3 LE SON ET LA LUMIÈRE

Une personne qui crie à 100 m de distance fait un son d'une intensité de 55 dB. Quelle sera l'intensité si 20 000 personnes à 100 m de distance font un cri identique ?

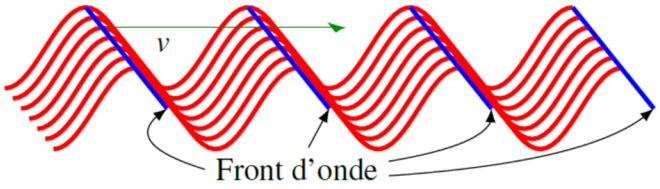
www.boudist.com/archive/2009/03/16/sound-relief-sydney.php

Découvrez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

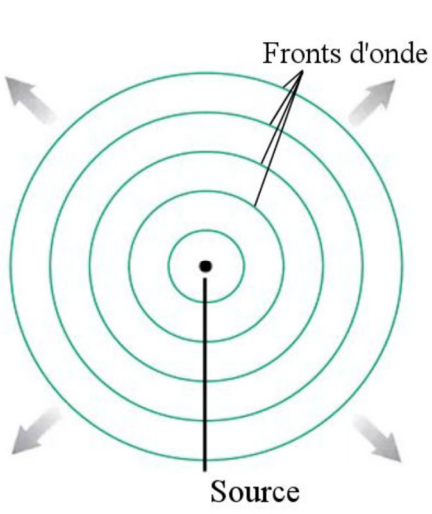
3.1 ONDES EN 2 OU 3 DIMENSIONS

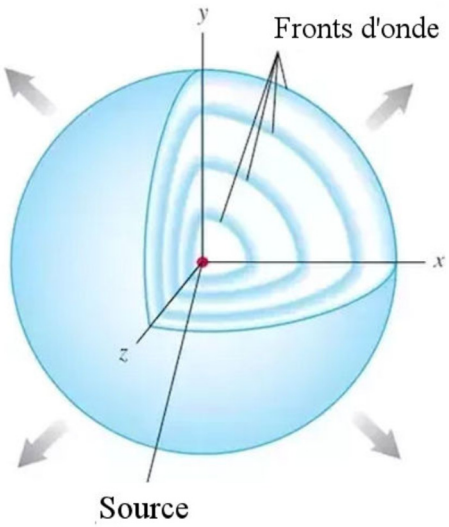
Dans ce chapitre, on va explorer deux types d'ondes se propageant en 3 dimensions. Il s'agit du son et de la lumière.

En 2 ou 3 dimensions, on représente l'onde avec les ***fronts d'onde***. Il s'agit de lignes qui relient tous les points de l'onde qui sont à la même phase. Pour éviter de se compliquer inutilement la vie, on peut souvent considérer que ce sont les lignes qui suivent les maximums (ou crêtes) de l'onde. (Parfois, on va aussi utiliser des lignes qui suivent les minimums de l'onde (creux).)

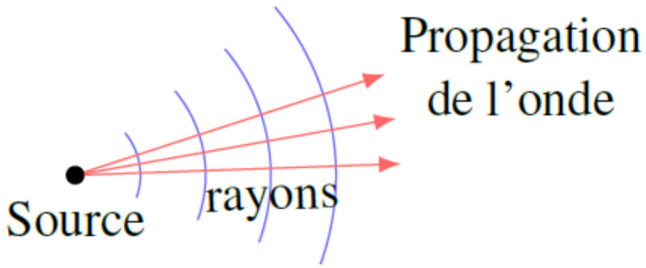


En utilisant cette représentation, voici des représentations en deux et trois dimensions d'une onde émise par une source.





wps.pearsoncustom.com/wps/media/objects/2056/2105451/media_portfolio/10.html and www.quora.com/What-is-a-spherical-wave-front



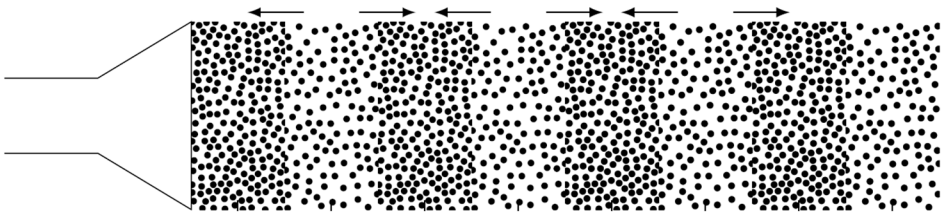
Notez que les fronts d'onde sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. Ces lignes suivant la direction de propagation des ondes sont les ***rayons.***

3.2 LES ONDES SONORES

Nature des ondes sonores

Quand un objet vibre dans l'air, la vibration perturbe l'air autour de l'objet en comprimant et en dilatant l'air. Ces perturbations se propagent et on obtient ainsi des ondes sonores. Dans le vidéo suivant, vous pouvez observer ce qui se passe.
http://www.youtube.com/watch?v=Y84Wc8fs-NA
Quand la paroi se déplace vers la droite, elle crée une région où l'air est plus dense et où la pression est plus élevée. Quand la paroi se déplace vers la gauche, elle crée une zone où l'air est moins dense et où la pression est moins élevée. On voit ces zones de haute et basse densité se propager vers la droite dans le tube. C'est exactement de cette façon que fonctionne un hautparleur.

Il y a une différence importante avec une onde sur une corde. L'oscillation de la matière se fait dans la même direction que la direction de propagation de l'onde.



Quand l'oscillation se fait dans la même direction que la direction de propagation de l'onde, on a une ***onde longitudinale***.

Ondes longitudinales et transversales dans la matière

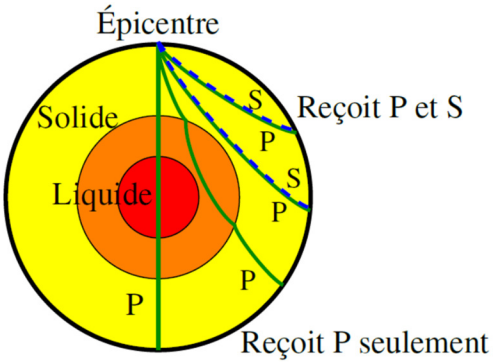
Si on veut qu'il y ait une onde dans un milieu, il doit y avoir une force qui s'oppose aux déformations du milieu. Si on déplace une corde tendue de la position d'équilibre, la tension de la corde cherche à ramener la corde à sa position d'équilibre. Cette force est donc la force qui s'oppose aux déformations du milieu et il peut y avoir des ondes sur la corde.

Le son est une onde de compression et de dilatation. Quand on compresse ou dilate la matière (solide, liquide ou gaz), l'élasticité du corps s'oppose à cette compression ou dilatation. Comme il y a une force qui s'oppose à la déformation, il est possible d'avoir des ondes sonores (qui sont des ondes de compression) dans toutes les substances.

Notez qu'on peut aussi avoir des ondes transversales, mais uniquement dans les solides. Dans une onde transversale, la matière est déplacée d'un côté à l'autre de la direction de propagation. Dans un solide, la déformation génère des forces qui cherchent à rétablir la position de départ et les ondes transversales sont possibles. Dans les fluides (liquides et gaz), il n'y a aucune force qui s'oppose au déplacement de la matière. Si on prend un

morceau d'air et qu'on le déplace un peu, aucune force ne cherche à ramener l'air déplacé à l'endroit de départ. Les ondes transversales sont donc impossibles dans les fluides.

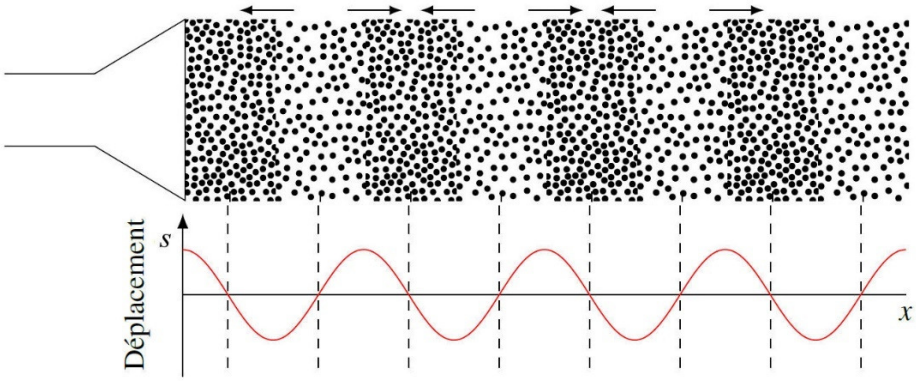
C'est cette propriété qui permet de savoir que l'intérieur de la Terre est liquide. Les tremblements de terre envoient des ondes longitudinales (des ondes sonores, notées P sur la figure) et transversales (notées S sur la figure) partout dans la Terre. Comme on capte seulement les ondes longitudinales de l'autre côté de la Terre, cela veut dire que les ondes transversales ne peuvent traverser l'intérieur de la Terre et donc que l'intérieur de la Terre est liquide. En déterminant à quels endroits on peut recevoir les ondes transversales sur Terre, on peut même déterminer la taille de la région liquide.



Notez aussi que dans un solide, les vitesses des ondes transversale et longitudinale ne sont pas nécessairement les mêmes. Même si les ondes se propagent dans le même milieu, la vitesse de ces deux types d'ondes peut être différente, car les forces qui s'opposent à la déformation ne sont pas les mêmes. Toutes les ondes longitudinales ont la même vitesse et toutes les ondes transversales ont la même vitesse, différente de celle des ondes longitudinales. Par exemple, les tremblements de terre créent des ondes longitudinales et transversales dans le sol. Dans ce cas, les ondes longitudinales vont plus vite que les ondes transversales. En gros, les ondes longitudinales ont une vitesse de 6 km/s près de la surface de la Terre alors que les ondes transversales ont plutôt une vitesse de 3 km/s. On peut même calculer la distance de l'épicentre en mesurant l'écart de temps entre l'arrivée des ondes longitudinales (qu'on appelle les ondes primaires, parce qu'elles arrivent en premier) et transversales (qu'on appelle les ondes secondaires).

Ondes sonores sinusoïdales

L'onde sonore peut être sinusoïdale. Dans ce cas, le déplacement des molécules d'air est décrit par une fonction sinusoïdale.



(L'axe des *x* est dans la direction de propagation de l'onde.)

Puisque l'onde est sinusoïdale, l'onde a une longueur d'onde et une fréquence. Cela signifie que les formules suivantes, obtenues au chapitre précédent, sont toujours valides pour ces ondes sonores.

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

où les valeurs de f et ω sont

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \omega = 2\pi f$$

Le déplacement des molécules ne se faisant pas dans la direction des y, nous ne noterons pas ce déplacement par la lettre y. Nous ne pouvons pas utiliser x non plus, car il est déjà utilisé pour indiquer la position des particules du milieu. Nous allons donc utiliser la lettre s pour indiquer le déplacement des particules du milieu par rapport à leurs positions d'équilibre. Le déplacement du milieu pour une onde longitudinale sonore sinusoïdale ayant une amplitude constante est donc donné par

Déplacement des molécules du milieu lors du passage d'une onde sonore sinusoïdale

$$s = A\sin\left(kx \pm \omega t + \phi\right)$$

où A est l'amplitude du mouvement d'oscillation des molécules du milieu. (Pour avoir une onde avec une amplitude constante, il faut qu'elle se propage dans une seule direction, comme du son se propageant dans un tube.)

Encore une fois, les molécules d'air ne sont pas transportées par l'onde. Si vous concentrez votre regard sur une molécule de l'animation vue précédemment
http://www.youtube.com/watch?v=Y84Wc8fs-NA
vous pouvez voir que le passage de cette onde sinusoïdale fait simplement osciller la molécule autour d'une position d'équilibre. C'est d'ailleurs ce qui rend la scène suivante impossible. Le son ne peut pas pousser un objet de cette façon.

iconicphotos.wordpress.com/2010/05/31/blown-away-man/

La formule de la position des molécules $s = A \sin (kx \pm \omega t + \phi)$ signifie que la vitesse et l'accélération des molécules d'air en fonction du temps sont données par

$$v_x = \pm A\omega\cos\left(kx \pm \omega t + \phi\right)$$
$$a = -A\omega^2\sin\left(kx \pm \omega t + \phi\right)$$

Ces formules, identiques à celles qu'on avait obtenues pour une onde sur une corde au chapitre 2, ont été obtenues en dérivant une fois et deux fois la formule de la position. La vitesse des molécules est toutefois notée v_x puisque cette vitesse est dans la direction de la propagation de l'onde qui est l'axe des x.

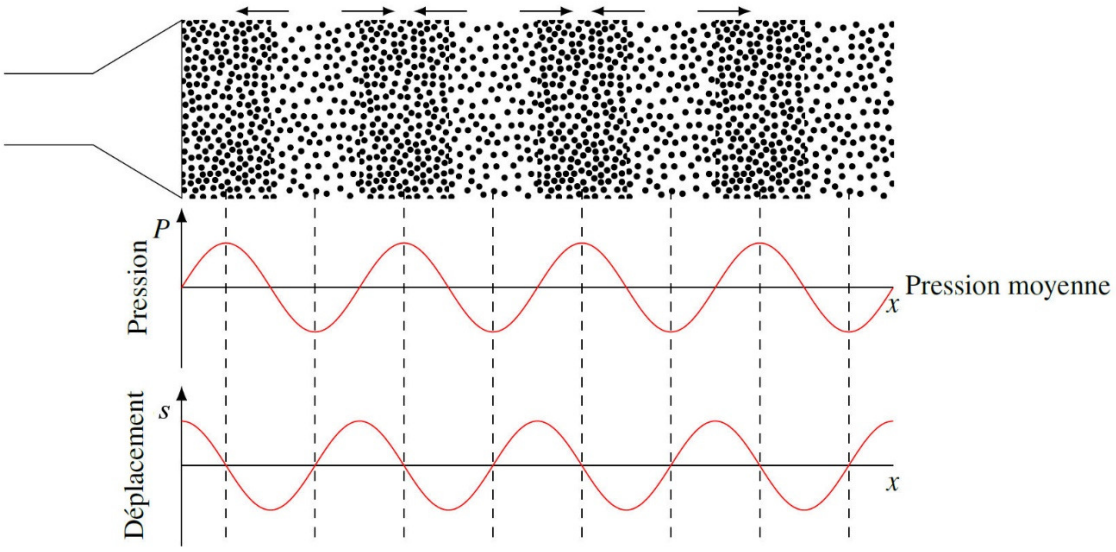
La formule de la position des molécules $s = A \sin(kx \pm \omega t + \phi)$ indique également que chaque molécule d'air fait un mouvement harmonique. Cela signifie que les formules suivantes

$$s^2 + \left(\frac{v_x}{\omega}\right)^2 = A^2$$

$$\tan\left(kx \pm \omega t + \phi\right) = \frac{s\omega}{v_x}$$

sont également valides pour les ondes sonores sinusoïdales.

On aurait pu décrire l'onde avec un sinus pour les variations de pression.



Remarquez comment les maximums de pression correspondent aux endroits où le déplacement est nul (les autres molécules autour s'approchent de la molécule située au maximum) et comment les minimums de pression correspondent aussi aux endroits où le déplacement est aussi nul (les autres molécules autour s'éloignent de la molécule située au minimum).

Si vous voulez davantage de détails pour le lien entre le déplacement des molécules et les variations de pression dans une onde sonore, vous pouvez lire ce document.
http://physique.merici.ca/ondes/lien-Px.pdf

La vitesse du son dans l'air

Il existe une formule donnant la vitesse du son dans l'air, dans laquelle on considère que l'air est un gaz parfait diatomique (c'est-à-dire fait de molécules composées de deux atomes, ce qui est le cas de la majorité des molécules dans l'air). On va donner la formule sans en donner la démonstration, car cette dernière demande de connaitre des notions de thermodynamique que la très grande majorité des étudiants de collège n'ont pas. Cette formule est

$$v = \sqrt{\frac{1,4RT}{M}}$$

où R = 8,3145 J/mol K est la constante des gaz parfaits
M = 28,9645 g/mol est la masse molaire moyenne des molécules dans l'air
T est la température de l'air (en kelvin)

Si vous voulez quand même voir la preuve, la voici.
http://physique.merici.ca/ondes/preuve-vson.pdf

On peut faire les manipulations suivantes

$$v = \sqrt{\frac{1,4RT}{M}}$$

$$v = \sqrt{\frac{1,4 \cdot R \cdot 273,15K}{M}} \sqrt{\frac{T}{273,15K}}$$

pour ensuite calculer la valeur de la première racine et arriver au résultat suivant.

Vitesse du son dans l'air

$$v = 331,3 \frac{m}{s} \cdot \sqrt{\frac{T}{273,15K}}$$

où T est la température en kelvin

À 0 °C, le son va donc à 331,3 m/s et à 20 °C, le son va à 343,2 m/s. Pour des températures autour de 0 °C (disons de -50 °C à 100 °C), la vitesse du son augmente d'environ 0,6 m/s par degré Celsius.

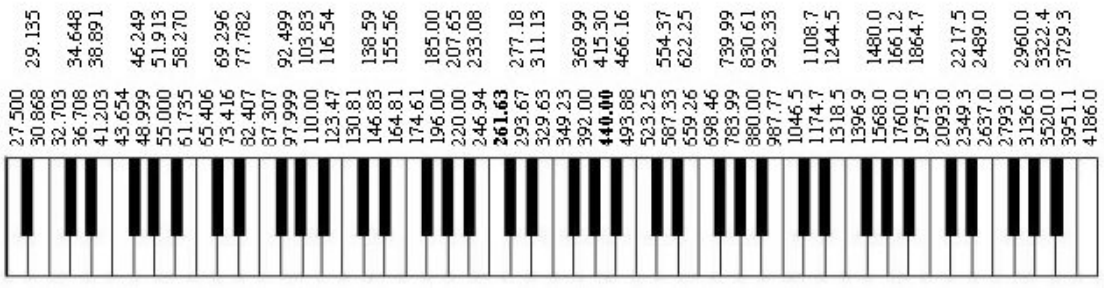
Il existe aussi des formules donnant la vitesse du son dans les liquides et les solides. Ces formules demandent toutefois de connaitre certaines notions de physique des fluides et de physique des solides. On ne donnera donc pas ces formules ici. Contentons-nous de dire que la vitesse est différente quand on change de milieu.

Par exemple, la vitesse du son dans l'eau est aux environs de 1450 m/s (elle varie avec la température) et la vitesse du son dans l'acier est aux environs de 5000 m/s. Attention, une vitesse plus élevée dans l'acier que dans l'air ne signifie pas que le son a plus de facilité à

se propager dans l'acier que dans l'air. Le son dans une tige d'acier pourrait être absorbé sur une distance plus courte que dans l'air, même si le son a une plus grande vitesse dans l'acier.

Fréquence du son

La fréquence détermine si le son est grave ou aigu, ce qu'on appelle la hauteur du son. Une basse fréquence correspond à un son grave et une fréquence élevée correspond à un son aigu. Certaines fréquences correspondent à des notes de musique comme le montre cette figure.

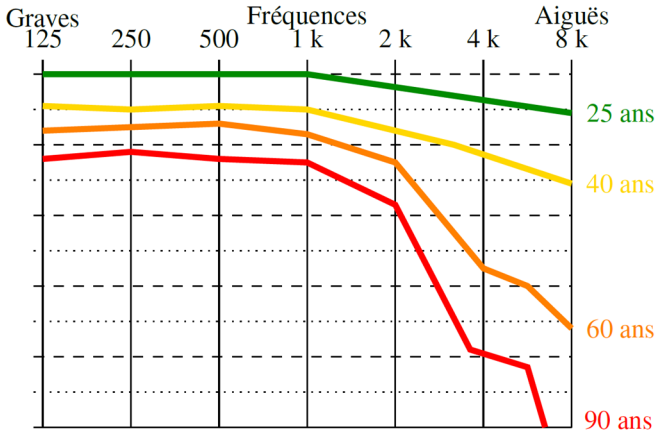


www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project_ideas/Music_p012.shtml

Notez que la fréquence double chaque fois qu'on monte d'une octave. La fréquence du troisième do de la figure est à 130,81 Hz et le do suivant est à 261,63 Hz, qui est le double. Petite note historique : Les fréquences des notes ne sont pas immuables. En fait, elles ont tendance à augmenter lentement avec le temps parce que les orchestres s'accordent parfois à des fréquences plus élevées pour obtenir un son plus riche. Ainsi, le *la* était généralement aux alentours de 425 Hz à l'époque de Mozart (fin du 18^{e} siècle) alors qu'il est maintenant à 440 Hz. Certains orchestres s'accordent même pour avoir un *la* à 442 Hz ou 444 Hz.

La plus basse fréquence que l'oreille peut entendre est de quelques dizaines de hertz (c'est plus une baisse graduelle de sensibilité en passant de 60 Hz et 20 Hz qu'une limite soudaine). Pour des fréquences plus basses que celles qu'on peut entendre, on parle d'*infrason*.

Il y a également un maximum pour les sons aigus, mais cette limite dépend de l'âge de la personne. Pour de jeunes adultes, la limite se situe aux environs de 20 000 Hz. Cette limite va diminuer avec l'âge pour se situer vers 5000 Hz à 90 ans (voir le graphique de la page suivante). Pour des sons ayant des fréquences supérieures à 20 000 Hz, on parle d'ultrasons.



On a même pensé inventer des sources sonores à haute fréquence (15 000 Hz) pour faire fuir les jeunes à certains endroits où ils ne sont pas les bienvenus. Ce son est très désagréable pour les jeunes, mais les vieux ne l'entendent pas…

Faites le test vous-même ! (Attentions à ces tests, car il est possible que l'encodage vidéo supprime les sons très aigus. Par exemple, dans l'encodage MP3, tous les sons de fréquences supérieures à 20 000 Hz sont éliminés, peu importe la résolution choisie. Dans certains cas, on élimine même toutes les fréquences supérieures à 16 000 Hz. Ce n'est pas très grave, car il est très rare que les sons ayant des fréquences supérieures à 10 000 Hz soient très évidents dans une chanson, sauf peut-être dans *My name is* de *Eminem*. J'ai vérifié ce test avec un appareil et il y a du son jusqu'à 16 000 Hz.)
http://www.youtube.com/watch?v=o810PkmEsOI

Certains animaux ont des limites d'audition ayant des fréquences plus élevées. Les chiens peuvent entendre jusqu'aux environs de 50 000 Hz, les chats jusqu'à environ 60 000 Hz, les souris jusqu'à environ 90 000 Hz, les chauvesouris, qui se servent des ultrasons pour se diriger, jusqu'à 110 000 Hz, et certaines espèces de baleine entendent jusqu'à environ 150 000 Hz. Rassurez-vous, on n'est pas les pires. Les éléphants dépassent rarement 12 000 Hz et les poulets 2000 Hz.

On utilise aussi des ultrasons en médecine. Lors d'une échographie, on utilise souvent des ultrasons de 2 000 000 Hz. Avec les réflexions de ce son sur les différents organes du corps, on peut recréer une image montrant l'intérieur du corps, incluant les bébés qui peuvent s'y trouver.

www.colourbox.com/image/obstetric-ultrasound-of-fetus-at-fourth-month-echography-scan-image-6922639

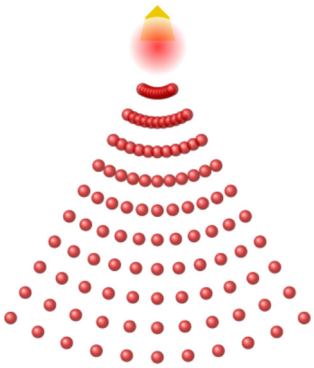
Il est important de rappeler que le son est une perturbation qui se propage dans l'air. Cela veut dire qu'il n'y a pas de son dans l'espace puisqu'il n'y a pas d'air dans l'espace. Cela veut dire qu'il y a une grave erreur de physique dans pratiquement tous les films de science-fiction. Bon, avouons que ce serait un peu plate s'il n'y avait aucun son au cinéma lors des scènes qui se passent dans le vide…

3.3 LA LUMIÈRE

Nature des ondes lumineuses

Le débat entre les théories corpusculaire et ondulatoire

Il n'était pas du tout évident avant le début du 19^{e} siècle que la lumière est une onde. Avant cette date, deux visions de la lumière s'opposaient l'une à l'autre : la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire (il y avait aussi d'autres théories, mais elles étaient moins populaires).



Selon les partisans de la théorie corpusculaire, une source lumineuse émet des particules de lumière.

Selon les partisans de la théorie ondulatoire, une source lumineuse émet une onde.

Au départ, la théorie corpusculaire est nettement plus populaire. Newton était d'ailleurs un partisan de la théorie corpusculaire.

Toutefois, une série d'observations, faites entre 1803 et 1822, permit de conclure que la lumière est une onde. On va voir dans les chapitres suivants ces observations qui permirent à la théorie ondulatoire de l'emporter.

Une onde dans l'éther

Si la lumière est une onde, on avait alors un problème. Comment l'onde peut-elle se propager dans l'espace où il n'y a pas de matière ? Dans quoi l'onde pouvait-elle bien se propager ? On a donc postulé qu'il existait une nouvelle substance, qu'on appela *éther* (qui n'a rien à voir avec l'éther en chimie), et que la lumière était une perturbation qui se propage dans ce milieu. Cette substance devait être présente partout dans l'univers, car la lumière peut se propager partout dans l'univers. Si on reçoit de la lumière de la galaxie d'Andromède, c'est qu'il devait y avoir de l'éther partout entre la galaxie d'Andromède et nous. Notons qu'on n'a jamais réussi à isoler cette substance, mais on croyait qu'elle devait exister puisque les ondes lumineuses peuvent se propager.

L'éther ne devait générer aucune friction puisque la Terre devait être en mesure de tourner autour du Soleil sans perdre de vitesse à cause de la friction. Si l'éther avait fait seulement un peu de friction, la Terre aurait lentement perdu de l'énergie et aurait fini sa course dans le Soleil. Cette propriété laissait donc penser que l'éther était un genre de gaz et cela impliquait que la lumière devait être une onde longitudinale, car il est impossible d'avoir des ondes transversales dans un fluide.

En 1816, il restait encore quelques phénomènes (impliquant la polarisation) que la théorie ondulatoire ne parvenait pas à expliquer. C'est alors qu'André-Marie Ampère constata que ces phénomènes pourraient être expliqués si on supposait que la lumière était plutôt une onde transversale. Augustin Fresnel développa cette idée en 1822 et il obtint alors des résultats en accord parfait avec les observations. À partir de ce moment, tous les phénomènes optiques connus à cette époque pouvaient être expliqués par la théorie ondulatoire, ce qui fit qu'on ne trouvait plus aucun partisan d'importance de la théorie corpusculaire après cette date (jusqu'à son retour en 1905… à voir dans un autre chapitre plus loin).

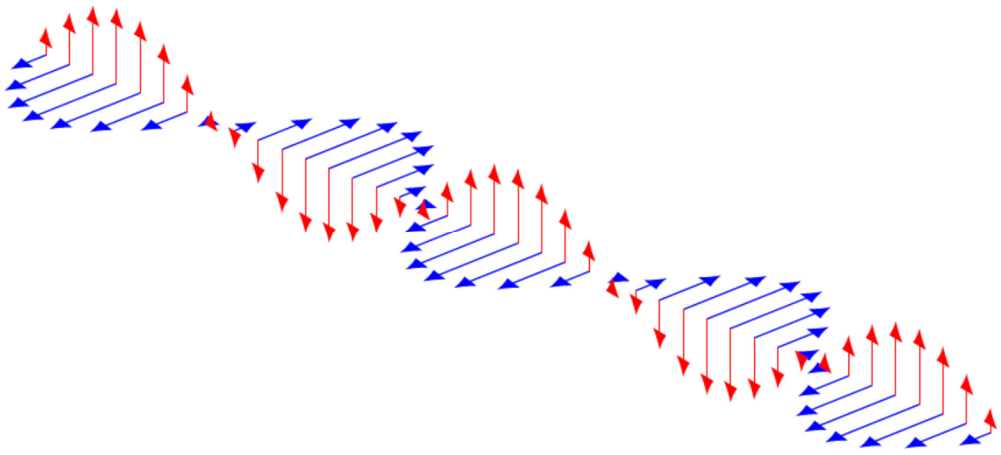
Toutefois, si la lumière est une onde transversale, alors l'éther devait être un solide. Restait à savoir comment un éther rigide pouvait laisser passer les objets sans exercer la moindre force de friction… Tout au long de 19^{e} siècle, de nombreux efforts furent déployés (en vain) pour tenter de faire des modèles d'éther rigides en accord avec les observations.

Une onde électromagnétique transversale

En 1879, James Clerk Maxwell complète les équations de base de l'électromagnétisme. Ces équations indiquent clairement que la lumière est une onde électromagnétique et qu'elle est bel et bien une onde transversale.

Pendant environ 25 ans, on tenta d'agencer les découvertes de Maxwell avec le concept d'éther avec des complications parfois assez spectaculaires. Toutefois, toutes ces tentatives ne servirent à rien puisque la relativité d'Einstein de 1905 implique clairement que l'éther ne peut tout simplement pas exister (du moins pas sous la forme envisagée au 19^{e} siècle.)

En fait, la lumière n'a pas besoin de milieu matériel pour se propager. C'est une onde, mais une onde électromagnétique, ce qui veut dire que c'est une perturbation des champs électrique et magnétique qui se propage. On peut voir ici une onde électromagnétique qui se propage vers la droite. Vous avez en rouge le champ électrique et en bleu le champ magnétique.



Voici une animation du mouvement de cette onde.
http://www.youtube.com/watch?v=4CtnUETLIFs

C'est une onde transversale parce que la direction des champs est toujours perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Bien que ces deux champs soient toujours présents et perpendiculaires l'un à l'autre, nous ne parlerons, dans ce cours, que du champ électrique de l'onde pour simplifier.

Comme on n'a pas encore vu les concepts de champ électrique et de champ magnétique, nous n'explorerons pas beaucoup cette idée. (On l'explorera dans le dernier chapitre en *électricité et magnétisme*.) On peut simplement dire que le champ électrique d'une onde électromagnétique remplace le déplacement des particules du milieu pour ce type d'onde. On va donc donner la valeur du champ électrique plutôt que le déplacement des particules du milieu.

Onde lumineuse sinusoïdale

Une onde lumineuse sinusoïdale est une onde dont la valeur du champ électrique varie de façon sinusoïdale.

Champ électrique dans une onde électromagnétique sinusoïdale

$$E = E_0 \sin\left(kx \pm \omega t + \phi\right)$$

où E_0 est l'amplitude du champ électrique, qui se mesure en *N/C* (newtons par coulomb). Encore une fois, l'axe des x est dans la direction de propagation de l'onde. (Notez que pour avoir une onde avec une amplitude constante, il faut que l'onde se propage dans une seule direction.)

Puisque l'onde est sinusoïdale, l'onde a une longueur d'onde et une fréquence. Cela signifie que les formules suivantes, obtenues au chapitre précédent, sont toujours valides pour les ondes lumineuses.

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

où les valeurs de f et ω sont

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \omega = 2\pi f$$

La vitesse de la lumière

Dans le vide, les ondes électromagnétiques ont toujours la même vitesse. Cette vitesse est

Vitesse de la lumière dans le vide

$$c = 299\ 792\ 458 \text{ m/s}$$

(On prouvera ceci en électricité et magnétisme.)

Dans un milieu transparent, la lumière va moins vite. La vitesse dépend alors de la substance dans laquelle se propage la lumière. La vitesse sera alors

Vitesse de la lumière dans une substance transparente

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

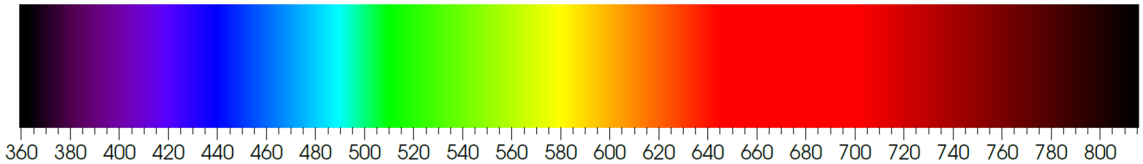
où n est une quantité appelée *indice de réfraction* et qui dépend de la substance. Voici quelques valeurs de cet indice pour différentes substances.

Substance	Indice de réfraction
Air	1,000 293
Eau	1,333
Verre	Environ 1,5
Éthanol	1,361
Diamant	2,409
Phosphure de gallium	3,50

L'explication du ralentissement de l'onde dans la matière est un peu plus compliquée qu'on pense. Quand l'onde entre dans la matière, les champs électrique et magnétique provoquent une vibration des particules composant la matière avec la même fréquence que l'onde. Or, des particules chargées en oscillation émettent à leur tour des ondes électromagnétiques. L'onde résultante dans la matière est alors la superposition de l'onde initiale, qui va à la vitesse c et des ondes émises par toutes les particules en oscillation dans la matière. Curieusement, le résultat de cette superposition est une onde de même fréquence, mais ayant une longueur d'onde plus petite, ce qui implique une vitesse plus petite.

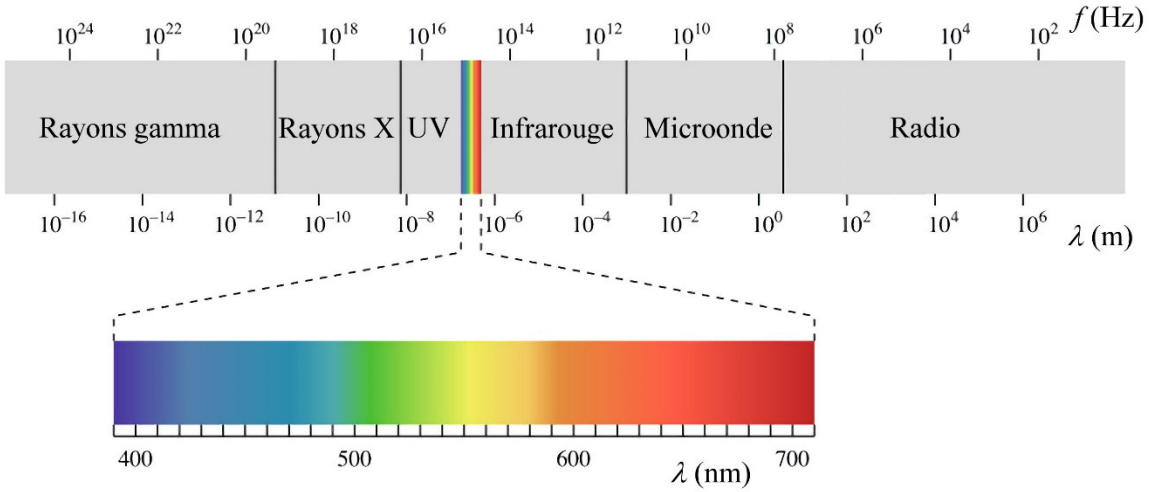
Le spectre électromagnétique

La longueur d'onde de la lumière est associée à la couleur. Cette image montre les couleurs associées aux différentes longueurs d'onde (indiquées en nm au bas de la figure).



Il n'y a pas de couleur associée pour des longueurs d'onde supérieures à 750 nm (approximativement) ou inférieures à 350 nm (approximativement) parce que notre œil ne capte pas ces ondes. Tout comme pour le son, nos sens ne peuvent pas capter toutes les ondes électromagnétiques possibles. L'œil humain capte seulement les ondes qui ont une longueur d'onde entre 400 nm et 700 nm (approximativement). C'est la ***partie visible du spectre électromagnétique***.

En réalité, ce spectre se prolonge de chaque côté et une bonne partie du spectre est composée de lumière que nos yeux ne peuvent percevoir. On a séparé ce spectre en régions.



fr.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum

Examinons ces différentes catégories.

Les ondes radio et les micro-ondes (Hertz 1888)

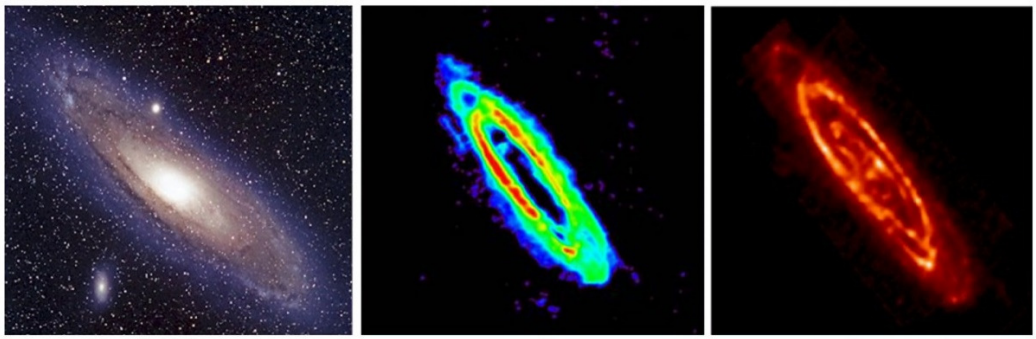
Ondes radio : λ de plus de 3 m
Micro-ondes : λ entre 1 mm et 3 m

Ces ondes sont utilisées pour les communications. Il existe une séparation très détaillée des longueurs d'onde selon l'utilité qu'un veut en faire : la télévision, la radio commerciale, cellulaire, la radionavigation aéronautique, la radionavigation maritime, la météorologie, les communications satellites, la radioastronomie, l'exploration spatiale et autres. Vous pouvez voir cette séparation pour le Canada sur ce site.
http://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/spectallocation-08.pdf/$FILE/spectallocation-08.pdf

Cette séparation est nécessaire pour éviter que votre cellulaire capte des ondes servant à autre chose. Ça serait un peu tannant si, en parlant au cellulaire, on entendait constamment un poste de radio en même temps, ou des communications entre policiers.
Les fours à micro-ondes utilisent très souvent des micro-ondes ayant une fréquence de 2450 MHz, donc une longueur d'onde de 12,2 cm. Voici une démonstration d'utilisation dangereuse des fours micro-ondes.

https://www.youtube.com/watch?v=8j5_iaIrWeE

En radioastronomie, on étudie les ondes radio et micro-ondes émises par des objets célestes. On fait alors une image qui correspond à ce qu'on pourrait voir si nos yeux étaient sensibles à ces longueurs d'onde. Il y a des choses qu'on peut voir sur ces images qu'on ne pourrait pas voir avec la lumière visible. Par exemple, voici trois images de la galaxie d'Andromède. La première est en lumière visible, la deuxième en ondes radio et la dernière en micro-ondes ($\lambda = 24\ \mu m$).



Visible Radio Microonde

www.wired.com/wiredscience/2011/04/jill-tarter-qa/
thebeautifulstars.blogspot.ca/2011/08/multi-wavelength-views-of-stuff.html

Erreur fréquente : Prendre la vitesse du son pour la vitesse des ondes radio

Les ondes radio qui passent de l'antenne émettrice de la station à votre récepteur radio à la maison ou dans l'auto vont à la vitesse de la lumière. Vous ne pouvez pas les entendre sous cette forme. Elles deviendront uniquement du son quand votre récepteur aura transformé l'onde radio en onde sonore.

Les infrarouges (Herschell 1800)

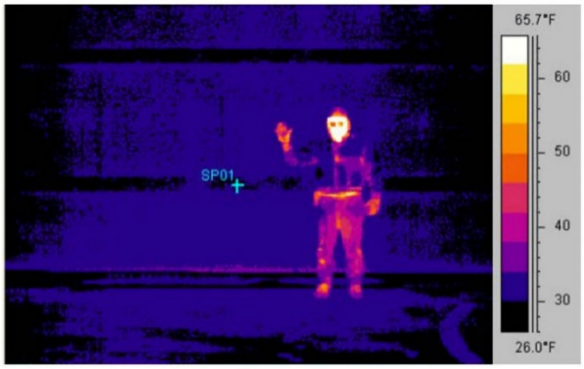
Infrarouges : λ entre 700 nm et 1 mm

Les infrarouges sont absorbés par de nombreux types de molécules. L'énergie absorbée ira alors en vibration et en rotation des molécules, ce qui signifie que leur température augmente. C'est pour ça qu'on peut percevoir les infrarouges (du moins une partie de ceux-ci) par une sensation de chaleur.

On verra un peu plus loin que les objets émettent du rayonnement électromagnétique et que ce rayonnement change selon la température de l'objet. Pour des objets ayant des températures entre 3 K et 4000 K, donc la plupart des objets autour de nous, ce rayonnement est principalement composé d'infrarouges. Plus l'objet est chaud, plus le rayonnement par unité de surface est intense. Si on pouvait voir l'infrarouge, tous les objets autour de nous seraient des sources lumineuses. Selon l'intensité lumineuse, on pourrait connaitre la température des objets.

Nos yeux ne sont peut-être pas sensibles aux infrarouges, mais certaines caméras le sont. On obtient donc des images qui montrent ce qu'on pourrait voir si on pouvait voir l'infrarouge.

Visible



Infrarouge

www.solarcrete.com/solarcrete-insulated-concrete-wall-buildings.php

On voit que la source la plus importante d'infrarouge est le visage du bonhomme, l'élément le plus chaud de cette image.

Les caméras numériques ordinaires sont sensibles à une partie de l'infrarouge. On peut faire une image en infrarouge en utilisant un filtre qui bloque le visible et laisse passer l'infrarouge. On obtient alors une image qui ressemble à la photo de droite. Cette image est une image en infrarouge proche (700 à 900 nm). Elle a été prise en été, même si tout semble gelé.

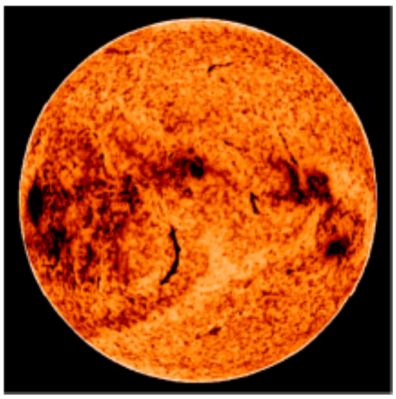
Il y en a beaucoup d'autres sur ce site.
https://www.smashingmagazine.com/2009/01/40-incredible-near-infrared-photos/
C'est essentiellement une photo en noir et blanc qui mesure l'intensité du rayonnement infrarouge émis par les objets. À ces longueurs d'onde, les infrarouges ne proviennent pas de la chaleur des objets, mais plutôt de la réflexion de la lumière du Soleil sur les objets, comme c'est le cas en visible.

Attention, car certaines caméras vidéos captent l'infrarouge. Elles captent donc le rayonnement émis par les objets chauds. Dans le film ici, on voit apparaitre une source d'infrarouge derrière la personne. Ce gaz chaud, provenant de l'anus de la personne (oui oui, un pet), se démarque bien de l'air ambiant, car il émet beaucoup plus de rayonnement infrarouge que l'air ambiant plus froid.
https://www.youtube.com/watch?v=NccsJ4MxCW0
Certains matériaux peuvent être opaques en visible, mais transparents pour d'autres longueurs d'onde (ou inversement). C'est le cas ici avec cette image montrant que les sacs d'ordures noirs sont opaques en visible, mais transparents en infrarouge.

Visible Infrarouge

coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_kids/learn_ir/

Remarquez cependant que les lunettes étaient transparentes en visible, mais qu'elles sont opaques en infrarouges.



On peut également faire de l'astronomie en infrarouge. Voici une image du Soleil en infrarouge (λ = 1083 µm). Il a une allure bien différente qu'en visible.

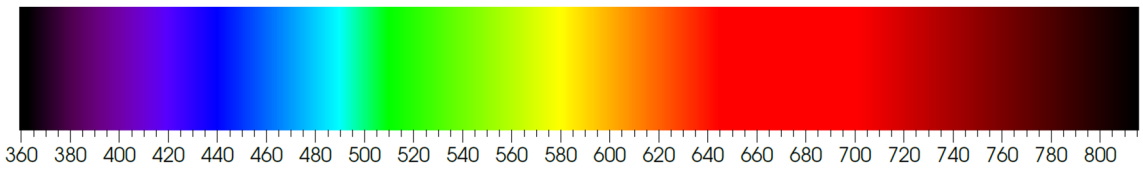
solar.physics.montana.edu/ypop/Spotlight/Today/infrared.html

Le visible

Visible : λ entre 400 nm et 700 nm

(En fait, on peut aller de 380 nm à 750 nm.)

Pour le visible, chaque longueur d'onde correspond à une couleur précise. Voici une image montrant les couleurs en fonction de la longueur d'onde.



Couleur	Longueur d'onde (nm)	Couleur	Longueur d'onde
Rouge	700 à 625	**Vert bleuté**	530 à 492
Orange	625 à 590	**Cyan**	492 à 487
Jaune	590 à 580	**Bleu verdâtre**	487 à 482
Jaune verdâtre	580 à 575	**Bleu**	482 à 465
Vert jaunâtre	575 à 560	**Indigo**	465 à 435
Vert	560 à 530	**Violet**	435 à 400

Évidemment, les limites entre les couleurs sont un peu approximatives.

L'ultraviolet (Ritter 1801)

Ultraviolet : λ entre 10 nm et 400 nm

(Pour les longueurs d'onde inférieures au visible, les limites entre les catégories sont plus floues. Vous verrez que certaines longueurs d'onde sont dans deux catégories.)

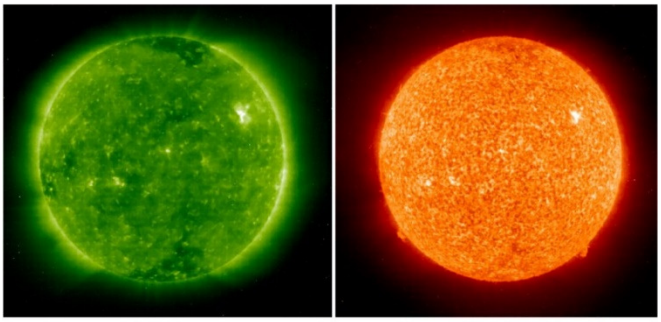
Tout comme les infrarouges et le visible, les ultraviolets sont absorbés par de nombreuses molécules. La mélanine dans la peau absorbe les ultraviolets provenant du Soleil, ce qui donne un beau bronzage. Les molécules de vos vêtements blancs absorbent les ultraviolets des « *blacklights* » dans les bars et les réémettent en visible. Ils semblent alors beaucoup plus lumineux qu'ils devraient l'être selon l'éclairage ambiant.

Encore une fois, on peut faire de la photographie ultraviolette. Il suffit d'avoir une caméra sensible à ces longueurs d'onde (ou une partie de ces longueurs d'onde). Voici un exemple d'image obtenu ainsi. On voit alors apparaitre des éléments qui étaient invisibles en visible.

Visible Ultraviolet

loveplantlife.blogspot.ca/2012/08/a-bees-eye-view-of-flowers.html

Comme toujours, on peut faire de l'astronomie en étudiant le rayonnement ultraviolet. Voici deux images du Soleil en ultraviolet.



19,5 nm 30,4 nm

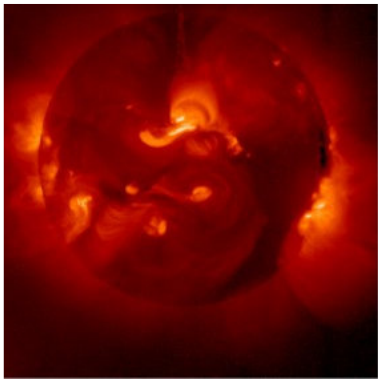
www.thesuntoday.org/the-sun-now/

Les rayons X (Röntgen 1895)

Rayons X : λ entre 0,001 nm et 100 nm

À ces longueurs d'onde, les ondes électromagnétiques ont un pouvoir de pénétration assez important. Ils peuvent donc traverser plusieurs substances avec un degré d'absorption variable selon le matériel. C'est ce qui permet d'obtenir des images comme celle-ci.

lupusadventurebetweenthelines.wordpress.com/2011/03/20/lupus-arthritis-on-a-cloudy-day/



Le Soleil a une allure très différente en rayons X (longueur d'onde entre 0,3 et 4,5 nm pour cette image).

www.thesuntoday.org

La galaxie d'Andromède a aussi une allure bien différente en rayons X.

Visible Rayons X

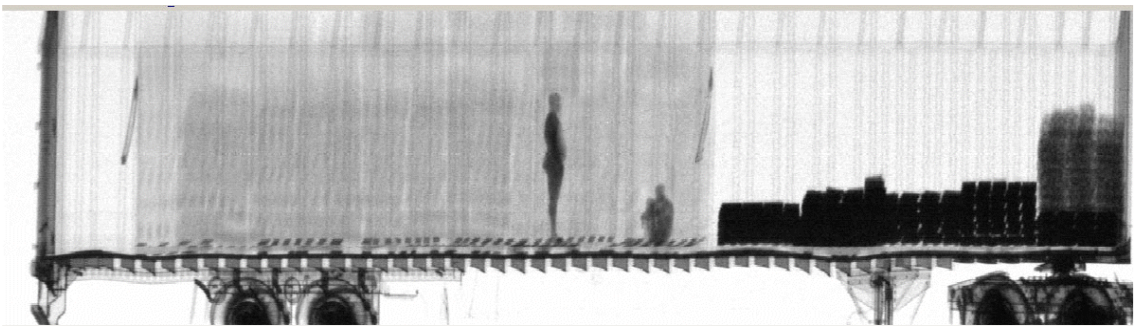
chandra.harvard.edu/photo/2007/m31/

Les rayons gamma (Villard 1900)

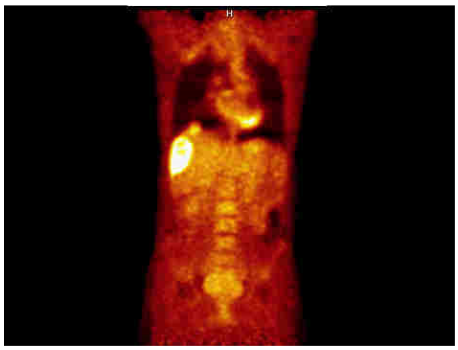
Rayons gamma : λ inférieure à 0,01 nm

Il y a un chevauchement assez important entre les rayons X et les rayons gamma. Traditionnellement, les rayons X sont les ondes de petites longueurs d'onde obtenues lors de transitions atomiques dans les atomes alors que les rayons gamma sont le résultat de désintégrations radioactives. C'est davantage l'origine du rayonnement que la longueur d'onde qui détermine le type d'onde.

À ces longueurs d'onde, les ondes électromagnétiques ont un pouvoir de pénétration encore plus grand. On peut donc en faire une utilisation un peu similaire à ce qu'on faisait avec les rayons X. L'image suivante a été obtenue grâce à des rayons gamma. On a pu ainsi détecter que deux personnes se cachaient dans ce camion.



teachnuclear.ca/contents/cna_radiation/gamma_rays/



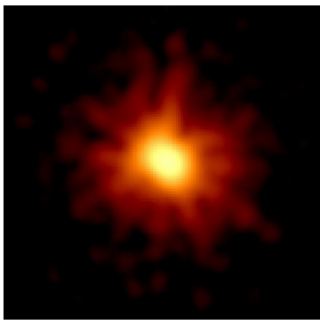
www.nucmedinfo.com/Pages/petbase.html

On utilise aussi les rayons gamma en imagerie médicale. L'image de gauche a été obtenue à l'aide de rayons gamma.

La Terre est constamment bombardée de rayons gamma, qui font alors partie des rayons cosmiques. On a observé dans ces rayons cosmiques des ondes ayant une longueur d'onde aussi petite que 10^{-20} m.

Il existe aussi des *sursauts de rayons gamma*. Ce sont des explosions gigantesques, en fait les plus importantes de l'univers, dont la cause n'est pas certaine pour l'instant. Elle libère jusqu'à environ 10^{44} J, soit environ toute l'énergie que va libérer le Soleil durant sa vie (10 milliards d'années). On reçoit alors des rayons gamma durant quelques dizaines de secondes.

L'image de droite montre un sursaut de rayons gamma visible à l'œil nu durant quelques secondes le 19 mars 2008. L'objet à l'origine de ce sursaut est situé à 10,6 milliards d'année-lumière de la Terre, ce qui veut dire qu'il faudrait 10,6 milliards d'années pour se rendre à cet objet en voyageant à la vitesse de la lumière (si l'univers ne prenait pas d'expansion).



en.wikipedia.org/wiki/GRB_080319B

Note sur les lasers

Les lasers émettent simplement des ondes électromagnétiques qui ne sont pas de nature différente par rapport aux autres ondes électromagnétiques.

La seule différence qui nous intéresse ici est le fait que la lumière d'un laser est monochromatique. L'onde émise par les lasers est une onde électromagnétique ayant une

valeur très précise de la longueur d'onde. Par exemple, les lasers hélium néon émettent une onde ayant une longueur d'onde de 632,8 nm, qui correspond à du rouge. Comme il n'y a qu'une seule couleur, on dit que la lumière est monochromatique. Il est vraiment rare que de la lumière naturelle soit monochromatique. Par exemple, la lumière provenant d'un objet rouge est souvent une superposition de plusieurs ondes sinusoïdales ayant des longueurs d'onde se situant autour de 650 nm plutôt que formée d'une seule onde ayant une longueur d'onde très précise. (En fait, même la lumière des lasers s'étend sur une plage de valeur de longueur d'onde, mais cette plage est très petite.)

Autrement, la lumière d'un laser n'est pas très différente de la lumière ordinaire. Certaines prouesses des lasers pourraient très bien se faire avec de la lumière ordinaire. Par exemple, on utilise des lasers pour couper des plaques de métal, mais on les utilise simplement parce qu'on a réussi à fabriquer des lasers qui émettent une lumière très intense. On pourrait tout aussi bien faire le découpage dans une plaque de métal avec de la lumière ordinaire, il suffirait d'en concentrer suffisamment sur l'endroit où on veut faire la coupe. La lumière des lasers n'a pas de propriétés coupantes ou explosives que la lumière ordinaire n'a pas.

Notez que la lumière générée par les lasers n'est pas nécessairement de la lumière visible. On peut, par exemple, avoir des lasers en micro-ondes (dans ce cas, le laser s'appelle plutôt un maser) ou en infrarouge (comme les lasers dans les lecteurs de CD, qui émettent une lumière ayant une longueur d'onde de 780 nm).

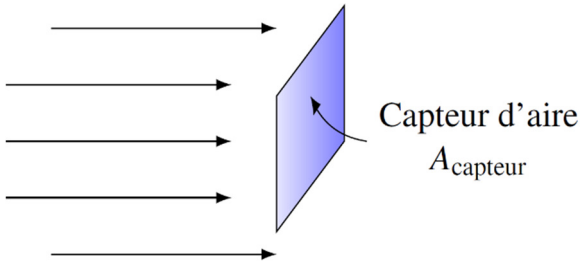
3.4 L'INTENSITÉ

Le son et la lumière sont des ondes se propageant en trois dimensions. Cela entraine une modification dans la façon de mesurer l'énergie par rapport à ce qu'on avait avec l'onde dans une corde, qui est une onde en une dimension. Avec ces ondes en trois dimensions, on travaille plutôt avec l'intensité de l'onde au lieu de travailler avec la puissance.

Définition de l'intensité

Dans le cas de l'onde dans la corde, un capteur situé au bout de la corde reçoit la totalité de la puissance de l'onde, car l'onde n'a pas d'autre place où aller. Pour une onde en trois dimensions, le capteur ne captera qu'une partie de l'onde, car il est possible dans ce cas que le reste de l'onde passe à côté du capteur.

Dans la situation montrée sur la figure de droite, une onde se dirigeant vers la droite arrive sur un capteur ayant une aire $A_{capteur}$.



Évidemment, on captera plus d'énergie si on capte l'énergie de l'onde pendant plus

de temps. La quantité d'énergie captée doit donc être proportionnelle au temps pendant lequel on capte l'énergie.

Aussi, on captera plus d'énergie si l'aire du capteur est plus grande. La quantité d'énergie captée doit donc être proportionnelle à l'aire du capteur.

Finalement, on aura un facteur qui va dépendre de l'énergie de l'onde. On va appeler ce facteur l'*intensité de l'onde*. On capte peu d'énergie avec une onde de faible intensité et beaucoup avec une onde de grande intensité. La quantité d'énergie captée doit donc être proportionnelle à l'intensité de l'onde.

On arrive donc à

$$E_{captée} = IA_{capteur}t$$

où I est l'intensité de l'onde. La puissance est l'énergie divisée par le temps. Ainsi, on pourrait diviser la formule précédente par t pour obtenir une formule de la puissance captée.

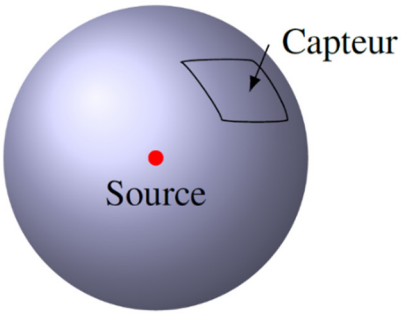
Puissance captée

$$P_{captée} = IA_{capteur}$$

(Cette équation est en fait la définition de l'intensité.) Pour que la puissance captée soit en watts, il faut que les unités de l'intensité soient des W/m².

Intensité à une distance *r* d'une source isotrope

Imaginons qu'on est à une certaine distance r d'une source qui émet une énergie E pendant un temps t. Ici, l'énergie est émise également dans toutes les directions, ce qui signifie qu'on a affaire à une ***source isotrope***. Ainsi, à une certaine distance r, l'énergie émise est distribuée également sur une sphère entourant la source.



À une certaine distance de la source, il y a un capteur ayant une aire $A_{capteur}$. Le capteur ne capte qu'une partie de l'énergie émise par la source. La proportion captée est donnée simplement par le rapport entre l'aire du capteur ($A_{capteur}$) et l'aire totale sur laquelle est répartie la puissance.

$$\frac{E_{captée}}{E} = \frac{A_{capteur}}{A_{sphère}}$$

$$E_{captée} = \frac{E}{A_{sphère}} A_{capteur}$$

$$E_{captée} = \frac{E}{4\pi r^2} A_{capteur}$$

En divisant les deux côtés de cette équation par le temps, on transforme l'énergie en puissance puisque $P = E/t$, on a

$$P_{captée} = \frac{P}{4\pi r^2} A_{capteur}$$

Mais puisque $P_{captée} = IA_{capteur}$, on obtient

Intensité d'une onde émise par une source isotrope

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Cette formule est valide pour les ondes sonores et lumineuses.

Exemple 3.4.1

Une source lumineuse isotrope a une puissance de 100 W.

a) Quelle est l'intensité de l'onde à 120 m de la source ?

L'intensité est

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{4\pi r^2} \\ &= \frac{100W}{4\pi \cdot (120m)^2} \\ &= 5,526\times10^{-4}\ \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

b) Quelle est l'énergie captée en 10 secondes avec un capteur ayant une aire de 2 m² et situé à 120 m de la source ?

L'énergie captée est $E_{captée} = P_{captée}t$. On doit donc connaitre la puissance captée. La puissance captée est

$$\begin{aligned} P_{captée} &= IA_{capteur} \\ &= 5,526\times10^{-4}\ \frac{W}{m^2} \cdot 2m^2 \\ &= 1,1052\times10^{-3}W \end{aligned}$$

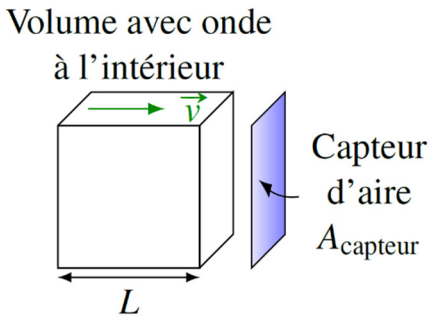
Comme la puissance est l'énergie par unité de temps, l'énergie captée est

$$\begin{aligned} E_{captée} &= P_{captée} t \\ &= 1{,}1052\times10^{-3} W \cdot 10 s \\ &= 0{,}011052 J \end{aligned}$$

Intensité des ondes sonores

L'intensité à partir de l'amplitude de l'onde

Imaginons qu'il y a une onde sonore sinusoïdale qui se déplace vers la droite et qui arrive sur un capteur. On va trouver l'énergie qu'il y a dans un volume imaginaire cubique qui suit l'onde et qui arrivera sur le capteur. Ce cube imaginaire se déplace à la vitesse du son vers le capteur.



À l'intérieur du cube, les molécules font un mouvement harmonique. Cela signifie que l'énergie d'une molécule est

$$E_{1\,molécule} = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2$$

Si on fait la somme des énergies des molécules dans le cube, on trouve que l'énergie totale captée est

$$\begin{aligned} E_{captée} &= \sum \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \\ &= \frac{1}{2}\left(\sum m\right)\omega^2 A^2 \\ &= \frac{1}{2} m_{totale}\omega^2 A^2 \end{aligned}$$

On a pu mettre la fréquence angulaire et l'amplitude en évidence, car on suppose que l'onde a la même fréquence et la même amplitude partout dans le cube. On peut ensuite utiliser la masse volumique du milieu (ρ) pour arriver à

$$\begin{aligned} E_{captée} &= \frac{1}{2}\rho\left(Volume\right)\omega^2 A^2 \\ &= \frac{1}{2}\rho L A_{capteur}\omega^2 A^2 \end{aligned}$$

Comme l'énergie captée est aussi $E_{captée} = IA_{capteur}t$, on a

$$IA_{capteur}t = \frac{1}{2}\rho L A_{capteur}\omega^2 A^2$$

$$It = \frac{1}{2}\rho L\omega^2 A^2$$

Reste à trouver le temps qu'il faudra pour capter l'onde. On commence à capter l'onde quand le devant du cube arrive au capteur et la captation se termine quand le derrière du cube arrive au capteur. Le temps de captation correspond donc au temps qu'il faut pour que le derrière du cube arrive au capteur. Comme le derrière du cube est à une distance L et qu'il se déplace à la vitesse v, il faudra le temps L/v pour qu'il arrive. On a donc

$$It = \frac{1}{2}\rho L\omega^2 A^2$$
$$I\frac{L}{v} = \frac{1}{2}\rho L\omega^2 A^2$$

En isolant I, on arrive à

$$I = \frac{1}{2}\rho v\omega^2 A^2$$

L'impédance

Encore une fois, la partie de cette formule qui ne dépend que du milieu (soit la masse volumique ρ et la vitesse v) est l'impédance du milieu.

Impédance du milieu pour les ondes sonores

$$Z = \rho v$$

Les unités de l'impédance sont des kg/m² s ou des Ns/m³. Cette combinaison d'unités est parfois appelée rayl.

Ainsi, la formule de l'intensité de l'onde sonore est donnée par la formule suivante.

Intensité d'une onde sonore

$$I = \frac{1}{2}\rho v\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}Z\omega^2 A^2$$

Exemple 3.4.2

Quelle est l'amplitude d'oscillation des molécules d'air quand une onde sonore de 500 Hz et ayant une intensité de 0,01 W/m² passe dans l'air ? (La densité de l'air est de 1,29 kg/m³ et la vitesse du son est de 340 m/s.)

On trouve l'amplitude avec la formule de l'intensité.

$$I = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 A^2$$

$$0,01\,\tfrac{W}{m^2} = \frac{1}{2}\cdot 1,29\,\tfrac{kg}{m^3}\cdot 340\,\tfrac{m}{s}\cdot\left(2\pi\cdot 500Hz\right)^2\cdot A^2$$

$$A = 2,149\times 10^{-6}\,m$$

$$A = 2,149\,\mu m$$

Les décibels

L'oreille humaine peut capter des sons dont l'intensité est au minimum de 10^{-12} W/m². Si le son a une intensité plus petite que cette valeur, on n'entend pas le son. À l'autre extrême, le son devient trop intense si son intensité dépasse 1 W/m² (approximativement). C'est le seuil de la douleur.

L'oreille, comme les autres sens d'ailleurs, ne réagit pas de façon linéaire. C'est-à-dire que si le son A est deux fois plus intense que le son B, on ne va pas du tout percevoir que le B est deux fois plus fort. On a donc inventé une échelle d'intensité qui correspond davantage à ce qui est perçu. C'est l'échelle des décibels. On calcule l'intensité en décibel avec la formule suivante.

Intensité du son en décibels

$$\beta = 10dB\cdot\log\frac{I}{10^{-12}\,\frac{W}{m^2}}$$

La perception du son suit la règle suivante : le son paraitra 2 fois plus fort si vous augmentez l'intensité de 10 dB. Dans la démonstration suivante, le son baisse 15 fois de 3 décibels.
http://physique.merici.ca/ondes/sons/Thedecibelscale.mp3

Voici un tableau montrant des intensités typiques pour le son.

	Intensité (I)	**Intensité (β)**
Intensité minimale	10^{-12} W/m²	0 dB
murmure	10^{-10} W/m²	20 dB
Conversation (à 50 cm)	10^{-6} W/m²	60 dB
Intérieur d'une auto à 75 km/h	10^{-5} W/m²	70 dB
Seuil de la douleur	1 W/m²	120 dB
Avion à réaction à 20 m	10 W/m²	130 dB

Exemple 3.4.3

Une personne qui crie à 100 m de distance fait un son d'une intensité de 55 dB. Quelle sera l'intensité si 20 000 personnes à 100 m de distance font un cri identique ?

Il ne faut jamais additionner les intensités en décibels. Ce sont les intensités en W/m² qu'il faut additionner. L'intensité faite par une personne est

$$\beta = 10dB \cdot \log \frac{I}{10^{-12}\ \frac{W}{m^2}}$$

$$55dB = 10dB \cdot \log \frac{I}{10^{-12}\ \frac{W}{m^2}}$$

$$I = 3{,}1623 \times 10^{-7}\ \frac{W}{m^2}$$

L'intensité faite par 20 000 personnes est donc

$$I = 20000 \cdot 3{,}1623 \times 10^{-7}\ \frac{W}{m^2}$$

$$= 6{,}3246 \times 10^{-3}\ \frac{W}{m^2}$$

Ce qui donne une intensité en décibel de

$$\beta = 10dB \cdot \log \frac{I}{10^{-12}\ \frac{W}{m^2}}$$

$$= 10dB \cdot \log \frac{6{,}3246 \times 10^{-3}\ \frac{W}{m^2}}{10^{-12}\ \frac{W}{m^2}}$$

$$= 98{,}01dB$$

La différence d'intensité est donc de 43 dB. Ceci correspond à ajouter 4,3 fois 10 décibels. Le son avec 20 000 personnes paraitra donc $2^{4,3}$ = 19,7 fois plus fort que le son avec une seule personne. On voit bien que l'oreille n'a pas de réponse linéaire au son. Si c'était le cas, le son aurait sembler 20 000 fois plus fort.

Exemple 3.4.4

Une source isotrope fait un son ayant une intensité de 100 dB à 50 m de distance. Quelle est l'intensité du son (en décibels) à 1 km de distance ?

Sachant que la source fait un son de 100 dB à 50 m, on peut trouver la puissance de la source. Avec cette puissance, on pourra ensuite trouver l'intensité à 1 km de distance.

L'intensité est

$$\beta = 10dB \cdot \log \frac{I}{10^{-12}\ \frac{W}{m^2}}$$

$$100dB = 10dB \cdot \log \frac{I}{10^{-12}\ \frac{W}{m^2}}$$

$$I = 0{,}01\ \frac{W}{m^2}$$

et la puissance est donc

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

$$0,01 \frac{W}{m^2} = \frac{P}{4\pi (50m)^2}$$

$$P = 314,16W$$

À 1000 m de distance, l'intensité est

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

$$= \frac{314,16W}{4\pi (1000m)^2}$$

$$= 2,5 \times 10^{-5} \frac{W}{m^2}$$

Ce qui donne

$$\beta = 10dB \cdot \log \frac{I}{10^{-12} \frac{W}{m^2}}$$

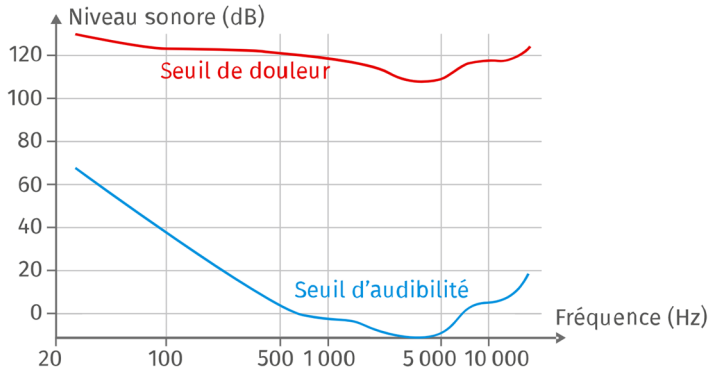
$$= 10dB \cdot \log \frac{2,5 \times 10^{-5} \frac{W}{m^2}}{10^{-12} \frac{W}{m^2}}$$

$$= 74dB$$

Deux petites remarques :

1- Un son de 0 dB à 1000 Hz a une amplitude de 10^{-11} m. On perçoit (à peine) ce son et l'amplitude de mouvement de molécule d'air est plus petite que la taille de l'atome d'hydrogène ! On peut dire que l'oreille humaine est pas mal sensible.

2- En réalité, les niveaux d'intensité en décibels sont beaucoup plus complexes que ce qui a été montré ici. Le graphique suivant montre les seuils d'audibilité et de douleur selon la fréquence.



www.lelivrescolaire.fr/page/6225300

L'intensité de la lumière

Nous verrons dans le cours d'électromagnétisme que la formule de l'intensité des ondes lumineuses est

Intensité de la lumière

$$I = \frac{1}{2} cn\varepsilon_0 E_0^2$$

où c est la vitesse de la lumière, n est l'indice de réfraction du milieu et ε_0 est une constante qui vaut 8,854 x 10^{-12} C²/Nm².

À partir de là, on pourrait définir l'impédance du milieu pour une onde électromagnétique, qui, si elle est composée des parties qui dépendent uniquement du milieu dans la formule de l'intensité, devrait être $Z = cn\varepsilon_0$. Toutefois, il y a quelques subtilités (qu'on ne donnera pas ici) qui proviennent du fait que cette onde est formée de champ électrique et de champ magnétique et que l'impédance est en fait associée au champ magnétique et non pas au champ électrique. Cela fait en sorte que l'impédance est plutôt donnée par $Z = 1/cn\varepsilon_0$. Ainsi, dans le vide, l'impédance est de 376,7 Ω.

Énergie captée par l'œil

On a vu que l'œil ne capte pas toutes les longueurs d'onde de la lumière. Même dans la partie visible du spectre, la sensibilité n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde. L'intensité perçue par l'œil humain se mesure en lux (symbole lx). On parle alors d'*éclairement lumineux*. Le nombre de lux se calcule en multipliant l'intensité de la lumière par un facteur qui dépend de la longueur d'onde. Voici ce facteur pour quelques longueurs d'onde.

Longueur d'onde	Facteur	Longueur d'onde	Facteur
375 nm	0,015	575 nm	625
400 nm	0,026	600 nm	431
425 nm	4,99	625 nm	216
450 nm	26,0	650 nm	73,1
475 nm	78,9	675 nm	15,8
500 nm	220	700 nm	2,80
525 nm	542	725 nm	0,505
550 nm	680	750 nm	0,0820

(Ce sont les valeurs pour la vision de jours pour un champ de vision de 2°. Il y a beaucoup de subtilités dans ces conversions…)

Ainsi, une onde lumineuse ayant une intensité de 1 W/m² et une longueur d'onde de 500 nm donnera une lumière ayant un éclairement de 220 lux.

Voyons maintenant ce que représentent quelques valeurs d'éclairement lumineux.

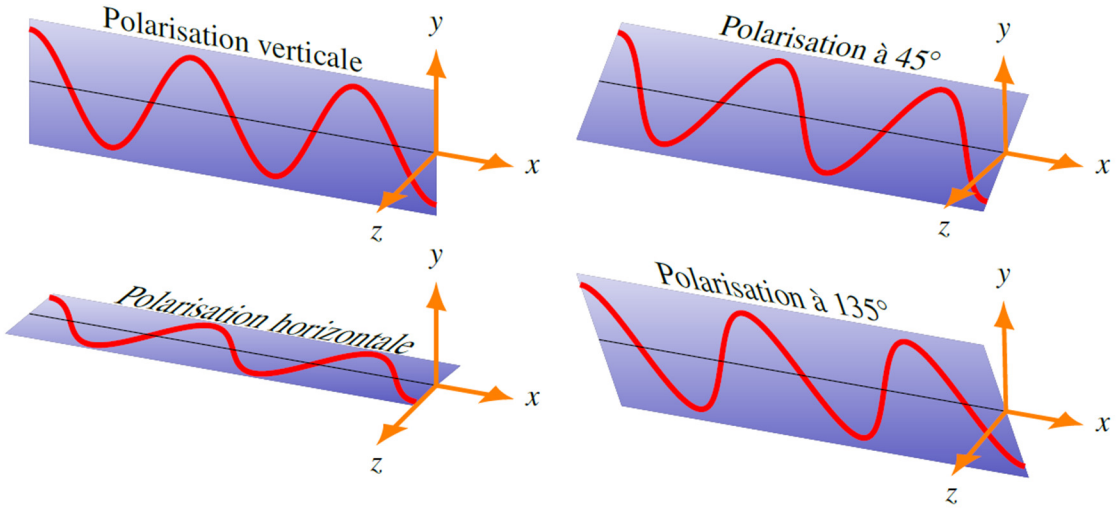
	Éclairement lumineux
Sensibilité d'une caméra	0,001 lx
Nuit de pleine lune	0,5 lx
Rue de nuit bien éclairée	20 à 70 lx
Appartement bien éclairé	200 à 400 lx
Local de travail	200 à 3000 lx
Extérieur par ciel couvert	500 à 25 000 lx
Extérieur en plein soleil	50 000 à 100 000 lx

Notez qu'en multipliant le nombre de lux par la surface du capteur, on obtient le flux lumineux, qui se mesure en lumen (symbole lm).

3.5 LA POLARISATION DE LA LUMIÈRE

La direction d'oscillation du champ électrique

Puisque la lumière est une onde transversale, il y a plusieurs directions possibles pour le champ électrique. Quand on change la direction d'oscillation, on dit qu'on change la polarisation de la lumière. On peut voir sur l'image suivante différentes directions possibles pour la direction du champ électrique.

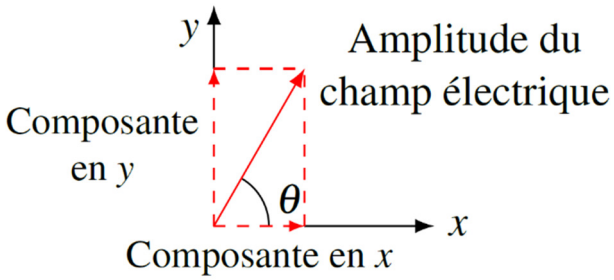


Dans tous les cas, l'oscillation est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, ce qu'on doit avoir pour l'onde transversale.

Notez qu'il n'y a pas ces différentes possibilités pour le son puisque c'est une onde longitudinale. Avec une onde longitudinale, il n'y a qu'une seule direction d'oscillation possible.

Séparation en deux composantes principales

Il y a une infinité de directions d'oscillation possibles. Doit-on examiner toutes ces possibilités ? Bien sûr que non. On peut travailler avec deux directions de polarisation principales (par exemple horizontale et verticale) et séparer toutes les autres directions en composantes. Par exemple, une polarisation à 45° peut être décomposée en une moitié de polarisation horizontale et une moitié de polarisation verticale. Il suffit donc de connaitre comment vont agir les polarisations selon nos axes choisis, les autres étant une combinaison de ces deux polarisations.



On peut assez facilement séparer l'onde en ses deux composantes selon les axes choisis. Les composantes sont

$$E_{0x} = E_0 \cos\theta$$
$$E_{0y} = E_0 \sin\theta$$

où E_0 est l'amplitude de l'onde, E_{0x} est l'amplitude de la composante en x, E_{0y} est l'amplitude de la composante en y et θ est l'angle entre la direction de la polarisation et l'axe des x. Notez qu'on pourrait tourner ces axes selon les conditions. On doit cependant toujours avoir des axes perpendiculaires l'un à l'autre.

Lumière polarisée et non polarisée

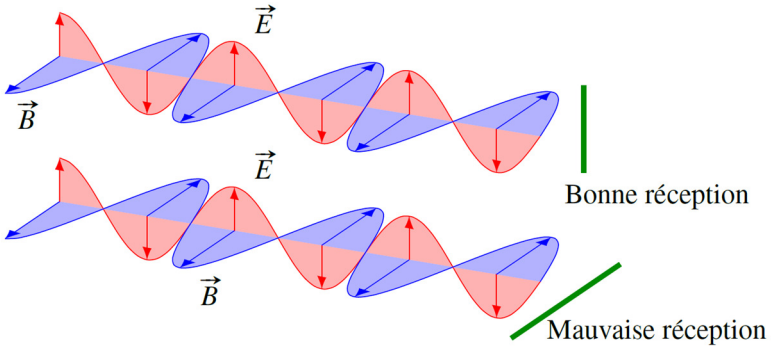
On dit que la lumière est polarisée si l'oscillation du champ se fait dans une seule direction. Généralement, la lumière est composée de plusieurs ondes superposées et dans la lumière polarisée, toutes ces ondes ont la même direction d'oscillation.

Dans la lumière non polarisée, les différentes ondes qui se superposent dans un faisceau lumineux ont différentes directions d'oscillation. C'est en fait une superposition de toutes les directions d'oscillation possibles avec une quantité égale pour chaque direction. Dans la très grande majorité des cas, les sources lumineuses que vous connaissez émettent de la lumière non polarisée. Par exemple, la lumière du Soleil et la lumière émise par des ampoules ne sont pas polarisées. Par contre, la lumière émise par un laser pourrait être polarisée.

Dans la lumière partiellement polarisée, toutes les directions d'oscillations sont présentes, mais il y a une des polarisations qui est plus intense que les autres.

Polarisation des ondes radio et micro-ondes

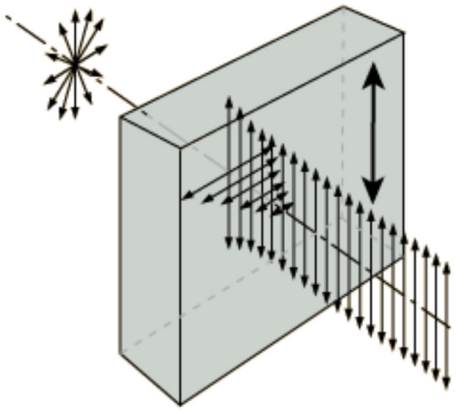
Toutes les ondes électromagnétiques peuvent être polarisées. Les ondes servant aux télécommunications sont très souvent polarisées et, si on veut les capter avec une antenne en forme de tige, on doit orienter l'antenne dans le sens de la direction de l'oscillation du champ électrique pour obtenir une bonne réception.



Avec la bonne orientation, le champ électrique oscille dans le même sens que l'antenne. Le champ électrique pourra alors déplacer les charges dans la direction de l'antenne et faire un courant dans l'antenne.

Les polariseurs

On peut polariser la lumière avec un filtre qui absorbe la polarisation dans une direction et laisse passer la polarisation dans une autre direction. Ce filtre est un *polariseur*. Par exemple, dans l'image suivante, de la lumière non polarisée arrive sur un tel filtre. On représente souvent cette lumière non polarisée avec plusieurs flèches dirigées dans des directions perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde pour montrer qu'elle est une superposition de toutes les directions d'oscillation transversale possibles. Ce polariseur laisse passer la lumière polarisée dans la direction verticale. On indique cela par la grosse double flèche sur le filtre qui montre la direction de polarisation qui pourra passer. Cette direction est l'axe de polarisation du polariseur. Par contre, toutes les polarisations perpendiculaires à l'axe de polarisation du polariseur sont absorbées. Quand la lumière sort de ce polariseur, il ne reste qu'une seule polarisation et on a maintenant de la lumière polarisée dans la direction de l'axe de polarisation du polariseur.



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polabs.html

Les polariseurs sont composés d'une matière faite de très longues molécules tout alignées dans la même direction. Ces molécules absorbent la lumière qui oscille dans une direction, mais elles ne peuvent pas absorber la lumière qui oscille dans l'autre direction. On a découvert ce genre de filtre en 1928.

Lumière non polarisée arrivant sur un filtre

On peut toujours séparer la lumière en deux polarisations principales, qu'elle soit polarisée ou non. Dans le cas de la lumière non polarisée, les deux composantes ont exactement la même amplitude. On peut choisir un axe dans la direction de l'axe de polarisation du filtre et un axe perpendiculaire à l'axe de polarisation du filtre. Quand la lumière va passer dans le filtre, la composante perpendiculaire va disparaitre et il ne restera que la composante parallèle. On aura ainsi perdu la moitié de la lumière et l'intensité de la lumière sera donc divisée par deux à la sortie du filtre. On a donc

Lumière non polarisée passant dans un filtre polarisant

La lumière est maintenant polarisée dans la direction de l'axe de polarisation du filtre.

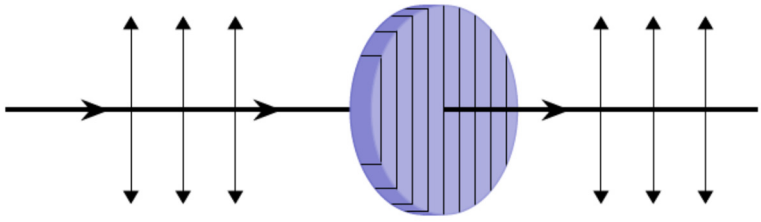
$$I = \frac{I_0}{2}$$

où I_0 est l'intensité de la lumière avant le passage dans le filtre.

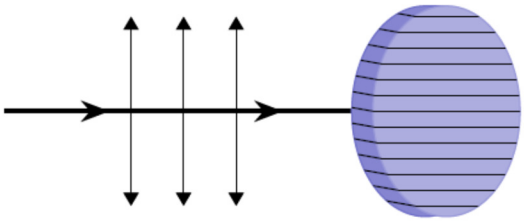
Lumière polarisée arrivant sur un filtre

On pourrait penser que rien ne va changer si on fait passer de la lumière polarisée dans un filtre polarisant parce que la lumière est déjà polarisée. Ce n'est pas nécessairement vrai puisque la direction de l'axe de polarisation du filtre peut être différente de la direction de polarisation de la lumière.

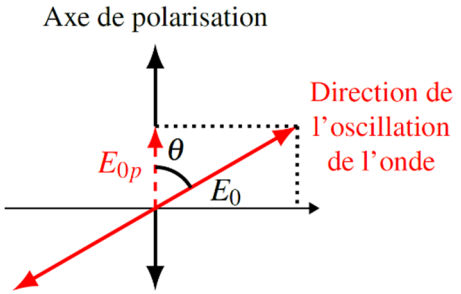
Si l'axe du filtre et la direction de la polarisation sont parallèles, alors c'est vrai que toute la lumière passera à travers le filtre.



Si, par contre, l'axe est perpendiculaire à la direction de la polarisation, aucune lumière ne va passer.



L'axe du polariseur peut en fait faire n'importe quel angle avec la direction de polarisation. Pour connaitre la proportion de lumière qui passera alors, il faut séparer la lumière en deux composantes : une composante parallèle à l'axe et une composante perpendiculaire à l'axe. Seule la composante parallèle va passer.



Si l'angle entre l'axe de polarisation du filtre et la direction de la polarisation est θ, alors l'amplitude de la composante du champ parallèle à l'axe de polarisation est

$$E_{0p} = E_0 \cos\theta$$

Ainsi, l'intensité initiale de la lumière est

$$I_0 = \frac{1}{2} cn\varepsilon_0 E_0^2$$

et l'intensité de la lumière de la composante parallèle à l'axe est

$$I = \frac{1}{2} cn\varepsilon_0 \left(E_0 \cos\theta\right)^2$$

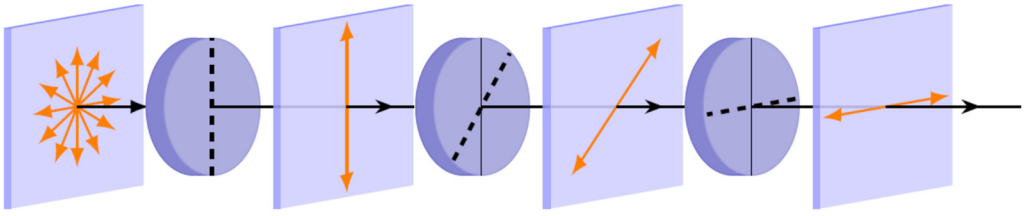
En divisant l'une par l'autre, on a

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\frac{1}{2} cn\varepsilon_0 \left(E_0 \cos\theta\right)^2}{\frac{1}{2} cn\varepsilon_0 \left(E_0\right)^2}$$

et on arrive à

$$I = I_0 \cos^2\theta$$

De plus, comme le filtre ne laisse passer que la composante de la lumière dans le sens de l'axe de polarisation, la lumière qui sort du polariseur est polarisée dans la direction de l'axe du polariseur. Sur la figure suivante, on peut voir que la direction de la polarisation est toujours la même que celle de l'axe de polarisation du dernier polariseur traversé.



On peut alors résumer ce qui se passe quand la lumière traverse un filtre polarisant. (C'est la loi de Malus.)

Lumière polarisée passant dans un filtre polarisant

La lumière est maintenant polarisée dans la direction de l'axe de polarisation du filtre.

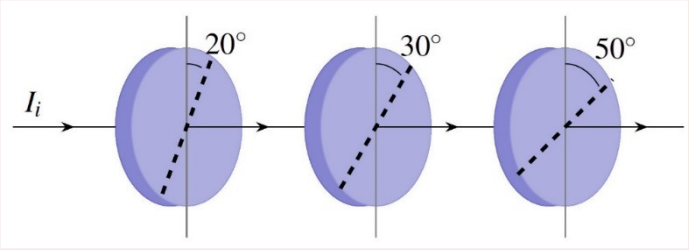
$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

où I_0 est l'intensité de la lumière avant le passage dans le filtre.

Ainsi, si l'angle est nul entre les axes, toute la lumière passe. Si l'angle est de 90°, il n'y a plus rien qui passe. C'est ce que vous explique Grandpa John
http://www.youtube.com/watch?v=QgA6L2n476Y
et le département de physique et d'astronomie de l'université de Californie.
http://www.youtube.com/watch?v=E9qpbt0v5Hw

Dans ce vidéo, on en fait un beau tour de magie.
http://www.youtube.com/watch?v=9flduws7EsQ

Exemple 3.5.1



De la lumière non polarisée ayant une intensité initiale I_i passe à travers 3 polariseurs dont les axes sont orientés tels qu'illustrés sur la figure. Quel pourcentage de lumière reste-t-il après que la lumière ait traversé les trois polariseurs ?

Premier polariseur

De la lumière non polarisée arrive sur le polariseur. L'intensité de la lumière après le passage à travers le polariseur est donc

$$I = \frac{I_i}{2} = 0{,}5 I_i$$

La lumière est maintenant polarisée dans la direction de l'axe du polariseur, donc dans une direction faisant 20° avec la verticale.

Deuxième polariseur

De la lumière polarisée arrive sur le polariseur. L'angle entre l'axe du polariseur (30°) et la direction de polarisation de la lumière (20°) est 30° - 20° = 10°. L'intensité de la lumière après le passage à travers le polariseur est donc

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$
$$= 0,5 I_i \cdot \cos^2 10°$$
$$= 0,485 I_i$$

La lumière est maintenant polarisée dans la direction de l'axe du polariseur, donc dans une direction faisant 30° avec la verticale.

Troisième polariseur

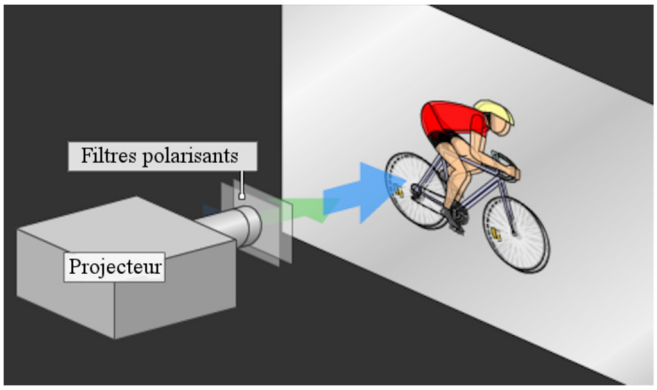
De la lumière polarisée arrive sur le polariseur. L'angle entre l'axe du polariseur (50°) et la direction de polarisation de la lumière (30°) est 50° - 30° = 20°. L'intensité de la lumière après le passage à travers le polariseur est donc

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$
$$= 0,485 I_i \cdot \cos^2 20°$$
$$= 0,428 I_i$$

Il ne reste donc que 42,8 % de l'intensité de la lumière initiale.

Le cinéma en trois dimensions

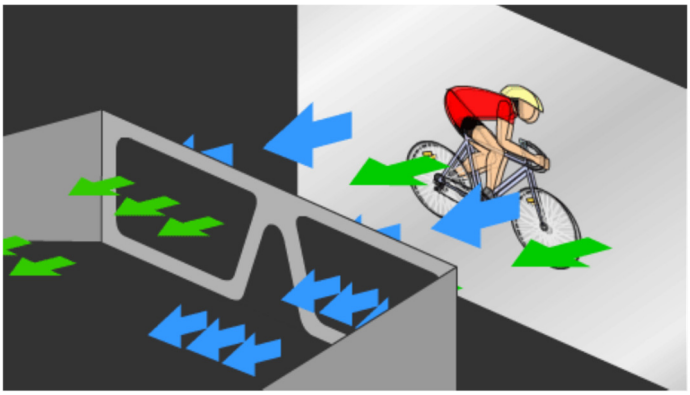
Pour obtenir une image en trois dimensions, il faut que l'image reçue par chacun des deux yeux soit légèrement différente. Quand on regarde une image projetée sur un écran, les deux yeux voient la même image et tous les éléments de l'image semblent être à la même distance. Pour que chaque œil capte une image différente, on projette sur l'écran deux images. Pour y arriver, on peut utiliser la polarisation. Une image est en lumière polarisée verticalement et l'autre image est en lumière polarisée horizontalement. Deux filtres polarisants (vertical et horizontal) alternent devant le projecteur pour polariser les deux images sur l'écran.



news.bbc.co.uk/2/hi/entertainment/7976385.stm

Pour qu'une seule de ces images se rende à un seul œil, on utilise des lunettes munies de polariseurs. Pour un œil, l'axe du polariseur est vertical et seule l'image polarisée verticalement peut se rendre à cet œil. Pour l'autre œil, l'axe de polariseur est horizontal

et, ainsi, seule l'image polarisée horizontalement peut se rendre à cet œil. Chaque œil reçoit ainsi une image différente.



news.bbc.co.uk/2/hi/entertainment/7976385.stm

Le principe expliqué ici est effectivement celui utilisé anciennement. Les lunettes ressemblaient alors à celles de la figure de droite.

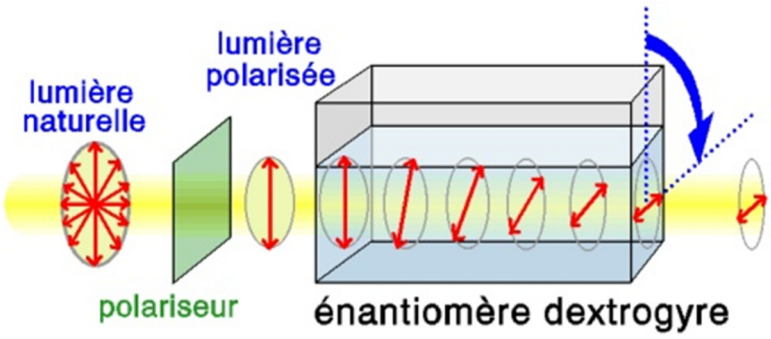
tpe3d-2013.e-monsite.com/pages/3d-polarisundefinede.html

Maintenant, on utilise plutôt de la lumière polarisée circulairement. Les lunettes ressemblent alors plutôt à celles de l'image de gauche. On n'expliquera pas ici ce qu'est la polarisation circulaire, mais le principe est passablement identique.

michaelaisms.wordpress.com/category/3-d-glasses/

L'activité optique

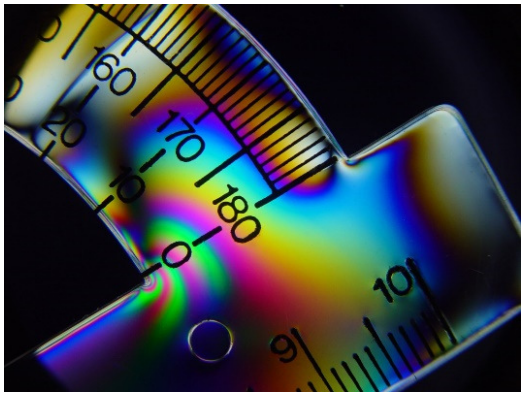
Certaines molécules en solution peuvent faire tourner la direction de polarisation de la lumière polarisée. Cette capacité à faire tourner le plan de polarisation s'appelle **l'*activité optique*** et les molécules qui peuvent faire tourner la direction sont des ***énantiomères***. Dans la figure, une substance en solution a fait tourner la direction de polarisation vers la droite quand on regarde la lumière se diriger vers nous. C'est donc qu'un énantiomère dextrogyre a été utilisé. Si la direction tourne vers la gauche, on a utilisé un énantiomère lévogyre.



158.64.21.3/chemistry/stuff1/EX1/notions/optique.htm

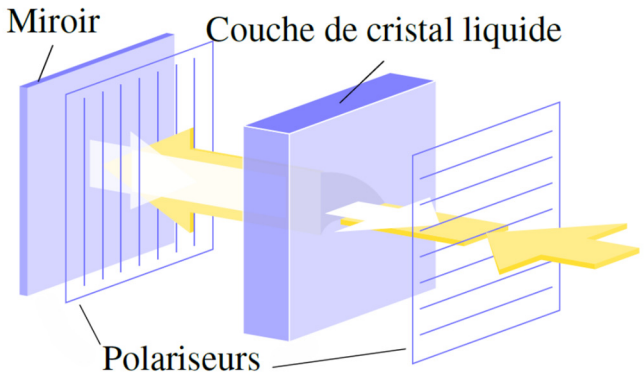
Comme l'angle de rotation dépend de la concentration de la substance, on peut se servir de la valeur de l'angle de rotation pour déterminer la concentration de l'énantiomère.
Voici une démonstration avec des sucres.
http://www.youtube.com/watch?v=GchTURvBz68

L'activité optique de certaines substances transparentes dépend de la tension dans l'objet et de la longueur d'onde de la lumière passant à travers l'objet. Quand on fait passer de la lumière blanche polarisée à travers ces objets et qu'on regarde le tout à travers un filtre polarisant, on peut carrément voir les zones de tensions dans l'objet.

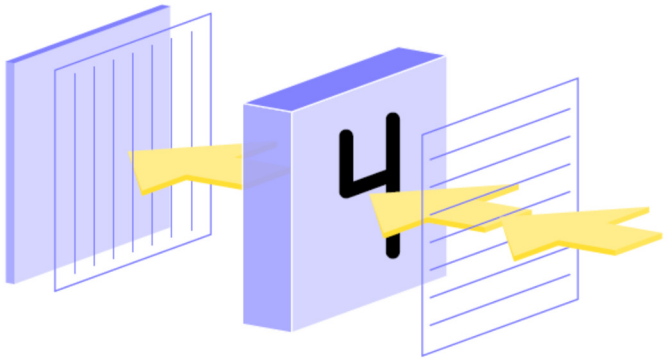


en.wikipedia.org/wiki/Photoelasticity

L'activité optique est aussi à la base du fonctionnement des affichages à cristaux liquides. Pour faire cet affichage, on place une couche de cristal liquide entre deux polariseurs croisés (qui ont des axes perpendiculaires l'un par rapport à l'autre). En l'absence de champ électrique, les cristaux liquides ont une activité optique. On a utilisé exactement la bonne épaisseur pour que la direction de polarisation tourne de 90°. Ainsi quand la lumière arrive à l'autre polariseur, elle peut passer. La lumière est ensuite réfléchie sur un miroir, repasse dans le polariseur, dans la couche qui refait tourner le plan de polarisation de 90°, et dans l'autre polariseur. Puisque la lumière peut ressortir, l'affichage est alors plutôt blanc.



Quand on applique un champ électrique, les cristaux liquides n'ont plus d'activité optique. Ainsi, la direction de polarisation de la lumière polarisée qui traverse la couche de cristal liquide n'est plus tournée de 90° et la lumière est donc bloquée par le polariseur situé de l'autre côté de la couche. Il n'y aura donc pas de lumière qui va se rendre au miroir et, ainsi, il n'y aura pas de lumière réfléchie. L'affichage sera donc noir.



Ainsi, l'image qui sort d'un affichage à cristaux liquides est polarisée. Vous pouvez facilement constater cela en regardant ces écrans avec des lunettes polarisées et en tournant la tête. Vous verrez alors l'intensité changer selon l'orientation des lunettes par rapport à l'écran.

Ce vidéo montre bien que la lumière des écrans LCD est effectivement polarisée alors que celle des anciens écrans à tube ne l'était pas.
http://www.youtube.com/watch?v=GwzUMEuGZHs

3.6 L'EFFET DOPPLER

Quand une source d'ondes sonores se déplace, on observe que la fréquence du son entendu est différente du son qu'on entendrait si la source est immobile. Quand la source se dirige vers l'observateur, le son devient plus aigu (fréquence plus élevée) et quand la source s'éloigne, le son devient plus grave (fréquence plus basse). Voici quelques démonstrations de ce phénomène.
http://www.youtube.com/watch?v=imoxDcn2Sgo
https://www.youtube.com/watch?v=iOB6-hs-tME

Il y a également un changement de fréquence si l'observateur est en mouvement et la source est immobile. Le son est plus aigu quand on se dirige vers la source et plus grave quand on s'éloigne de la source.
http://www.youtube.com/watch?v=6-AIiJxFXFw

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

Formule du changement de fréquence en une dimension

On va commencer par obtenir la formule du changement de fréquence si la source et l'observateur sont limités à des mouvements en une dimension.

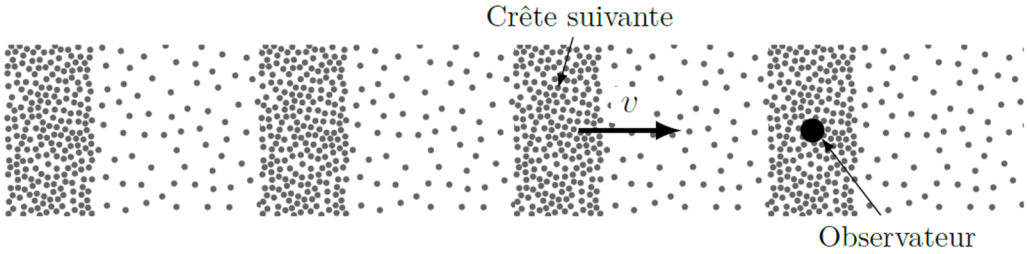
(On pourrait inverser les directions de chaque vitesse.)

On utilisera la notation suivante.

> f' et T' sont la fréquence et la période de l'onde reçue quand la source ou l'observateur se déplacent.

f et *T* sont la fréquence et la période de l'onde reçue quand la source ou l'observateur ne se déplacent pas.

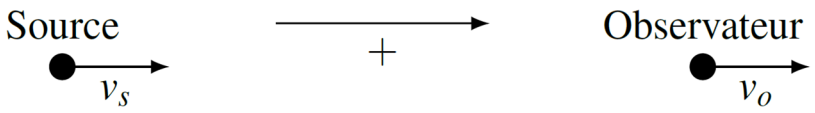
Pour calculer la période de l'onde reçue par l'observateur quand la source et l'observateur sont en mouvement (*T'*), on va trouver combien il faudra de temps pour que la crête suivante de l'onde arrive quand l'observateur est en train de recevoir une crête.



Comme il y a trois vitesses en jeux, nous utiliserons la notation suivante :

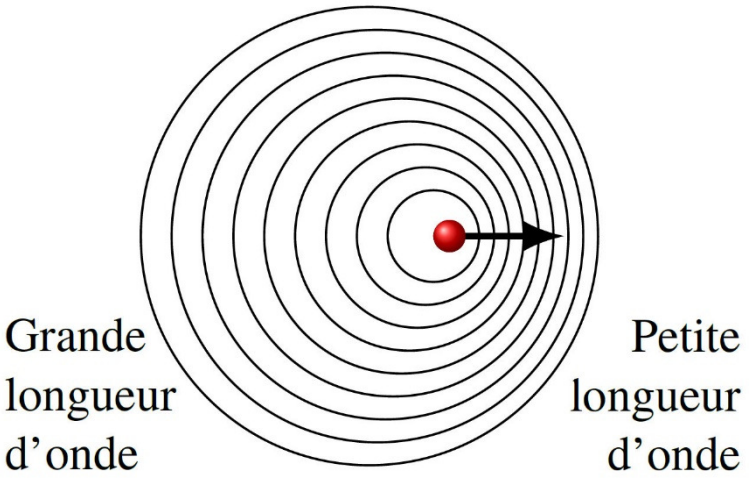
v = vitesse de l'onde
v_s = vitesse de la source
v_o = vitesse de l'observateur

Le signe des vitesses de la source et de l'observateur se détermine avec la convention de signe suivante : Le sens positif va de la source vers l'observateur.

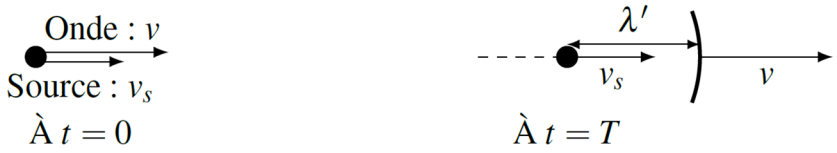


Changement de longueur d'onde dû au mouvement de la source

Examinons maintenant comment change la longueur d'onde quand la source se déplace. Dans l'animation suivante, on montre l'onde émise par la source.
http://www.youtube.com/watch?v=Gz8JxhosvW8
On voit les crêtes de l'onde qui se propagent à partir de la source. On voit très bien que le mouvement de la source fait changer la longueur d'onde de l'onde. Du côté où on voit la source s'approcher, la longueur d'onde est plus petite et du côté où on voit la source s'éloigner, la longueur d'onde est plus grande.



Prenons la situation suivante : la source a émis une crête à $t = 0$. Au temps T plus tard, la source émet de nouveau une crête puisqu'elle émet une crête à toutes les périodes. Pour connaitre la longueur d'onde λ', il faut connaitre la distance entre les crêtes, donc la distance entre la crête émise à $t = 0$ et la source quand elle émet la crête suivante au temps T.



Entre $t = 0$ et $t = T$, la première crête, qui va à vitesse v, s'est déplacée de

$$D_{crête} = vT$$

Entre $t = 0$ et $t = T$, la source, qui va à vitesse v_s, s'est déplacée de

$$D_{source} = v_s T$$

L'écart entre les deux, qui est la nouvelle longueur d'onde, est

$$\lambda' = vT - v_s T$$

$$\lambda' = vT\left(1 - \frac{v_s}{v}\right)$$

Si la source ne se déplaçait pas, vT aurait été la longueur d'onde λ, on a alors

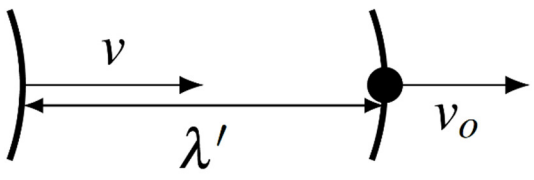
Effet Doppler : Changement de longueur d'onde

$$\lambda' = \lambda\left(1 - \frac{v_s}{v}\right)$$

Effet dû au mouvement de l'observateur

On peut voir dans l'animation suivante que la période diminue quand l'observateur se dirige vers la source et qu'elle augmente quand il s'éloigne de la source.
http://www.youtube.com/watch?v=4mUjM1qMaa8

Pour trouver le changement de période, prenons la situation suivante : un observateur reçoit une crête de l'onde à $t = 0$. On doit calculer combien il faudra de temps avant que la crête suivante, qui est à une distance de λ' si on tient compte du mouvement de la source, arrive à l'observateur si celui-ci se déplace.



Le temps nécessaire pour que la crête rattrape l'observateur, qui est la nouvelle période T', est

$$T' = \frac{\lambda'}{v - v_o}$$

Ce qui nous donne, en utilisant la formule de λ' (pas celle de l'encadré, mais celle juste avant)

$$T' = \frac{vT\left(1 - \frac{v_s}{v}\right)}{v - v_o}$$

$$T' = T\frac{v - v_s}{v - v_o}$$

Le changement de fréquence est donc

$$f' = \frac{1}{T'}$$

$$= \frac{1}{T\left(\frac{v - v_s}{v - v_0}\right)}$$

Cela nous donne

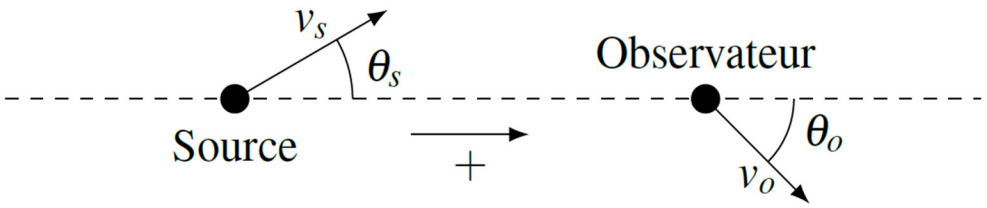
Effet Doppler : Changement de fréquence

$$f' = f\frac{v - v_0}{v - v_s}$$

Convention de signe pour les vitesses dans cette formule : **le sens positif va de la source vers l'observateur**.

En plusieurs dimensions

En deux ou trois dimensions, les vitesses peuvent avoir n'importe quelle direction, comme sur cette figure.



Seules les composantes des vitesses dans la direction de la ligne pointillée peuvent changer la fréquence. Comme les composantes de ces vitesses sont v cos θ, la fréquence est

Effet Doppler en 2 ou 3 dimensions : Changement de fréquence

$$f' = f\,\frac{v - v_0\cos\theta_0}{v - v_s\cos\theta_s}$$

L'angle est toujours l'angle entre la vitesse et l'axe, qui va de la source à l'observateur.

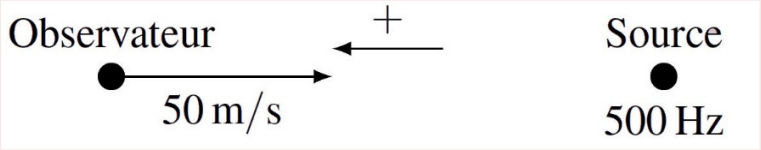
Effet Doppler avec le son

Comme on l'a vu dans les clips du début de cette section, on peut avoir de l'effet Doppler avec le son.

Exemple 3.6.1

Un observateur s'approche à 180 km/h d'une source immobile émettant un son ayant une fréquence de 500 Hz. La vitesse du son est de 343 m/s.

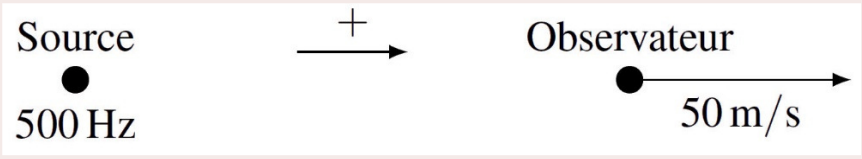
a) Quelle est la fréquence du son entendu par l'observateur ?



La fréquence du son entendu par l'observateur est donc

$$\begin{aligned} f' &= f\,\frac{v - v_0}{v - v_s} \\ &= 500Hz \cdot \frac{343\,\frac{m}{s} - \left(-50\,\frac{m}{s}\right)}{343\,\frac{m}{s}} \\ &= 572,3Hz \end{aligned}$$

b) Quelle est la fréquence du son entendue par l'observateur une fois qu'il aura passé à côté de la source ? (Il s'éloigne alors de la source.)



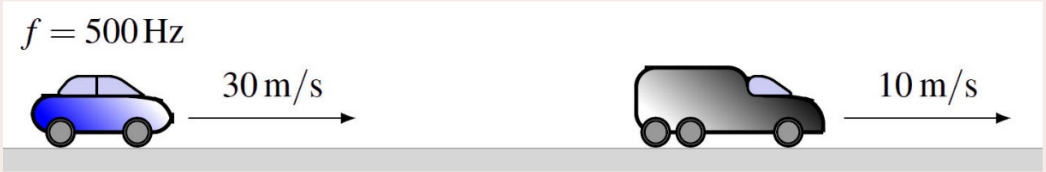
La fréquence du son entendu par l'observateur est alors

$$f' = f\,\frac{v - v_0}{v - v_s}$$

$$= 500Hz \cdot \frac{343\frac{m}{s} - \left(50\frac{m}{s}\right)}{343\frac{m}{s}}$$
$$= 427,1Hz$$

Exemple 3.6.2

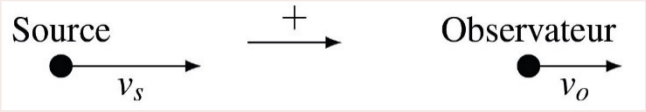
Le son émis par le klaxon de cette automobile se reflète sur le camion et revient vers la personne dans l'auto. Quelle est la fréquence du son entendu par la personne dans l'auto ? La vitesse du son est de 340 m/s.



Pour faire ce genre de problème, on doit savoir quoi faire avec le son qui se reflète. Le truc consiste à faire ce problème en deux parties. Dans la première partie, l'automobile est la source et le camion est l'observateur. Le camion reçoit alors un son dont la fréquence f' est

$$f' = f\frac{v - v_0}{v - v_s}$$
$$= 500Hz \cdot \frac{340\frac{m}{s} - 10\frac{m}{s}}{340\frac{m}{s} - 30\frac{m}{s}}$$
$$= 532,26Hz$$

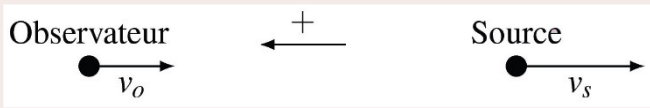
Les vitesses sont positives dans ce cas.



Le son va ensuite se réfléchir avec la même fréquence que celle reçue par le camion. Le camion devient alors la source avec la fréquence f' et la personne de l'auto devient l'observateur. On a alors

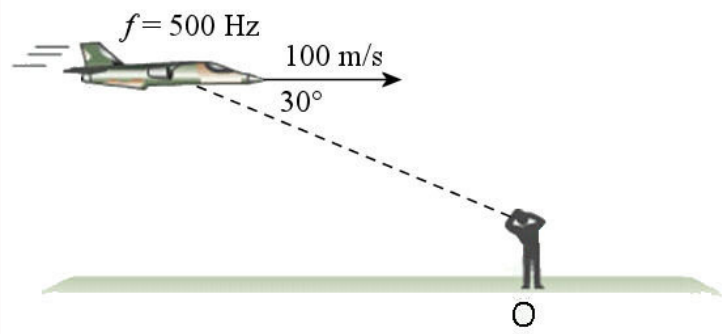
$$f'' = f'\frac{v - v_0}{v - v_s}$$
$$= 532,26Hz \cdot \frac{340\frac{m}{s} - \left(-30\frac{m}{s}\right)}{340\frac{m}{s} - \left(-10\frac{m}{s}\right)}$$
$$= 562,67Hz$$

Les vitesses sont négatives dans ce cas.



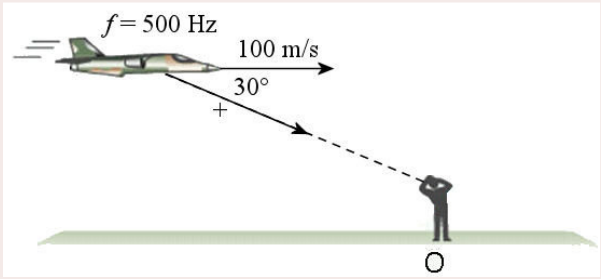
Exemple 3.6.3

Quelle est la fréquence entendue par l'observateur dans la situation suivante ? La vitesse du son est de 343 m/s.



people.highline.edu/iglozman/classes/physnotes/doppler.htm

L'angle pour la vitesse de la source est l'angle entre la vitesse et l'axe positif, qui va de la source à l'observateur. Cet angle est de 30°.



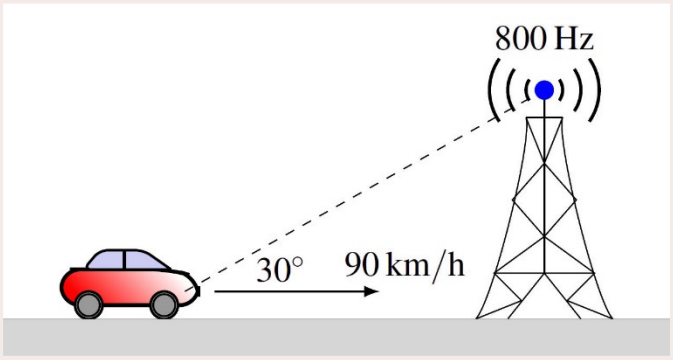
La fréquence entendue est donc

$$f' = f\frac{v - v_0\cos\theta_0}{v - v_s\cos\theta_s}$$
$$= 500Hz \cdot \frac{343\frac{m}{s} - 0}{343\frac{m}{s} - 100\frac{m}{s}\cdot\cos 30°}$$
$$= 668,9Hz$$

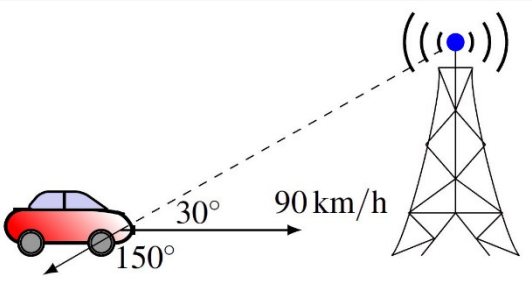
(Notez que l'avion ne sera pas à cette place quand l'observateur va entendre ce son. Pendant le temps que prend le son pour arriver à l'observateur, l'avion aura avancé.)

Exemple 3.6.4

Quelle est la fréquence entendue par l'observateur dans la situation suivante ? La vitesse du son est de 343 m/s.



L'angle pour la vitesse de l'observateur est l'angle entre la vitesse et l'axe positif, qui va de la source vers l'observateur. L'angle est donc de 150°.



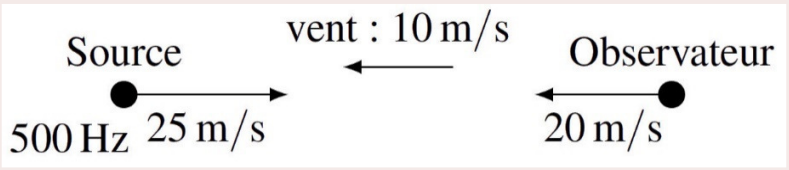
La fréquence entendue est donc

$$f' = f\frac{v - v_0\cos\theta_0}{v - v_s\cos\theta_s}$$
$$= 800Hz \cdot \frac{343\frac{m}{s} - 25\frac{m}{s}\cdot\cos(150°)}{343\frac{m}{s} - 0\frac{m}{s}}$$
$$= 850,5Hz$$

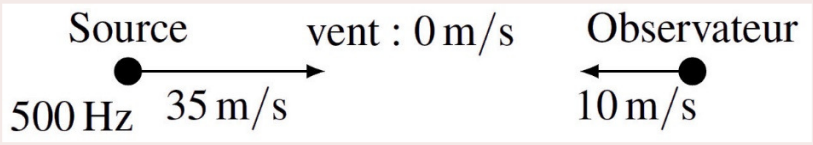
Avec le son, les vitesses de la source et de l'observateur sont toujours les vitesses par rapport à l'air.

Exemple 3.6.5

Quelle est la fréquence entendue par l'observateur dans la situation suivante ? La vitesse du son est de 343 m/s.



Comme les vitesses dans la formule de l'effet Doppler doivent être données par rapport à l'air, il faut tenir compte de l'effet du vent. Pour y arriver, on doit se placer dans le repère de vent (c'est-à-dire les vitesses selon une personne qui se déplace avec le vent). Il suffit d'ajouter une vitesse de 10 m/s vers la droite à toutes les vitesses pour se placer dans ce repère. On voit alors que la vitesse de 10 m/s vers la droite vient annuler la vitesse du vent de 10 m/s vers la gauche et que l'air est maintenant immobile. On a maintenant la situation suivante.



La fréquence du son entendu par l'observateur est donc

$$f' = f\frac{v - v_0}{v - v_s}$$

$$= 500Hz \cdot \frac{343\frac{m}{s} - \left(-10\frac{m}{s}\right)}{343\frac{m}{s} - 35\frac{m}{s}}$$
$$= 573Hz$$

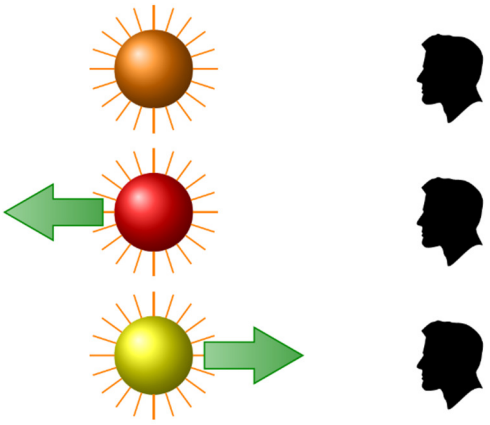
Effet Doppler avec la lumière

Les résultats obtenus pour l'effet Doppler ne sont pas uniquement valides pour le son, ils sont valides pour tous les types d'ondes, incluant la lumière. (En France, on l'appelle *effet Doppler-Fizeau* quand on l'applique à la lumière.) Ainsi, si la source ou l'observateur se déplace, la fréquence de la lumière perçue par l'observateur sera différente. Comme la couleur dépend de la fréquence, cela signifie que la couleur perçue sera différente s'il y a de l'effet Doppler.

Attention : Les formules de l'effet Doppler de ce chapitre sont valides avec la lumière uniquement si la source et l'observateur ont de petites vitesses par rapport à la vitesse de la lumière. On peut prendre 10 % de la vitesse de la lumière comme vitesse maximale pour appliquer cette formule. On verra pourquoi cette limite existe et comment changer la formule pour qu'elle soit toujours valide au chapitre sur la relativité.

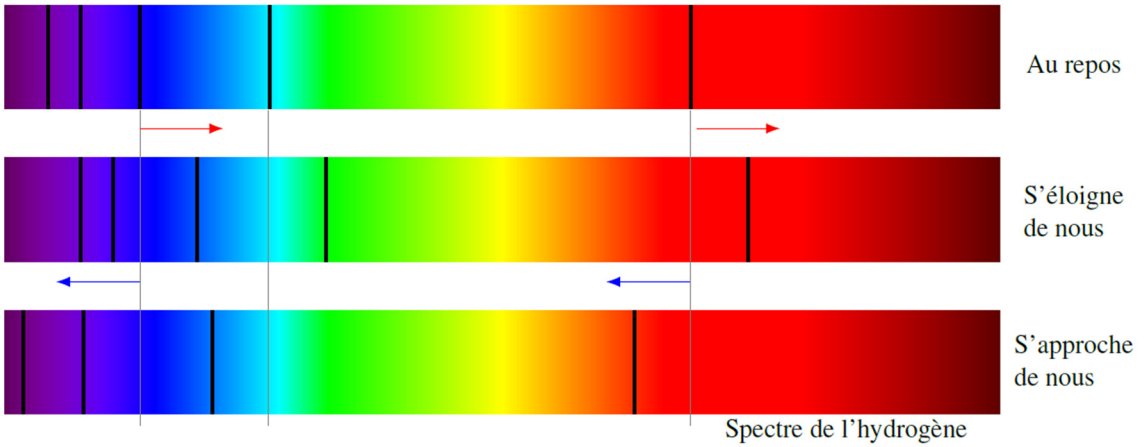
Application en astronomie

Supposons qu'on ait une source lumineuse qui émet de la lumière ayant une certaine fréquence ou longueur d'onde correspondant à de la lumière orange. (Sur la figure, c'est une étoile, bien qu'il soit impossible qu'une étoile émette une seule longueur d'onde.) Si la source s'éloigne de l'observateur, la fréquence de la lumière va diminuer, ce qui signifie que la longueur d'onde de la lumière va augmenter. La couleur de la lumière va donc décaler vers la partie rouge du spectre. Elle pourrait alors sembler être rouge pour l'observateur. Si la source se déplace vers l'observateur, la fréquence de la lumière va augmenter, ce qui signifie que la longueur d'onde de la lumière va diminuer. La couleur de la lumière va donc décaler vers la partie bleue du spectre. Elle pourrait alors sembler jaune pour l'observateur.



Ce n'est pas exactement le changement de couleur de l'étoile qu'on pourra observer pour une étoile parce qu'elle n'émet pas une seule longueur d'onde. Elle émet plutôt un spectre continu et c'est le spectre entier de l'étoile qui va se décaler d'un côté ou de l'autre. Cela ne change donc pas la couleur de l'étoile parce que les couleurs décalées sont remplacées par d'autres couleurs qui ont aussi été décalées. Toutefois, on peut remarquer que le spectre s'est déplacé d'un côté ou de l'autre parce qu'il y a des raies d'absorption dans le spectre

des étoiles. Il y a de telles raies parce que le gaz entourant l'étoile absorbe certaines longueurs d'onde. Quand l'étoile s'éloigne ou s'approche de nous, le déplacement dû à l'effet Doppler entraine avec lui les raies d'absorption dans le spectre. On aura alors les changements suivants.



Quand la source s'éloigne de nous, on remarque que les raies spectrales décalent vers la partie rouge du spectre. C'est ce qu'on appelle le *décalage vers le rouge* ou, en anglais, le *redshift*.

Quand la source s'approche de nous, on remarque que les raies spectrales décalent vers la partie bleue du spectre. C'est ce qu'on appelle le *décalage vers le bleu* ou, en anglais, le *blueshift*.

Exemple 3.6.6

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

Dans ce cas, l'observateur est immobile. On a donc

$$\lambda' = \lambda\left(1-\frac{v_s}{c}\right)$$

$$656,263nm = 656,279nm\cdot\left(1-\frac{v_s}{3\times10^8\ \frac{m}{s}}\right)$$

$$v_s = 7314\ \tfrac{m}{s}$$

Comme le sens positif va de la source vers l'observateur, une réponse positive signifie que cette étoile s'approche de nous à 7314 m/s.

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Déplacement des molécules du milieu lors du passage d'une onde sonore sinusoïdale

$$s = A\sin\left(kx \pm \omega t + \phi\right)$$

Vitesse du son dans l'air

$$v = 331{,}3\,\tfrac{m}{s} \cdot \sqrt{\frac{T}{273{,}15K}}$$

Champ électrique dans une onde électromagnétique sinusoïdale

$$E = E_0 \sin\left(kx \pm \omega t + \phi\right)$$

Vitesse de la lumière dans le vide

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Vitesse de la lumière dans une substance transparente

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

Puissance captée

$$P_{captée} = IA_{capteur}$$

Intensité d'une onde avec une source isotrope

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Impédance du milieu pour les ondes sonores

$$Z = \rho v$$

Intensité d'une onde sonore

$$I = \frac{1}{2}\rho v\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}Z\omega^2 A^2$$

Intensité du son en décibels

$$\beta = 10dB \cdot \log\frac{I}{10^{-12}\,\frac{W}{m^2}}$$

Intensité de la lumière

$$I = \frac{cn\varepsilon_0 E_0^2}{2}$$

où ε_0 est une constante qui vaut 8,854 x 10^{-12} C²/Nm².

Lumière non polarisée passant dans un filtre polarisant

La lumière est maintenant polarisée dans la direction de l'axe de polarisation du filtre.

$$I = \frac{I_0}{2}$$

où I_0 est l'intensité de la lumière avant le passage dans le filtre.

Lumière polarisée passant dans un filtre polarisant

La lumière est maintenant polarisée dans la direction de l'axe de polarisation du filtre.

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

où I_0 est l'intensité de la lumière avant le passage dans le filtre.

Effet Doppler : changement de longueur d'onde (si $v << c$ pour la lumière)

$$\lambda' = \lambda\left(1 - \frac{v_s}{v}\right)$$

Effet Doppler : changement de fréquence (si $v << c$ pour la lumière)

$$f' = f\,\frac{v - v_0}{v - v_s}$$

Convention de signe dans cette formule : **le sens positif va de la source vers l'observateur**

Effet Doppler en 2 ou 3 dimensions : Changement de fréquence (si $v << c$ pour la lumière)

$$f' = f\,\frac{v - v_0\cos\theta_0}{v - v_s\cos\theta_s}$$

Convention de signe dans cette formule : **le sens positif va de la source vers l'observateur**

EXERCICES

3.2 Les ondes sonores

1. Les chiens peuvent entendre jusqu'à une fréquence de 50 000 Hz. Quelle est la longueur d'onde du son à cette fréquence si la vitesse du son est de 340 m/s ?

2. Quelle est la vitesse des ondes sonores quand il fait 25 °C ?

3. Une onde sonore se propageant dans un tube est décrite par l'équation

$$s = 0,01mm \cdot \sin\left(1,6\,\tfrac{rad}{m} \cdot x - 560\,\tfrac{rad}{s} \cdot t + 0,5rad\right)$$

   a) Quelle est la température de l'air ?
   b) Quelle est la vitesse maximale des molécules d'air lors du passage de l'onde ?

3.3 La lumière

4. Combien faut-il de temps pour que la lumière nous arrive du Soleil sachant que la distance entre le Soleil et la Terre est de 149 600 000 km ?

5. Une année-lumière est une unité de distance qui équivaut à la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant un an. Quelle est cette distance en mètre ?

6. Quelle est la vitesse de la lumière dans le diamant (n = 2,4) ?

7. Une onde électromagnétique a une fréquence de 10^{15} Hz. Dans quelle région du spectre électromagnétique retrouve-t-on cette onde ? (Radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X ou rayons gamma ?)

3.4 L'intensité

8. Une source sonore a une puissance de 50 W. Quelle est l'intensité (en dB) du son à 30 m de distance de la source ?

9. Une onde lumineuse ayant une intensité 0,1 W/m² arrive sur un capteur ayant une aire de 10 cm². Quelle est l'énergie captée par le capteur en 2 minutes ?

10. À 10 m d'une source lumineuse, l'intensité est de 0,001 W/m². À quelle distance de la source doit-on être pour que l'intensité soit de 0,00001 W/m² ?

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

12. Quelle intensité (en dB) obtient-on si on superpose un son ayant une intensité de 90 dB et un son ayant une intensité de 95 dB ?

13. Un hautparleur ayant une puissance de 50 W produit un son ayant une fréquence de 200 Hz. Quelle est l'amplitude de l'onde à 25 m du hautparleur si la vitesse du son est de 340 m/s et que la densité de l'air est de 1,3 kg/m³ ?

14. Un hautparleur produit un son ayant une fréquence de 400 Hz et une amplitude de 0,1 µm. Quelle est l'intensité de ce son (en dB) si la vitesse du son est de 340 m/s et que la densité de l'air est de 1,3 kg/m³ ?

15. Une explosion émet un son ayant une puissance de 20 000 W. On va considérer que c'est une source isotrope.

    a) Quelle est l'intensité (en dB) à 5 km de la source si on ne tient pas compte de l'absorption du son par l'air ?
    b) Quelle est l'intensité (en dB) à 5 km de la source si on tient compte du fait que l'air absorbe le son au rythme d'environ 7 dB/km ?

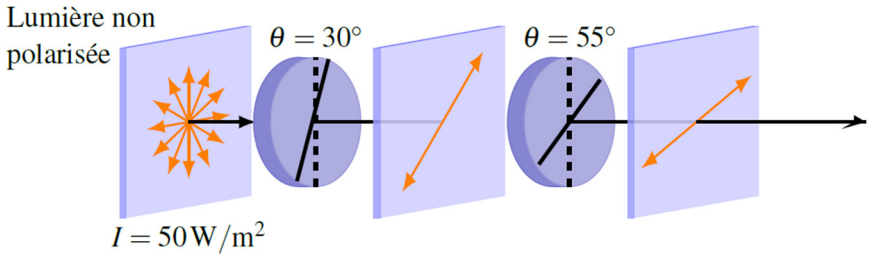
16. Une source d'onde lumineuse isotrope a une puissance de 100 W.

    a) Quelle est l'intensité de la lumière à 30 m de la source ?
    b) Quelle est l'amplitude du champ électrique de cette onde à 30 m de cette source ? (On est dans l'air.)

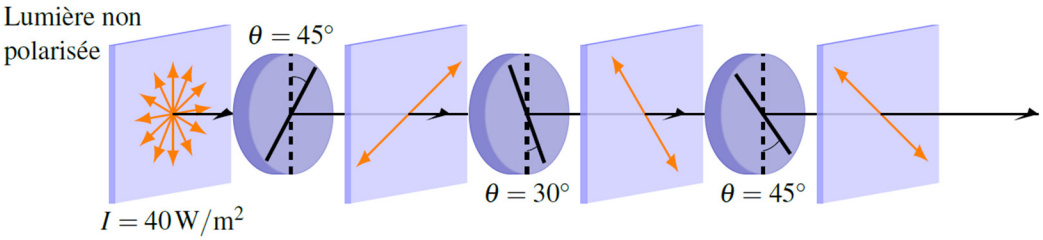
17. À 20 m d'une source sonore isotrope, l'amplitude d'oscillation des molécules d'air est de 20 µm. Quelle est l'amplitude à 100 m de la source ?

3.5 La polarisation de la lumière

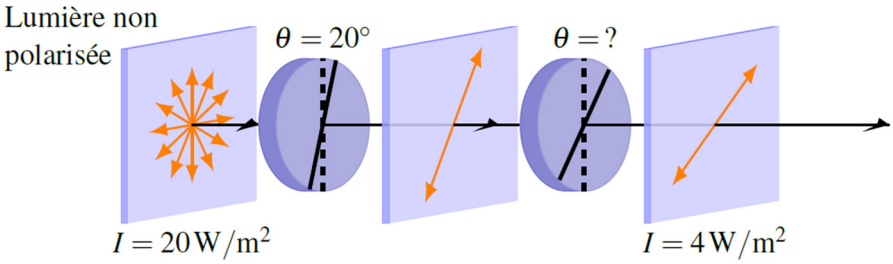
18. Quelle est l'intensité de la lumière après qu'elle ait traversé ces deux polariseurs ?



19. Quelle est l'intensité de la lumière après qu'elle ait traversé ces trois polariseurs si elle n'était pas polarisée au départ ?



20. Quel doit être l'angle du deuxième polariseur pour qu'on ait les intensités lumineuses indiquées sur la figure si la lumière n'était pas polarisée au départ ?

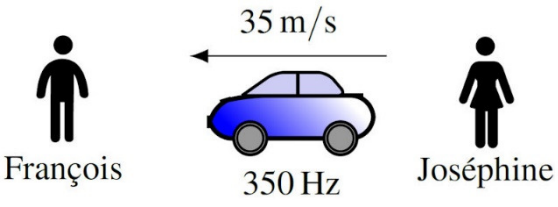


21. De la lumière polarisée traverse un polariseur. Après avoir traversé le polariseur, l'intensité de la lumière est de 5 W/m². L'intensité diminue à 3 W/m² si on tourne le polariseur de 20°. Quelle est l'intensité de la lumière avant son passage dans le polariseur ?

    Indice : $\cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$

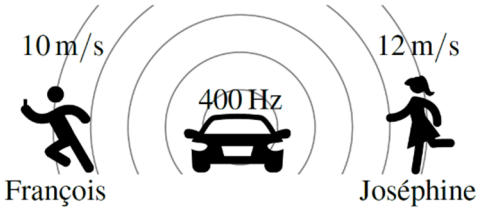
3.6 L'effet Doppler

22. Dans cette situation, la vitesse du son est de 340 m/s. Le conducteur de l'auto fait fonctionner son klaxon, qui a une fréquence de 350 Hz, pour que François se tasse de la rue.



a) Quelle est la fréquence du son entendu par François ?
b) Quelle est la longueur d'onde du son reçu par François ?
c) Quelle est la fréquence du son entendu par Joséphine ?
d) Quelle est la longueur d'onde du son reçu par Joséphine ?

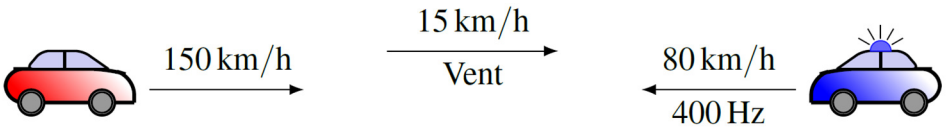
23. Dans cette situation, la vitesse du son est de 340 m/s. François a tenté de voler l'auto de Joséphine, ce qui a déclenché le système d'alarme. François se sauve alors que Joséphine vient voir ce qui se passe.



a) Quelle est la fréquence du son entendu par François ?
b) Quelle est la longueur d'onde du son reçu par François ?
c) Quelle est la fréquence du son entendu par Joséphine ?
d) Quelle est la longueur d'onde du son reçu par Joséphine ?

24. Quelle est la fréquence du son entendu par la personne dans la voiture de droite si la vitesse du son est de 340 m/s ?

25. Quelle est la fréquence du son entendu par la personne dans la voiture de gauche si la vitesse du son est de 340 m/s ?



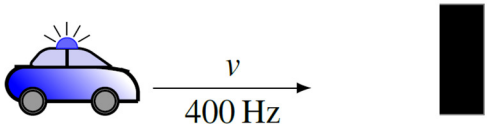
26. Quand un train se dirige vers une personne et que le sifflet du train fonctionne, la personne entend un son ayant une fréquence de 150 Hz. Quand le train s'éloigne de la personne avec la même vitesse et que le sifflet du train fonctionne, la personne entend un son ayant une fréquence de 125 Hz. La vitesse du son est de 335 m/s.

a) Quelle est la vitesse du train ?
b) Quelle serait la fréquence du son entendu par la personne si le train était arrêté ?

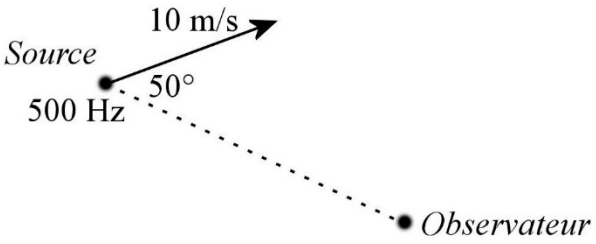
27. Dans la situation suivante, la personne dans la voiture rouge (celle qui est devant) entend la sirène de police avec une fréquence de 420 Hz. Sachant que la vitesse de la voiture de police est plus élevée de 15 m/s que celle de la voiture rouge, déterminez la vitesse des deux voitures. La vitesse du son est de 345 m/s.

28. Dans la situation suivante, la personne dans la voiture entend le son arrivant directement de la voiture de police et le son de la voiture de police qui s'est réfléchi sur le mur. Quelle est la fréquence des deux sons entendus par la personne dans la voiture si la température est de 25 °C ?

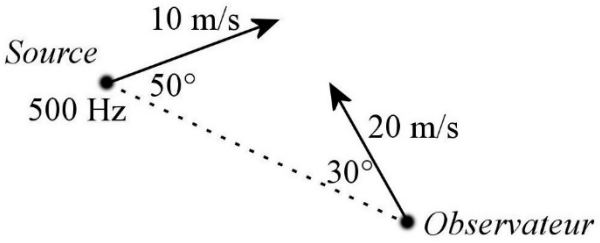
29. Dans la situation suivante, le policier entend que le son de sa sirène qui s'est réfléchi sur le mur a une fréquence de 415 Hz. Quelle est la vitesse de la voiture si la température est de 20 °C ?



30. Dans la situation montrée sur la figure, quelle est la fréquence entendue par l'observateur si la vitesse du son est de 340 m/s ?



31. Dans la situation montrée sur la figure, quelle est la fréquence entendue par l'observateur si la vitesse du son est de 340 m/s ?



Pour la question suivante, utilisez ce tableau.

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Couleur	Longueur d'onde
Rouge	700 à 625	**Vert bleuté**	530 à 492
Orange	625 à 590	**Cyan**	492 à 487
Jaune	590 à 580	**Bleu verdâtre**	487 à 482
Jaune verdâtre	580 à 575	**Bleu**	482 à 465
Vert jaunâtre	575 à 560	**Indigo**	465 à 435
Vert	560 à 530	**Violet**	435 à 400

32. Une source lumineuse émet une lumière jaune ayant une longueur d'onde de 585 nm quand elle est au repos.

    a) Quelle sera la couleur perçue par un observateur au repos si cette source lumineuse s'approche de lui à 10 % de la vitesse de la lumière ?
    b) Quelle sera la couleur perçue par un observateur au repos si cette source lumineuse s'éloigne de lui à 10 % de la vitesse de la lumière ?

33. Une source lumineuse immobile émet une lumière rouge ayant une longueur d'onde de 600 nm. À quelle vitesse doit-on se diriger vers cette source pour qu'elle nous paraisse bleue (λ = 470 nm) ? (En faisant comme si la formule était vraie pour toutes les vitesses, même celles près de la vitesse de la lumière.)

Défis

(Questions plus difficiles que les questions qu'il y aura à l'examen.)

34. Une explosion émet un son ayant une puissance de 20 000 W. On va considérer que c'est une source isotrope.

    a) À quelle distance doit-on être de l'explosion pour que l'intensité soit de 10 dB si on ne tient pas compte de l'absorption du son par l'air ?
    b) À quelle distance doit-on être de l'explosion pour que l'intensité soit de 10 dB si on tient compte du fait que l'air absorbe le son au rythme d'environ 7 dB/km ?

35. On définit le pourcentage de polarisation d'un faisceau de lumière partiellement polarisée avec la formule suivante.

$$p = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

    où $I_{\max}$ et $I_{\min}$ sont les intensités maximale et minimale obtenues quand la lumière traverse un polariseur qu'on tourne lentement.

    Montrez que si on fait passer un faisceau partiellement polarisé à travers un polariseur qui fait un angle θ par rapport à sa position quand on a $I_{\max}$, l'intensité de la lumière qui traverse le polariseur est donnée par

$$I = \frac{1 + p\cos(2\theta)}{1 + p}$$

    Indices : on peut considérer qu'un faisceau partiellement polarisé est une superposition de deux ondes polarisées perpendiculairement qui ont des intensités différentes et $\cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$.

RÉPONSES

3.2 Les ondes sonores

1. 6,8 mm
2. 346,1 m/s
3. a) 31,7 °C b) 5,6 mm/s

3.3 La lumière

4. 8 min 19 s
5. $9{,}46 \times 10^{15}$ m
6. $1{,}25 \times 10^{8}$ m/s
7. La longueur d'onde est de 300 nm. C'est de l'ultraviolet.

3.4 L'intensité

8. 96,5 dB
9. 0,012 J
10. 100 m
11. 57,96 dB
12. 96,2 dB
13. 4,271 µm
14. 71,44 dB
15. a) 78,04 dB b) 43,04 dB
16. a) $8{,}842 \times 10^{-3}$ W/m² b) 2,58 N/C
17. 4 µm

3.5 La polarisation de la lumière

18. 20,53 W/m²
19. 1,25 W/m²
20. 70,8° ou 149,2°
21. 6,165 W/m²

3.6 L'effet Doppler

22. a) 390,2 Hz b) 87,14 cm c) 317,3 Hz d) 107,1 cm
23. a) 388,2 Hz b) 85 cm c) 414,1 Hz d) 85 cm
24. 480,4 Hz
25. 481,4 Hz
26. a) 30,45 m/s b) 136,4 Hz
27. auto : 30 m/s police : 45 m/s
28. La personne dans l'auto entend un son à 424,91 Hz et un son à 437,37 Hz.
29. 6,317 m/s

30. 509,6 Hz
31. 535,6 Hz
32. a) vert bleuté (λ = 526,5 nm) b) rouge (λ = 643,5 nm)
33. 8,3 x 10^7 m/s

Défis

34. a) 12 616 km b) 8,992 km