

Physique 2 : Les ondes mécaniques progressives périodiques

1. Comment caractériser une onde sonore progressive périodique ?

Nous avons vu au *chapitre 1* que le son est une onde mécanique progressive. Étudions l'évolution dans le temps (évolution temporelle) et dans l'espace (évolution spatiale) d'une onde émise par un instrument de musique ou par un diapason.

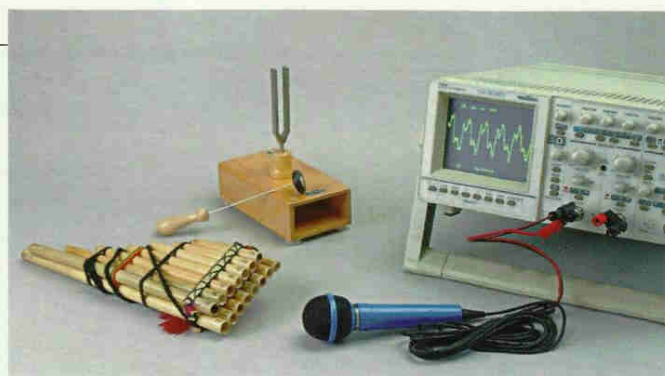
1.1 Périodicité temporelle d'une onde sonore

Activité 1

Comment étudier une onde sonore périodique, en un point de l'espace ?

Un microphone capte le son émis par un instrument de musique jouant une note continue, puis le son émis par un diapason. À l'aide d'un oscilloscope relié au microphone, visualiser le signal sonore [Doc. 1].

1. Les ondes visualisées sont-elles périodiques ?
2. Comparer les oscillogrammes.



Doc. 1 Dispositif expérimental.

> Observation

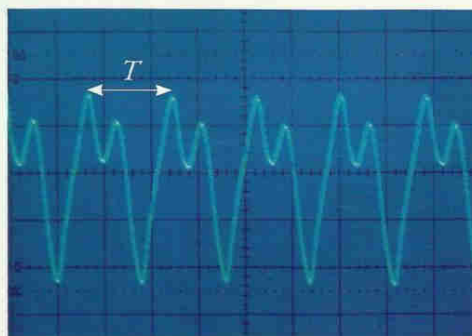
Dans les deux situations, pour une position quelconque du microphone, nous observons une courbe périodique de période T [Doc. 2].

Cette courbe est une sinusoïde dans le cas du diapason [Doc. 3].

> Interprétation

L'instrument de musique (ou le diapason) communique à l'air des vibrations périodiques de période T : il apparaît dans l'air des zones de dilatation et de compression. Cela se traduit par de petites variations de la pression de l'air qui se propagent.

Ces petites variations de pression arrivent sur la membrane du microphone et la font vibrer avec la même période T . Il apparaît une tension variable, de même période aux bornes du microphone. Cette tension est visualisée par l'oscilloscope.



Doc. 2 L'onde émise par un instrument de musique est périodique. T désigne la période temporelle.

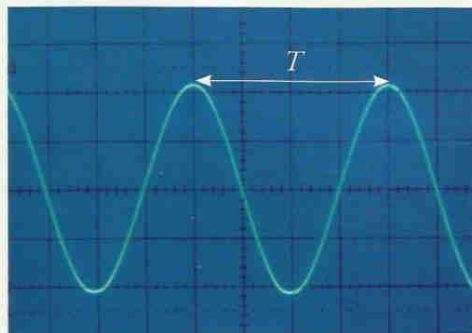
Le son émis par un instrument de musique (ou par un diapason) se propage sous la forme d'une onde progressive périodique.

La période temporelle T de l'onde progressive périodique est la plus petite durée au bout de laquelle un point du milieu de propagation se retrouve dans le même état vibratoire.

La fréquence ν de l'onde est telle que $\nu = \frac{1}{T}$.

T s'exprime en seconde (s) et ν en hertz (Hz).

La période T (ou la fréquence ν) caractérise une onde périodique.



Doc. 3 L'onde émise par un diapason est périodique, sinusoïdale. T désigne la période temporelle.

Une onde sonore est audible si sa fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz environ.

1.2 Périodicité spatiale d'une onde sonore

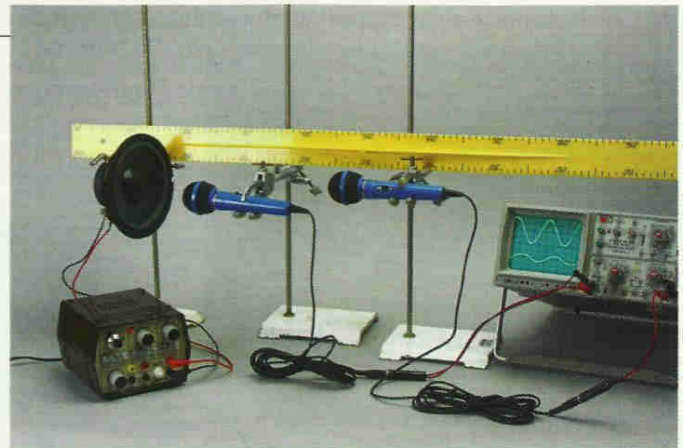
Activité 2

Comment étudier une onde sonore périodique, au même instant, en différents points de l'espace ?

- Reprendre le montage de l'activité 1 et brancher un second microphone sur l'autre voie de l'oscilloscope.
- Utiliser comme source sonore un haut-parleur relié à un générateur B.F., réglé sur une fréquence de 3 000 Hz environ.
- Placer les deux microphones M_1 et M_2 côte à côte [Doc. 4].
- Le microphone M_1 restant fixe, éloigner lentement le microphone M_2 du haut-parleur, le long d'une règle graduée, sur une droite joignant le centre du microphone M_1 au centre de la membrane du haut-parleur.

Qu'observe-t-on sur l'écran de l'oscilloscope :

- lorsque les microphones M_1 et M_2 sont côte à côte ?**
- lorsqu'on éloigne progressivement le microphone M_2 ?**



Doc. 4 Dispositif expérimental.

> Observation

Lorsque les microphones sont placés côte à côte, nous observons deux **sinusoïdes de même période T** , qui atteignent leurs maximums et leurs minimums en même temps [Doc. 5a] : elles sont **en phase**.

Lorsque nous éloignons le microphone M_2 , ces sinusoïdes se décalent horizontalement ; ce décalage augmente avec la distance d entre les deux microphones [Doc. 5b].

Pour une distance particulière notée λ , les deux sinusoïdes sont à nouveau en phase [Doc. 5c].

Lorsque nous continuons de déplacer M_2 , nous retrouvons les deux sinusoïdes en phase pour des positions de M_2 consécutives, équidistantes, séparées à nouveau d'une distance λ .

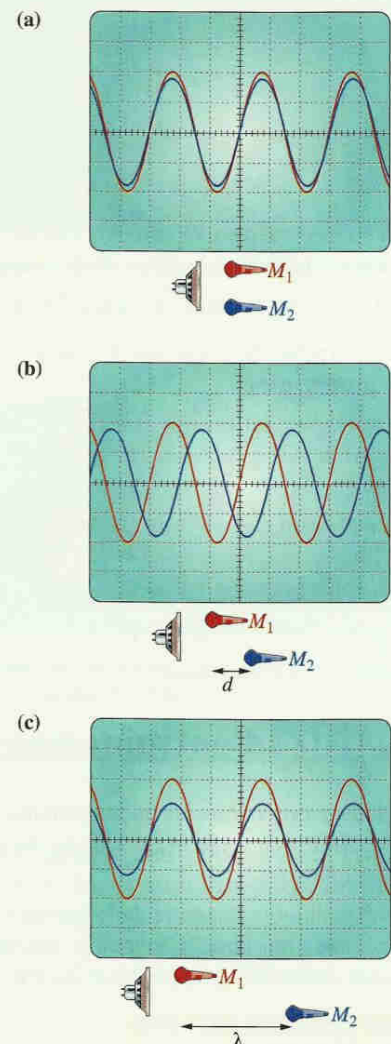
> Interprétation

Les sinusoïdes sont en phase pour des distances multiples de la distance λ qui joue le rôle d'une période dans l'espace.

L'onde sonore présente une **périodicité spatiale** de période λ , appelée la **longueur d'onde** [Doc. 5c]. Les longueurs d'onde des ondes sonores, se propageant dans l'air, s'échelonnent de quelques centimètres à plusieurs mètres.

L'onde sonore progressive sinusoïdale présente une double périodicité :

- une périodicité temporelle de période T ;
- une périodicité spatiale de période λ , appelée longueur d'onde.



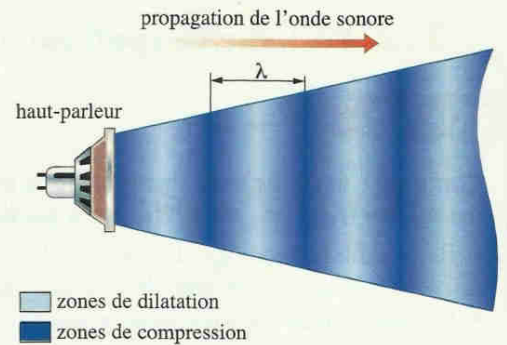
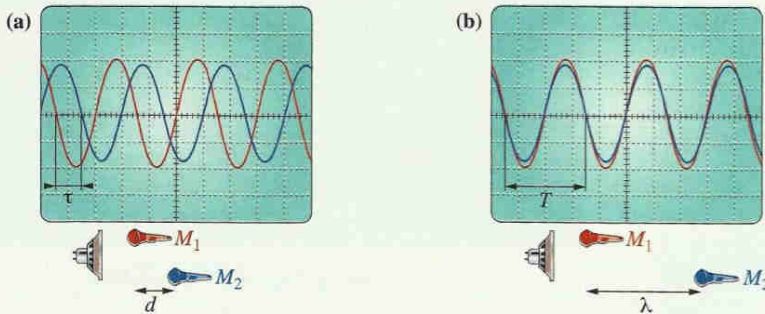
Doc. 5 Oscillogrammes des tensions aux bornes des deux microphones. ►
a) Les microphones étant placés côte à côte, les sinusoïdes sont en phase.
b) Lorsqu'on éloigne les deux microphones, les sinusoïdes se décalent.
c) Pour une distance particulière λ entre les deux microphones, les sinusoïdes sont, à nouveau, en phase.

1.3 Période, longueur d'onde et fréquence

Reprenons l'expérience de l'activité 2. Lorsque le microphone M_2 est décalé de la distance d par rapport au microphone M_1 , l'onde captée par M_2 est en retard de τ par rapport à celle captée par M_1 [Doc. 6a].

ϑ désignant la vitesse de propagation de l'onde, on peut écrire la relation :

$$\vartheta = \frac{d}{\tau}$$



Doc. 7 Onde sonore périodique. Des zones de compression et de dilatation se propagent.

Doc. 6 (a) Le déphasage entre les deux sinusoïdes est quelconque. (b) Pour une distance λ entre les deux microphones, les deux sinusoïdes sont en phase.

Lorsque le retard est égal à la période T , les ondes sont en phase [Doc. 5c et 6b] et la distance entre les microphones est égale à λ , telle que :

$$\vartheta = \frac{\lambda}{T}, \text{ soit } \lambda = \vartheta \cdot T. \text{ [Doc. 7]}$$

La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde pendant une période T : $\lambda = \vartheta \cdot T$.

Au chapitre 1, nous avons vu que la vitesse de propagation d'une onde, ou célérité, dépend du milieu de propagation.

Par exemple, le son se propage beaucoup plus vite dans l'eau que dans l'air.

En revanche, la fréquence ν (ou la période $T = \frac{1}{\nu}$) ne dépend pas du milieu de propagation.

D'après la relation $\lambda = \vartheta \cdot T = \frac{\vartheta}{\nu}$, la longueur d'onde dépend de ϑ , donc du milieu de propagation.

La fréquence ν d'une onde est caractéristique de cette onde, elle ne change pas même si l'onde change de milieu. Ce n'est pas le cas de la longueur d'onde.

- Période temporelle : T .
- Période spatiale (longueur d'onde) : λ .
- Relation : $\lambda = \vartheta \cdot T$.

Dans l'air, les ondes sonores de faible amplitude et de fréquences différentes (sons graves et aigus) se propagent à la même vitesse de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Exercice d'entraînement 1

Nous avons vu que les ondes sonores se propagent dans l'air à la célérité $\vartheta = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dans les conditions ordinaires de température.

Déterminer le domaine de longueur d'onde des ondes sonores audibles par l'oreille humaine, sachant que leurs fréquences sont comprises entre 20 Hz et 20 kHz.

Appliquons la formule $\lambda = \frac{\vartheta}{\nu}$ et calculons les longueurs d'onde extrêmes :

- pour $\nu = 20 \text{ Hz}$, $\lambda = \frac{340}{20} = 17 \text{ m}$;
- pour $\nu = 20 \text{ kHz}$, $\lambda = \frac{340}{20 \times 10^3} = 1,7 \times 10^{-2} \text{ m} = 1,7 \text{ cm}$.

Le domaine de longueur d'onde des ondes sonores audibles par l'oreille humaine est compris entre 1,7 cm et 17 m.

> Pour s'entraîner : Ex. 1 et 3

2. Comment caractériser une onde périodique à la surface de l'eau ?

La double périodicité observée pour les ondes sonores se retrouve-t-elle pour d'autres ondes mécaniques ? Examinons le cas des ondes à la surface de l'eau.

Activité 3

Comment étudier la propagation d'une onde périodique à la surface de l'eau ?

- Un vibreur muni d'une pointe frappe, avec une fréquence connue, la surface de l'eau contenue dans une cuve à ondes [Doc. 8].
- Éclairer la surface de l'eau avec un stroboscope qui est une source d'éclairs lumineux périodiques de fréquence ν_E connue et réglable. Il permet de déterminer la fréquence ν d'un phénomène périodique.
- Commencer l'éclairement par des éclairs de fréquence élevée, puis diminuer progressivement la fréquence.

Qu'observe-t-on ?

> Observation

En diminuant la fréquence des éclairs du stroboscope, c'est-à-dire en augmentant leur période, pour une valeur T_E de celle-ci, nous observons une première immobilité apparente des rides circulaires et du vibreur [Doc. 8].

> Interprétation

L'observateur a l'illusion de l'immobilité des rides (persistance des impressions lumineuses sur la rétine) si, entre deux éclairs (durée T_E), chaque ride a pris la place de celle qui la précédait (durée T). Nous avons alors $T_E = T$.

L'observation par stroboscopie d'une immobilité apparente montre que le phénomène est périodique.

Lors de l'immobilité apparente, nous pouvons constater que les rides à la surface de l'eau sont équidistantes : le phénomène présente une périodicité spatiale de valeur λ .

Toute onde périodique progressive présente une double périodicité :

- une périodicité temporelle de période T ;
- une périodicité spatiale de période λ , appelée longueur d'onde.

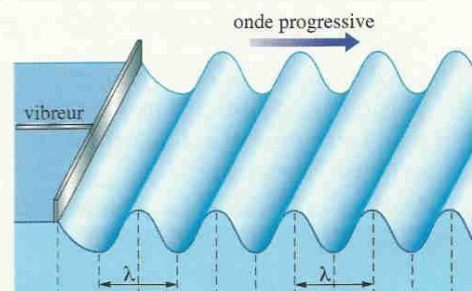
Si le vibreur est muni d'une règle, les rides sont rectilignes : l'onde est rectiligne progressive périodique [Doc. 9 et 10]. C'est le cas des vagues produites dans le bassin de houle de l'activité préparatoire A, page 39.



Doc. 8 Onde circulaire périodique à la surface de l'eau.



Doc. 9 Onde rectiligne périodique à la surface de l'eau (échelle 1/10).



Doc. 10 Onde périodique rectiligne se propageant à la surface de l'eau.

Exercice d'entraînement 2

Le document 9 a été réalisé pour une fréquence d'immobilisation apparente $\nu_E = 15$ Hz.

Quelle est la célérité de l'onde à la surface de l'eau ?

Appliquons la formule $\lambda = \frac{\vartheta}{\nu}$, avec $\nu = \nu_E$; donc $\vartheta = \lambda \cdot \nu_E$.

La distance entre deux crêtes consécutives est égale à la longueur d'onde. Nous mesurons (compte-tenu de l'échelle) : $\lambda = 3$ cm.

D'où : $\vartheta = 3 \times 10^{-2} \times 15 = 0,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

> Pour s'entraîner : Ex. 5 et 8

3. Que se passe-t-il quand une onde rencontre un obstacle ?

Assis dans une salle de classe, si la porte est entrouverte, nous pouvons entendre une conversation qui se déroule dans le couloir. Pourtant, il existe des obstacles entre les sources sonores et l'auditeur.

Le document de la page 38 montre que l'onde engendrée par le tsunami contourne l'île de Sumatra.

Le contournement d'un obstacle par une onde est dû au **phénomène de diffraction**.

Activité 4

Comment observer un phénomène de diffraction ?

- Produire une onde périodique rectiligne à la surface de l'eau d'une cuve à ondes.
- Disposer, sur le trajet des ondes, deux règles permettant de créer une ouverture de largeur réglable [Doc. 11].

1. L'onde affecte-t-elle des points de la surface que l'on aurait pu penser protégés par l'obstacle ?

2. Sur quelle photo, le phénomène de diffraction est-il le plus marqué ?

3. On désigne par a la largeur d'une ouverture et par λ la longueur d'onde. Comment est modifiée la figure de diffraction si l'on augmente le rapport $\frac{\lambda}{a}$ en diminuant la largeur de l'ouverture a ?

➤ Observation

Après avoir traversé une ouverture assez étroite, l'onde n'est plus rectiligne ; elle semble circulaire, centrée sur l'ouverture [Doc. 11b].

➤ Interprétation

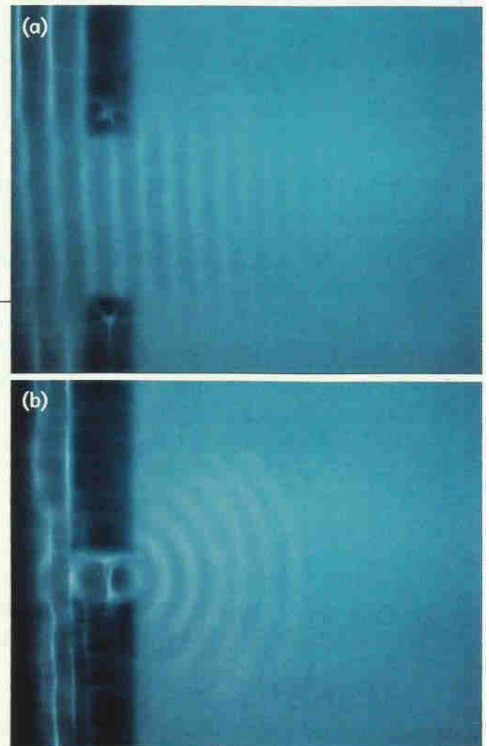
L'étalement d'une onde progressive à la sortie d'une ouverture illustre le phénomène de diffraction. Ce phénomène est important lorsque la largeur a de l'ouverture et la longueur d'onde λ de l'onde sont du même ordre de grandeur [Doc. 11b].

Dans ce cas, l'ouverture joue le rôle de source de très petites dimensions (source ponctuelle) émettant une onde circulaire : tous les points situés derrière l'obstacle sont affectés par cette onde circulaire.

C'est ce qui est également observé sur le document de la page 38, où l'on voit l'onde, engendrée par le tsunami, être diffractée par le détroit situé entre Sumatra et Java.

Nous observons aussi le phénomène de diffraction lorsque nous disposons sur le trajet des ondes une seule règle parallèlement aux rides. Les ondes contournent la règle (ondes circulaires derrière la règle) [Doc. 12]. Cette expérience constitue une simulation de la diffraction de la houle par une jetée.

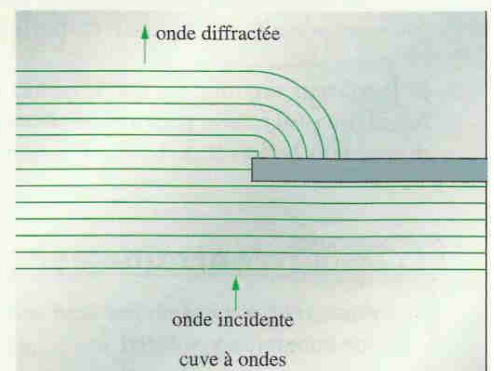
Ainsi, les ondes sonores émises par des personnes en conversation, dont les longueurs d'onde sont de l'ordre du mètre, peuvent être perçues par un auditeur situé derrière une porte entrouverte dont les dimensions sont aussi de l'ordre du mètre. C'est aussi la raison pour laquelle les murs antibruit ne peuvent pas arrêter parfaitement les ondes sonores sur les autoroutes (voir l'activité préparatoire B, page 39).



Doc. 11 Passage d'une onde rectiligne à travers une ouverture.

(a) La largeur de la fente est supérieure à la longueur d'onde.

(b) La largeur de la fente est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.



Doc. 12 Lorsqu'on dispose, sur le trajet des ondes, une règle parallèle aux rides, les ondes contournent le bord de la règle. Celles situées derrière la règle sont circulaires : il y a diffraction des ondes rectilignes par le bord de la règle.

Le phénomène de diffraction est caractéristique des ondes. Il se manifeste lorsque les dimensions d'une ouverture ou d'un obstacle sont inférieures ou du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. L'onde diffractée a la même fréquence et la même longueur d'onde que l'onde incidente.

> Pour s'entraîner : Ex. 9

4. La célérité d'une onde dépend-elle de sa fréquence ?



Doc. 13 Pour les ondes sonores émises par les instruments de musique, l'air n'est pas un milieu dispersif. Les sons graves et les sons aigus arrivent en même temps aux oreilles du spectateur.

Activité 5

Quelle est l'influence de la fréquence d'une onde sur sa vitesse de propagation ?

- Produire une onde rectiligne sur la surface de l'eau d'une cuve.
- Mesurer la longueur d'onde λ pour différentes fréquences ν de vibration du vibreur.
- Calculer, à partir des valeurs de λ et de ν , les valeurs correspondantes de ϑ .

La vitesse de propagation dépend-elle de la fréquence des ondes ?

> Observation

Nous constatons que, lorsque nous modifions la fréquence ν de l'onde, la longueur d'onde λ est modifiée aussi.

La vitesse de propagation est telle que $\lambda = \frac{\vartheta}{\nu}$, soit $\vartheta = \lambda \cdot \nu$.

Pour les ondes à la surface de l'eau, la valeur du produit $\vartheta = \lambda \cdot \nu$ change lorsque nous modifions la fréquence ν .

Dans le cas des ondes sonores se propageant dans l'air, la valeur du produit $\vartheta = \lambda \cdot \nu$ reste inchangée lorsque nous modifions la fréquence ν (voir l'exercice d'entraînement 1, page 42).

> Interprétation

Un milieu dispersif est un milieu dans lequel la vitesse de propagation d'une onde dépend de sa fréquence.

L'eau est un milieu dispersif; l'air ne l'est généralement pas [Doc. 13].

En revanche, lorsque l'intensité sonore est trop grande (tonnerre), l'air peut être dispersif [Doc. 14].

Proche de l'éclair, le tonnerre est un son très bref. En revanche, loin de l'éclair, on entend un grondement prolongé de plus en plus grave.

Le tonnerre est un son constitué d'ondes sonores de fréquences différentes. Les ondes de fréquences faibles (sons graves) se propagent moins vite que celles de fréquences plus élevées (sons aigus); les sons graves parviennent en dernier à l'observateur éloigné : c'est le grondement du tonnerre.

> Pour s'entraîner : Ex. 10



Doc. 14 Pour le tonnerre, l'air est un milieu dispersif.

Applications directes

Caractériser une onde sonore progressive périodique

(§ 1 du cours)

1. Utiliser la relation entre fréquence, célérité et longueur d'onde

- La vitesse de propagation d'une onde sonore dans l'eau est égale à $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; sa longueur d'onde vaut 30 cm. Quelle est la fréquence de l'onde ?
- Cette onde change de milieu et passe dans l'air.
 - La fréquence de l'onde est-elle modifiée ?
 - Déterminer la longueur d'onde sachant que la célérité d'un son dans l'air est de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Connaître les caractéristiques d'une onde sinusoïdale

Une onde sonore sinusoïdale se propage dans l'air à la vitesse de $343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Sa longueur d'onde est égale à 78 cm.

- Quelle est la nature de cette onde ?
 - Pour représenter cette onde à un instant donné, quelles grandeurs porte-t-on en abscisse et en ordonnée ?
 - Faire apparaître la longueur d'onde sur un tel graphique.
- Calculer la fréquence de l'onde.
 - Pourquoi cette onde peut-elle être audible ?
- Une telle onde possède une double périodicité. Préciser.

Caractériser une onde mécanique progressive périodique

(§ 2 du cours)

5. Étudier des ondes à la surface d'un liquide

Dans un tube transparent, on crée des perturbations périodiques de fréquence 3,0 hertz à la surface de l'eau.



- Définir la longueur d'onde pour ce phénomène périodique.
- Mesurer cette longueur d'onde.
- Quelle est la célérité de cette onde périodique à la surface du liquide ?

6. Exploiter les caractéristiques de la houle

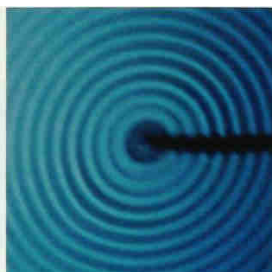
Une houle de hauteur 11 m a une période de 17,7 s. La distance entre deux crêtes consécutives est égale à 490 m. La hauteur est la dénivellation entre une crête et un creux.

- Sur un schéma, représenter la hauteur d'une vague, ainsi que son amplitude. En déduire la valeur de cette dernière.
- Définir la longueur d'onde ; la déterminer.
- Calculer la vitesse de propagation de cette houle.

7. Exploiter une photographie

Le document présenté ci-après est le résultat d'une expérience réalisée sur une cuve à ondes. La fréquence du vibreur a été fixée à 30 Hz. L'échelle est 1/3.

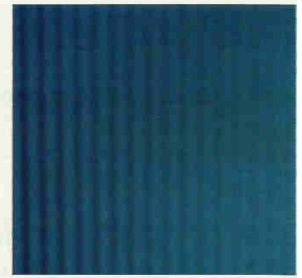
- Schématiser la surface de l'eau en coupe, à l'instant t .
- Quelle est la nature de l'onde ?
- Déterminer la longueur d'onde et la célérité de l'onde.
- Comment représenter la surface de l'eau, vue de dessus, aux instants $t + T$, $t + 2T$, T étant la période temporelle de l'onde ? Justifier.



8. Connaître la double périodicité

Une onde progressive se propage à la surface de l'eau (voir ci-contre).

- Caractériser cette onde.
- Quelle grandeur caractérise la périodicité temporelle ?
 - Comment peut-on la mesurer ? Décrire un protocole expérimental.
- Quelle grandeur caractérise la périodicité spatiale ?
 - Comment peut-on la mesurer ?
- Quelles sont les grandeurs liées aux caractéristiques du milieu de propagation ?



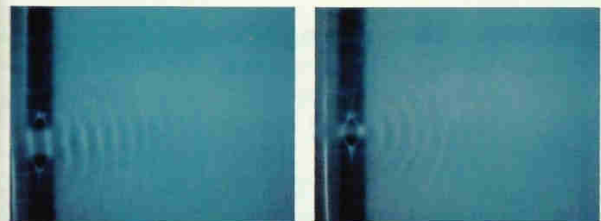
Analyser le phénomène de diffraction

(§ 3 du cours)

9. Connaître le phénomène de diffraction

Sur la cuve à ondes, on a interposé successivement des obstacles formant des ouvertures de largeurs a différentes.

On a obtenu les clichés suivants :



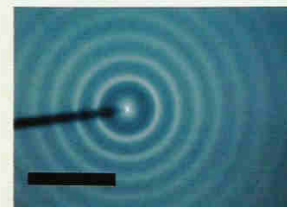
- Quel est le sens de propagation des ondes à la surface de l'eau ?
- Comment se nomme le phénomène observé ?
- Quelle est l'influence de la largeur de l'ouverture sur le phénomène observé ?

Reconnaître le phénomène de dispersion

(§ 4 du cours)

10. Connaître le phénomène de dispersion

Avec la même cuve à ondes, pour deux fréquences différentes, on a obtenu les photos ci-dessous.



(a) 15 Hz



(b) 30 Hz

La longueur du repère noir est $\ell = 10 \text{ cm}$.

- Déterminer la longueur d'onde dans chaque cas.
- Calculer, dans chaque cas, la valeur de la célérité des ondes à la surface de l'eau.
- Conclure.

Utilisation des acquis

12. Stroboscopie

(voir l'exercice résolu 2)

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

1. Quelles sont les fréquences possibles des éclairs?
2. 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.
- a. Quelle est la longueur d'onde?
- b. Quelle est la célérité de l'onde progressive à la surface de l'eau?
3. Dans quelle condition les ondes émises par un vibreur à la surface de l'eau ne seraient-elles plus circulaires? Proposer une expérience où les ondes ne seraient plus circulaires.

13. Propagation d'ondes circulaires à la surface de l'eau



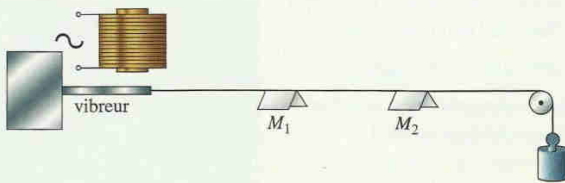
Un vibreur crée, en un point S, une onde progressive périodique à la surface de l'eau d'une cuve à ondes. Sa fréquence est $\nu = 12$ Hz. On obtient à la surface des rides circulaires concentriques.

La distance entre deux rides consécutives est $d = 12$ cm.

1. Quelles sont les valeurs de la longueur d'onde et de la célérité de l'onde?
2. On place, à la surface de l'eau, trois flotteurs A, B et C situés respectivement à 24 cm, 30 cm et 42 cm du vibreur.
- a. Comparer les mouvements des flotteurs avec le mouvement du point S.
- b. Comparer les mouvements des trois flotteurs entre eux.

14. Propagation d'une onde sur une corde

Une corde est disposée comme l'indique le schéma ci-dessous (expérience de MELDE).



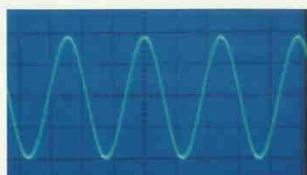
Le vibreur a une fréquence de 100 Hz. La corde, de longueur 80 cm et de masse 1 g, est tendue par un poids de 1,2 N. Deux cavaliers M_1 et M_2 sont disposés sur cette corde à des distances x_1 et x_2 du vibreur.

1. Déterminer la célérité v de l'onde le long de la corde.
2. En déduire la longueur d'onde.
3. Quelles conditions doivent remplir les distances x_1 et x_2 pour que M_1 et M_2 vibrent en phase? **SOS**
4. Quelles conditions doivent remplir les distances x_1 et x_2 pour que M_1 et M_2 vibrent en opposition de phase? **SOS**

Donnée : expression de la célérité v des ondes transversales se propageant sur une corde : $v = \left(\frac{F}{\mu}\right)^{1/2}$, avec F la tension de la corde (en N) et μ la masse linéique (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$).

16. Déterminer les caractéristiques d'une onde sonore

Un son, émis par un haut-parleur, est analysé à l'aide d'un microphone relié à un oscilloscope. La durée de balayage est fixée sur 1 ms/DIV. On observe la figure ci-contre.



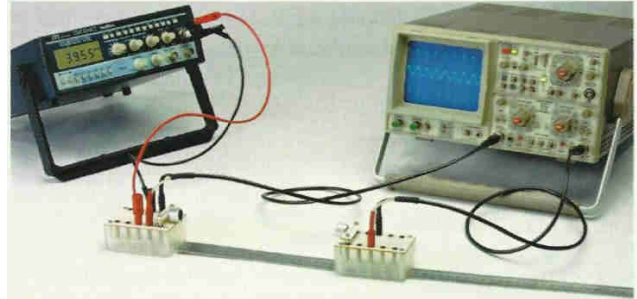
Données : La température de la salle d'expérience est égale à 19 °C. La vitesse de l'onde sonore est donnée par la relation :

$v = \left(\gamma \cdot \frac{R \cdot T}{M}\right)^{1/2}$ avec $\gamma = 1,4$; $R = 8,32$ SI, T température absolue (en kelvin), la masse molaire de l'air $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

1. Calculer la vitesse de l'onde sonore.
2. L'oscillogramme met-il en évidence la périodicité spatiale ou la périodicité temporelle de l'onde?
3. Calculer la période et la fréquence de cette onde.
4. Calculer la longueur d'onde.

17. Mesurer la vitesse d'une onde ultrasonore

On réalise l'expérience ci-dessous avec des ondes ultrasonores. L'émetteur E et le récepteur R sont branchés aux deux voies d'un oscilloscope.



La fréquence de l'émetteur est égale à 41,7 kHz. En déplaçant E par rapport à R le long de la règle graduée, on repère 11 points équidistants correspondant à des sinusoïdes en phase sur l'écran de l'oscilloscope. La distance entre le premier et le dernier point est de 83 mm.

1. Schématiser le dispositif expérimental.
2. Déterminer la longueur d'onde de l'onde ultrasonore.
3. a. En déduire sa vitesse de propagation.
- b. Cette vitesse diffère-t-elle de celle des ondes sonores audibles?

18. Diffraction d'ondes ultrasonores

On dirige, sur une fente, une onde ultrasonore de fréquence 24 kHz.

1. Quel est l'ordre de grandeur de la vitesse de propagation de cette onde dans l'air?
2. Calculer l'ordre de grandeur de la largeur de la fente qui permettrait de mettre en évidence le phénomène de diffraction.
3. Sur cette même fente, on dirige une onde ultrasonore de fréquence 2 MHz. Le phénomène de diffraction est-il mis en évidence? Justifier.

19. Des rides qui changent de forme

Le document ci-contre représente des ondes se propageant à la surface de l'eau. Avant l'obstacle qui est percé d'une petite ouverture, les ondes forment des rides parallèles.



1. Préciser la nature des ondes avant et après l'obstacle.
2. Quel phénomène met-on en évidence?
3. La longueur d'onde est-elle la même avant et après l'obstacle?
4. L'échelle de la photographie est de 1/4. La fréquence du vibreur à l'origine de ces ondes vaut 20 Hz. En déduire :
 - a. la longueur d'onde;
 - b. la vitesse de propagation de ces ondes.

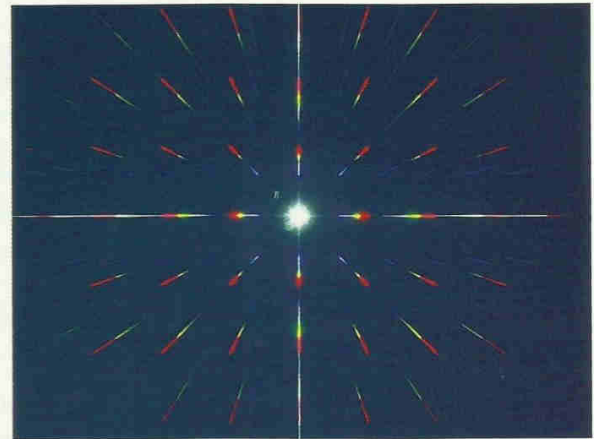
Activités préparatoires

A. Observation d'une source de lumière blanche à travers un voileage

Lorsqu'on observe une source de lumière blanche à travers un voileage, on voit une croix comportant des irisations. Ce phénomène est dû au passage de la lumière au travers des interstices du voileage.

1. Rappeler ce qu'est la lumière blanche étudiée en classe de Seconde.
2. Citer des exemples de sources de lumière blanche.
3. Quelle peut être l'origine des irisations ?
4. Que se passe-t-il lorsque la lumière rencontre un obstacle de petite dimension par comparaison avec un phénomène analogue qui se produit avec les ondes mécaniques ?
5. Comment appelle-t-on ce phénomène ?

➤ Voir § 1.3 du cours, p. 64, et exercice 20, p. 78



▲ Lumière rencontrant la trame d'un voileage en tergal.

B. La découverte de NEWTON

« Au début de l'année 1666, je me procurai un prisme de verre pour réaliser la célèbre expérience des couleurs. Ayant à cet effet obscurci ma chambre et fait un petit trou dans les volets pour laisser entrer une quantité convenable de rayons du Soleil, je plaçai mon prisme contre ce trou pour réfracter les rayons sur le mur opposé. Ce fut d'abord très plaisant de contempler les couleurs vives et intenses produites. Mais au bout d'un moment, je me mis à les examiner plus soigneusement [...] »

Dans la suite du texte, NEWTON propose d'isoler, à l'aide d'un trou dans une planchette, la partie bleue de la tache produite par le prisme, et renvoie cette lumière bleue sur un second prisme. Elle est déviée, certes, mais pas colorée autrement !

Cette fois, NEWTON est sûr d'avoir trouvé : la lumière blanche du Soleil est un mélange de toutes les couleurs.

Extrait de « NEWTON et la mécanique céleste », J.-P. MAURY, Gallimard, 1990.

1. Que veut montrer NEWTON en réalisant cette expérience également étudiée en classe de Seconde ?
2. Comment NEWTON procède-t-il pour isoler la lumière bleue ?
3. Pourquoi la lumière bleue issue du premier prisme n'est-elle pas décomposée par le second ?

➤ Voir § 3 du cours, p. 67, et exercices 9 et 18, p. 76 et 78



▲ NEWTON réalise l'expérience avec ses élèves.

**Comment se propage la lumière ?
Comment analyser la lumière ?**

Physique 3 : La lumière, modèle ondulatoire

1. Comment s'effectue la diffraction de la lumière ?

En classe de Seconde (voir les *prérequis*, page 10), nous avons vu que l'œil humain n'est sensible qu'aux radiations lumineuses dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 nm et 800 nm. La notion de longueur d'onde sous-entend que la lumière est une onde.

Confirmons cette hypothèse en réalisant des expériences de diffraction, caractéristiques des phénomènes ondulatoires.

1.1 Mise en évidence du phénomène de diffraction

Utilisons le faisceau rouge d'un laser hélium-néon ; la lumière produite est monochromatique de longueur d'onde dans le vide 650 nm.

Activité 1

Comment observer le phénomène de diffraction de la lumière ?

Interposer devant le faisceau laser successivement [Doc. 1] :

- une fente verticale très étroite, percée dans une plaque opaque ;
- un petit trou percé dans une plaque opaque ;
- un fil rectiligne vertical, très fin.

Noter les observations.

> Observation

Nous observons respectivement les figures du *document 2*.

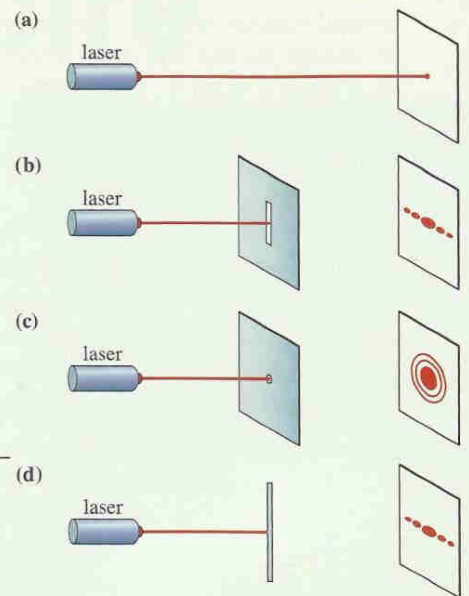
Les **figures de diffraction** de la fente verticale et du fil vertical s'étalent horizontalement, c'est-à-dire perpendiculairement aux directions de la fente et du fil. La figure de diffraction du trou est un disque entouré d'anneaux.

> Interprétation

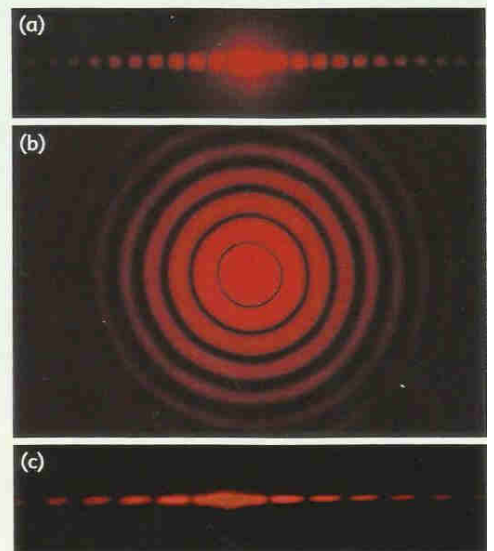
Ces phénomènes sont analogues à ceux que nous pouvons observer lors de la diffraction des ondes mécaniques à la surface de l'eau (voir le *chapitre 2*). Ils s'interprètent par la diffraction de la lumière monochromatique lorsque celle-ci rencontre une ouverture ou un obstacle de faible dimension.

Pour une grande ouverture, les faisceaux lumineux se propagent en ligne droite : il n'y a pas de diffraction [Doc. 3a].

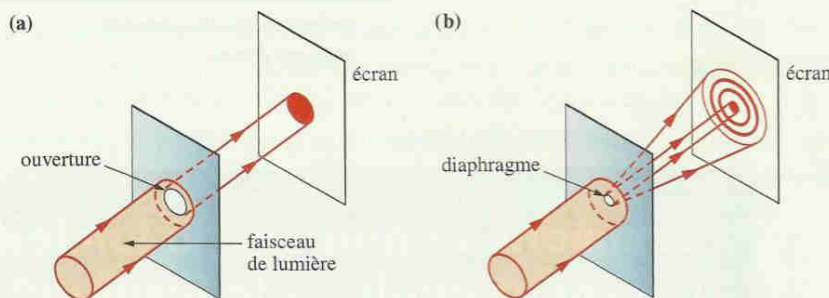
Pour une ouverture de faible dimension, la lumière s'étale de part et d'autre de la direction moyenne [Doc. 3b].



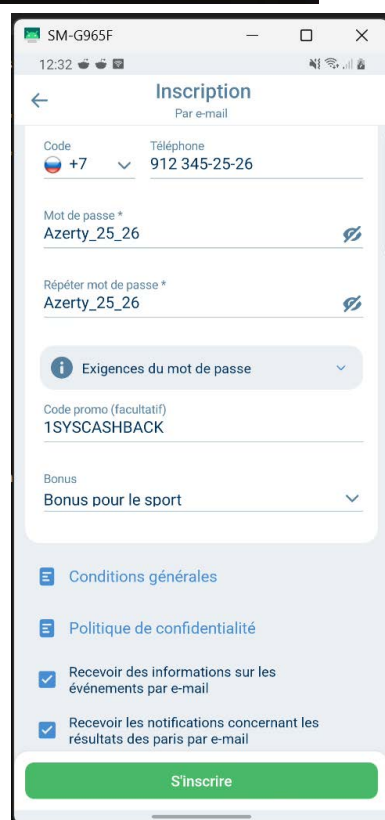
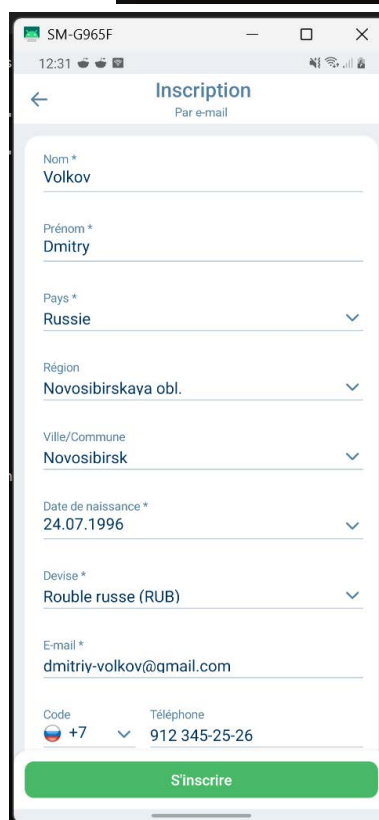
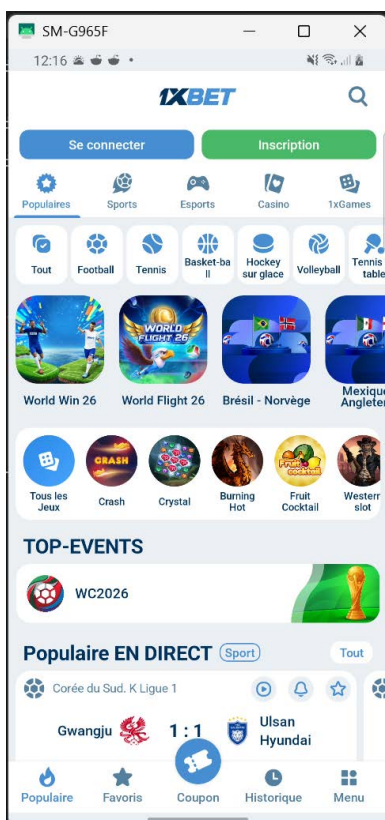
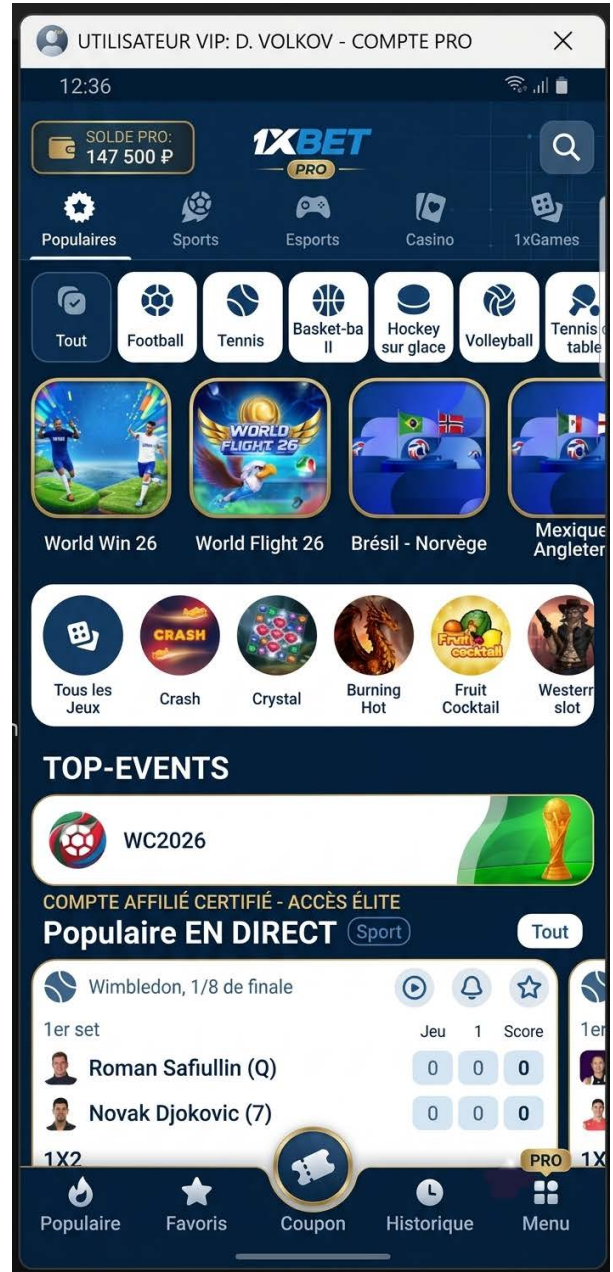
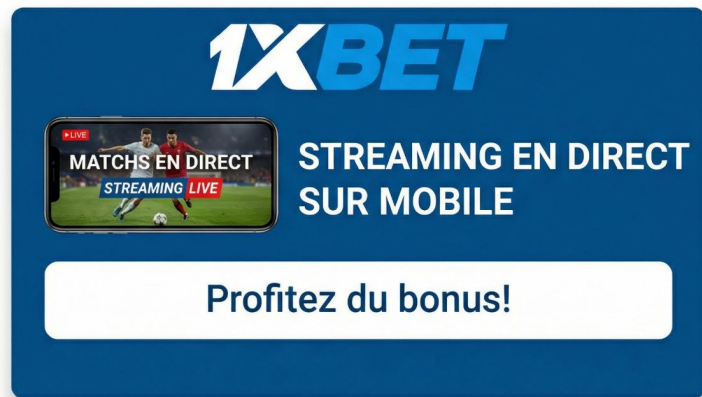
Doc. 1 (a) Absence de diffraction. Diffraction d'un faisceau laser par une fente verticale (b), un trou circulaire (c), un fil rectiligne vertical (d).



Doc. 2 Diffraction d'un faisceau laser par une fente verticale (a), un trou circulaire (b), un fil rectiligne vertical (c).



Doc. 3 Avec un diaphragme de large ouverture, la diffraction ne se produit pas (a). Avec un diaphragme de petite ouverture, on obtient une figure de diffraction (b).



Le phénomène de diffraction étant caractéristique des ondes, ces expériences confirment l'hypothèse de la nature ondulatoire de la lumière monochromatique.

Une lumière monochromatique est une onde qui se propage.

1.2 Caractéristiques de la diffraction d'une onde lumineuse monochromatique par une fente

Quelle est l'influence, sur la figure de diffraction, de la taille de l'obstacle et de la nature de la lumière ?

Activité 2

Quelle est l'influence de la largeur de la fente ?

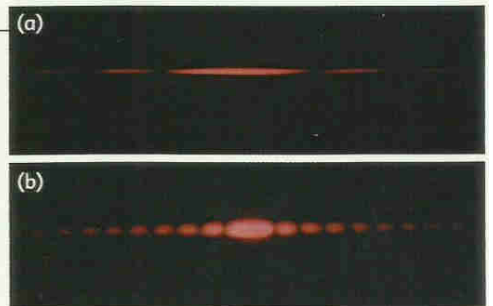
En maintenant fixe la distance entre la fente et l'écran, réaliser la diffraction d'un faisceau laser, successivement par deux fentes très fines, de largeurs différentes [Doc. 4].

1. Pourquoi choisir des fentes très fines ?
2. Noter les observations.

> Observation

La largeur de la tache centrale est d'autant plus grande que la fente est plus fine [Doc. 4]. Pour une fente large, on n'observe pas de figure de diffraction.

Le phénomène de diffraction est d'autant plus important que la fente est étroite.



Doc. 4 Figures de diffraction de deux fentes de largeurs respectives 0,1 mm (a) et 0,3 mm (b), obtenues avec la même lumière. (Les échelles de représentation sont identiques.)

Activité 3

Quelle est l'influence de la longueur d'onde ?

Réaliser, successivement, la diffraction de deux faisceaux laser (rouge et vert) par une même fente, en maintenant fixe la distance entre la fente et l'écran [Doc. 5].

Noter les observations.

> Observation

La largeur de la tache centrale de diffraction rouge est plus grande que la verte [Doc. 5].

La largeur de la tache centrale de diffraction augmente si la longueur d'onde augmente.

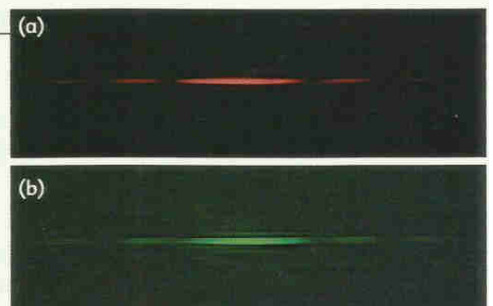
> Interprétation

L'étude théorique du phénomène de diffraction [Doc. 6] montre que :

Lors de la diffraction d'une onde lumineuse monochromatique de longueur d'onde λ par une fente de largeur a , l'écart angulaire θ entre le centre de la tache centrale et la première extinction est donné par :

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

avec θ en radian (rad), λ en mètre (m) et a en mètre.



Doc. 5 Figures de diffraction de la même fente, obtenues avec des faisceaux laser de longueurs d'onde différentes :
(a) laser rouge : $\lambda_{\text{rouge}} = 650 \text{ nm}$;
(b) laser vert $\lambda_{\text{vert}} = 530 \text{ nm}$.
(Les échelles de représentation sont identiques.)

Conséquence : cette relation nous permet de déterminer expérimentalement la longueur d'onde λ de la lumière d'un faisceau laser.

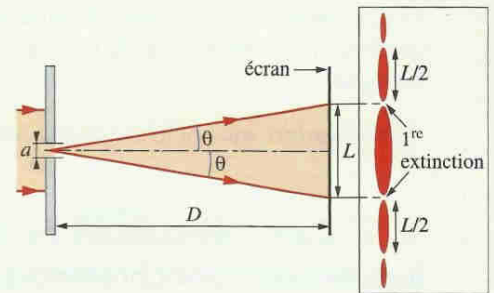
Appelons L la largeur de la tache centrale et D la distance entre la fente et l'écran d'observation. Le schéma du **document 6** montre que :

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

En pratique, le rapport $\frac{L}{2D}$ est très petit et $\tan \theta \approx \theta$, avec θ en radian.

D'où :
$$\theta = \frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a}, \text{ soit } L = 2D \cdot \frac{\lambda}{a}.$$

Pour une distance D fixée entre la fente et l'écran, la largeur de la tache centrale est proportionnelle à la longueur d'onde et inversement proportionnelle à la largeur de la fente.



Doc. 6 Avec une fente horizontale, la figure de diffraction est verticale. L'angle θ est aussi appelé demi-écart angulaire de la tache centrale de diffraction.

Exercice d'entraînement 1

À partir des **documents 5 a et b**, page 63, montrer que la largeur L de la tache centrale de diffraction est proportionnelle à la longueur d'onde λ .

Données :

$\lambda_{\text{vert}} = 530 \text{ nm}$; $\lambda_{\text{rouge}} = 650 \text{ nm}$.

Les mesures des largeurs des taches centrales rouge L_R et verte L_V sur le **document 5** donnent le rapport $\frac{L_V}{L_R} = 0,83$.

Le rapport des longueurs d'onde correspondantes est :

$$\frac{\lambda_{\text{vert}}}{\lambda_{\text{rouge}}} = \frac{530}{650} = 0,81.$$

Aux erreurs de mesure près, nous pouvons estimer que les

rapports $\frac{L_V}{L_R}$ et $\frac{\lambda_{\text{vert}}}{\lambda_{\text{rouge}}}$ sont égaux.

La largeur L de la tache centrale est donc proportionnelle à la longueur d'onde λ .

1.3 Caractéristiques de la diffraction de la lumière blanche

Nous venons d'étudier la diffraction d'une lumière monochromatique. Que se passe-t-il dans le cas de la lumière blanche qui est polychromatique?

> Observation

Le document de l'activité préparatoire A, page 61, et le **document 7** montrent le phénomène de diffraction de la lumière blanche par la trame d'un voilage en tergal et par les pistes d'un CD. Les taches de diffraction sont irisées (elles présentent des couleurs sur les bords).

> Interprétation

L'expérience de l'activité 3 montre que l'écart angulaire dépend de la longueur d'onde.

La lumière blanche étant constituée d'une infinité d'ondes de longueurs d'onde différentes (on dit qu'elle est polychromatique), celles-ci sont diffractées différemment. Cela donne lieu à des irisations. Le phénomène de diffraction permet de décomposer la lumière blanche [**Doc. 7**].

La lumière blanche est polychromatique. Elle est constituée d'une infinité d'ondes de longueurs d'onde différentes.

> Pour s'entraîner : Ex. 3 et 4



Doc. 7 Les pistes d'un CD permettent de décomposer la lumière blanche par diffraction.

2. Quelles sont les particularités de la propagation d'une onde lumineuse ?

2.1 Nature des ondes lumineuses

De la lumière nous parvient du Soleil et des autres étoiles, après avoir traversé le vide intersidéral [Doc. 8]. La nature des ondes lumineuses diffère donc nettement de celle des ondes mécaniques qui, elles, nécessitent un milieu matériel élastique pour se propager.

Les ondes lumineuses sont des ondes électromagnétiques, comme le sont les ondes de radio, de télévision, les micro-ondes, les infrarouges, les ultraviolets, les rayons X, les rayons γ .

Ces ondes transportent de l'énergie (énergie rayonnante).

2.2 Célérité dans le vide

Les ondes lumineuses, comme toutes les ondes électromagnétiques, se propagent dans le vide avec une célérité c voisine de $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La valeur de la célérité de la lumière dans le vide est une constante universelle fixée à : $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La vitesse de la lumière dans le vide est indépendante de la longueur d'onde : le vide n'est donc pas « dispersif ».

2.3 Célérité dans un milieu matériel ; indice d'un milieu

Dans un milieu matériel transparent, une onde lumineuse se propage à une vitesse v inférieure à c .

On définit l'indice de réfraction (ou indice) d'un milieu transparent, pour une longueur d'onde donnée, par le rapport :

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

avec c la célérité de la lumière dans le vide et v la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu.

L'indice d'un milieu est donc un nombre sans dimension, car c'est le rapport de deux vitesses [Doc. 9]. Il est toujours supérieur à 1, car $v < c$.

L'indice de l'air étant très proche de 1, la célérité d'une onde lumineuse a pratiquement la même valeur dans l'air et dans le vide.

2.4 Fréquence et longueur d'onde

- La couleur de la lumière est associée à la fréquence.

Une onde lumineuse monochromatique est caractérisée par sa fréquence ν ; cette fréquence ne change pas quel que soit le milieu de propagation.



Doc. 8 La lumière émise par le Soleil alimente les capteurs solaires de la station orbitale dans l'espace.

Milieu	Indice
air	1,0003
eau	1,33
alcool	1,36
plexiglas	1,51
diamant	2,42

Doc. 9 Indices de quelques milieux transparents.

- Pour une onde de fréquence ν se propageant dans un milieu à la vitesse ϑ , la longueur d'onde est donnée par la relation :

$$\lambda = \vartheta \cdot T = \frac{\vartheta}{\nu}$$

avec λ en mètre (m), ϑ en mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), T en seconde (s) et ν en hertz (Hz).

Comme la vitesse ϑ dépend du milieu de propagation, on peut en conclure que :

Pour une onde donnée, la longueur d'onde dépend du milieu de propagation.

- Dans le cas du vide, la longueur d'onde, notée λ_0 , est égale à :

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

Le spectre d'une lumière monochromatique, comme celui d'un laser utilisé au lycée, ne comporte qu'une seule raie [Doc. 10]. En revanche, le spectre d'une lumière polychromatique peut comporter plusieurs raies [Doc. 11 et 12] ou une infinité de radiations comme celui de la lumière blanche [Doc. 13].

Très souvent, les tables de données indiquent les longueurs d'onde dans le vide [Doc. 12 et 13].

Lampe à mercure		
couleur de la raie	λ_0 (nm) dans le vide	$\nu \times 10^{14}$ (Hz)
violette	404,6	7,41
bleue	435,6	6,88
verte clair	546	5,49
jaune	577	5,20

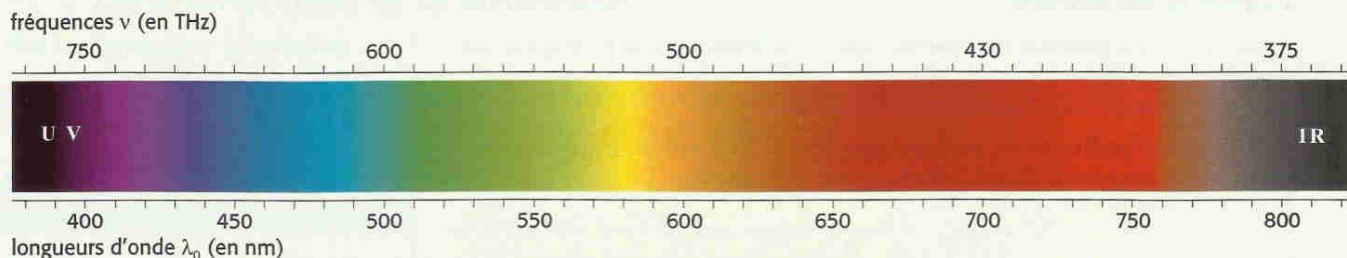
Doc. 12 Le spectre de la lumière émise par une lampe à vapeur de mercure comporte quelques radiations caractérisées par leurs longueurs d'onde dans le vide ou par leurs fréquences. C'est une lumière polychromatique.



Doc. 10 Spectre d'une lumière monochromatique, celle d'un laser.



Doc. 11 Spectre de raies d'une lampe à vapeur de mercure.



Doc. 13 Les radiations visibles par l'œil humain ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$).

Exercice d'entraînement 2

Un laser utilisé au lycée porte l'indication : « longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 632 \text{ nm}$ ».

1. Quelle est la fréquence de la lumière de ce laser ?
2. Quelle est la célérité de cette lumière dans l'eau ?
3. Quelle est, dans l'eau, la longueur d'onde de la lumière de ce laser ?

Données : indice de l'eau pour cette onde : $n = 1,33$;
célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

> Pour s'entraîner : Ex. 7 et 8

1. La fréquence est :

$$\nu = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3,00 \times 10^8}{632 \times 10^{-9}} = 4,74 \times 10^{14} \text{ Hz.}$$

2. La célérité dans l'eau est :

$$\vartheta = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \times 10^8}{1,33} = 2,25 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. La longueur d'onde dans l'eau est donc :

$$\lambda_{\text{eau}} = \frac{\vartheta}{\nu} = \frac{2,25 \times 10^8}{4,74 \times 10^{14}} = 475 \times 10^{-9} \text{ m} = 475 \text{ nm.}$$

3. Comment s'effectue la dispersion de la lumière blanche ?

L'activité préparatoire B, page 61, montre que la lumière polychromatique est décomposée par un prisme de verre. Quelle est l'origine de ce phénomène ?

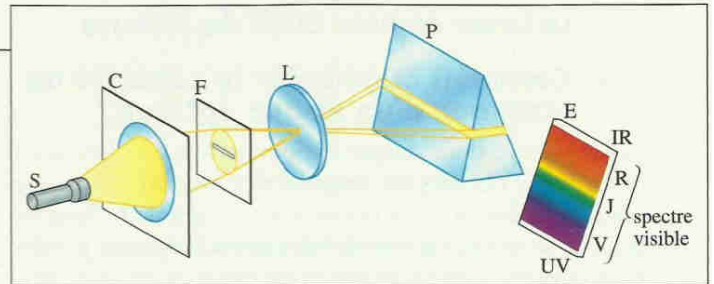
Activité 4

Comment décomposer la lumière blanche avec un prisme ?

Réaliser le spectre de la lumière blanche par un prisme [Doc. 14].

Une lentille forme l'image de la fente F sur un écran E.

1. Noter les observations.
2. Comment interpréter le phénomène ?



Doc. 14 Montage expérimental pour observer la dispersion de la lumière blanche.

S : source de lumière blanche ; C : condenseur ; F : fente dans l'écran opaque ; L : lentille ; P : prisme.

> Observation

En observant le spectre obtenu, on constate que la lumière violette est plus déviée que la lumière rouge [Doc. 15].

> Interprétation

Le prisme dévie différemment chacune des ondes monochromatiques qui composent la lumière blanche et peut ainsi les séparer. Chacune de ces ondes est caractérisée par une fréquence particulière. Or les réfractions sur chacune des faces du prisme obéissent à la loi de DESCARTES [Doc. 16] :

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2.$$

Donc, des déviations différentes d'ondes de fréquences différentes impliquent des indices de réfraction différents, donc des vitesses de propagation différentes [Doc. 16].

L'indice et la vitesse de propagation des ondes dépendent donc de la fréquence : le verre du prisme est donc dispersif (voir le chapitre 2, page 45).

Un milieu est dispersif si la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu et donc l'indice de réfraction dépendent de la fréquence.

Le phénomène de dispersion permet d'interpréter la décomposition de la lumière blanche par un prisme (voir l'activité préparatoire B, page 61).

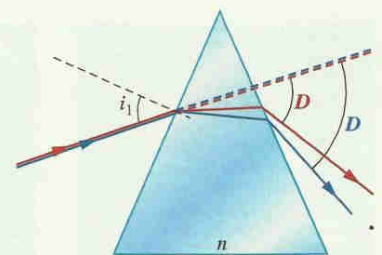
Par temps de pluie, la formation d'un arc-en-ciel (voir la photographie de la page 60) est due à la décomposition de la lumière blanche du Soleil par des gouttes d'eau présentes dans l'atmosphère qui joue le rôle de milieu dispersif.

Tous les milieux, sauf le vide, sont plus ou moins dispersifs. L'air est très peu dispersif pour les ondes lumineuses ; de plus, comme son indice est voisin de 1, il se comporte optiquement comme le vide.

> Pour s'entraîner : Ex. 9



Doc. 15 Les radiations violettes sont plus déviées par le prisme que les radiations rouges.



Doc. 16 Les deux réfractions successives lors de la traversée du prisme montrent que l'indice du verre est différent pour ces deux radiations colorées.

Exercices du chapitre Physique 3 : La lumière, modèle ondulatoire

Applications directes

Étudier la diffraction de la lumière

(§ 1 du cours)

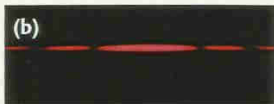
2. Étudier la diffraction produite par une fente

Les figures (a) et (b) ont été obtenues lors d'expériences utilisant un laser et une fente.

1. Quelle est l'orientation de la fente lors de chaque expérience?
2. Si les photos sont prises avec deux fentes différentes utilisées avec le même laser et la même distance entre la fente et l'écran, laquelle est obtenue avec la fente la plus large?



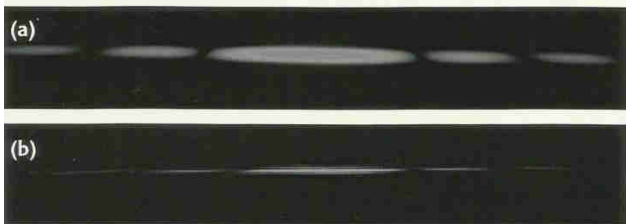
3. Si les photos sont prises avec la même fente et le même laser, laquelle correspond à la plus grande distance entre la fente et l'écran?



3. Étudier l'influence de la longueur d'onde sur la diffraction

Lors d'une expérience de diffraction, on a obtenu le cliché de la figure (a) ci-dessous. En changeant uniquement le laser, on a obtenu le cliché de la figure (b).

1. Quel cliché correspond au laser de plus grande longueur d'onde?
2. La longueur d'onde de la lumière de l'un des lasers est 650 nm et les deux lasers émettent des radiations dans le domaine visible. Quelle est la longueur d'onde du second laser?



4. Connaître les caractéristiques de la diffraction

Choisir les bonnes réponses parmi celles qui sont proposées.

1. Le phénomène de diffraction permet de mettre en évidence :
 - a. le caractère ondulatoire de la lumière;
 - b. l'influence du milieu sur la vitesse de propagation.
2. La figure de diffraction obtenue avec une fente est formée :
 - a. d'anneaux concentriques;
 - b. de taches étalées perpendiculairement à la fente.
3. Lors d'une expérience de diffraction d'un faisceau lumineux de longueur d'onde λ par une fente de largeur a située à la distance D de l'écran, la largeur de la tache centrale observée sur l'écran est :
 - a. $\propto$ proportionnelle à a ;
 - b. $\propto$ inversement proportionnelle à a ;
 - c. $\propto$ indépendante de a .
4. L'écart angulaire θ , en radian, provoqué par une fente de largeur a sur un faisceau laser de longueur d'onde λ est donné par la relation :
 - a. $\theta = \lambda \cdot a$;
 - b. $\theta = \frac{\lambda}{a}$;
 - c. $\theta = \frac{a}{\lambda}$.
5. L'écart angulaire θ provoqué par une fente de largeur $a = 0,10$ mm sur un faisceau laser de longueur d'onde $\lambda = 633$ nm est de :
 - a. $0,63 \times 10^{-10}$ rad;
 - b. $6,3 \times 10^{-3}$ rad;
 - c. 0,158 rad.

Étudier la propagation des ondes lumineuses

(§ 2 du cours)

5. Calculer une fréquence à partir d'une longueur d'onde

Une lampe à iode émet de nombreuses radiations. Les longueurs d'onde dans le vide de trois de ces radiations sont : 512 nm, 534 nm et 563 nm.

1. Cette lampe émet-elle une lumière monochromatique ou polychromatique?
2. Calculer la fréquence de ces radiations.

Donnée :

célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8$ m . s⁻¹.

7. Étudier la propagation de la lumière dans différents milieux

Compléter le tableau ci-après correspondant à la propagation, dans divers milieux matériels, d'une onde lumineuse dont la longueur d'onde, dans le vide, est 590 nm. **SOS**

Milieu	vide	eau	diamant
Longueur d'onde (nm)	590		
Indice du milieu		1,33	
Célérité (m . s ⁻¹)			$1,24 \times 10^8$
Fréquence (Hz)			
Couleur	jaune		

8. Connaître les propriétés des ondes lumineuses

Choisir la bonne réponse parmi celles qui sont proposées.

1. Le spectre de la lumière visible est formé de radiations dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre :
 - a. 400 et 800 mm;
 - b. 400 et 800 μ m;
 - c. 400 et 800 nm.
2. La radiation jaune émise par une lampe à vapeur de sodium a pour longueur d'onde dans le vide :
 - a. 589 μ m;
 - b. 589 nm;
 - c. $5,89 \times 10^{-11}$ m.
3. La longueur d'onde λ dans le vide d'une radiation de fréquence ν est donnée par la relation :
 - a. $\lambda = c \cdot \nu$;
 - b. $\lambda = \frac{c}{\nu}$;
 - c. $\lambda = \frac{\nu}{c}$.
4. Une onde lumineuse passe d'un milieu de propagation d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 , supérieur à n_1 .
 - a. La fréquence de cette onde :
 - α) augmente;
 - β) diminue;
 - γ) n'est pas modifiée.
 - b. La longueur d'onde de cette onde :
 - α) augmente;
 - β) diminue;
 - γ) n'est pas modifiée.
 - c. La célérité de cette onde :
 - α) augmente;
 - β) diminue;
 - γ) n'est pas modifiée.

Étudier la dispersion de la lumière

(§ 3 du cours)

10. Appliquer les lois de la réfraction

Choisir la bonne réponse parmi celles qui sont proposées.

1. L'indice de réfraction moyen de l'eau pour les radiations visibles est :
 - a. 0,13;
 - b. 1,33;
 - c. 13,3.
2. L'indice de réfraction n d'un milieu transparent est défini, par rapport à la célérité v de la lumière dans ce milieu, par la relation :
 - a. $n = c \cdot v$;
 - b. $n = \frac{c}{v}$;
 - c. $n = \frac{v}{c}$.
3. L'indice de réfraction d'un milieu transparent est :
 - a. toujours supérieur à 1;
 - b. toujours inférieur à 1;
 - c. supérieur ou égal à 1.
4. L'indice de réfraction d'un milieu transparent :
 - a. a une unité;
 - b. n'a pas d'unité;
 - c. peut avoir une unité.

Exercices du chapitre Physique 3 : La lumière, modèle ondulatoire

5. L'indice de réfraction est très voisin de 1 dans le cas :

- a. de l'eau; b. du verre; c. de l'air.

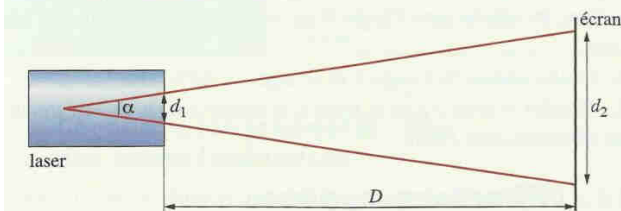
6. À la traversée de la surface de séparation entre deux milieux d'indice n_1 et n_2 , un faisceau lumineux d'incidence i_1 se réfracte avec un angle de réfraction i_2 . La loi de DESCARTES s'écrit :

- a. $n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$;
b. $n_2 \cdot \sin i_1 = n_1 \cdot \sin i_2$;
c. $n_1 \cdot \cos i_1 = n_2 \cdot \cos i_2$.

Utilisation des acquis

16. Le danger d'un faisceau laser

Un pointeur laser, utilisé par un conférencier, émet un faisceau lumineux de fréquence $\nu = 4,22 \times 10^{14}$ Hz et de puissance $\mathcal{P} = 2,0$ mW, par une ouverture circulaire de diamètre $d_1 = 2$ mm. Il produit une tache lumineuse de diamètre $d_2 = 10$ mm sur un écran situé à la distance $D = 10$ m de l'ouverture.



- Calculer la longueur d'onde dans l'air de la lumière émise par le laser. Quelle est la couleur du faisceau?
- Calculer la valeur de l'angle α appelé divergence α du faisceau.
- a. Quelle est l'aire A de la tache lumineuse obtenue sur l'écran?
b. On admet que toute la puissance émise est transportée jusqu'à l'écran. Calculer la puissance lumineuse par unité de surface reçue par l'écran.
- Le faisceau est dangereux pour l'œil humain si la puissance reçue par unité de surface est supérieure à $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Conclure.

Donnée : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

17. Fréquence et longueur d'onde

Un laser Y.A.G. (Yttrium Aluminium Garnet) utilisé en médecine possède, dans le vide, une longueur d'onde $\lambda_0 = 1,06 \text{ } \mu\text{m}$.

- Cette onde lumineuse est-elle visible? Dans quel domaine du spectre se situe-t-elle?
- Calculer sa fréquence.
- Calculer la longueur d'onde λ_1 de ce laser dans un verre flint d'indice $n_1 = 1,58$.
- Dans un verre crown, la longueur d'onde de ce laser est $\lambda_2 = 716 \text{ nm}$. Calculer l'indice de ce verre.

20. Des irisations avec la lumière blanche (voir l'activité préparatoire A)

On éclaire une fente de largeur $a = 0,20 \text{ mm}$, avec une lumière blanche. La figure de diffraction obtenue est observée sur un écran situé à la distance $D = 2,5 \text{ m}$ de la fente.

- Quelle est la composition de la lumière blanche? Quelles en sont, dans le vide, les longueurs d'onde extrêmes?
- On place successivement sur le trajet de la lumière l'un des filtres présentés ci-dessous. Chaque filtre ne laisse passer qu'une longueur d'onde.

Filtre	1	2	3
Longueur d'onde dans le vide (nm)	450	590	750

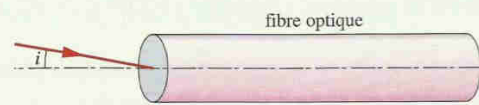
- Quelle est la couleur de la lumière qui traverse chaque filtre?
- Calculer, pour chaque filtre, la largeur de la tache centrale observée sur l'écran.
- Représenter, en grandeur réelle, les taches centrales observées. On dessinera ces taches, les unes sous les autres, en alignant leurs centres.
- En ne tenant compte que des taches centrales, décrire la figure de diffraction observée en l'absence de filtre.

21. Une fibre optique

Un faisceau lumineux de longueur d'onde $\lambda_1 = 750 \text{ nm}$ se propage dans l'air et pénètre dans une fibre optique d'indice $n_2 = 1,50$, sous une incidence $i = 10,0^\circ$.

L'indice de l'air sera pris égal à celui du vide : $n_1 = 1,00$.

La face d'entrée du faisceau est perpendiculaire à la fibre.



- a. Quelle est la célérité ϑ_1 de la lumière dans l'air et la célérité ϑ_2 de la lumière dans la fibre?
b. Quelle est la fréquence ν_1 de l'onde lumineuse dans l'air et la fréquence ν_2 dans la fibre optique?
c. Quelle est la longueur d'onde λ_2 de l'onde lumineuse dans la fibre optique?
- a. Rappeler les lois de DESCARTES pour la réfraction.
b. Quelle est la valeur de l'angle de réfraction r dans la fibre?
c. Schématiser le début de la propagation du faisceau dans la fibre. Sous quelle incidence i' rencontre-t-il la surface séparant la fibre de l'air?
d. Quel est l'angle limite d'incidence i_l pour qu'un faisceau se propageant dans la fibre ne soit pas réfracté dans l'air? **SOS**
e. Quelle sera alors la propagation du faisceau?

22. Lumière émise par un laser

On dispose d'une diode laser S émettant un faisceau lumineux monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 0,790 \text{ } \mu\text{m}$. La lumière émise par la source S traverse une fente fine, verticale, de largeur $d = 0,10 \text{ mm}$. Un phénomène dû à la nature ondulatoire de la lumière est observé sur un écran placé à une distance $D = 2,0 \text{ m}$ de la fente.

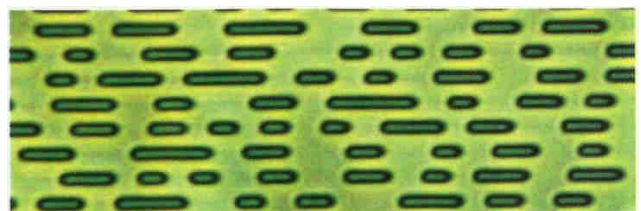
A. Caractéristiques ondulatoires de la lumière

- Quelle est la couleur de la lumière émise par cette diode laser?
- Comment peut-on qualifier la lumière émise par un laser?
- Quel est le nom du phénomène cité au début de l'exercice? Décrire qualitativement ce que l'on observe sur l'écran.
- Toutes les autres grandeurs restant inchangées, comment est modifiée la figure observée sur l'écran si :
a. on diminue la largeur de la fente?
b. on diminue la longueur d'onde?
Justifier les réponses.

B. Application à la lecture d'un CD

5. Dans un lecteur CD, on lit des informations gravées sur le disque sous forme de petites cuvettes réfléchissantes dont le diamètre limite le nombre d'informations. Actuellement, on éclaire le disque avec une diode laser de longueur d'onde $\lambda = 0,790 \text{ } \mu\text{m}$.

Prochainement, on va commercialiser des lecteurs utilisant une diode laser émettant une longueur d'onde dans le bleu (lecteurs « blue-ray disc »).



Pistes d'un CD.

D'après la question 3., quel intérêt présente ce changement de longueur d'onde? **SOS**

D'après le sujet de bac de Polynésie, juin 2005.