

## **Plan du cours sur les ondes**

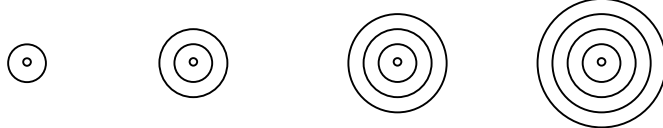
- I. Introduction aux ondes  
Exemples, front d'onde, rayon d'onde, vitesse de déplacement, ondes transversales, ondes longitudinales.
- II. Ondes sinusoïdales  
Grandeurs caractéristiques : La longueur d'onde, la vitesse, la période, la fréquence, l'amplitude, l'équation d'onde.
- III. Exemples d'ondes dans la nature  
Les ondes sonores, les ondes électromagnétiques, les ondes sismiques, l'utilisation des ondes par les animaux.
- IV. La diffraction et le principe de Huygens
- V. La réflexion
- VI. La réfraction
- VII. Ondes émises par une source en mouvement  
L'effet Doppler, le mur du son, le cône de Mach.
- VIII. Interférences  
Battements, ondes stationnaires.
- IX. Ondes sonores  
Intervalles musicaux et gammes.
- X. Ondes électromagnétiques  
La vision des couleurs. Liens entre la température et la couleur. Couleurs et filtres. La diffraction. La dispersion. La diffusion de Rayleigh : Pourquoi le ciel est bleu ? La polarisation.

# I. Introduction aux ondes

Les ondes constituent un domaine fondamental en physique. Elles interviennent dans presque tous les phénomènes, particulièrement comme mode de **transport d'informations**. Les ondes sonores transportent les informations contenues dans la parole et la musique, les ondes électromagnétiques transportent les informations contenues dans les images, dans les messages entre natels et ceux reçus par la radio et la télévision.

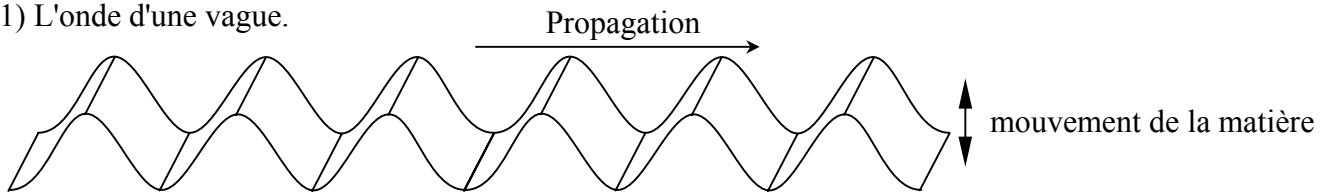
Mais qu'est-ce qu'une onde ? Par définition, **une onde est la propagation de proche en proche d'une perturbation**.

L'exemple type d'une onde est la vague. Un caillou qui tombe dans l'eau perturbe l'eau en l'enfonçant là où il tombe. Cet enfoncement va se propager dans toutes les directions, formant les cercles concentriques de la vague. Aucune matière ne se déplace avec vague. C'est la déformation de la surface de l'eau qui se déplace.

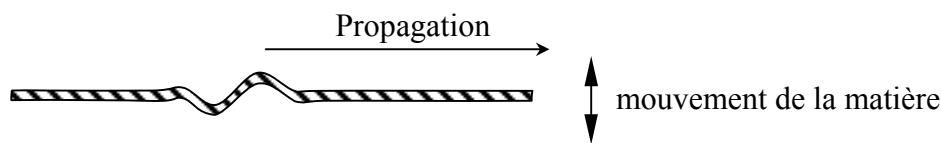


Exemples d'ondes :

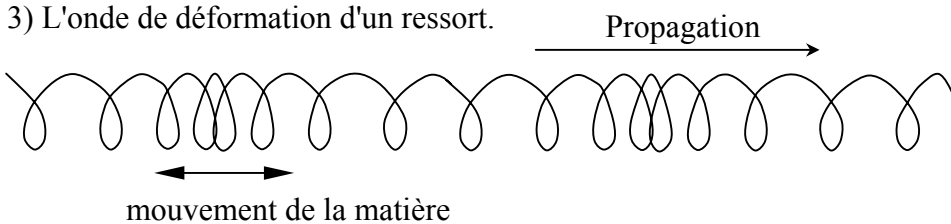
1) L'onde d'une vague.



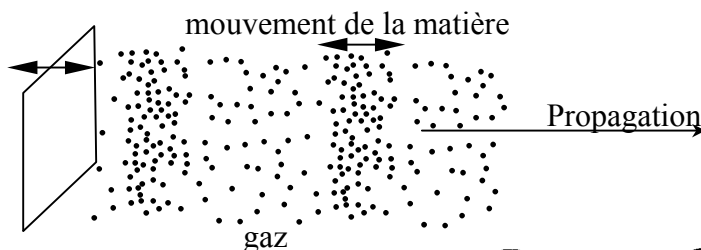
2) L'onde que l'on obtient en agitant une corde à l'une de ses extrémités.



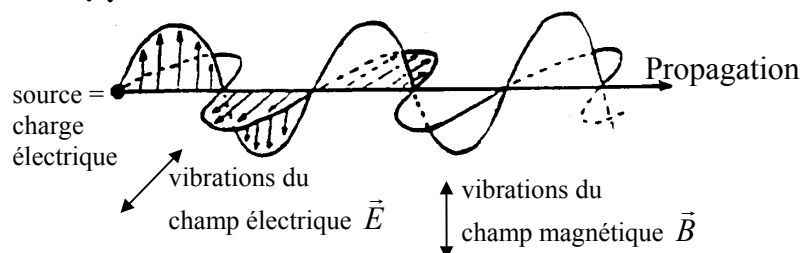
3) L'onde de déformation d'un ressort.



4) L'onde sonore.



5) L'onde électromagnétique.



**Aucune matière ne se propage avec l'onde.** C'est la perturbation qui se propage. Une tige qu'on tord ou un caillou qu'on lance ne sont pas des ondes. Dans une vague, les particules d'eau oscillent verticalement, mais ne se déplacent nullement horizontalement avec la vague.

L'onde ne transporte pas de matière, mais elle transporte de l'énergie. Par exemple, on pourrait utiliser le mouvement des vagues pour mettre en mouvement une machine. C'est l'énergie transportée dans les ondes sonores qui est captées par nos oreilles qui nous permet d'entendre des sons.

On appelle **front d'onde** l'ensemble des points de l'espace qui sont directement voisins et qui se trouvent dans un même état de vibration. Dans l'espace à trois dimensions, les fronts d'ondes sont des surfaces. Dans un espace à deux dimensions, comme sur de l'eau, les fronts d'ondes sont des lignes.

Dans notre exemple de la vague, les fronts d'onde sont tous les cercles concentriques qui partent du point d'impact.

On appelle **rayon d'onde** une ligne de propagation de l'onde. Un rayon d'onde est toujours en tout point perpendiculaire aux fronts d'onde.

Dans notre exemple de la vague, toute droite partant du point d'impact est un rayon d'onde.

On définit la **vitesse de déplacement d'une onde**, comme la vitesse de déplacement d'un front d'onde. Dit autrement, la **vitesse de déplacement d'une onde** est la vitesse à laquelle avance la perturbation. Elle ne correspond pas à la vitesse de déplacement de quelque chose de matériel.

Cette vitesse dépend :

- *du type de l'onde.* Les ondes électromagnétiques se déplacent à quelques centaines de milliers de kilomètres par secondes. Les ondes sonores se déplacent à des vitesses entre la centaine et des milliers de mètres par secondes.
- *du milieu* dans lequel elle se déplace. Dans du verre et de l'eau, les ondes électromagnétiques vont environs 30% moins vite. Dans l'eau, les ondes sonores vont plus de 4 fois plus vite que dans l'air. Dans du cuivre, plus de 10 fois plus vite.
- *de l'état physique du milieu.* Les ondes sonores vont plus vite dans de l'air chaud que froid. Plus une corde est tendue, plus la vitesse de l'onde sera grande.

On classe les ondes en deux types : les **ondes transversales**, dont la perturbation est *perpendiculaire* à la direction de propagation, et les **ondes longitudinales**, dont la perturbation est *parallèle* à la direction de propagation.

Dans les cinq exemples d'ondes donnés précédemment, indiquez celles qui sont transversales et celles qui sont longitudinales.

- 1) L'onde d'une vague est une onde ...
- 2) L'onde dans une corde est une onde ...
- 3) L'onde de déformation d'un ressort est une onde ...
- 4) L'onde sonore est une onde ...
- 5) L'onde électromagnétique est une onde ...

## II. Ondes sinusoïdales

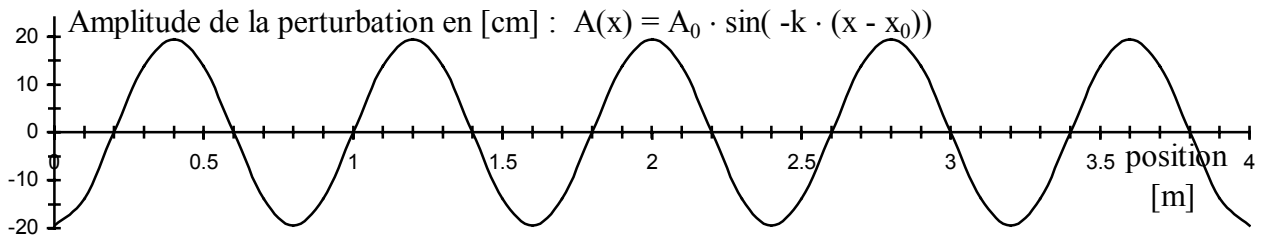
Les ondes les plus simples sont les ondes sinusoïdales. Se sont des ondes générées par une oscillation dont la perturbation en fonction du temps est de la forme :  $A(t) = A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$

Elles sont très importantes car toutes les ondes peuvent s'écrire comme somme d'ondes sinusoïdales et elles modélisent beaucoup d'ondes que l'on rencontre dans la nature.

$\omega \cdot t$  est en **radians**, pas en degrés.

Agitons l'extrémité d'une corde pour la perturber selon la fonction ci-dessus.

Si on fait une photo de cette corde, elle montrera l'amplitude d'oscillation en fonction de la position.

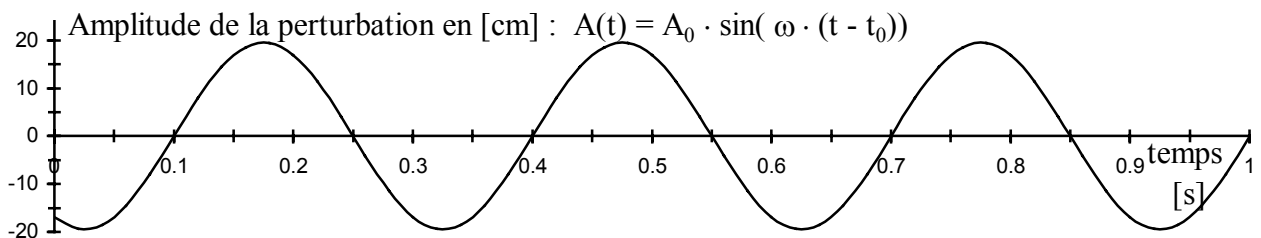


Selon le graphique ci-dessus :

La valeur de  $A_0 =$

La distance entre deux maximums =

La perturbation d'un point précis de la corde se représente par le graphique suivant :

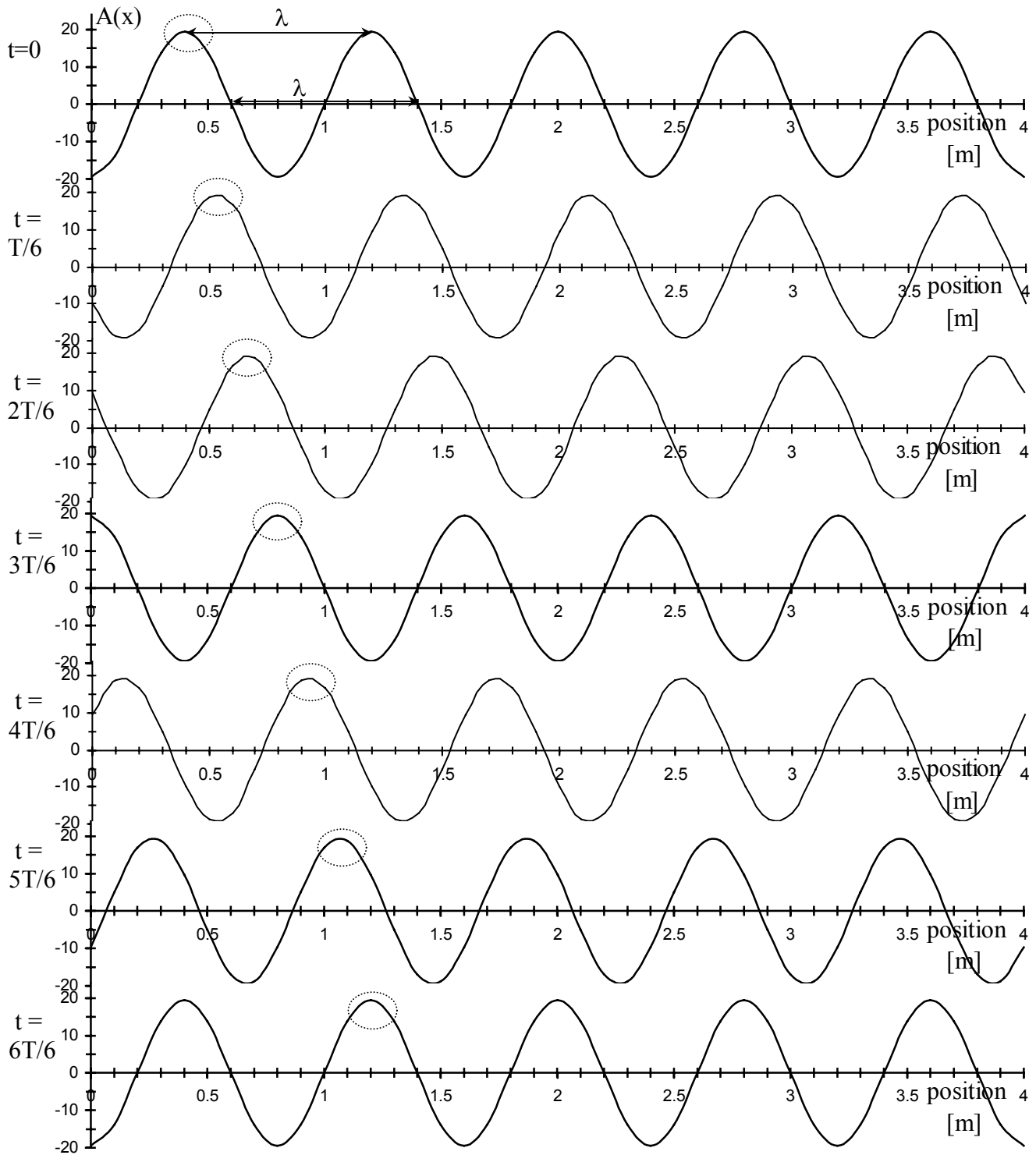


Selon le graphique ci-dessus :

La valeur de  $A_0 =$

La distance entre deux maximums =

Amplitude de l'onde en fonction de la position en divers temps  $t$ .  $T$  = la période de l'onde.



Questions :

- 1) Le sommet de l'onde entouré en pointillé, correspond-elle à une même partie de matière ?
- 2) De quelle distance l'onde a-t-elle avancée en une période ?
- 3) Déduisez de ce qui précède la vitesse de l'onde en fonction de sa longueur d'onde et de sa période.

Les grandeurs caractéristiques d'une onde sinusoïdale sont :

**L'amplitude**  $A_0$  de l'onde est la valeur maximale de la perturbation.

L'amplitude de l'onde de l'exemple précédent est :  $A_0 = \dots$

Remarquez qu'elle est toujours la même pour la représentation de la perturbation en fonction de la position et de la perturbation en fonction du temps.

**La longueur d'onde**  $\lambda$  est la distance à un instant donné entre deux maximums consécutifs.

La longueur d'onde de l'exemple précédent est :  $\lambda = \dots$

**La période**  $T$  de l'onde est la durée d'une oscillation complète de la perturbation en un point donné.

La période de l'onde de l'exemple précédent est :  $T = \dots$

**La fréquence**  $\nu$  de l'onde est le nombre d'oscillations de la perturbation en un point donné par seconde.

La fréquence de l'onde de l'exemple précédent est :  $\nu = \dots$

La fréquence se mesure en  $[1/s]$ , unité appelée aussi Hertz [Hz].  
Un Hertz signifie une vibration par seconde.

La fréquence  $\nu$  et la période  $T$  sont reliées par la relation : ...

**La vitesse**  $V$  de l'onde est la vitesse à laquelle se déplace un maximum de la perturbation.

La vitesse, la longueur d'onde et la période sont reliées par la relation : ...

La vitesse, la longueur d'onde et la fréquence sont reliées par la relation : ...

La vitesse de l'onde de l'exemple précédent est :  $V = \dots$

### III. Exemples d'ondes dans la nature

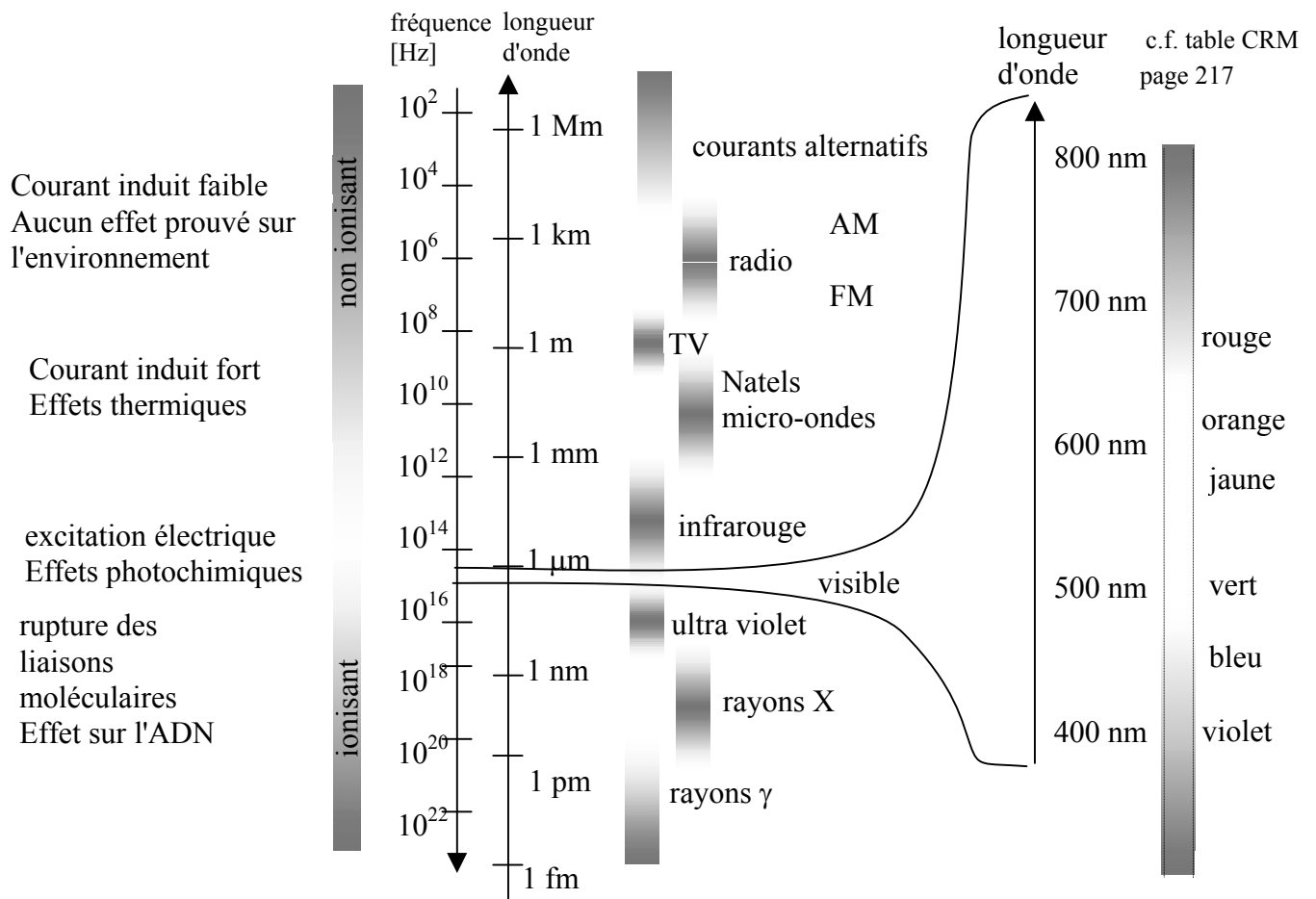
Les deux types d'ondes les plus importants sont les ondes sonores et les ondes électromagnétiques, que nous étudierons dans deux chapitres séparés.

#### A) Les ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont créées par la **vibration d'une charge électrique**. Le changement de position de la charge crée une perturbation du champ électrique et du champ magnétique, engendrant ainsi une **onde électromagnétique**, qui est *transversale*. Elles n'ont pas de support matériel, la perturbation étant immatérielle. Elles peuvent se propager dans le vide.

On classe les ondes électromagnétiques par leur fréquence  $\nu$  [Hz], ou par leur longueur d'onde  $\lambda$  [m]. Rappelons que ces deux grandeurs sont liées par la relation :  $\lambda \cdot \nu = \text{vitesse de la lumière} = 3 \cdot 10^8$  [m/s].

Voici une classification des ondes électromagnétique.



Toute vibration de charges émet des ondes électromagnétiques. Puisque les atomes vibrent à cause de l'agitation thermique, leurs électrons et protons émettent des ondes électromagnétiques. En conséquence, tout corps émet des ondes électromagnétiques, qui donne une signature de sa température. Par exemple, un corps à 0 °C rayonne avec un maximum d'intensité autour d'une longueur d'onde de 10  $\mu$ m qui est dans l'infrarouge. Le Soleil, qui a une température de surface d'environ 5500 °C rayonne avec un maximum d'intensité dans le vert.

### B) Les ondes sonores

Les ondes sonores sont des ondes de pression. Elles peuvent exister dans tous les **milieux matériels**, solides, liquides ou gazeux, mais pas dans le vide.

Dans l'air, le déséquilibre est une différence de pression du gaz, causée par le mouvement d'une membrane solide telle que celle d'un haut-parleur. Cette différence de pression se propage longitudinalement jusqu'à l'oreille où elle appuie sur le tympan.

### C) Les ondes sismiques

Dans les solides, un ébranlement crée toujours simultanément une *onde longitudinale* et une *onde transversale*, dont les vitesses de propagation sont différentes. Ceci nous donne une méthode simple pour déterminer le lieu où se situe la source de l'ébranlement.

### D) Les animaux et les ondes

Les animaux qui n'ont pas d'armes pour se défendre et dont le salut ne peut résider que dans la fuite, tels les lapins et les fennecs ont de grandes oreilles, afin d'intercepter davantage d'énergie du front d'onde, donc d'entendre mieux le prédateur arriver! A cela, certes, deux exceptions troublantes, l'éléphant et le prince Charles.

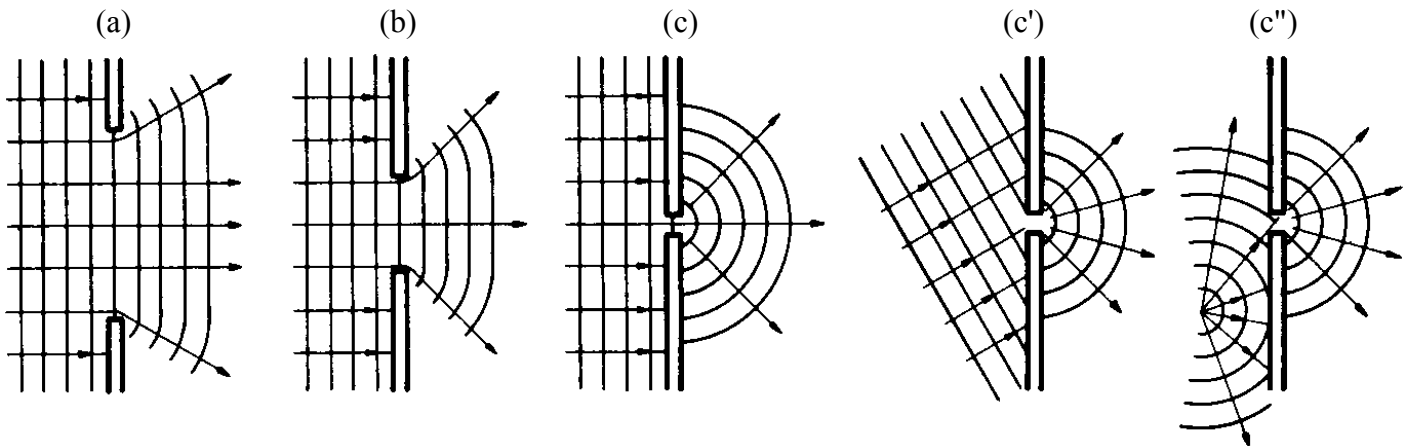
Quant aux chauve-souris qui chassent la nuit, elles sont dotées d'un sonar, un émetteur d'ondes ultrasonores qui, se réfléchissant sur tout corps solide, reviennent à la chauve-souris qui possède aussi un récepteur de ces ondes et construit ainsi un « paysage ultrasonore » ultrasensible (elle détecte un cheveu !) qui lui permet de « voir » la nuit.

Les hiboux, enfin, ont une vue comparable à la nôtre, mais mauvaise (ils sont myopes !). Par contre leur vue leur permet de capter les infrarouges. Ainsi, ils construisent un « paysage thermique » constitué par les différences de température. Leur plat favori étant la petite souris dont la température est d'environ 40 [°C], on comprend que les hiboux chassent l'été la nuit et l'hiver le jour.



## IV. La diffraction et le principe de Huygens

Lorsqu'une onde passe à travers un trou ou une fente, elle a un comportement très particulier. On peut facilement le mettre en évidence avec des ondes sur une surface liquide. On fait arriver une onde sur un obstacle muni d'une ouverture réglable. Les figures ci-dessous montrent de façon approximative ce qu'on peut observer dans le voisinage de l'ouverture. On a représenté ici les lignes de crête. La distance entre deux lignes est la longueur d'onde.

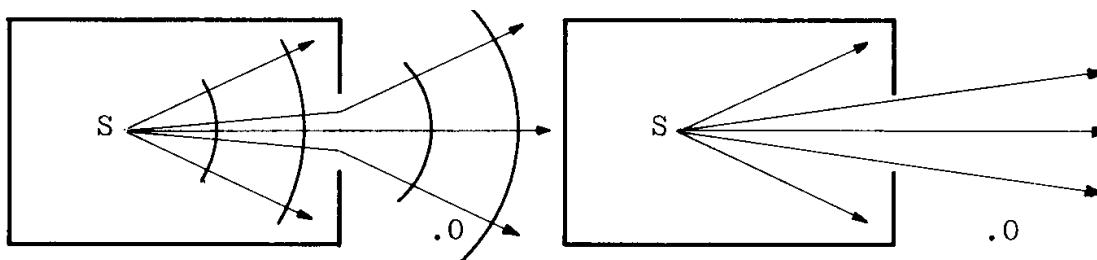


Si la largeur du trou est beaucoup plus grande que la longueur d'onde (fig. a), les fronts passent sans subir de modification importante. Leurs bords sont légèrement incurvés.

A l'opposé, si la largeur du trou est inférieure ou égale à la longueur d'onde (fig. c, c', c''), le trou devient le centre d'émission d'une onde circulaire, et cela quelle que soit l'allure de l'onde avant l'obstacle. Entre ces cas extrêmes, la figure (b) présente une situation intermédiaire.

Ce phénomène est caractéristique de toutes les ondes. Dans le cas d'un milieu à trois dimensions, les ondes circulaires sont remplacées par des ondes sphériques.

Si on place une source sonore et une source lumineuse au même point d'une chambre ayant une fenêtre ouverte, un observateur O peut être placé de façon à recevoir les ondes sonores mais non les ondes lumineuses.



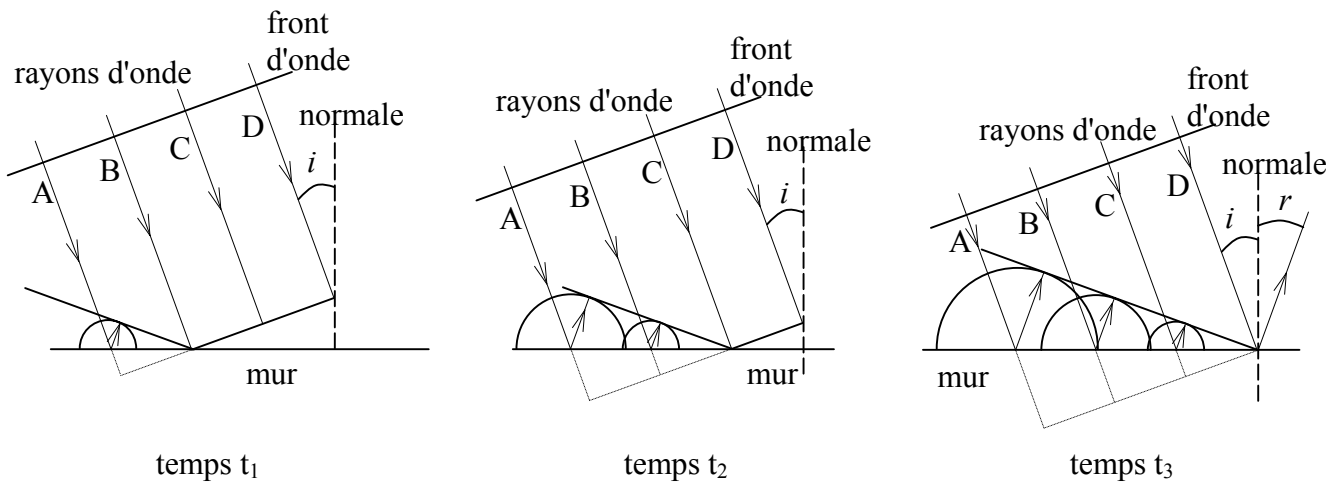
Il en est ainsi parce que la longueur d'onde des ondes sonores est de l'ordre de grandeur de l'ouverture, tandis que celle des ondes lumineuses est environ un million de fois plus petite. Le centre de la fenêtre est un centre d'émission pour les premières, mais non pour les secondes.

Ce phénomène, ainsi que celui de la réflexion et de la réfraction s'expliquent en utilisant **le principe de Huygens** due au physicien hollandais Christiaan Huygens (La Haye 1629 - 1695) qui dit que : *Tout point d'un front d'onde se comporte comme une source d'une onde circulaire ou sphérique. A tout instant ultérieur, le front de l'onde qui se propage est l'enveloppe des lignes d'ondes ou surfaces d'ondes émises simultanément par les points du front d'onde initial.*

## V. La réflexion

Lorsqu'une onde arrive contre un obstacle, elle est renvoyée par celui-ci. Ce phénomène est appelé **la réflexion**. Vous utilisez ce phénomène chaque fois que vous vous regardez dans un miroir.

Considérons une vague qui arrive contre un mur.



Au temps  $t_1$ , le rayon B de la vague arrive sur le mur. Le rayon A est déjà arrivé sur le mur et a été réfléchi.

Au temps  $t_2$ , le rayon C de la vague arrive sur le mur. Les rayons A et B sont déjà arrivés sur le mur et ont été réfléchis.

Au temps  $t_3$ , le rayon D de la vague arrive sur le mur. Les rayons A, B et C sont déjà arrivés sur le mur et ont été réfléchis.

Quand un rayon d'onde arrive sur le mur, il émet une onde circulaire. Le point d'impact est le centre de cette onde circulaire. Elle se déplace à la même vitesse que l'onde incidente. L'ensemble des ondes circulaires ainsi créées, génère l'onde réfléchie.

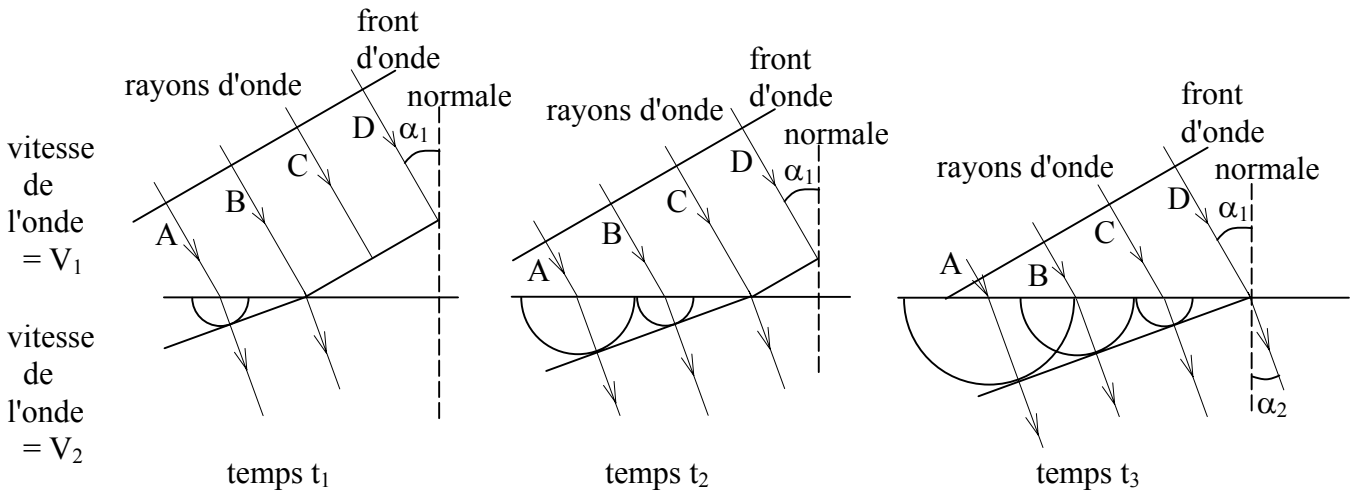
L'angle de réflexion  $r$  est égal à l'angle d'incidence  $i$ .  
Les angles se mesurent entre les rayons d'onde et la normale au mur.

## VI. La réfraction

Lorsqu'une onde change de vitesse, ses rayons changent de direction. Ce phénomène est appelé **la réfraction**. C'est ce phénomène qui vous fait voir tordu un bâton partiellement plongé dans l'eau. C'est aussi ce phénomène qui est à l'origine des mirages.

Une onde peut changer de vitesse lorsqu'elle change de milieu ou lorsque la densité du milieu dans laquelle elle se propage change. Une vague change de vitesse si la profondeur de l'eau est faible et change.

Considérons une vague qui change de vitesse.



Au temps  $t_1$ , le rayon B de la vague change de vitesse. Le rayon A a déjà changé de vitesse.

Au temps  $t_2$ , le rayon C de la vague change de vitesse. Les rayons A et B ont déjà changé de vitesse.

Au temps  $t_3$ , le rayon D de la vague change de vitesse. Les rayons A, B et C ont déjà changé de vitesse.

Quand un rayon d'onde change de vitesse, il émet une onde circulaire. Le point d'impact est le centre de cette onde circulaire. Elle se déplace à une vitesse  $V_2$  différente de la vitesse  $V_1$  de l'onde incidente. L'ensemble des ondes circulaires ainsi créées, génère l'onde réfractée.

Si on note  $\alpha_1$  l'angle incident et  $\alpha_2$  l'angle de réfraction,

alors ils sont reliés par la relation :  $\frac{\sin(\alpha_2)}{\sin(\alpha_1)} = \frac{V_2}{V_1}$  C'est la **loi de Snell-Descartes**.

Les angles se mesurent entre les rayons d'onde et la normale à la ligne de changement de vitesse.


Pour de la *lumière*, et plus généralement, pour des *ondes électromagnétiques*, on définit **l'indice de réfraction d'un milieu** comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur la vitesse de la lumière dans le milieu. Nous verrons plus loin qu'il dépend légèrement de la longueur d'onde.

Pour de la lumière, on a :

$V_1 = c / n_1$ , où  $c$  = la vitesse de la lumière et  $n_1$  = l'indice de réfraction du milieu (1).

$V_2 = c / n_2$ , où  $c$  = la vitesse de la lumière et  $n_2$  = l'indice de réfraction du milieu (2).

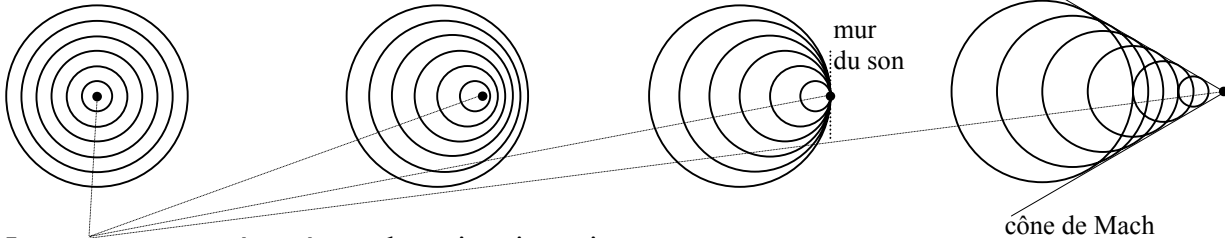
Dans ce cas, la loi de Snell-Descartes peut s'écrire :  $\frac{\sin(\alpha_2)}{\sin(\alpha_1)} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_1}{n_2}$

 Dans le cas où le sinus d'un angle devrait être supérieur à un, il n'y a plus réfraction, mais **réflexion totale**, comme sur un miroir.

## VII. Ondes émises par une source en mouvement

Etudions le cas d'une source ponctuelle émettant des ondes dans un milieu matériel. Considérons le cas où cette source se déplace à vitesse constante  $V_s$  relativement au milieu. Notons  $V_o$  la vitesse de l'onde. Dessinons les fronts d'onde dans un cas à deux dimensions. Dans un cas à trois dimensions, les fronts d'ondes sont des sphères, mais le phénomène est similaire.

a) Cas où  $V_s = 0$       b) Cas où  $V_s < V_o$       c) Cas où  $V_s = V_o$       d) Cas où  $V_s > V_o$



La source est représentée par le petit point noir.  
Les fronts d'ondes sont représentés par les cercles.

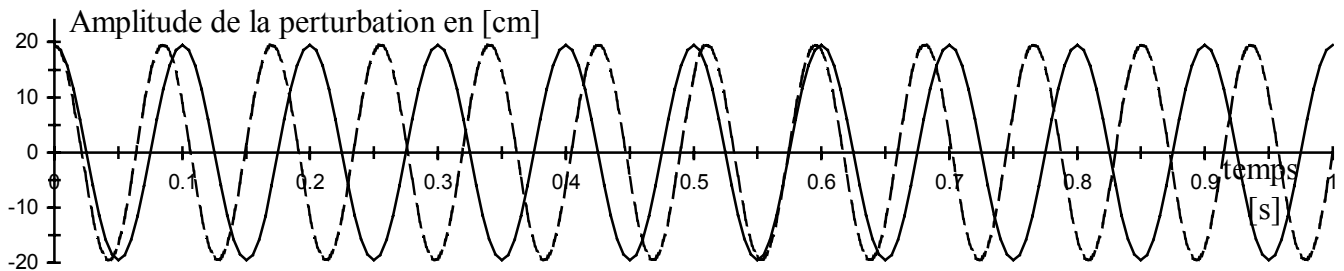
- a) Quand la source ne se déplace pas dans le milieu,  $V_s = 0$ , tous les fronts d'onde sont concentriques. Quel que soit l'endroit où se placerait un observateur immobile par rapport au milieu, il observerait le même nombre d'oscillations de la perturbation par seconde. Donc la fréquence de l'onde est indépendante de l'endroit où il se trouve.
- b) Quand la source se déplace dans le milieu à une vitesse inférieure à celle de l'onde,  $V_s < V_o$ , tous les fronts d'onde contiennent la source et ils ne se croisent pas.  
Quand la source se rapproche d'un observateur immobile par rapport au milieu, il observe plus d'oscillations de la perturbation par seconde que celles émises par la source. Donc la fréquence de l'onde augmente à l'endroit où se trouve l'observateur. Pour des ondes sonores, cela s'observe par une augmentation de la tonalité du son.  
Quand la source s'éloigne d'un observateur immobile par rapport au milieu, il observe moins d'oscillations de la perturbation par seconde que celles émises par la source. Donc la fréquence de l'onde diminue à l'endroit où se trouve l'observateur. Pour des ondes sonores, cela s'observe par une diminution de la tonalité du son.  
Vous pouvez observer ce phénomène quand une voiture de pompier ou une ambulance se rapproche de vous, vous dépasse, puis s'éloigne de vous.  
Ce phénomène de changement de fréquence d'une onde s'appelle **l'effet Doppler**.
- c) Quand la source se déplace dans le milieu à la même vitesse que celle de l'onde,  $V_s = V_o$ , tous les fronts d'onde se croisent sur la source. A cet endroit, toutes les perturbations s'additionnent. Pour des ondes sonores, cela correspond à une très grosse pression, qui forme ce qu'on appelle **le mur du son**.
- d) Quand la source se déplace dans le milieu à une vitesse supérieure à celle de l'onde,  $V_s > V_o$ , tous les fronts d'onde se croisent et aucun ne contient la source. Dans ce cas, les fronts d'ondes forment un cône dont la source est le sommet. Sur ce cône, appelé **cône de Mach**, la perturbation a une intensité élevée. Un exemple typique d'un tel cône est fourni par les avions supersoniques. Leur bruit est localisé à l'intérieur d'un cône qu'ils traînent derrière eux. Sur le cône lui-même, la perturbation est si intense, que le passage de celle-ci sur un observateur est ressenti comme une détonation et peut casser des vitres. Un autre exemple est celui des vagues créées par un bateau. On voit facilement ce cône de perturbation, qui forme une grosse vague.

"Laboratoire" théorique : Etudier le changement de fréquence en fonction des vitesses  $V_o$  de l'onde,  $V_s$  de la source et  $V_{obs}$  de l'observateur.

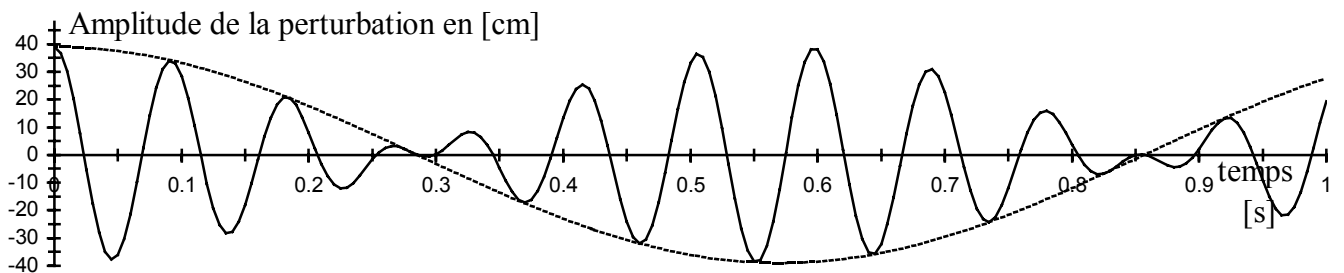
## VIII. Interférences

Lorsque deux ondes de même nature se croisent, la perturbation résultante est égale à la somme des perturbations de chaque onde prise individuellement, ceci pour chaque point du milieu et à tout instant. On dit que les ondes entrent en **interférence**.

Etudions le cas de deux sources émettant des ondes de même nature et de fréquences proches mais différentes. Aux endroits où elles se croisent, elles interfèrent. C'est le phénomène de **battement**, qui est perceptible à l'oreille pour les ondes sonores si les fréquences sont proches, c.-à-d. inférieures à 10 Hertz. Ceci est illustré ci-dessous.



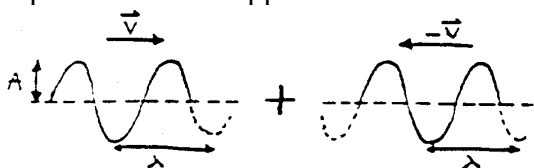
Deux ondes ont été représentées sur ce graphique. C'est leur somme qui représente l'onde réelle.



La somme des deux ondes du graphique précédent ont été représentées ici. En pointillé, c'est l'enveloppe de l'onde qui a été représentée. Ce trait pointillé ne correspond pas à une onde réelle. Tout se passe comme si on avait une onde de fréquence fixe, mais d'intensité variable. Cela se perçoit facilement à l'oreille pour des ondes sonores.

### Les ondes stationnaires

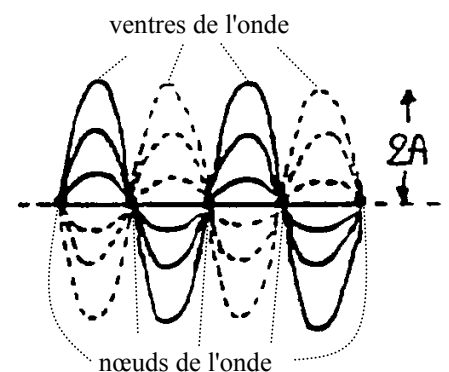
Etudions le cas de deux ondes de même nature, de même fréquence et de même amplitude qui se déplacent en sens opposé et se croisent comme sur le schéma ci-dessous.



L'interférence de ces deux ondes crée une **onde stationnaire**, c'est-à-dire une onde qui ne se déplace pas. Sa vitesse est nulle. En certains points, son amplitude est toujours nulle. On appelle ses points les **nœuds** de l'onde. Son amplitude varie au cours du temps. Les points de maximum de variation d'amplitude sont appelés les **ventres** de l'onde.

Le dessin suivant montre une onde stationnaire à six instants différents.

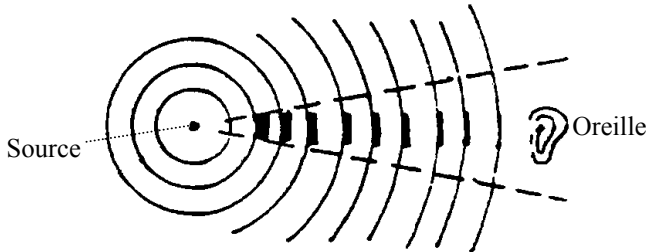
L'amplitude maximale de l'onde résultante est le double de l'amplitude des deux ondes qui ont généré cette onde stationnaire.



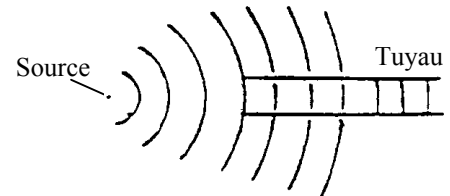
La longueur d'onde égale celle des ondes initiales.

## IX. Ondes sonores

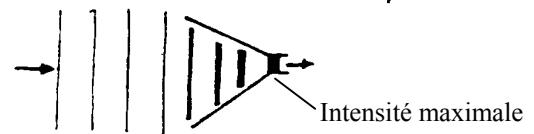
Les ondes sonores sont des ondes de pression longitudinales dans l'air. Lorsque les vibrations de la source sont ponctuelles, les fronts d'onde forment des sphères concentriques qui s'éloignent du centre. La surface de chacune de ces sphères augmente ainsi avec l'éloignement du centre. Le nombre des molécules d'air mises en vibration augmente ainsi dans la même proportion. L'énergie que reçoit chaque molécule diminue alors d'autant. Donc, **l'intensité** sonore perçue par une membrane donnée (tympan de l'oreille) **diminue avec l'éloignement** de la source.



Si l'onde est guidée dans un **tuyau**, la surface du front d'onde n'augmente pas dans le tuyau et l'intensité demeure alors la même à la sortie du tuyau qu'à l'entrée.



Un corne acoustique resserre l'étendue du front d'onde. L'intensité sonore se trouve ainsi augmentée.



### Les sons musicaux

L'oreille humaine perçoit les sons compris entre 20 Hertz et 20'000 Hertz. En dessous de 20 Hertz, on parle **d'infrasons**, au-dessus de 20'000 Hertz, ce sont des **ultrasons**. Des ultrasons peuvent être perçus par certains animaux, les chiens par exemple.

En musique, la fréquence d'un son s'appelle la **hauteur**.

Un **son pur** est formé par une onde sinusoïdale, de fréquence bien définie.

Un **son composé** est la superposition d'ondes sinusoïdales de fréquences différentes.

Les instruments de musique génèrent des sons composés d'ondes sinusoïdales, toutes de fréquences multiples d'une fréquence de base que l'on appelle la fréquence **fondamentale**. Les autres fréquences sont appelées les **harmoniques**. L'ensemble des différentes harmoniques d'un son composé s'appelle le **timbre**.

Le « la » d'orchestre est défini à 440 Hertz. Il peut comporter jusqu'à 40 harmoniques audibles, d'où l'immense variété des timbres que l'on peut donner à une note !

Un **accord** est la superposition de plusieurs sons composés.

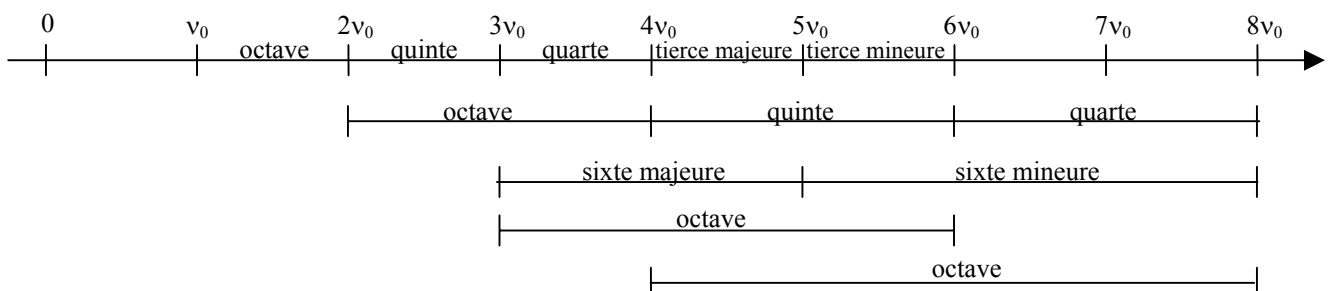
Augmenter une note d'une **octave** correspond à doubler sa fréquence.

Augmenter une note d'une **quinte** correspond à multiplier sa fréquence par 3/2.

Augmenter une note d'une **quarte** correspond à multiplier sa fréquence par 4/3.

Augmenter une note d'une **tierce majeure** correspond à multiplier sa fréquence par 5/4.

Augmenter une note d'une **tierce mineure** correspond à multiplier sa fréquence par 6/5.



## X. Ondes électromagnétiques

### La vision des couleurs

Une source lumineuse est caractérisée par sa répartition spectrale d'intensité, c'est-à-dire par l'ensemble des fréquences, qu'elle émet. L'œil, lui, n'est pas sensible à la composition spectrale des radiations lumineuses qui tombent à un même endroit de la rétine. Il n'analyse pas, il perçoit un effet de couleur global. Par exemple il ne fera pas de différence entre la lumière du jour et celle de certains tubes néon, alors que leurs spectres sont différents.

La rétine comporte **deux appareils visuels** distincts de structures différentes, fournissant l'un une vision **noir - blanc**, l'autre une vision **couleur** !

Les **bâtonnets** fournissent une information qui est fonction de l'amplitude, mais non de la fréquence, donc une vision non colorée, mais dont la **sensibilité est très grande**.

Les **cônes** sont eux sensibles à la fréquence. Chez la majorité des êtres humains, il existe trois types de cônes. Ceux qui ont un maximum de sensibilité dans le **rouge**, ceux qui ont un maximum de sensibilité dans le **vert** et ceux qui ont un maximum de sensibilité dans le **bleu**.

Quand aucune lumière ne vient d'un corps frapper les cônes, nous disons que ce corps est noir. L'absence de toute fréquence correspond donc au noir. Quand d'un corps provient une lumière qui excite les trois jeux de cônes avec la même intensité, nous disons que ce corps est blanc. Pour les êtres humains, le blanc peut être créé avec uniquement les trois couleurs, rouge, vert et bleu. Les écrans de télévisions et d'ordinateurs n'émettent que du rouge, du vert et du bleu, à différentes intensités, pour reconstituer toutes les couleurs pour les êtres humains.

Les cônes sont beaucoup moins sensibles que les bâtonnets. Leur seuil de sensibilité est situé environ mille fois plus haut que celui des bâtonnets. Dans la pénombre, où pratiquement seuls les bâtonnets fournissent une impression lumineuse, la sensation de couleur disparaît, d'où l'expression : « la nuit, tous les chats sont gris ».

### Liens entre la température et la couleur

Nous avons déjà dit que tout corps émet des ondes électromagnétiques, d'intensités et de fréquences qui dépendent de la température du corps. On parle souvent de la température que devrait avoir un corps pour émettre des ondes donnant une couleur correspondante à celle provenant d'une source particulière. On l'appelle la **température de couleur**. On exprime généralement cette température en degrés Kelvin [K] plutôt qu'en degrés centigrades [C]. Rappelons que  $0 [C] = -273,16 [K]$ . Il existe d'autres procédés pour émettre de la lumière. Un néon ionise un gaz qui émettra de la lumière.

Voici des exemples de températures de couleurs.

La *température de couleur* du soleil est de 5'785 [K]. Celle d'un tube néon est légèrement inférieure, alors que la *température* du tube néon n'est que d'environ 310 [K]. La *température de couleur* d'une ampoule ordinaire est d'environ 2'600 [K]. Donc elle émet plus de rouge que de bleu. Celle d'une bougie est de 1'800 [K], qui émet donc encore moins de bleu. Celle d'une lampe halogène est de 4'000 [K] et celle d'un flash est de 6'000 [K].



## Couleurs et filtres

La couleur des objets ne dépend pas que de l'objet, mais aussi de la lumière qui les éclaire. Quand on parle de la couleur d'un objet on sous-entend qu'il est éclairé par une lumière du type de celle émise par le soleil, c.-à-d. contenant des ondes d'intensités similaires allant du rouge au bleu. Si on éclaire une page blanche avec de la lumière rouge, elle paraîtra rouge. Si on éclaire une feuille jaune avec de la lumière rouge, elle paraîtra rouge. Si on l'éclaire avec de la lumière bleu, elle paraîtra noire.

On obtient des couleurs soit par mélange additif, soit par mélange soustractif.

Les **émetteurs** génèrent la lumière **additivement**. Un émetteur qui n'émet aucune lumière est noir, s'il émet seulement de la lumière rouge, il est rouge, s'il émet la même intensité de rouge et de verte, nous disons qu'il est jaune, s'il émet enfin à la fois la même intensité de rouge, de vert et de bleu, nous disons que sa lumière est blanche.

Les **objets éclairés** renvoient de la lumière **soustractivement**. N'émettant par eux-mêmes aucune lumière, ils ne peuvent que soustraire (on dit aussi filtrer) tout ou partie de la lumière qui les éclaire, soit en ne renvoyant que certaines fréquences. Au soleil, un brin d'herbe, qui absorbe toutes les fréquences autres que celles proches du vert, sera vu vert; une feuille qui absorbe les fréquences proches du bleu, sera vue jaune; un objet qui absorbe toutes les fréquences proches du rouge sera vu cyan.

Pour les êtres humains, les 3 couleurs de base, couvrant le spectre visible, sont donc **rouge, vert et bleu**. Ce sont les couleurs de base des systèmes additifs. En émettant ces trois couleurs avec des intensités bien choisies, on génère toutes les couleurs visibles par les êtres humains. En émettant du rouge et du bleu, seuls nos cônes rouges et bleus seront excités, et nous voyons une couleur magenta. En émettant du rouge et du vert, seuls nos cônes rouges et verts seront excités, et nous voyons une couleur jaune.

On résume cela en écrivant :

**blanc** = rouge + vert + bleu;    **cyan** = vert + bleu;    **magenta** = rouge + bleu;    **jaune** = rouge + vert

En imprimerie, photographie et en peinture, c'est le système soustractif qui donne la couleur aux objets. En partant d'une lumière blanche, comme celle du soleil, en filtrant la lumière rouge, seuls nos cônes verts et bleus seront excités, et nous voyons une couleur cyan. En filtrant la lumière verte, seuls nos cônes rouges et bleus seront excités, et nous voyons une couleur magenta. En filtrant la lumière bleue, seuls nos cônes rouges et verts seront excités, et nous voyons une couleur jaune. En filtrant la lumière rouge et la verte, seuls nos cônes bleus seront excités, et nous voyons une couleur bleue. Etc.

On résume cela en écrivant :

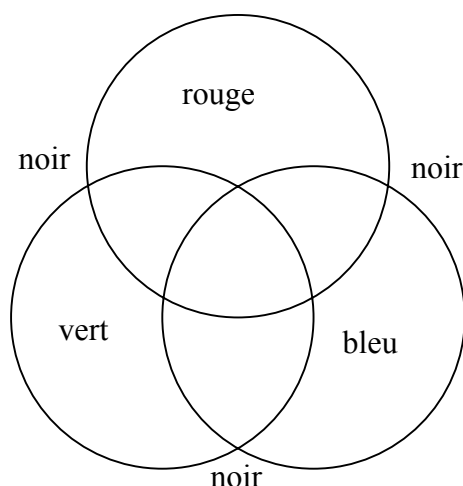
**cyan** = blanc - rouge;    **magenta** = blanc - vert;    **jaune** = blanc - bleu;  
**bleu** = blanc - rouge - vert;    **vert** = blanc - rouge - bleu;    **rouge** = blanc - vert - bleu;    **noir** = blanc - rouge - vert - bleu

On schématise ces deux systèmes de synthèse de couleurs par les deux schémas suivants :

A vous de les compléter...

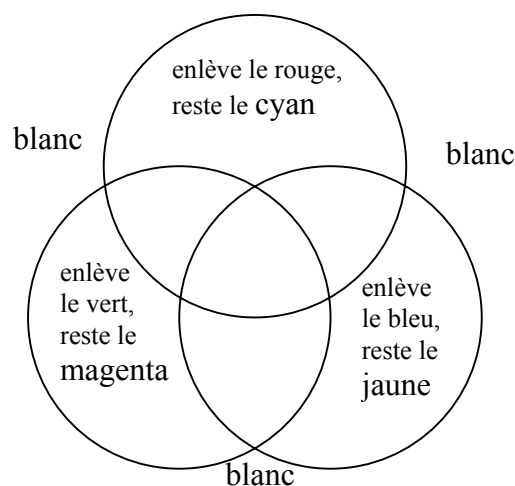
Synthèse additive :

On part du noir et on ajoute des couleurs



Synthèse soustractive :

On part du blanc et on enlève des couleurs.



## La diffraction

Nous avons vu de manière générale, qu'une onde peut être **réfléchi**e, **réfractée** et **diffractée**. Elle peut aussi être **dispersée**, **diffusée** et partiellement ou totalement **absorbée**. Si elle ne rencontre aucun obstacle sur son chemin, ses rayons continus en ligne droite. Tout ceci est vrai en particulier pour les ondes électromagnétiques et donc pour la lumière.

Nous avons déjà vu que lorsqu'une onde passe par un trou, elle est **diffractée**. L'importance de la diffraction dépend du rapport entre la largeur  $d$  du trou et la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde diffractée. Si  $d \leq \lambda$  alors la diffraction est telle qu'après le trou, l'onde est sphérique quelle que soit sa forme avant le trou. Si  $d \gg \lambda$  alors la diffraction est négligeable, les fronts qui passent ne subissent pas de modifications, seuls les bords sont légèrement incurvés.

C'est ainsi que s'explique le fait qu'à l'extérieur d'une pièce ayant une fenêtre ouverte, on puisse entendre une personne, mais pas la voir ! En effet, une fenêtre constitue un trou d'environ 1 mètre, et les ondes sonores ont une longueur d'onde d'environ 1 mètre également, alors que les ondes lumineuses ont une longueur d'onde d'environ 1 micromètre. La diffraction est donc très forte pour les ondes sonores, dont le front d'onde est sphérique à l'extérieur et se propagera donc dans tout l'espace, alors qu'elle est négligeable pour la lumière, pour laquelle le trou est si grand qu'il n'est pas un obstacle, comme pour nous une ouverture de 1'000 kilomètres de large n'est pas un obstacle. Donc la lumière passe tout droit par la fenêtre, sans diffracter.

Dans tout appareil optique, la lumière pénètre par un trou, pour aller frapper et impressionner la partie sensible telle que le film ou la rétine. Ainsi y a-t-il diffraction dans tout appareil visuel, ce qui a pour effet de limiter le **pouvoir de résolution** (ou pouvoir séparateur) de tout instrument d'optique. En effet, l'onde lumineuse issue d'un point va, en se diffractant, sensibiliser une zone sur le film ou la rétine. L'image d'un point est une tache, donc deux points distincts mais suffisamment proches auront pour image deux taches qui se recouvrent. L'appareil ne peut pas distinguer ces deux points !

Par exemple, le télescope du Mont-Palomar, situé en Californie, le plus célèbre et l'un des plus grands du monde, a une lentille et un diamètre d'ouverture de 5 mètres, et ne peut cependant, à cause de la diffraction, distinguer sur la lune, qui n'est distante que de 400'000 kilomètres, des détails de moins de 48 mètres. Pas question de voir une jeep lunaire ou même un site d'alunissage !

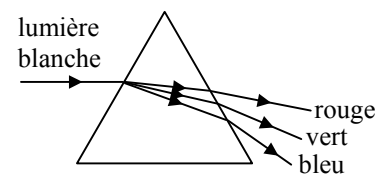
Le cas de l'œil humain est aussi étonnant. Avec une ouverture minimale de la pupille de 2,5 [mm] et un diamètre de l'œil humain de 3 [cm], le calcul de la diffraction donne pour l'image d'un point sur la rétine une tache de 7 microns de diamètre. Et, comme par enchantement, la distance entre deux cellules rétinienne contiguës est d'environ 10 microns ! Une plus grande densité de cellules rétinienne ne nous permettrait donc pas de voir plus de détails sur l'objet observé, alors que moins de cellules, donnerait moins de détails.

## La dispersion

Dans le vide, la vitesse de la lumière est la même pour toutes les fréquences et donc pour toutes les couleurs. Il n'en va pas de même dans les milieux transparents. Dans du verre et de l'eau, un rayon bleu se propage légèrement moins vite qu'un rayon rouge. C'est le phénomène de **dispersion**.

Ainsi, l'**indice de réfraction**  $n$  d'un milieu transparent ne dépend pas que de la nature du milieu, mais aussi de l'onde qui le traverse. En conséquence, quand un rayon de lumière blanche, comprenant donc les fréquences rouges, vertes et bleues, traverse par double réfraction un prisme ou une goutte d'eau, les différentes couleurs vont être déviées un peu différemment à l'entrée, puis à la sortie du prisme ou de la goutte d'eau, c'est-à-dire vont se séparer. Il y a décomposition spectrale de la lumière blanche, illustrée par exemple par l'arc-en-ciel.

On dit qu'il y a **dispersion** chaque fois que la vitesse de propagation de l'onde dépend de sa fréquence.



## La diffusion de Rayleigh : Pourquoi le ciel est bleu ?

Un objet éclairé émet de la lumière par **diffusion**. Il renvoie une partie de la lumière, dans toutes les directions. L'interaction de la lumière incidente du soleil avec les molécules de l'atmosphère terrestre représente un cas particulier de diffusion, appelé **diffusion de Rayleigh**, qui explique pourquoi le **ciel est bleu ... à vrai dire cyan !**

En 1870, le physicien Robert John Rayleigh se pose la question : "Pourquoi le ciel est bleu ?" Il répondit à cette question de la manière suivante. Les molécules qui composent l'atmosphère dévient légèrement la lumière. Cette déviation dépend fortement de la longueur d'onde de la lumière. Dans l'atmosphère, le bleu est fortement dévié, le vert un peu et le rouge quasiment pas. Donc les rayons rouges, émis du soleil, passent en ligne droite à travers l'atmosphère, alors que les rayons bleus sont fortement déviés. En regardant en l'air, dans une direction différente de celle du soleil, principalement des rayons bleus avec un peu de vert nous parviennent dans notre rétine.

C'est le même phénomène qui explique pourquoi le soleil est rouge quand il se couche le soir. Quand il est au zénith, la couche d'atmosphère traversée par la lumière n'est pas suffisamment importante pour diffuser beaucoup de bleu. Par contre, quand le soleil se couche, ses rayons traversent une plus grande couche d'atmosphère et perdent beaucoup de bleu par diffusion et un peu de vert. Donc les rayons qui nous parviennent sont rouges - oranges.

## La polarisation

Les ondes transversales ont une particularité supplémentaire, ils peuvent être polarisés. Ce qui n'est pas le cas des ondes longitudinales. Ainsi, les ondes électromagnétiques, dont la lumière, peuvent être polarisées, par contre les ondes sonores ne le peuvent pas.

Une onde qui n'a qu'une seule direction de vibration est **polarisée**.

La lumière ordinaire, qui est composée d'ondes transversales, a des vibrations dans toutes les directions perpendiculaires au rayon.

Un **polariseur** est un **filtre** qui ne laisse passer qu'une seule direction de vibration, en absorbant toutes les autres : la lumière ne peut donc pas traverser deux polariseurs croisés !

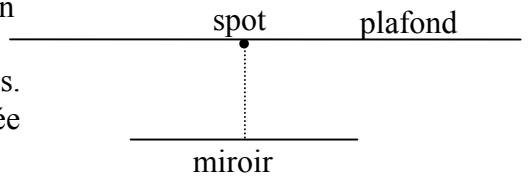
Voici trois applications de la polarisation :

- a) **Les lunettes polaroïd**. Les verres polarisés de lunettes de soleil ne sont pas un gadget. En effet, en plus d'obscurcir l'ensemble de la lumière comme les verres ordinaires teintés sombres, les verres polarisés **suppriment les éclats** de lumière réfléchi par l'eau ou la neige, cette lumière se trouvant être polarisée.
- b) **En photographie**. Le photographe est très souvent confronté au terrible problème des reflets, des vitrines, bijoux, et tableaux par exemple. Par bonheur, les reflets sont presque toujours polarisés, mais suivant une direction quelconque ; aussi bien le photographe visse-t-il sur son objectif un filtre polarisant orientable, de sorte qu'en le tournant, il tombe sur une position où d'un coup le reflet disparaît, mais pas le reste du sujet, dont la lumière n'est pas polarisée !
- c) **La Photoélasticité**. Elle permet l'étude des contraintes dans les solides. Les ingénieurs civils construisent une maquette transparente de l'ouvrage projeté et le photographient en contrainte à travers deux polariseurs. Les différentes tensions dans la matière apparaissent alors de couleurs différentes.

## Exercices qui suivent le cours sur les ondes.

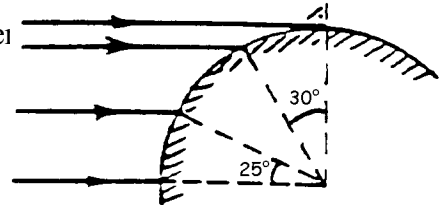
- I.1 Citez deux exemples d'ondes longitudinales et trois exemples d'ondes transversales.
- I.2 Dessinez une onde avec quelques fronts d'ondes et quelques rayons d'ondes.
- II.1 La vitesse du son dans l'air vaut 340 [m/s]. Si un observateur entend le tonnerre 5 secondes après avoir vu l'éclair, à quelle distance de lui gronde l'orage ?
- II.2 L'oreille humaine ne peut distinguer deux sons brefs successifs que s'ils sont séparés d'au moins 1/10 de secondes. A quelle distance minimale doit-on alors se trouver d'un obstacle pour que l'on puisse entendre l'écho d'un son ?
- II.3 La vitesse du son dans l'eau fut mesurée pour la première fois dans la rade genevoise par Colladon et de Saussure à l'aide de deux barques distantes de 400 [m]. D'une barque sont envoyés simultanément un signal lumineux dans l'air et une sonnerie dans l'eau. Dans l'autre barque, on mesure alors à l'aide d'un chronographe que le son sous l'eau arrive 270 millisecondes après la lumière. Calculez la vitesse du son dans l'eau. Comparez-la avec celle donnée dans la table CRM.
- II.4 Voyez-vous le jeu des 5 boules suspendues et alignées ? On lâche la première qui percute la 2<sup>ème</sup>, et la 5<sup>ème</sup> seule se met en mouvement... au bout de combien de temps après le choc de la première, si les boules, d'acier, ont 2 centimètres de diamètre, la vitesse du son dans l'acier valant 5850 [m/s] ?
- II.5 Lors d'une secousse sismique, une onde longitudinale de vitesse  $V_L = 4'000$  [m/s] et une onde transversale de vitesse  $V_T = 2'300$  [m/s] prennent simultanément naissance. Si une station sismologique enregistre un retard de 3 minutes entre les deux ondes, à quelle distance de la station se trouve l'épicentre du séisme ?
- II.6 Des ondes à la surface de l'eau, qu'on appelle rides capillaires (beaucoup moins profondes que les vagues), ont une distance entre deux crêtes successives de 1,5 [cm] et se succèdent à chaque endroit à raison de 15 par seconde. Quelle est la vitesse de ces ondes ?
- II.7 Les orchestres se règlent sur le « la » d'orchestre, dont la fréquence vaut 440 [Hz]. Quelle est la longueur d'onde de ce « la » dans l'air ? Et dans l'eau ?
- II.8 a) La fréquence d'un rayon lumineux bleu vaut  $\nu = 6,5 \cdot 10^{14}$  [Hz]. Quelle est sa longueur d'onde dans l'air ? Et dans l'eau ? La vitesse de la lumière dans l'eau est de 225'000 [km/s].  
b) Quelle est la période de ce rayon bleu dans l'air ? Et dans l'eau ?  
c) La station de radio Europe 1 émet sur « 1620 [m] ». Quelle est la fréquence de son émetteur ?  
d) Un four à micro-ondes chauffe les aliments grâce à un émetteur d'ondes électromagnétiques centimétriques de longueur d'onde égale à 12,2 centimètres. Quelle est la fréquence des fours à micro-ondes ?
- III.1 Voici quelques longueurs d'ondes d'émission de quelques substances, quand on les chauffe. A quelles couleurs cela correspond-il ?  
Le sodium :  $\lambda \approx 589$  [nm]  
Le mercure :  $\lambda \approx 495$  [nm] ;  $\lambda \approx 430$  [nm] ;  $\lambda \approx 400$  [nm]  
L'oxygène :  $\lambda \approx 750$  [nm] ;  $\lambda \approx 620$  [nm]
- IV.1 Dans une salle ayant une porte ouverte donnant sur une autre salle, même si tous les murs sont isolés contre le bruit, on peut entendre une personne parler dans la salle voisine, sans pouvoir la voir. Pourquoi ? Ici, les murs ne réfléchissent aucun son.

V.1 Un spot de lumière suspendu au plafond, éclaire un miroir en forme de disque posé sur le sol. Le spot est à la verticale du centre du miroir. Le diamètre du miroir est de 60 centimètres. Quelle est la forme et la taille de la tache lumineuse renvoyée par le miroir sur le plafond ? Cette taille, dépend-elle de la hauteur du plafond ?



V.2 Quelle doit être la hauteur d'un miroir pour que vous puissiez vous voir entièrement dedans ? Cela dépend-il de la distance à laquelle vous vous trouvez du miroir ?

V.3 4 rayons parallèles frappent une bille de métal poli. Déterminez l'angle que font les 4 rayons réfléchis avec l'horizontale.



V.4 Un miroir est posé horizontalement, un autre est au-dessus de lui, formant un angle de  $10^\circ$  avec l'horizontale. Ce deuxième miroir a un trou, pour laisser passer la lumière, comme représenté sur le schéma. Quelle doit être l'angle d'arrivée avec l'horizontale d'un rayon de lumière au niveau du trou, pour que ce rayon ressorte horizontalement ?

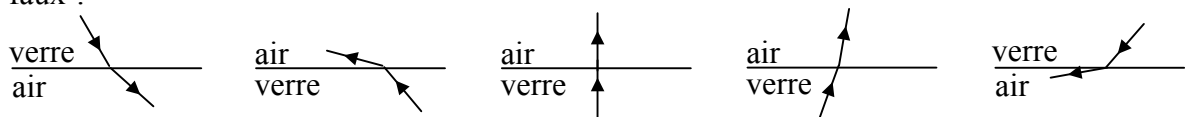


VI.1 Cherchez dans la table CRM les indices de réfraction de l'air, de l'eau, du verre et du diamant.

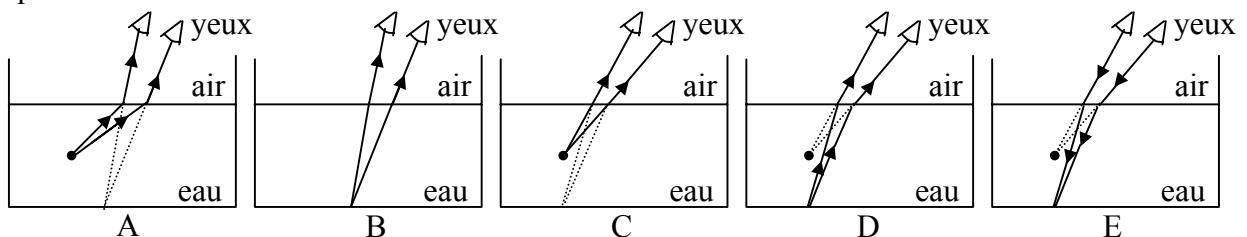
VI.2 a) Calculer la vitesse de la lumière dans le verre et dans l'eau.

b) Un rayon passe du verre dans l'eau avec un angle d'incidence de  $i = 50^\circ$ . Calculer l'angle de réfraction  $r$ . Quel est l'angle de réfraction  $r$  si  $i = 0^\circ$  ?

VI.3 Lequel des dessins ci-dessous, montrant le passage d'un rayon de lumière du verre dans l'air, est-il faux ?

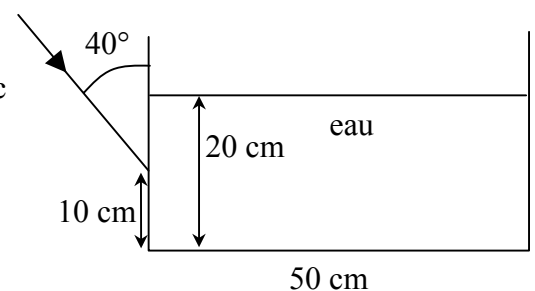


VI.4 Lequel des dessins suivants montre-t-il correctement pourquoi un bassin apparaît moins profond qu'il n'est en réalité ?



VI.5 Un bloc de verre a la forme d'un triangle rectangle isocèle. Dessiner le trajet d'un rayon lumineux qui arrive perpendiculairement à l'hypoténuse, jusqu'à ce qu'il sorte du bloc de verre.

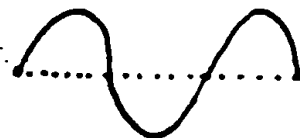
VI.6 Dessiner le trajet du rayon lumineux ci-contre, qui arrive sur la paroi d'un aquarium en faisant un angle de  $40^\circ$  avec elle, jusqu'à ce qu'il ressorte de l'aquarium. On négligera l'épaisseur des parois de l'aquarium.



VII.1 Quel est le changement de fréquence d'une onde sonore, dont la source se rapproche de vous à une vitesse  $V_s$  ? Notons  $V_o$  la vitesse de l'onde sonore. Quel est le changement de fréquence quand la source s'éloigne de vous à une vitesse  $V_s$  ?

VIII.1 Voici l'état de vibration maximale d'une corde de 80 [cm] de longueur.

a) Dessiner cette vibration  $1/2$ ,  $1/4$  et  $1/8$  de période plus tard.



IX.1 La **gamme de Zarlin** est construite sur la base de l'accord parfait majeur. Elle est compliquée et a été remplacée par la **gamme tempérée** qui ne respecte pas parfaitement les quintes, quartes, tierces majeures et mineurs, mais apporte des simplifications. *Elle divise une octave en 12 intervalles, de telle sorte que le rapport de fréquence de deux notes successives soit toujours le même.* Dans la gamme tempérée, le  $do_3$  a une fréquence de 261,5 Hertz, le  $la_3$  a une fréquence de 440 Hertz, le  $do_4$  est une octave plus haut que le  $do_3$ .

Quel est le rapport de fréquence entre deux notes successives ?

Sous la gamme ci-dessous, indiquez en Hertz les fréquences correspondantes.

$do_3$	$do\#_3$	$ré_3$	$ré\#_3$	$mi_3$	$fa_3$	$fa\#_3$	$sol_3$	$sol\#_3$	$la_3$	$la\#_3$	$si_3$	$do_4$
261,5									440			

IX.2 (Facultatif). Sur une corde de guitare, les ondes ont une vitesse de 330 [m/s]. Cette corde a 50 [cm] de longueur.

a) Quelle note produit cette corde ?

b) Que valent la fréquence et la longueur d'onde de l'harmonique numéro 3 ?

c) A combien de centimètres du bout du manche de la corde faut-il poser le doigt pour que cette corde produise un  $do_4$  ? Un  $do_4$  est un son de fréquence égale à 523 Hertz.

d) Quelle est la longueur d'onde de ce  $do_4$  sur la corde et dans l'air ?

X.1 N'importe quel corps est-il susceptible de rayonner de la lumière blanche ?

X.2 Pourquoi parle-t-on, à propos des tubes néon, de « lumière froide » ?

X.3 On parle dans le langage courant de couleurs chaudes ou froides : rouge est typiquement une couleur chaude et bleue une couleur froide. Cela correspond-il à la réalité physique ?

X.4 Que se passe-t-il si l'on photographie le soir, sans flash, une scène d'intérieure éclairée par des lampes ?

X.5 Complétez les deux schémas de synthèse de couleurs, page 14.

X.6 Quand un peintre rajoute de la peinture sur sa toile, cela correspond-il à des couleurs additives ou soustractives ?

X.7 Au coucher du soleil, la source de lumière, qui est le soleil, est rouge. Si l'on photographie alors au coucher des pissenlits (jaunes) au milieu de l'herbe (verte) sur fond de ciel (cyan), quelle couleur auront sur le cliché les pissenlits, l'herbe et le ciel ?

X.8 On regarde un paysage de mer. Sur l'assiette aveuglante (de couleur cyan) danse une coque rouge aux voiles blanches. Nous portons des lunettes de soleil. Comment voyons-nous la mer, le bateau et les voiles si les verres de nos lunettes sont jaunes ? Et s'ils sont bleus ? Et s'ils sont magenta ?

X.9 Trois voitures sont garées au soleil, une bleue, une blanche et une jaune. Laquelle est la plus chaude ?