation $(m.s^{-1})$**
Air	$f = 5,88.10^{14}$	$\lambda(air) = 510\ nm$	$c = 3,00.10^{8}$
verre	$f = 5,88.10^{14}$	$\lambda = \frac{\lambda(vide)}{n} = \frac{510}{1,64}$ $\lambda = 311$	V= $\frac{c}{n} = \frac{3,00.10^{8}}{1,64}$ V= $1,83.10^{8}$

Ahmed Hakim	Lycée qualifiant Ibn Arabi - Fès -
2 bac international	Exercice : Propagation d'une onde lumineuse

Un faisceau de lumière, horizontal monochromatique de longueur d'onde λ, produit par une source laser arrive sur un fil vertical, de diamètre a (a est de l'ordre du dixième de millimètre).
On place un écran à une distance D (D est grande devant a) de ce fil .

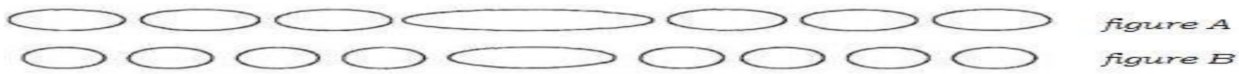
1. **a.** *Décrire le phénomène observé.*
   b. *Quel renseignement sur la nature de la lumière ce phénomène apporte-t-il ? Nommer ce phénomène.*
   c. *La lumière émise par la source laser est dite monochromatique. Quelle est la signification de ce terme ?*
2. *Sur votre copie, faire un schéma représentant l'expérience vue de dessus observée sur l'écran*

3. *Exprimer l'écart angulaire θ en fonction des grandeurs L (largeur de la tâche centrale de diffraction) et D sachant que pour de petits angles exprimés en radian : $\tan \theta = \theta$.*

4. *Ecrire l'expression mathématique qui lie les grandeurs θ, λ et a ?*

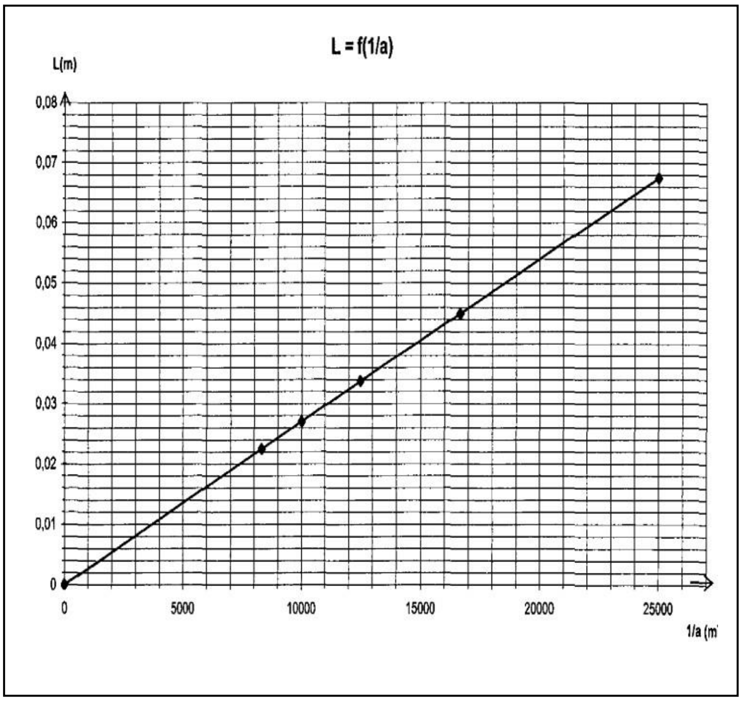
5. *En utilisant les résultats précédents, montrer que L s'exprime par : $L = 2 \lambda D / a$.*

6. *On dispose de deux fils calibrés de diamètres respectifs $a_1 = 20\ \mu m$ et $a_2 = 50\ \mu m$.*
On place successivement ces deux fils verticaux dans le dispositif précédent. On obtient sur l'écran deux figures de diffraction distinctes notées A et B .



Associer, en le justifiant, à chacun des deux fils la figure de diffraction qui lui correspond.

7. *On cherche à déterminer expérimentalement la longueur d'onde dans le vide λ de la lumière monochromatique émise par une source laser. Pour cela, on place devant le faisceau laser horizontal des fils calibrés verticaux de diamètre « a » et pour chacun des fils, on mesure la largeur L de la tâche centrale de diffraction, puis on trace la courbe $L = f(1/a)$.*



Montrer que l'allure de la courbe $L = f(1/a)$ obtenue est en accord avec l'expression de L donnée en 5.

Donner l'équation de la courbe $L = f(1/a)$ eten déduire la longueur d'onde λ dans le vide de la lumière monochromatique du faisceau laser utilisé.

La couleur de la lumière émise par le laser est-elle rouge, verte ou violette ?
Calculer la fréquence de la lumière monochromatique émise par la source laser.

Donnée: *célérité de la lumière dans le vide ou dans l'air $c = 3{,}00 \times 10^8\ m.s^{-1}$.*

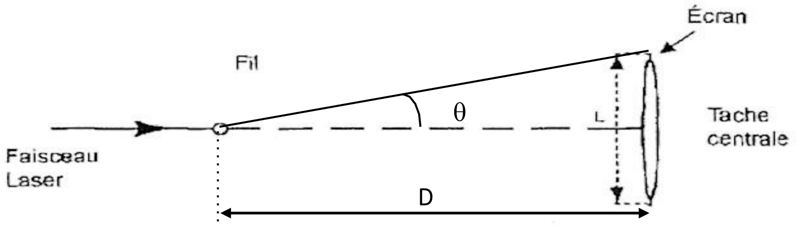
Correction

On observe sur l'écran un étalement du faisceau laser, perpendiculaire à la direction du fil, constitué d'une tache centrale bordée de taches latérales.

b. *La lumière ne se propage plus de façon rectiligne, le phénomène observé est la* ***diffraction de la lumière****. Or ce phénomène est caractéristique des ondes, donc* ***la lumière est de nature ondulatoire****.*

c. *La lumière émise par la source laser est monochromatique : cela signifie que la lumière laser est constituée d'une seule radiation de fréquence fixée (ou de longueur d'onde dans le vide fixée).*

2.



3. *L'angle θ est l'angle entre le* ***centre de la tache centrale*** *et le* ***centre de la zone de première extinction****. Voir figure ci-dessus.*

Le schéma montre que: $\tan\theta = (L/2) \div D = L / 2D$

θ étant petit et exprimé en radian, on a $\tan\theta = \theta$, *donc* $\theta = L / 2D$

4. *La relation entre les grandeurs θ, λ et a est:* $\theta = \lambda / a$ *avec θ en (rad), λ et a en (m).*

5. *En égalant les deux expressions de θ, il vient:* $L/2D = \lambda / a$ *soit :* $L = 2\lambda D / a$

6. *D'après la relation précédente pour λ et D fixés, la largeur L "de la tache centrale" est inversement proportionnelle au diamètre a du fil diffractant.*

Donc la tache centrale la plus grande correspond au fil de diamètre le plus petit :

figure A ⇔ $a_1 = 20\ \mu m$

figure B ⇔ $a_2 = 50\ \mu m$

7.

Le graphe L = f (1/a) est une droite qui passe par l'origine : donc la largeur L de la tache centrale est proportionnelle à l'inverse du diamètre du fil, soit 1 /a.

L'équation modélisant la droite est de la forme: $L = k.\frac{1}{a}$ *avec k le coefficient directeur de cette droite.*

Ceci est en accord avec l'expression $L = 2\lambda D \times \frac{1}{a}$ *car D et λ sont constantes, avec* $k = 2.\lambda.D$ *.*

Détermination le coefficient directeur k :

Soient les points A (15000 ; 0,028) et B (25 000 ; 0,068) : $\mathbf{k} = (0{,}068 - 0{,}028)/(25\,000 - 15000)$

$\mathbf{k = 2{,}67.10^{-6}}$

L'équation de la droite s'écrit : $L = 2{,}67\times10^{-6}\ \frac{1}{a}$

De l'expression $k = 2.\lambda.D$ *on déduit l'expression :* $\lambda = k / 2 D$

$\lambda = 2{,}67\ 10^{-6} / 2 \times 2{,}5 = \mathbf{5{,}34 \times 10^{-7}\ m}$

C'est une lumière de coloration verte.

La fréquence ν *de la lumière monochromatique émise par la source laser est:* $\nu = c / \lambda$

$\nu = 3\ 10^{8} / 5{,}4\ 10^{-7} = \mathbf{5{,}5 \times 10^{14}\ Hz}$.