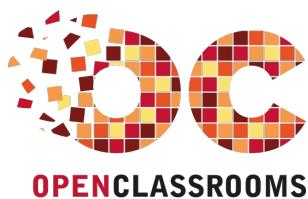


Lumière sur la lumière

Par Brice Errandonea



www.openclassrooms.com

*Licence Creative Commons 6 2.0
Dernière mise à jour le 1/11/2011*

Sommaire

Sommaire	2
Partager	1
Lumière sur la lumière	3
Partie 1 : Les rayons de lumière	4
Les lois de Snell-Descartes	5
A - Alhazen	5
B - La réfraction	6
C - Les trois lois	9
D - Le pêcheur fou	11
E - Le miroir	12
F - La réflexion totale	14
Les lentilles minces	15
A - Lentilles minces convergentes	16
B - Lentilles minces divergentes	20
C - Objet, image, réel et virtuel	21
D - Emplacement et taille de l'image	23
Systèmes optiques	25
A - L'oeil	26
B - Les verres correcteurs	27
C - Le microscope	30
D - La lunette astronomique	31
c : la vitesse de la lumière	32
A - Io est en retard	33
B - La roue dentée de Fizeau	34
C - Les miroirs de Foucault	36
Partie 2 : Onde ou corpuscule ?	37
Les ondes	38
A - Les phénomènes périodiques	38
B - Notion d'onde	40
C - Les ondes sonores	41
D - L'effet Doppler	46
Diffraction et interférences	48
A - La diffraction	49
B - Les interférences	53
C - L'interféromètre de Michelson-Morley	57
D - Les ondes électromagnétiques	60
Les couleurs	63
A - Dispersion de la lumière par un prisme	64
B - Les spectres	66
C - Synthèse des couleurs	69
Les photons	71
A - Le rayonnement du corps noir	72
B - L'effet photoélectrique	74
C - L'effet Compton	76



Lumière sur la lumière



Par Brice Errandonea

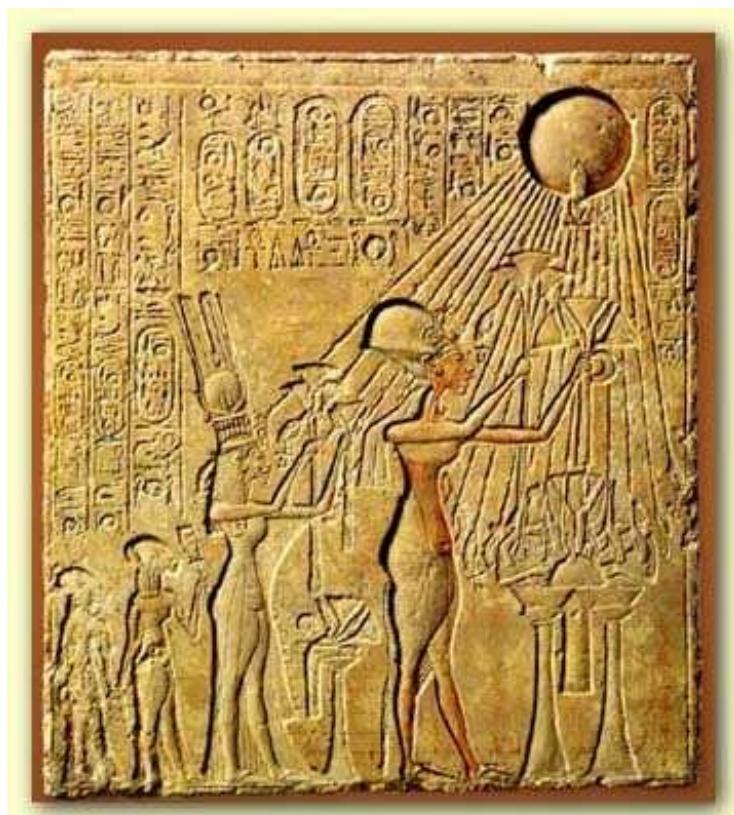
Mise à jour : 01/11/2011

Difficulté : Intermédiaire ☰ Durée d'étude : 7 jours



Pour la plupart d'entre nous, la vue est le plus développé de nos 5 sens. C'est sur la **lumière** que nous comptons pour nous renseigner sur le monde et nous n'estimons connaître quelque chose que quand nous l'avons *vu de nos yeux vu*. 😊

La **lumière** est également célèbre pour son impressionnante et inégalable vitesse. Elle rythme nos jours et nos nuits. Et en plus elle nous nourrit, puisque à travers le phénomène de photosynthèse, elle fait croître les végétaux à la base de notre pyramide alimentaire.



Akhénaton et Néfertiti adorant Aton (le disque solaire), avec ses rayons de lumière

C'est dire si elle occupe une place centrale dans nos vies. Et il n'est pas étonnant que le premier "dieu unique" de l'Histoire ait justement été la **lumière**.

Mais qu'est-ce, au juste, que la **lumière** ?



Ce tutoriel réutilise par endroits des passages de **La Physique-Chimie en Seconde** qui concernent la lumière. Mais, cette fois, nous ne nous limitons ni au niveau ni au programme de Seconde.

Il n'est pas nécessaire de déjà s'y connaître en Physique-Chimie pour lire ce tutoriel. Par contre, quelques connaissances en **géométrie** s'imposent : la symétrie, les angles, les sinus et cosinus, les termes "parallèle" et "perpendiculaire", les théorèmes de Pythagore et de Thalès, ainsi qu'une vague idée de ce qu'est un vecteur. Et pour faire les exercices, il vous faudra une calculatrice munie des touches **sin** et **cos**.

Les chapitres **Diffraction et interférences** et **Les photons** sont un peu plus compliqués. Vous y verrez de gros calculs dans lesquels j'enchaîne beaucoup de formules mathématiques du genre $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$ ou $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$. Si ces calculs vous font peur et si vous ne voulez pas vous embêter à les suivre en détail (ils sont pourtant très intéressants 😊), vous pourrez les survoler en me faisant confiance et en ne vous occupant que de leur résultat et des phénomènes concrets auxquels ils correspondent.

Partie 1 : Les rayons de lumière

L'une des premières choses que l'on a sues concernant la lumière, c'est qu'elle s'organise en **rayons** : des lignes **droites** extrêmement fines, comme sur la fresque d'Aton (ci-dessus).

On se doutait vaguement que la lumière devait se déplacer le long de ces lignes. Mais on ne savait pas dans quel sens, et cela a donné lieu à bien des débats entre les philosophes grecs de l'Antiquité (Euclide et Aristote, par exemple) : la lumière entre-t-elle dans nos yeux depuis l'extérieur ou est-elle, au contraire, émise par nos yeux ? 😊

Ne riez pas ! Aujourd'hui encore, je vois chaque année des élèves dessiner des schémas avec des flèches montrant que la lumière sort des yeux.

📘 Les lois de Snell-Descartes

Les débats de l'Antiquité auraient pu durer éternellement car ils reposaient sur de pures spéculations et pas vraiment sur des expériences. Il faudra attendre l'an mil pour que commence une étude scientifique de la lumière, avec le philosophe **Alhazen** (en Égypte, justement).

A - Alhazen

La méthode d'**Alhazen** était révolutionnaire pour l'époque. D'abord parce qu'il en avait une, de méthode.

😊 Et ensuite parce qu'elle est centrée sur l'**expérimentation**, pour confirmer ou infirmer ses **hypothèses** :



- **Observation** d'un phénomène.
- **Délimitation** du problème à éclaircir.
- **Hypothèse** : on imagine une solution possible à ce problème.
- **Expérience** pour mettre l'hypothèse à l'épreuve.
- **Observation** des résultats de l'expérience.
- **Conclusion** : confrontation de ces résultats avec l'hypothèse précédente.
- **Publication**.

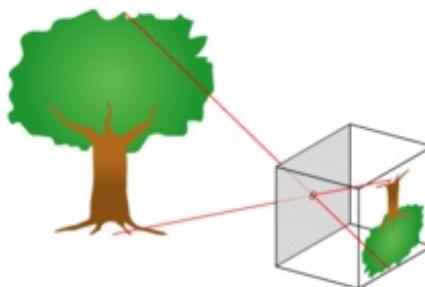
La dernière étape, la publication, est également novatrice. Jusque là, les savants du Moyen-Âge avaient tendance à garder jalousement pour eux les secrets qu'ils avaient découverts. Alhazen, et quelques autres, comprennent au contraire que la science ne pourra progresser que si toutes ces connaissances sont mises en commun.

Cette méthode est encore utilisée de nos jours dans tous les laboratoires de recherche. Elle fait presque d'Alhazen le fondateur de la Science en général.

Avec cette méthode, Alhazen départage Euclide et Aristote. Son expérience est radicale : une lumière trop intense peut fort bien blesser les yeux de celui qui la fixe. Elle n'est donc pas produite par les yeux mais entre au contraire dedans. Euclide avait tort et Aristote avait raison sur ce point.

Il a aussi constaté que la lumière change de direction lorsqu'elle passe d'un milieu transparent dans un autre : de l'air dans le verre, par exemple. C'est le phénomène de **réfraction**. Mais il n'a pas mesuré de quel angle la lumière était ainsi déviée.

Enfin, il a inventé le **sténopé**.



Le **sténopé** est une petite boîte dont l'intérieur est entièrement noir. Il y a un petit trou sur l'une des parois. La lumière entre par cet orifice et forme sur la paroi d'en face une image renversée de ce qu'il y a dehors. La paroi arrière doit être fine pour qu'on puisse voir par transparence l'image qui se forme dessus.

Le fait que le sténopé fonctionne invalide une autre théorie grecque, selon laquelle des images voyageraient dans les airs, depuis

les objets jusqu'à nos yeux. En chemin, ces images rencontreraient des obstacles et seraient en partie déchirées, ce qui expliquerait pourquoi on ne voit pas la portion de mur située derrière la commode. Si cette théorie de "l'image voyageuse", qui reste elle-aussi populaire chez certains élèves, avait été la bonne, on n'aurait jamais pu observer l'arbre entier au fond du sténopé, et surtout pas à l'envers. Par contre, cette expérience confirme la vieille théorie égyptienne des **rayons de lumière**. Sauf accident particulier, comme un changement de milieu, la lumière se propage en **ligne droite**. Et c'est parce que ces rayons se croisent en entrant dans le sténopé que l'arbre apparaît renversé.

Quand on voit un objet, c'est donc que celui-ci envoie des rayons de lumière et que certains de ces rayons arrivent jusqu'à nos yeux. Certains objets produisent eux-mêmes cette lumière : une flamme, le Soleil, une ampoule électrique allumée, etc. Ce sont des **sources primaires de lumière**. D'autres **diffusent** simplement une lumière qu'ils ont reçue et qu'ils renvoient dans toutes les directions. Ce sont des **sources secondaires de lumière**. Bien sûr, ces sources secondaires doivent avoir quelque chose à diffuser pour être visibles. Elles doivent donc être éclairées. Sinon, on ne les voit pas. Une autre découverte d'Alhazen concerne justement la **Lune**, dont il a compris qu'elle était une source secondaire diffusant la lumière du Soleil.

Ainsi, tous les objets visibles sont des **sources de lumière**.

On ne voit jamais la lumière elle-même, mais seulement des objets qui produisent ou diffusent de la lumière.

B - La réfraction

Robert Grossetête (1175-1253) importe en Europe les travaux d'Alhazen et invente la **loupe**. Il utilise une sorte de bocal à poissons rouges (sans poissons rouges 😊) pour étudier la **réfraction**. Sans toutefois parvenir, lui non plus, à déterminer de quel angle la lumière est déviée. Cette énigme reste donc posée pendant quelques siècles encore...

Et soudain, tout s'accélère ! Au début du XVII^e siècle, **Willebrord Snell** découvre enfin les lois de la réfraction. Mais c'est **René Descartes** qui les publie en 1637. On les appelle donc **lois de Snell-Descartes**.

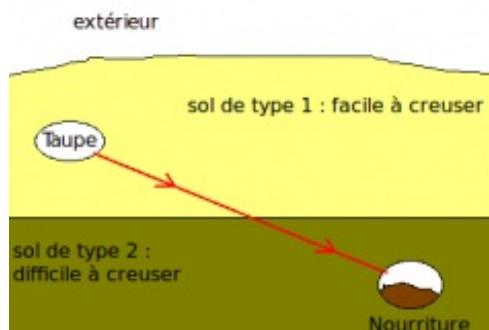
Pour bien comprendre ces lois, nous allons faire appel à un autre René : René la taupe !



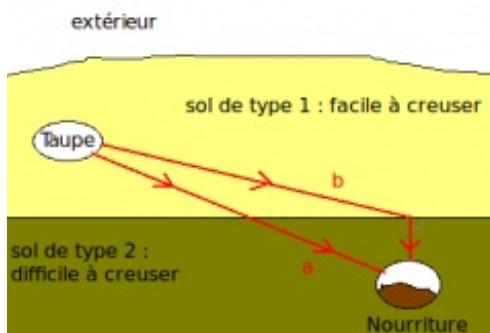
La taupe a très faim. Elle veut rejoindre au plus vite la nourriture qu'elle a stockée dans son garde-manger. Ce dernier est caché à plusieurs mètres sous la terre, dans une zone où le sol est plutôt difficile à creuser.

Quel chemin la taupe doit-elle emprunter pour rejoindre sa nourriture le plus vite possible ?

A priori, on pense tout de suite à la ligne droite. C'est vrai que c'est le chemin le plus court.

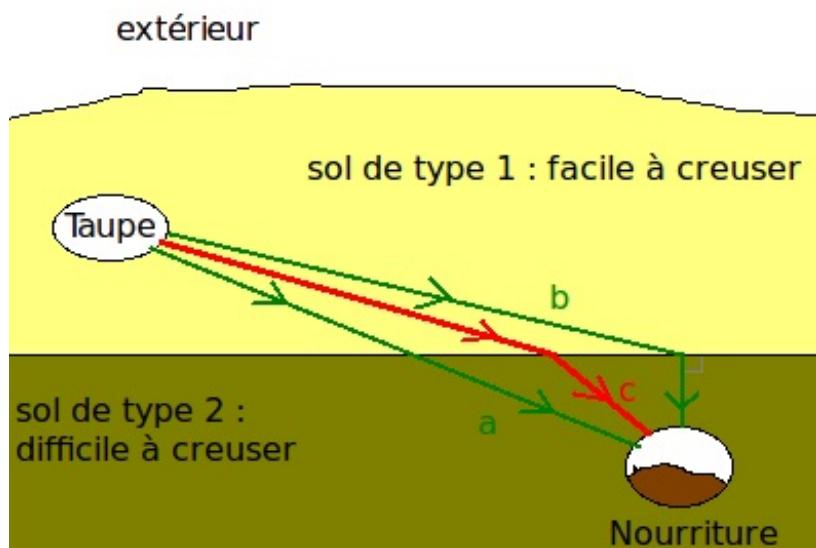


Le problème, c'est que cette solution **(a)** oblige la taupe à creuser longtemps dans la partie difficile. Et donc à perdre beaucoup de temps. Pour réduire au maximum le trajet dans la zone difficile, il faut emprunter le chemin **(b)**.



L'ennui est que cela représente tout de même un gros détour. Il n'est pas certain que ce soit vraiment un gain de temps. Si le sol 2 est vraiment beaucoup plus difficile à creuser que le 1, alors le chemin b est le plus intéressant des deux. Sinon, c'est le a.

Mais la meilleure solution consiste à trouver un juste milieu entre ces deux extrêmes. Voici le chemin c. C'est lui le plus rapide :



Pourquoi est-ce que je parle de cette taupe ?

Parce que, comme elle, la lumière éprouve plus de difficultés 😞 à traverser certains milieux transparents que d'autres. Dans le vide, elle se déplace excessivement vite. Nous verrons plus tard à quelle vitesse. Dans l'air, c'est pratiquement la même chose. Mais dans l'eau, et plus encore dans le verre ou le diamant, la lumière est ralentie.

On appelle **indice de réfraction** d'un milieu le nombre **n** défini par :

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

- **c** : vitesse de la lumière dans le vide, exprimée en **mètres par seconde** ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- **v** : vitesse de la lumière dans ce milieu, exprimée en **mètres par seconde** ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- **n** est un nombre sans unité



Notation : Dans la vie courante, et au collège, vous avez l'habitude d'écrire **m/s** pour dire "mètres par seconde". Mais en Physique, on l'écrit : **$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$** .



Mais ... pourquoi ?

C'est une notation. A priori, ça l'air plus compliqué d'écrire **$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$** plutôt que **m/s**. Mais quand on fait des calculs plus avancés, cette notation se révèle bien pratique. Alors, c'est sûr, la première fois qu'on la voit, ça fait un choc. 😲

D'abord, il y a ce symbole **•**, que vous ne connaissez pas. Il représente la multiplication.



Mais le symbole de la multiplication, ce n'est pas \times ?????? 😕

Surtout pas ! Jusqu'à maintenant, pour multiplier 25 par 3, vous pouviez vous permettre d'écrire des \times . Mais c'est fini ! Dès qu'on commence à faire des calculs plus sophistiqués, des inconnues x apparaissent bien souvent. Et \times ressemble beaucoup trop à x . En plus, quand on utilise des vecteurs, les symboles \cdot et \times désignent deux opérations différentes, respectivement appelées **produit scalaire** et **produit vectoriel**. Mais là, je m'éloigne un peu du sujet...

Donc, c'est comme ça, la multiplication, désormais, c'est \cdot , et puis c'est tout ! 😊



Peut-être, mais dans la formule, il n'y a pas de multiplication. Ne faut-il pas plutôt *diviser* la distance par le temps ?

Exactement ! Et c'est bien pour ça qu'on n'écrit pas $m \cdot s$ mais $m \cdot s^{-1}$. Ne cherchez pas trop, pour l'instant, à savoir pourquoi on a choisi de représenter la division de cette façon. Retenez juste que $m \cdot s^{-1}$ se prononce "**mètres par seconde**" et signifie qu'on **divise** une distance en mètres par un temps en secondes.



J'aimerais bien savoir, quand même. Pourquoi représenter la division comme ça ?

Je vous reconnaiss bien là, petit curieux 😊 OK, vous avez l'esprit scientifique : vous voulez connaître le pourquoi du comment. Je vais vous répondre. Mais d'abord, il faut que je vous parle un peu des **puissances de 10**.

Comme vous le savez sans doute :

- $10^3 = 10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000$
- $10^2 = 10 \cdot 10 = 100$
- $10^1 = 10 = 10$

Figurez-vous qu'on peut continuer comme ça :

- $10^0 = 1$
- $10^{-1} = 0,1$
- $10^{-2} = 0,01$
- $10^{-3} = 0,001$

À présent, si je multiplie un nombre par 10^{-1} , donc par $0,1$, cela revient bien à le **diviser** par 10 . Pour le mètre par seconde, c'est pareil : multiplier m par s^{-1} , cela revient à **diviser** m par s .

Bien, votre curiosité est satisfaite. Je reprends. Chaque milieu transparent est donc caractérisé par un **indice de réfraction**, qui indique s'il est difficile pour la lumière de traverser ce milieu. Plus la valeur de n est grande, plus c'est difficile. n n'a pas d'unité. En effet, on a divisé des *mètres par seconde* (ceux de c) par des mètres par seconde (ceux de v). Donc, question unité, il ne reste plus rien.

Quelques exemples :

- $n_{vide} = 1$ avec une précision infinie puisque $n = \frac{c}{v} = 1$
- $n_{air} = 1,00$
- $n_{eau} = 1,33$
- $n_{verre} = 1,5$

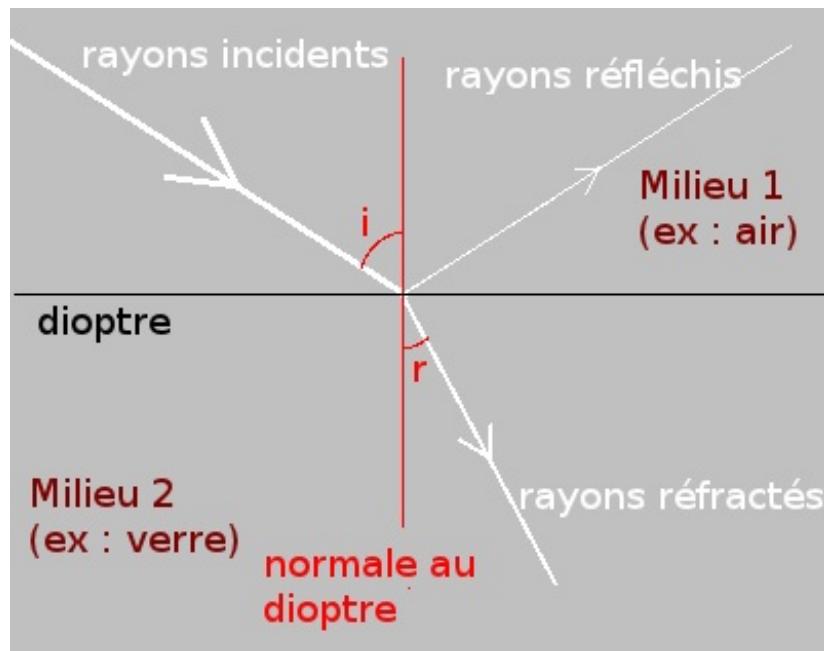


Pourquoi écrire **1,00** pour l'air, et pas **1**, tout simplement ?

Lorsqu'on fait des mesures en Physique, il y a toujours une certaine **précision**, qui n'est jamais parfaite. En écrivant le résultat avec plus ou moins de **chiffres significatifs**, on indique si on a fait une mesure très précise, moyennement précise ou pas précise du tout. Quand on écrit **1,00**, c'est plus précis que **1,0** mais moins précis que **1,000**. **1,00** signifie que la valeur réelle est comprise entre **0,95** (inclus) et **1,05** (non inclus).

Revenons à la lumière. Non seulement elle est confrontée aux mêmes difficultés que la taupe, mais elle se comporte exactement comme une taupe affamée : elle emprunte toujours le chemin le plus rapide.

Sachez qu'on appelle **dioptre** la surface qui sépare deux milieux transparents. Les rayons de lumière qui arrivent sur le dioptre sont des **rayons incidents**. Pour retenir facilement que le rayon *incident* est celui qui *arrive* sur le dioptre, souvenez-vous qu'*un incident est vite arrivé*. 😊 Les rayons incidents atteignent le dioptre en un point appelé **point d'incidence**. La plupart d'entre eux traversent alors le dioptre mais quelques-uns sont **réfléchis**.



Les rayons qui traversent le dioptre sont déviés. On dit qu'ils sont **réfractés**. Cette déviation permet à la lumière de suivre le chemin le plus rapide, comme la taupe. C'est qu'elle a une réputation de rapidité à entretenir, tout de même ! 😎

Notez l'importance de la droite imaginaire appelée **normale au dioptre** (en rouge sur le schéma). Elle est perpendiculaire au dioptre et passe par le point d'incidence. D'ailleurs, en géométrie, *normal* est synonyme de *perpendiculaire*. Comment ça, je ne suis pas perpendiculaire ???? 😕



Qu'est-ce qu'elle a de si important, cette droite ? Elle n'existe même pas.

Elle sert à définir les angles **i** et **r**.

- **i** : **angle d'incidence**, entre la normale et le rayon incident.
- **r** : **angle de réfraction**, entre la normale et le rayon réfracté.

C - Les trois lois

Le phénomène de réfraction de la lumière obéit aux trois **lois de Snell-Descartes**.

Première loi

Le rayon incident, le rayon réfracté, le rayon réfléchi et la normale au dioptre sont situés dans un seul et même plan.

Heureusement, d'ailleurs. Sinon, j'aurais eu bien du mal à dessiner le schéma ci-dessus. Mais nous avons de la chance : tous les rayons sont bien dans le plan de l'écran. Ce plan commun, on l'appelle le **plan d'incidence**.

Deuxième loi

Le rayon réfléchi est symétrique au rayon incident par rapport à la normale au dioptre. Sauf que, bien sûr, la lumière du rayon

réfléchi s'éloigne du diopstre alors que celle du rayon incident s'en rapproche.

Troisième loi

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



Hein ? Quoi ? 😐 Des sinus ? Mais c'est des maths, ça ! Comment je vais faire ? Au secours ! 🚨💡

Pas de panique ! Je vais commencer par vous expliquer calmement cette formule. i et r sont les angles d'incidence et de réfraction. Je viens de vous en parler. n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des milieux 1 et 2. Par exemple, $n_1 = n_{air} = 1,00$ et $n_2 = n_{verre} = 1,5$. Enfin, le symbole \cdot représente la multiplication. Vous êtes sans doute plus habitués au symbole \times . Mais il va falloir vous y faire : en Physique, à partir d'un certain niveau, la multiplication se note \cdot .

Le **sinus** est une fonction mathématique qui, à tout angle, associe un nombre compris entre -1 et 1. Dans un triangle rectangle, le sinus d'un angle est égal à la longueur du côté opposé (à l'angle étudié), divisée par celle de l'hypothénuse. En pratique, vous n'aurez vraiment pas besoin de vous embêter : appuyez sur le bouton *sin* de votre calculette et vous aurez votre valeur. 🎉💡



Attention aux réglages de votre calculette : les angles peuvent être exprimés en degrés, en radians ou en grades. Si vous travaillez en degrés, votre calculette devra donc être réglée en mode *degrés*, sinon elle vous donnera de mauvais résultats. Il doit y avoir une touche **MODE** ou **DRG** sur votre calculette pour arranger ça. Pour vérifier que vous êtes bien en *degrés*, demandez **sin 30**. La machine doit vous répondre **0,5**.

Avant de refermer cette parenthèse mathématique, permettez-moi de vous présenter la fonction **arcsinus** (**arcsin** pour les intimes).

Bonjour **arcsinus** !!! 😊

C'est la fonction inverse du sinus : si **sin x = y**, alors **arcsin y = x**. Sur votre calculette, **arcsin** se trouve souvent sur la même touche que **sin** et il faut d'abord appuyer sur **SHIFT** ou **2nde** pour y accéder. Sur certains modèles, elle n'est pas notée **arcsin** mais **sin⁻¹**.

Nous voici donc mathématiquement armés pour trouver l'angle de réfraction associé à n'importe quel angle d'incidence, et vice-versa... Essayons :

Un faisceau de lumière (composé de plusieurs rayons) traverse l'air puis entre dans un bloc de verre avec l'angle d'incidence $i = 45^\circ$. À vous de calculer l'angle de réfraction r .

Secret (cliquez pour afficher)

On commence par écrire la troisième loi de Snell-Descartes :

$$n_{air} \cdot \sin i = n_{verre} \cdot \sin r$$

Nous cherchons r , donc il faut isoler $\sin r$ en divisant les deux membres de l'équation par n_{verre} .

$$\sin r = \frac{n_{air}}{n_{verre}} \cdot \sin i$$

Et voilà l'expression littérale. Passons à l'application numérique :

$$\sin r = \frac{1,00}{1,5} \cdot \sin 45^\circ = 0,66 \cdot 0,71 = 0,47$$

C'est l'indice de réfraction du verre (1,5) qui limite le nombre de chiffres significatifs : 2.

Il est temps pour **arcsin** d'entrer en scène :

$$r = \arcsin(0,47) = 28^\circ$$

Le faisceau de rayons réfractés aura un angle de réfraction de 28° .

Ne vous en faites pas si vous n'avez pas réussi du premier coup. Voici l'occasion d'une deuxième tentative :

Un faisceau de lumière traverse la vitre d'un aquarium (le bocal de Robert Grossetête, par exemple). Après une petite épaisseur de verre, il entre finalement dans l'eau avec l'angle d'incidence i . Il est alors réfracté et a un angle de réfraction $r=30^\circ$. Quelle est la valeur de i ?

Secret (cliquez pour afficher)

On commence par écrire la troisième loi de Snell-Descartes :

$$n_{verre} \cdot \sin i = n_{eau} \cdot \sin r$$

Nous cherchons i , donc il faut isoler $\sin i$ en divisant les deux membres de l'équation par n_{verre} .

$$\sin i = \frac{n_{eau}}{n_{verre}} \cdot \sin r$$

Et voilà l'expression littérale. Passons à l'application numérique :

$$\sin i = \frac{1,33}{1,5} \cdot \sin 30^\circ = 0,89 \cdot 0,50 = 0,44$$

C'est l'indice de réfraction du verre (1,5) qui limite le nombre de chiffres significatifs : 2. Même si la calculette affiche 0,5 pour $\sin 30^\circ$, il y a deux chiffres significatifs à 30° donc on écrit aussi son sinus avec deux chiffres significatifs : 0,50.

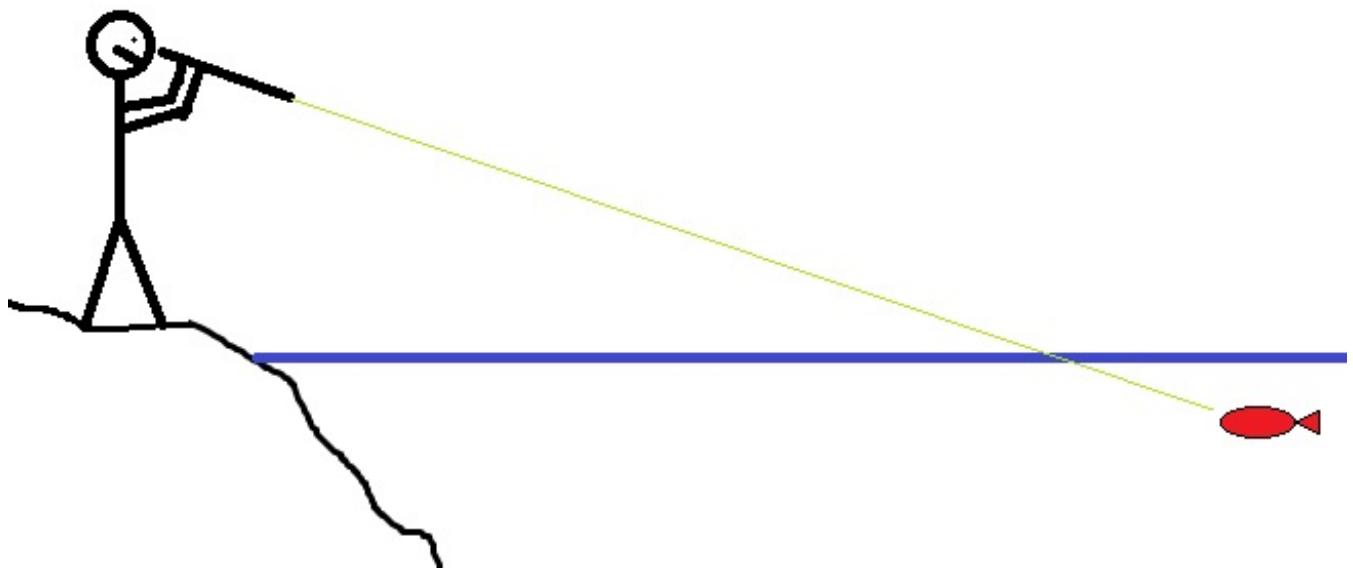
Avec **arcsin**, nous trouvons la valeur de l'angle :

$$i = \arcsin(0,44) = 26^\circ$$

Le faisceau de rayons incidents avait un angle d'incidence de 26° avant d'entrer dans l'eau.

D - Le pêcheur fou

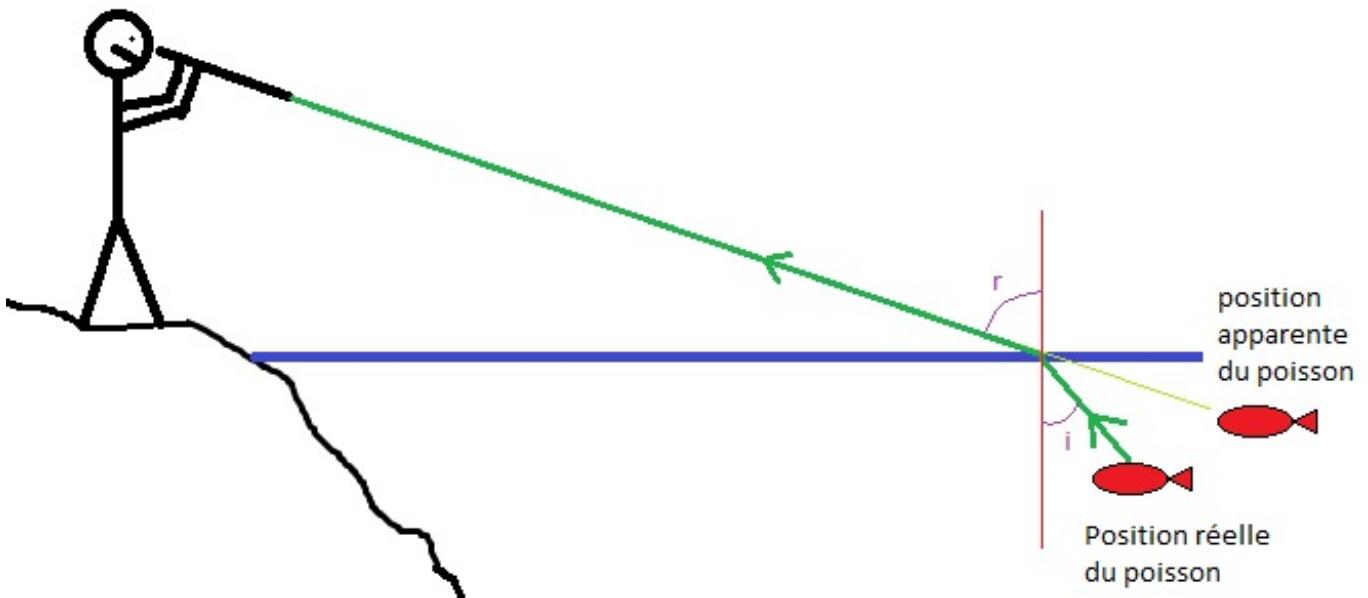
C'est l'histoire d'un tireur d'élite qui prend sa retraite après une longue carrière dans l'armée. Pour s'occuper, il décide de se mettre à la pêche. Mais il est très marqué par son ancien métier et se dit que les cannes à pêche, c'est pour les amateurs. Lui, les poissons, c'est avec un fusil qu'il en fait son affaire. 



Catastrophe ! 😞 Il n'arrive pas à toucher le moindre poisson. L'eau est pourtant parfaitement limpide et notre tireur était encore si habile quelques mois plus tôt. Il se dit qu'il était vraiment temps de prendre sa retraite.

En fait, il est tout simplement victime de la **réfraction**. Les poissons ne sont pas là où il croit les voir.

Un poisson, souvenez-vous, est visible car il est une **source secondaire** de lumière. Il reçoit la lumière du Soleil et la diffuse dans toutes les directions. Les rayons de lumière émis par le poisson se propagent à travers l'eau et certains atteignent la surface. Or, la surface de l'eau est un dioptre. Les rayons de lumière qui le traversent sont réfractés lorsqu'ils arrivent dans l'air, donc déviés. Et c'est seulement une fois dévié que l'un de ces rayons entre dans le viseur du fusil et atteint finalement l'oeil du tireur d'élite.

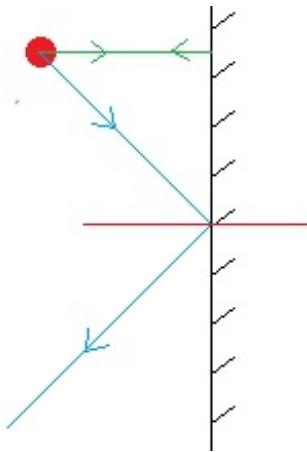


E - Le miroir

La **réflexion** de la lumière est un phénomène plus simple que la réfraction mais tout de même intéressant. La **deuxième loi de Snell-Descartes** nous dit que le rayon de lumière réfléchi par un dioptre est symétrique au rayon incident par rapport à la normale au dioptre.

Un **miroir** est un dioptre air/verre derrière lequel se trouve immédiatement une couche opaque. Sur un schéma, on le représente comme ceci (à droite) :

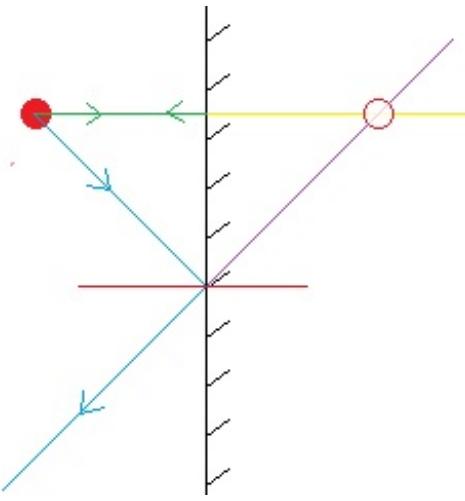
Voyons maintenant comment se forme un reflet. Prenons l'exemple du petit cercle rouge ci-dessous. Dès lors qu'il est éclairé, il diffuse la lumière qu'il reçoit dans toutes les directions. L'un des rayons (le vert) arrive sur le miroir à angle droit ($i=0$). Le miroir le renvoie donc directement là d'où il vient.



Par contre, le rayon bleu arrive sur le miroir avec un angle d'incidence $i > 0$. Il est donc réfléchi. La normale au dioptre est dessinée en rouge et le rayon réfléchi est symétrique au rayon incident par rapport à elle.

On se retrouve donc avec deux rayons allant vers la gauche (le vert et le bleu). Et ces deux rayons proviennent au départ d'un même point : le centre du cercle rouge.

Or, notre cerveau part du principe que la lumière se propage *toujours* en ligne droite, sans aucune exception. Il pense donc que le point de départ commun aux rayons bleu et vert se trouve à droite, derrière le miroir. Regardons ce qui se passe si on prolonge ces deux rayons vers la droite.



Pour notre cerveau, tout se passe comme si les rayons réfléchis provenaient d'un point commun : le centre du cercle blanc à droite. Il est donc persuadé qu'il y a derrière le miroir un autre cercle, identique au rouge, et symétrique à lui par rapport au miroir : son reflet. C'est une illusion d'optique.

Je vous propose maintenant une petite énigme. Je vous demande de ne pas regarder la solution aujourd'hui. Prenez le temps d'y réfléchir.

Voici l'énigme : Soit un miroir rond fixé normalement sur un mur vertical tout à fait normal. Pourquoi ce miroir inverse-t-il la gauche et la droite et n'inverse-t-il pas le haut et le bas ?

Il va de soi que le miroir n'a aucun moyen de savoir où se trouve le sol.

Voici la solution. si vous avez cherché assez longtemps, ou si vous êtes certains d'avoir trouvé, vous pouvez la regarder :

Secret (cliquez pour afficher)

En fait, un miroir n'inverse rien. Ni le haut et le bas, ni la gauche et la droite. Quand nous nous regardons dans un miroir, le reflet de notre main gauche se trouve en face de notre main gauche. Et le reflet de notre main droite se trouve en face de notre main droite. Ces deux reflets ne sont donc pas inversés.

Mais alors, pourquoi avons-nous l'impression qu'ils le sont ? Tout simplement parce que, quand une autre personne se tient face à nous, sa main droite est en face de notre main gauche et sa main gauche est en face de notre main droite. Nous sommes habitués en permanence à ce genre d'inversions. Et donc, le fait que notre reflet, lui, ne soit pas inversé, ça nous paraît bizarre.

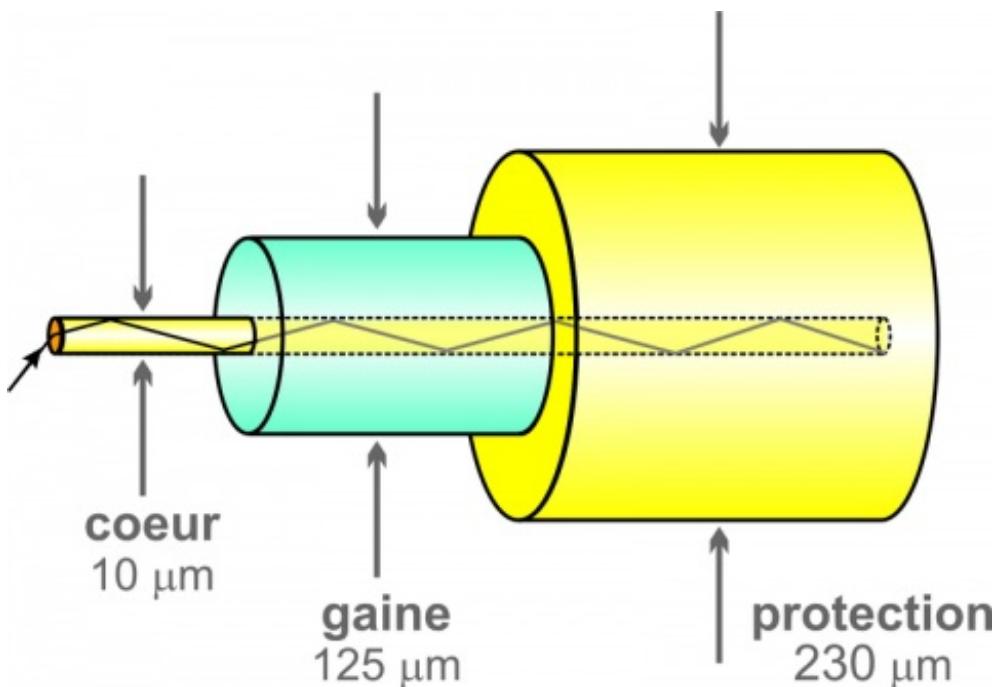
F - La réflexion totale

En chirurgie, on fait parfois entrer dans le corps du patient un **endoscope flexible**, ou **fibroscope**, qui va conduire la lumière et permettre au chirurgien de voir ce qui passe à l'intérieur pendant qu'il opère.



Mais il est tout entortillé, ce **fibroscope**. Comment peut-il conduire la lumière ? Elle ne se propage pas en ligne droite ?

Si, bien sûr. Sauf quand elle rencontre un **diopstre**. Or, le tuyau du fibroscope est une **fibre optique**, composée de deux matériaux transparents différents (deux variétés de plastiques), entourés d'une protection opaque :



La lumière se propage dans le cœur de la **fibre optique** et rencontre parfois le **diopstre cœur/gaine**. Là, elle peut donner naissance

à un **faisceau réfléchi** et à un **faisceau réfracté**, en fonction des **lois de Descartes**. Regardez ce que donne la troisième :

$$n_{coeur} \cdot \sin i = n_{gaine} \cdot \sin r$$

i est l'angle d'incidence et r est l'angle de réfraction.

$$\text{Donc } \sin r = \frac{n_{coeur}}{n_{gaine}} \cdot \sin i$$

Or, la fonction mathématique **sinus** a une particularité : ses valeurs ne peuvent être comprises qu'entre 1 et -1. Les plastiques composant la fibre optique sont choisis de telle sorte que $n_{coeur} > n_{gaine}$. Donc, si l'angle i est assez grand, on se retrouve avec :

$$\frac{n_{coeur}}{n_{gaine}} \cdot \sin i > 1$$

Donc **sin r** ne peut pas exister ! 😱

Donc il n'y a pas de faisceau réfracté : toute la lumière est réfléchie. Elle reste dans le cœur de la fibre et continue à y avancer en zigzags, comme on le voit sur l'image ci-dessus. C'est une **réflexion totale**.

Double avantage : on peut envoyer de la lumière depuis l'extérieur pour éclairer l'intérieur du corps et, dans l'autre sens, recevoir à l'extérieur la lumière diffusée par les organes (autrement dit, voir les organes).



Les fibres optiques sont utilisées dans bien des domaines, chaque fois que l'on veut "guider" un signal lumineux. Par exemple, elles servent à assurer des communications téléphoniques et n'ont pas leur pareil pour garantir un débit élevé sur internet.

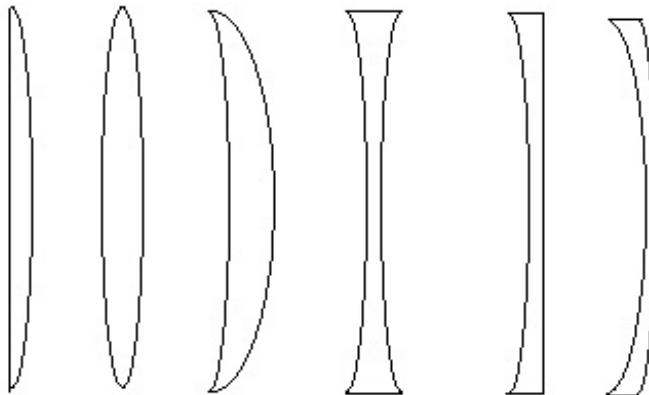
Vous connaissez maintenant les phénomènes de réflexion et de réfraction. Et vous savez prévoir de quelle manière la lumière va être déviée. Nous allons maintenant chercher comment en profiter. Je vous emmène tout de suite au pays des **lentilles**.

Les lentilles minces

Une **lentille** est un objet transparent comportant deux faces relativement proches l'une de l'autre et pas tout à fait parallèles entre elles.

Dans ce chapitre, nous allons parler des **lentilles minces**, celles dont l'épaisseur est négligeable par rapport aux dimensions de leurs deux faces principales. Elles sont presque toujours rondes et, vues de face, elles ressemblent à ceci (à droite) :

Vues "de profil", elles peuvent avoir des aspects beaucoup plus variables. Voici 6 exemples :



On distingue deux familles de lentilles minces :

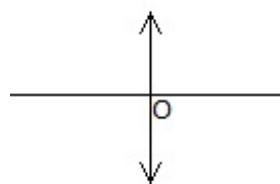
- Les 3 lentilles de gauche sont plus larges au centre et plus fines sur les bords : ce sont des **lentilles convergentes**.
- Les 3 lentilles de droite sont plus fines au centre et plus larges sur les bords : ce sont des **lentilles divergentes**.

Toutes ces lentilles sont généralement en verre mais elles peuvent aussi être en plastique ou dans n'importe quel matériau transparent.

A - Lentilles minces convergentes

Une lentille mince, c'est donc deux dioptrès, très proches l'un de l'autre, mais pas parallèles entre eux. Les rayons de lumière qui arrivent sur une lentille sont d'abord réfractés par le premier dioptre, puis par le second.

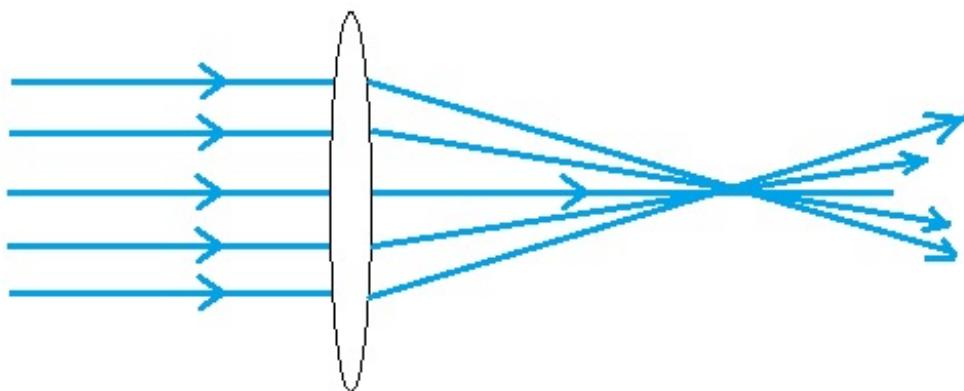
Le résultat de ces deux réfractions successives est assez intéressant. Prenons d'abord le cas d'une lentille mince convergente. Sur un schéma, elle est symbolisée (de profil) par une double flèche verticale :



Le point O est en plein centre de la lentille. On l'appelle le **centre optique** de la lentille. Les rayons de lumière qui passent par le centre optique ne sont jamais déviés.

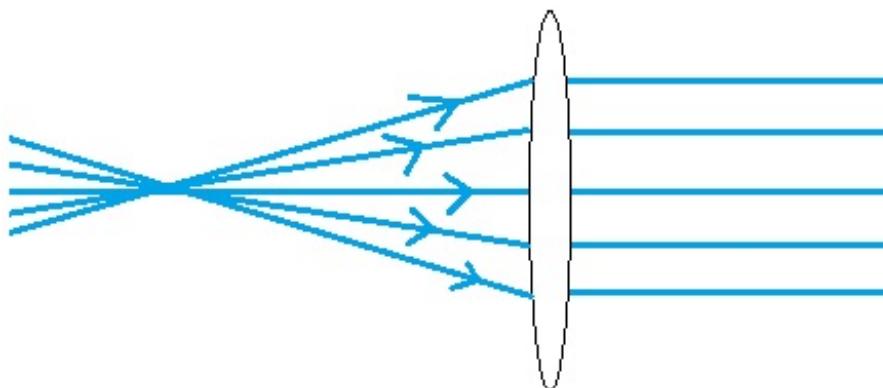
Et cette ligne horizontale, c'est l'**axe optique** de la lentille : une droite imaginaire perpendiculaire à la lentille et passant par le centre optique.

Si l'on envoie sur une **lentille convergente** un **faisceau de lumière**, c'est-à-dire un ensemble de rayons parallèles entre eux, et si ces rayons sont aussi parallèles à l'axe optique, ils vont **converger** après avoir traversé la lentille et vont se croiser en un point unique. C'est pour ça qu'on parle de lentille **convergente**. 😊



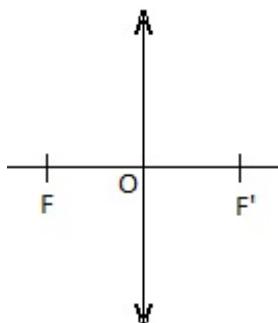
Il y a donc beaucoup de lumière, beaucoup d'énergie, concentrée en ce point unique. Tellement d'énergie qu'il est théoriquement possible d'y allumer un feu. On appelle donc ce point le **foyer** de la lentille.

Plus précisément, on l'appelle le **foyer image**. Car la lentille a un deuxième foyer, le **foyer objet**, situé de l'autre côté. Si des rayons de lumière se croisent au foyer objet avant de traverser la lentille, ils seront parallèles entre eux, et parallèles à l'axe optique, quand ils ressortiront.



Ajoutons les foyers au schéma précédent :

On suppose ici (et sur tout mes autres schémas) que la lumière se déplace de gauche à droite.



Les points F et F' sont les foyers de la lentille. F est le **foyer objet** et F' le **foyer image**. Ils sont tous deux situés sur l'axe optique, à égale distance du point O.

Cette distance commune dépend des dimensions de la lentille. On l'appelle la **distance focale**, on la note **f** et on l'exprime en **mètres** (ben oui : c'est une distance 😊). Vous allez voir qu'elle est très importante. Car les lentilles ne sont pas toutes aussi convergentes les unes que les autres. Et certaines sont carrément divergentes. On appelle **vergence** la grandeur physique qui dit à quel point une lentille est convergente. Le symbole de la vergence est **C**. Ne me demandez pas pourquoi. 😊 Son unité est la **dioptrie**, représentée par la lettre grecque **δ** ("delta").

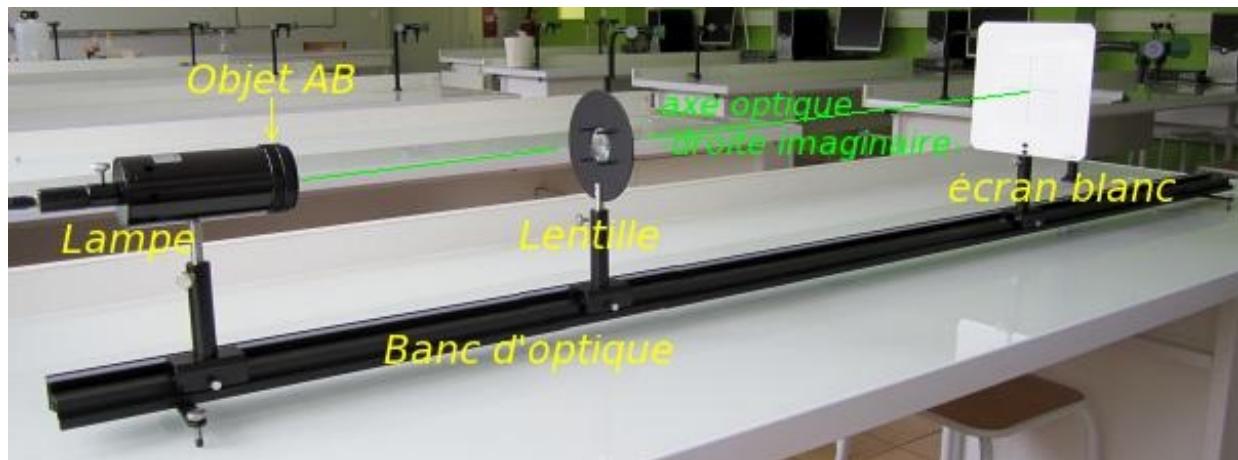
Plus une lentille est convergente, plus sa **vergence** est grande. Si elle est divergente (nous y reviendrons), sa vergence est négative. Or, cette vergence est directement liée à la **distance focale** par la relation :

$$C = \frac{1}{f}$$

Donc, plus une lentille est convergente, plus sa distance focale est petite. C'est logique : plus elle est convergente et moins les rayons doivent parcourir une grande distance avant de se croiser.

Expérience

Bon, il est temps de faire quelque chose d'utile avec notre lentille. Il faut se placer dans une pièce sombre, pour qu'il n'y ait pas d'autres rayons de lumière que ceux qui nous intéressent. On fixe la lentille sur un support qu'on appelle un **banc d'optique**. Devant, on place un objet lumineux quelconque, qui sera représenté sur les prochains schémas par le segment AB :

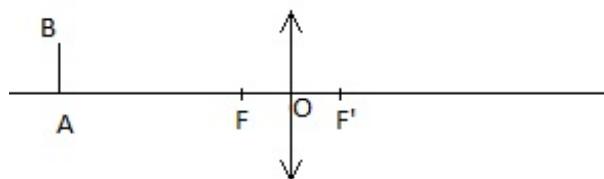


Je me servirai de l'écran blanc un peu plus tard. La droite verte sur la photo est, bien sûr, une droite imaginaire, perpendiculaire à la lentille et passant par O. C'est donc...

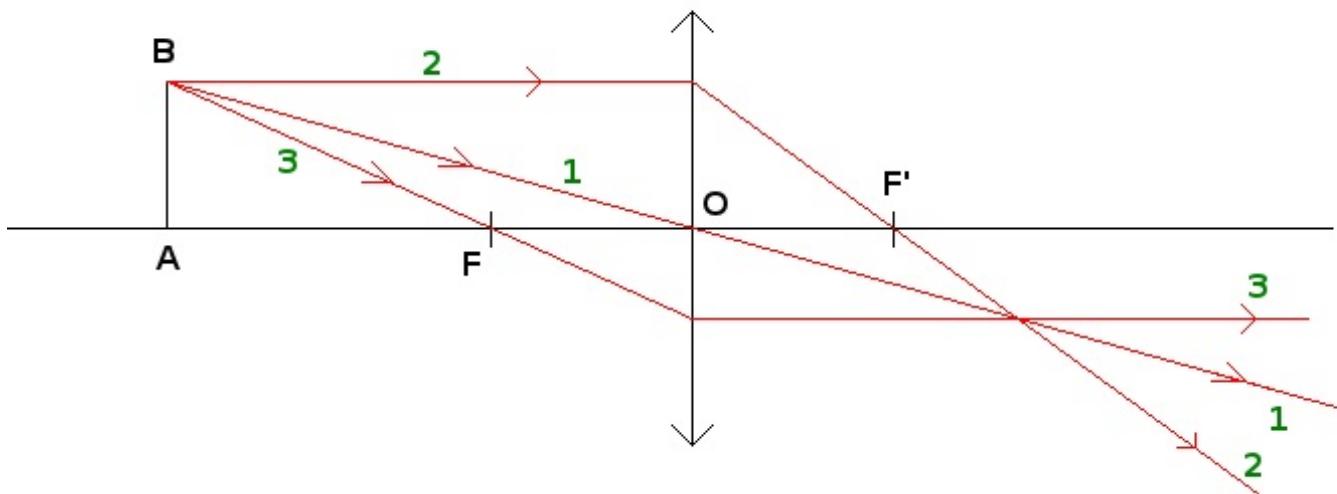
Secret ([cliquez pour afficher](#))

l'axe optique.

Schématisons ce dispositif :



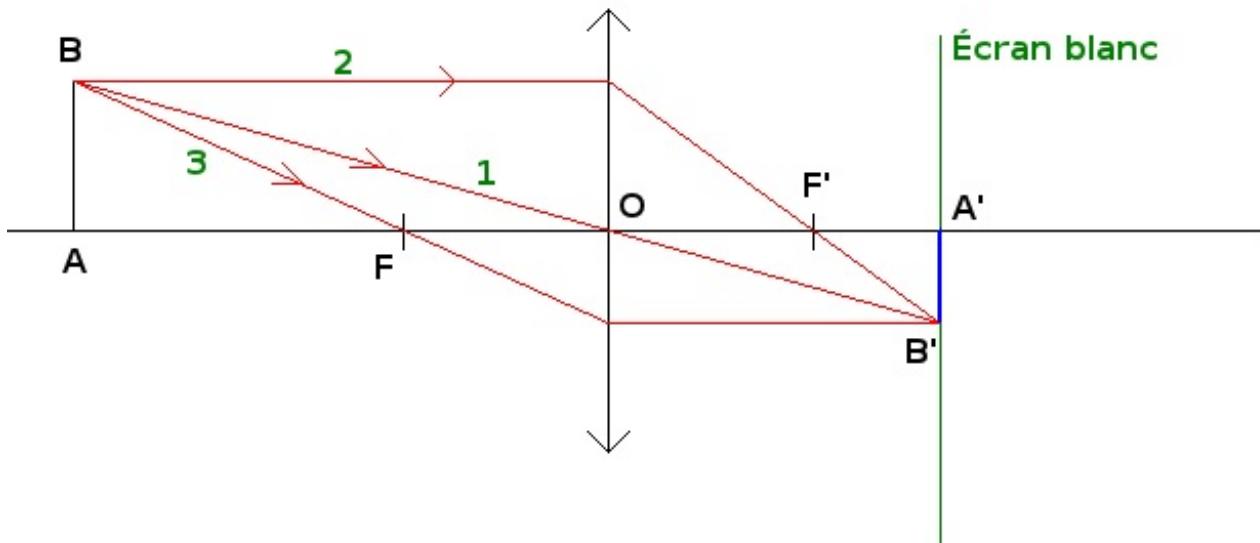
Le point B (comme tous les autres, mais on ne va en prendre qu'un : ce sera plus simple) émet des rayons de lumière dans toutes les directions. Ceux qui vont vers la droite vont atteindre la lentille, et être déviés. Et parmi eux, il y a trois rayons particuliers dont on peut prévoir le trajet :



- 1 : Ce rayon passe par le centre optique de la lentille. Il n'est donc pas dévié.
- 2 : Ce rayon est parallèle à l'axe optique. Une fois la lentille franchie, il passera donc par le point F'.

- 3 : Ce rayon passe par le point F. Une fois la lentille franchie, il sera donc parallèle à l'axe optique.

Surprise ! Ces trois rayons se croisent en un même point après la lentille, un point que nous appellerons B'. Si on place un écran blanc à cet endroit, on peut observer en B' une image de ce qui se trouve au point B. Et comme chacun des points de AB diffuse la lumière de la même façon, chacun engendre un point image quelque part sur le segment A'B'. On peut donc observer une image renversée de l'objet AB :



On peut même enregistrer cette image en plaçant une pellicule photographique sur l'écran. C'est le principe de l'appareil photo !

Nous verrons d'autres applications concrètes au prochain chapitre.

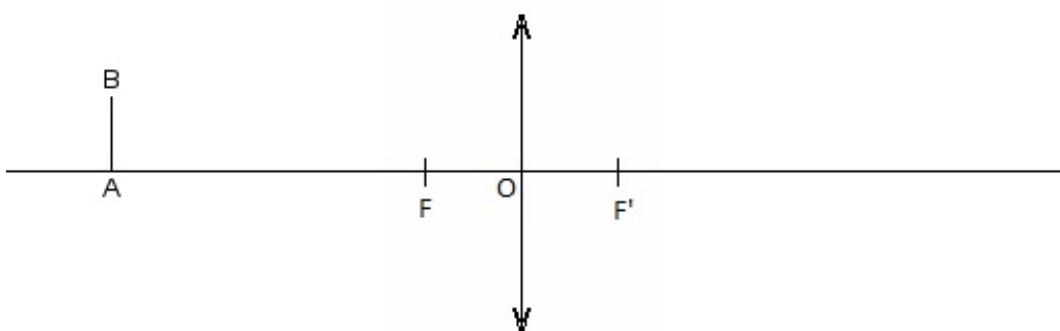
Pour obtenir une image nette, il faut bien mettre l'écran au niveau des points A' et B'. Si on le met un peu avant ou un peu après, l'image sera floue.



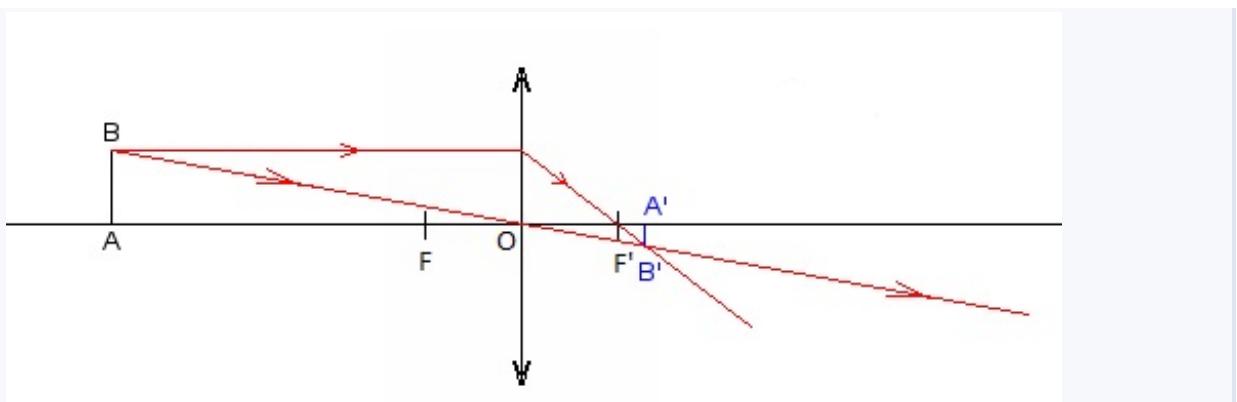
Toutes ces règles ne sont valables que si les **conditions de Gauss** sont respectées : les rayons doivent être peu inclinés par rapport à l'axe optique et traverser la lentille tout près de son centre. Pour des raisons de lisibilité, les schémas donnent souvent l'impression de ne pas respecter ces conditions. Mais dans tous les exemples que nous allons voir, je pars toujours du principe que nous sommes bel et bien dans les conditions de Gauss.

Exercice

Avant de lire la suite, je vous propose, pour bien digérer ce passage, de vous entraîner à construire des images. Copiez le schéma ci-dessous dans votre logiciel de dessin préféré, puis tracez vous-mêmes les rayons issus de B et cherchez où il faut placer l'écran blanc pour voir une image nette A'B' de AB. Quelle est, en pixels, la distance entre la lentille et l'écran ?



Secret (cliquez pour afficher)



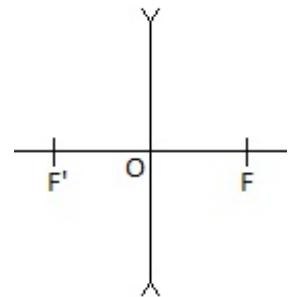
Il y a **60 pixels** entre la lentille et l'image A'B'. C'est au niveau de cette image qu'il faut placer l'écran.

Remarquer qu'il suffit de tracer 2 rayons pour trouver B'.

B - Lentilles minces divergentes

Les **lentilles divergentes** ne font pas converger mais **divergent** les rayons de lumière qui les traversent. Du coup, il y a pas mal de choses qui changent. Regardez sur le schéma de droite comment on la représente et remarquez que les deux foyers sont inversés. La lumière, pourtant, se propage toujours de la gauche vers la droite.

La **vergence C** et la **distance focale f'** d'une lentille divergente sont négatives.

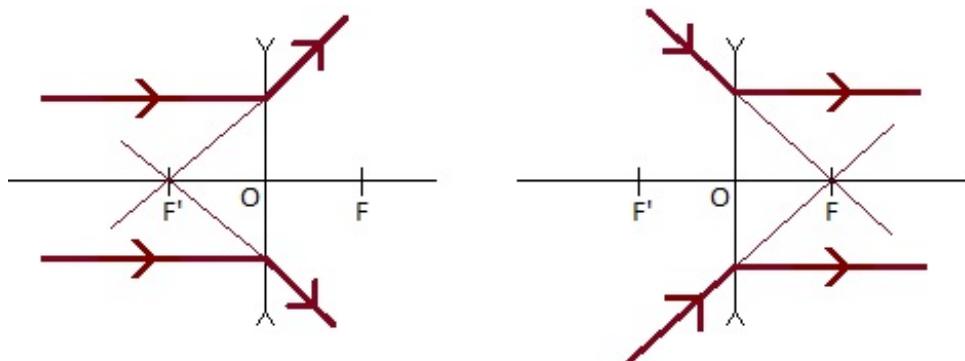


Négative, la distance focale ? Mais comment une distance peut-elle être négative ?

C'est vrai, une **distance** est toujours positive. f' n'en est pas vraiment une. C'est plutôt ce qu'on appelle une **distance algébrique** : une distance avec un sens. C'est-à-dire qu'il y a un point de départ et un point d'arrivée. Si le point d'arrivée (ici F') est à droite du point de départ (ici O), alors la distance algébrique est positive. Mais s'il se trouve à gauche, alors la distance algébrique est négative. On peut aussi noter une distance algébrique de cette façon : $\overline{OF'}$, avec une barre au dessus, pour la distinguer d'une distance ordinaire. $f' = \overline{OF'}$

Mais comment F' peut-il être à gauche ? Comment des rayons sortant de la lentille peuvent-ils se croiser en un point situé *avant* la lentille ?

Les rayons sortant d'une lentille divergente ne convergent nulle part. Je vous l'ai dit : ils divergent. Mais si on prolonge ces rayons vers la gauche, regardez ce que font ces prolongements :



- Si un rayon arrive parallèlement à l'axe optique, il s'en éloigne après la lentille, mais son prolongement vers la gauche passe par le foyer image F'.
- Si un rayon se dirigeait vers le foyer objet F avant d'atteindre la lentille, alors il est parallèle à l'axe optique quand il

ressort.

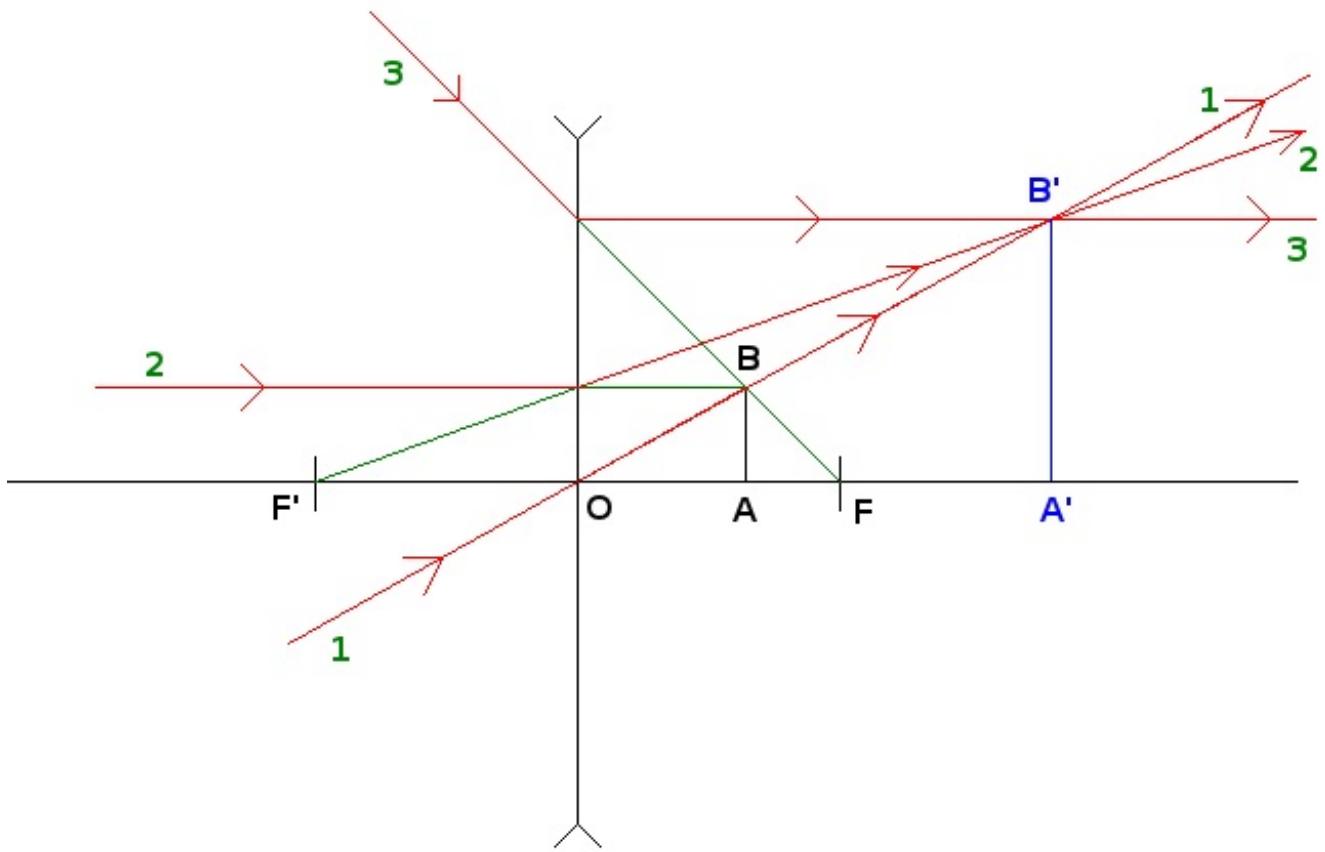
- Comme avec une lentille convergente, les rayons passant par le centre optique ne sont pas déviés.

Finalement, ce n'est pas si compliqué, vous voyez. Ce sont les mêmes règles qu'avec une lentille convergente. Enfin presque... 

Voyons si, en appliquant ces règles, on peut former l'image d'un objet à travers une lentille divergente.

L'objet AB est placé juste derrière la lentille. Comme toute à l'heure, nous allons examiner 3 rayons particuliers passant par B. Les 3 mêmes que pour la lentille convergente.

- Le rayon 1 (en bas à gauche), passant par B et par le centre optique, n'est pas dévié. Pour lui, c'est simple. Bon, d'accord, il passe d'abord par O avant de passer par B, mais on ne va pas en faire un plat. 
- Voyons maintenant le rayon 2 (à gauche au milieu), qui arrive sur la lentille parallèlement à l'axe optique. Ce rayon passe par B. Bon d'accord, il ne passe pas vraiment par B puisque la lentille le dévie avant. Mais son prolongement (en vert) passe par B. Après avoir franchi la lentille, le rayon sortant doit passer par F'. Mais vous l'avez compris : F' est à gauche. C'est donc le prolongement du rayon sortant (à gauche en vert) qui passe par F'.
- Le 3ème rayon particulier, en haut à gauche, c'est celui dont le prolongement passe par B et par F. Avoir avoir franchi la lentille, ce rayon devient parallèle à l'axe optique.



On obtient donc trois rayons sortant de la lentille. Ces rayons se croisent en un point que nous appellerons B'. Ce dispositif forme l'image A'B' de AB. Une image plus grande que l'objet de départ mais dans le même sens.

C - Objet, image, réel et virtuel

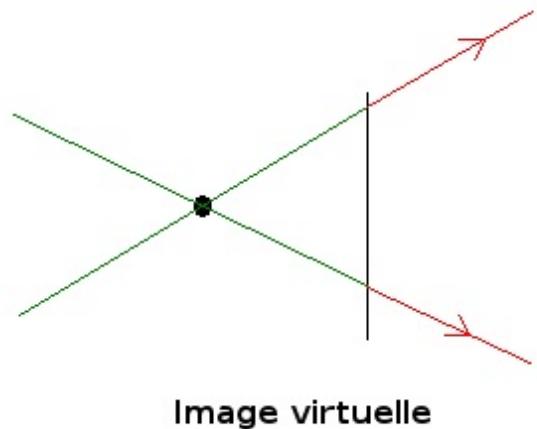
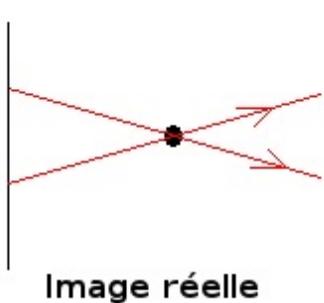
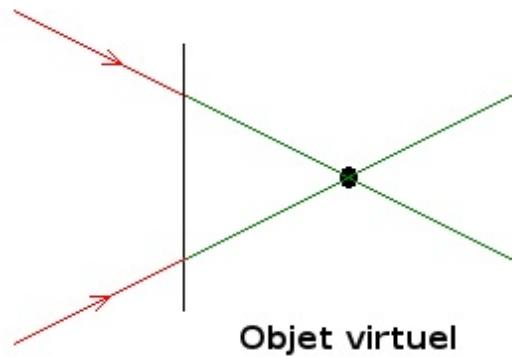
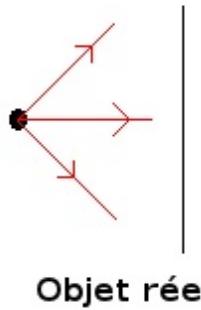
Maintenant que nous avons vu ces deux exemples, nous pouvons définir les termes **objet** et **image**. Ces définitions sont valables aussi bien pour des lentilles convergentes que pour des lentilles divergentes.

Un **point objet** (B, par exemple) est le point d'intersection des rayons de lumière entrant dans la lentille ou de leurs prolongements.

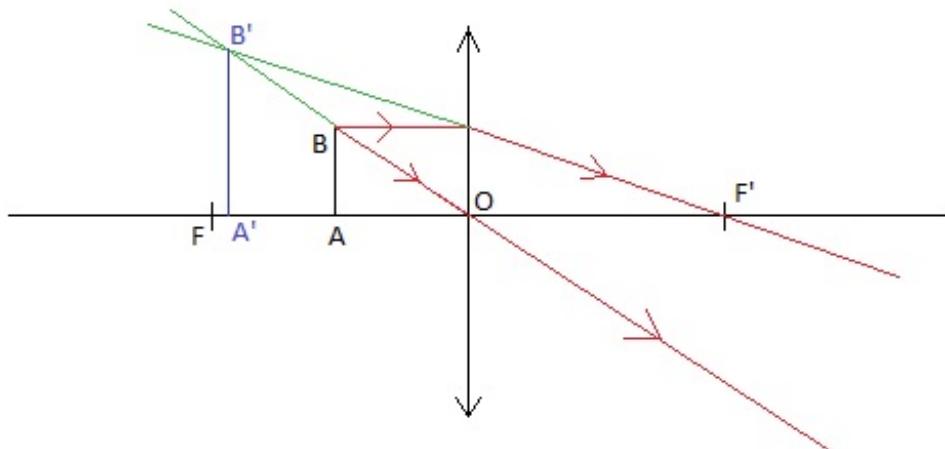
Un **point image** (B' , par exemple) est le point d'intersection des rayons de lumière sortant de la lentille ou de leurs prolongements.

On distingue deux sortes d'images : les **images réelles**, que l'on peut recueillir sur un écran, et les **images virtuelles**, que l'on ne peut observer qu'à travers la lentille. Si les rayons sortant de la lentille se croisent vraiment, l'image sera réelle. Si ce sont seulement leurs prolongements qui se croisent, l'image sera virtuelle.

De même, il existe des **objets réels** et des **objets virtuels**. Si les rayons entrant se croisent vraiment, l'objet est réel. Si ce sont leurs prolongements qui se croisent, l'objet est virtuel.



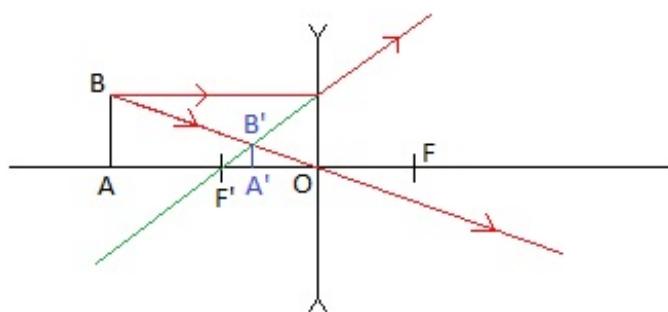
Voyons maintenant deux autres exemples. Que se passe-t-il si on place un objet juste devant une lentille convergente ?



Je ne trace plus, à chaque fois, que deux des trois rayons particuliers. Cela suffit pour localiser B'.

L'image A'B' obtenue est virtuelle. On ne peut pas la recueillir sur un écran. Mais si on place notre œil à droite, et si on regarde à travers la lentille, on la verra. Elle est plus grosse que AB donc plus facile à observer. Et elle est dans le bon sens. Dans cet exemple, la lentille convergente a servi de **loupe**.

Avec une lentille divergente, maintenant. L'objet est placé à gauche.



Là encore, l'image est de type virtuel puisque ce sont les prolongements des rayons sortants qui se croisent. Il faut regarder à travers la lentille pour la voir. Cette fois, l'image obtenue est plus petite que l'objet, ce qui présente en général un intérêt limité.

D - Emplacement et taille de l'image

Pour prévoir l'emplacement d'une image, ainsi que sa taille, il n'est pas nécessaire de sortir à chaque fois sa panoplie de géomètre. Des formules mathématiques permettent de les déterminer par le calcul, ce qui est souvent plus simple, surtout quand on a plusieurs lentilles l'une derrière l'autre.

Ce qui est bien pratique, c'est que ces formules sont exactement les mêmes avec toutes les lentilles, qu'elles soient convergentes ou divergentes, avec tous les objets, qu'ils soient réels ou virtuels, et avec toutes les images, qu'elles soient, elles aussi, réelles ou virtuelles.

Il y a, d'abord, la **formule de conjugaison**, pour localiser l'image :

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$$

- $a = \overline{OA}$ C'est la distance algébrique de O vers A, en mètres (m)
- $a' = \overline{OA'}$ C'est la distance algébrique de O vers A', en mètres (m)
- $f' = \overline{OF'}$ C'est la distance algébrique de O vers F', en mètres (m)

Exercice

Un objet est placé à 10 cm à gauche d'une lentille mince convergente de distance focale 3 cm. Où se trouve son image ? Vous pouvez faire un schéma grandeur nature pour vous aider.

Secret (cliquez pour afficher)

L'objet est à gauche de la lentille donc A est à gauche de O, donc la distance algébrique a est négative.

C'est a' qu'on cherche. $a = -10 \text{ cm} = -0,10 \text{ m}$ et $f = 3,0 \text{ cm} = 0,030 \text{ m}$.

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{f'} = \frac{1}{-0,10} + \frac{1}{0,03} = -10 + 33 = 23 \delta$$

$$a' = \frac{1}{23} = 0,043 \text{ m} = 4,3 \text{ cm}$$

L'image se trouve donc à **4,3 cm** à droite du centre optique de la lentille.

La taille, à présent. Le **grandissement** est une grandeur physique sans unité, de symbole γ ("gamma"), qui permet de comparer la taille de l'image à celle de l'objet.

Soit h la hauteur de l'objet, c'est-à-dire la distance algébrique \overline{AB} de A vers B. Soit h' la hauteur de l'image, c'est-à-dire la distance algébrique $\overline{A'B'}$ de A' vers B'.

$$\gamma = \frac{h'}{h} = \frac{a'}{a}$$

Exercice

Soit AB un objet de 3,0 cm de haut. B est au dessus de A. On le place à 2,0 cm à droite d'une lentille mince divergente de distance focale - 5,0 cm. Où se trouve l'image et quelle est sa hauteur ?

Secret (cliquez pour afficher)

$$h = 3,0 \text{ cm} = 0,030 \text{ m}$$

$$a = 2,0 \text{ cm} = 0,020 \text{ m}$$

$$f = -5,0 \text{ cm} = -0,050 \text{ m}$$

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{f'} = \frac{1}{0,020} + \frac{1}{-0,050} = 50 - 20 = 30 \delta$$

$$a' = \frac{1}{30} = 0,033 \text{ m} = 3,3 \text{ cm}$$

L'image se trouve donc à 3,3 cm à droite du centre optique de la lentille.

$$\frac{h'}{h} = \frac{a'}{a}$$

$$h' = \frac{h \cdot a'}{a} = \frac{0,030 \cdot 0,033}{0,020} = \frac{3,0}{2,0} \cdot 0,033 = 0,050 \text{ m} = 5,0 \text{ cm}$$

L'image mesure donc 5,0 cm de haut et elle est à l'endroit. Si elle avait été renversée, on aurait trouvé une valeur négative.

Vous aimez les lentilles ? 😊 Tant mieux. On va continuer à travailler avec elles, et en associer plusieurs pour mettre au point divers systèmes optiques tous plus utiles les uns que les autres.

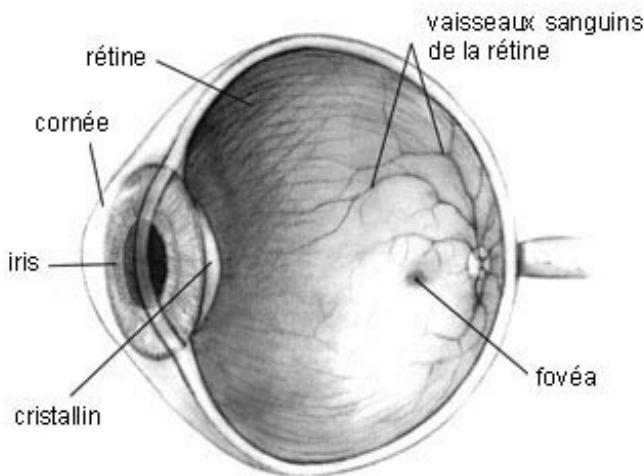
Systèmes optiques

Les lentilles nous permettent de jouer avec la lumière. Elles ont de nombreuses applications. Je vous propose maintenant d'en examiner quelques-unes.

En commençant par la plus essentielle de toutes : l'**œil**.

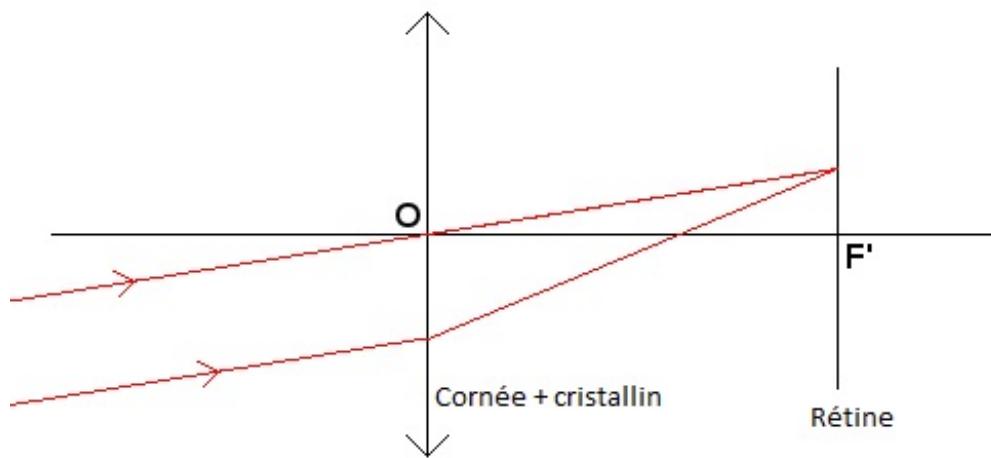
A - L'œil

L'**œil** est l'organe de la vue. C'est lui qui reçoit la lumière du monde extérieur et la convertit en influx nerveux compréhensibles par le cerveau. Voici un schéma anatomique d'un œil humain :



La **cornée** et le **cristallin** constituent ensemble un lentille convergente. Seul le centre de cette lentille (la **pupille**) est effectivement transparent : le reste est masqué par l'**iris**, ce qui garantit le respect des **conditions de Gauss**. Au fond de l'œil, au centre de la rétine, la **fovéa** correspond à peu près au foyer image F' de cette lentille. La **répine** en général joue le rôle d'écran. C'est là que l'œil forme l'image (réelle) des objets extérieurs.

Voici donc un schéma plus simple :



Les deux rayons de lumière représentés en rouge sur ce schéma proviennent d'un même point : celui qu'on regarde. Si ce point n'est pas trop proche, les deux rayons sont pratiquement parallèles entre eux quand ils arrivent sur la cornée. Par contre, il n'y a aucune raison pour qu'ils soient parallèles à l'axe optique de l'œil.

Le rayon qui passe par le centre optique n'est pas dévié. L'autre si.



Quand des rayons de lumière parallèles entre eux arrivent sur une lentille, les rayons sortants se croisent quelque part dans le **plan focal image** de la lentille, c'est à dire le plan passant par F' et perpendiculaire à l'axe optique.

Les deux rayons sortants rouges se croisent donc quelque part dans le plan focal image de l'œil. C'est donc dans ce plan que se forme une image nette du monde extérieur, à l'exception toutefois des objets très proches de l'œil. Et comme la nature est très

bien faite 😊, c'est aussi là que se trouve la rétine.



Et comment fait-on pour regarder des objets proches ? Pour lire un livre, par exemple ?

Les rayons de lumière venus d'un point du livre ne sont pas parallèles entre eux quand ils arrivent sur la cornée. On est dans le cas du premier exemple du chapitre précédent : l'image va se former plus loin que le plan focal image. Heureusement, les **muscles ciliaires** sont là. En se contractant, ils modifient la courbure de la cornée et réduisent la distance focale. Du coup, le plan focal se retrouve en avant de la rétine. Et l'image nette, elle, se forme bien sur la rétine. On dit que l'oeil **accommode**.

Mais bien sûr, ce travail fatigue les muscles ciliaires. Il est donc plus reposant pour l'oeil de regarder l'horizon plutôt qu'un objet proche. En plus, ces muscles ont leurs limites. Si vous placez votre doigt juste devant votre oeil, ils ne pourront pas accommoder suffisamment pour que vous le voyiez net. De même, impossible de voir nettement le bout de votre nez. 😞

On appelle **punctum proximum**, la plus petite distance à laquelle on est capable de voir nettement un objet en accommodant. Cette valeur varie d'un individu à l'autre et a tendance à augmenter avec l'âge. De plus, certaines personnes souffrent de **presbytie**, un dysfonctionnement des muscles ciliaires, et ont un **punctum proximum** relativement éloigné.

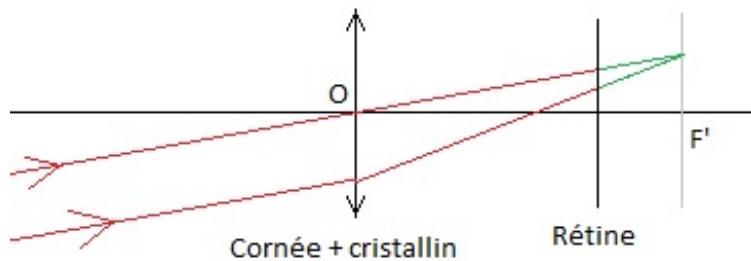
On parle aussi de **punctum remotum**, la plus grande distance à laquelle on peut voir un objet. Mais rien n'est plus facile pour un oeil que de regarder l'horizon, ou même les étoiles. Le **punctum remotum** se trouve donc à l'infini.

B - Les verres correcteurs

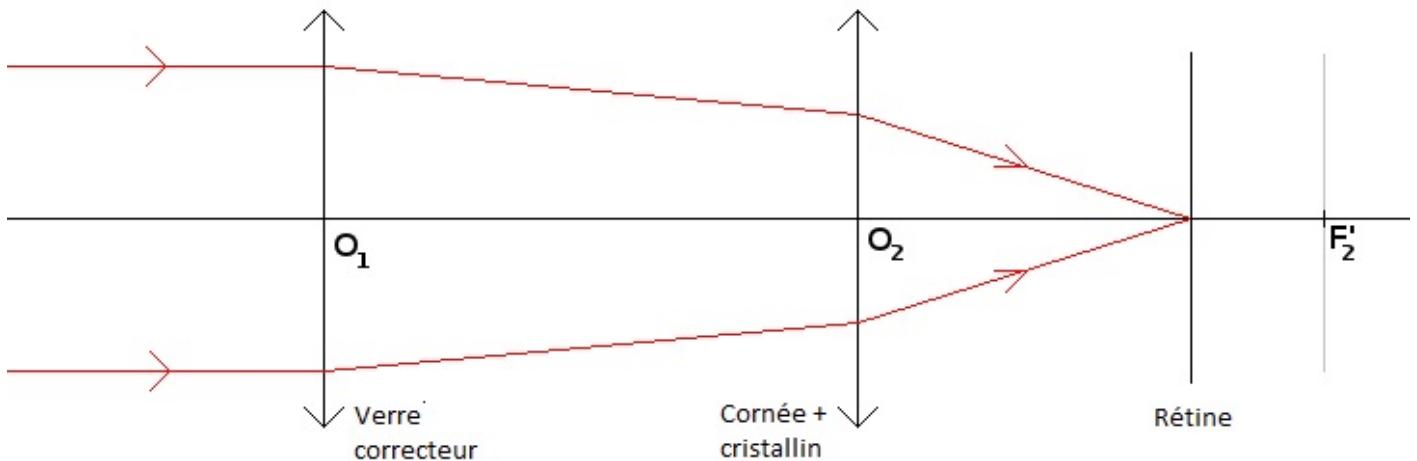
Parfois, l'oeil ne fonctionne pas aussi bien qu'on le voudrait. La position de la rétine ne correspond pas à celle du plan focal image. Il faut alors recourir à des verres correcteurs pour que les images nettes se forment quand même sur la rétine.

Correction de l'hypermétropie

Un oeil hypermétrope est un oeil trop peu convergent ou trop peu profond. Sa distance focale est plus grande que la distance entre la pupille et la rétine. Son plan focal image se trouve donc derrière la rétine. En accommodant, les personnes hypermétropes peuvent arriver à voir les objets lointains. Mais c'est fatigant. Et ils ne peuvent pas voir nettement les objets proches.



Le problème est donc que l'oeil n'est pas assez convergent. On peut arranger ça en plaçant devant lui une deuxième lentille convergente. Ce verre correcteur peut être une lentille de contact ou faire partie d'une paire de lunettes.



Le verre correcteur commence à faire converger les rayons de lumière. La cornée et le cristallin continuent le travail, et les rayons se croisent sur la rétine.

Bien sûr, la **vergence** du verre correcteur doit être soigneusement choisie. Voyons si vous feriez un bon opticien.

Exercice

Un patient hypermétrope a une profondeur de 1,2 cm entre sa pupille et sa rétine. La distance focale de son oeil est de 1,6 cm. Pour qu'il puisse regarder sans effort un arbre situé à l'infini, on lui donne une paire de lunettes, avec des verres correcteurs placés à 2,0 cm devant ses yeux. Quelle est la vergence de ces verres ?

Pas évident, hein ?

Bon, je vous donne la réponse. Et vous cherchez vous-mêmes pour la myopie.

On appelle L1 la première lentille (le verre correcteur) et L2 la seconde (la cornée + le cristallin).

$a_1 = -\infty$: on regarde les objets à l'infini.

$a'_1 = 1,2 \text{ cm} = 0,012 \text{ m}$

$f'_1 = 1,6 \text{ cm} = 0,016 \text{ m}$

$O_1O_2 = 2,0 \text{ cm} = 0,020 \text{ m}$

On cherche C_1 , la vergence de L1. Appliquons la formule de conjugaison.

$$\frac{1}{a'_1} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f'_1} \text{ donc } \frac{1}{a'_1} - \frac{1}{-\infty} = C_1 \text{ donc } \frac{1}{a'_1} - 0 = C_1 \text{ donc } C_1 = \frac{1}{a'_1}$$

a'_1 est la distance algébrique $\overline{O_1A'_1}$. Au point A'_1 se trouve l'image de l'arbre par le verre correcteur. Cette image intermédiaire sert d'objet à la seconde lentille. L'image définitive sera sur la rétine. Donc le point A'_2 se trouve sur la rétine tandis que A_2 n'est autre que A'_1 .

$$\text{Donc } \overline{O_1O_2} + a_2 = a'_1 \text{ donc } C_1 = \frac{1}{\overline{O_1O_2} + a_2} \text{ donc il faut maintenant calculer } a_2.$$

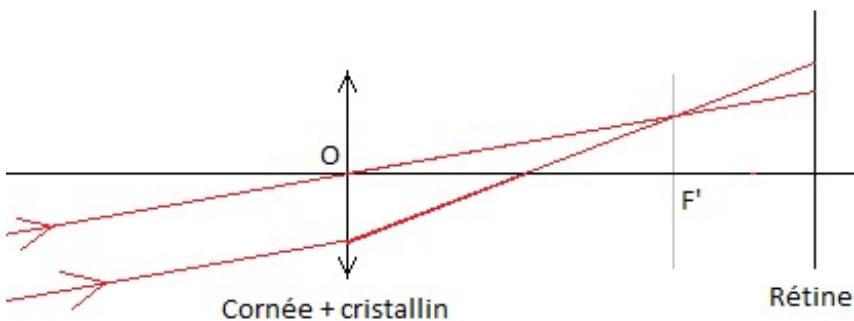
$$\frac{1}{a'_2} - \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f'_2} \text{ donc } \frac{1}{a_2} = \frac{1}{a'_2} - \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{0,012} - \frac{1}{0,016} = 21 \delta \text{ donc } a_2 = 0,048 \text{ m}$$

$$C_1 = \frac{1}{\overline{O_1O_2} + a_2} = \frac{1}{0,020 + 0,048} = \frac{1}{0,068} = 15 \delta$$

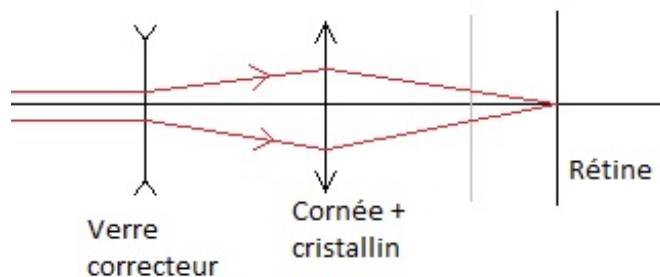
Il faut des verres de **15 δ** pour corriger la vue de ce patient hypermétrope. Cette vergence est positive donc les verres correcteurs sont convergents.

Correction de la myopie

Un œil myope est un œil trop convergent ou trop profond. Sa distance focale est plus petite que la distance entre la pupille et la rétine. Son plan focal image se trouve donc devant la rétine. En accommodant, les personnes myopes peuvent arriver à voir les objets proches. Mais c'est fatigant. Et ils ne peuvent pas voir nettement les objets éloignés. Leur **punctum remotum** n'est pas à l'infini.



Le problème est donc que l'oeil est trop convergent. On peut arranger ça en plaçant devant lui une lentille divergente. Ce verre correcteur peut être une lentille de contact ou faire partie d'une paire de lunettes.



Le verre correcteur fait diverger les rayons de lumière. Ensuite, la cornée et le cristallin les font converger juste assez pour qu'ils se croisent sur la rétine.

Bien sûr, la **vergence** du verre correcteur doit être soigneusement choisie. Cette fois, à vous de faire le calcul.

Exercice

Un patient myope a une profondeur de 1,5 cm entre sa pupille et sa rétine. La distance focale de son œil est de 1,2 cm. Pour qu'il puisse regarder sans effort un arbre situé à l'infini, on lui donne une paire de lunettes, avec des verres correcteurs placés à 2,2 cm devant ses yeux. Quelle est la vergence de ces verres ?

Secret (cliquez pour afficher)

On appelle L1 la première lentille (le verre correcteur) et L2 la seconde (la cornée + le cristallin).

$a_1 = -\infty$: on regarde les objets à l'infini.

$a'_1 = 1,5 \text{ cm} = 0,015 \text{ m}$

$f_2 = 1,2 \text{ cm} = 0,012 \text{ m}$

$O_1O_2 = 2,2 \text{ cm} = 0,022 \text{ m}$

On cherche C_1 , la vergence de L1. Appliquons la formule de conjugaison.

$$\frac{1}{a'_1} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f'_1} \text{ donc } \frac{1}{a'_1} - \frac{1}{-\infty} = C_1 \text{ donc } \frac{1}{a'_1} - 0 = C_1 \text{ donc } C_1 = \frac{1}{a'_1}$$

a'_1 est la distance $O_1A'_1$. Au point A'_1 se trouve l'image de l'arbre par le verre correcteur. Cette image intermédiaire sert d'objet à la seconde lentille. L'image définitive sera sur la rétine. Donc le point A'_2 se trouve sur la rétine tandis que A_2 n'est autre que A'_1 .

$$\text{Donc } \overline{O_1O_2} + a_2 = a'_1 \text{ donc } C_1 = \frac{1}{\overline{O_1O_2} + a_2} \text{ donc il faut maintenant calculer } a_2.$$

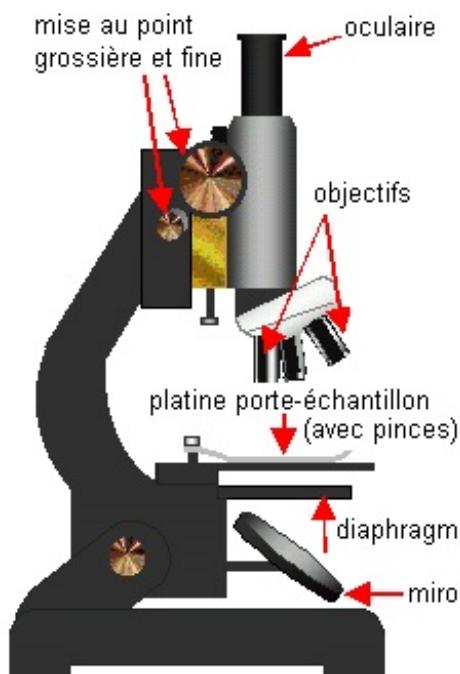
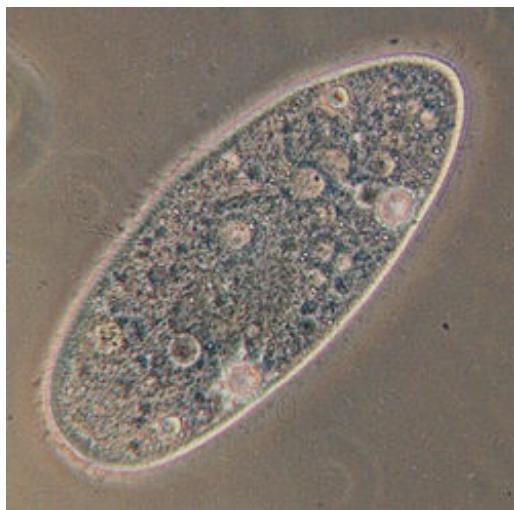
$$\frac{1}{a'_2} - \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f'_2} \text{ donc } \frac{1}{a_2} = \frac{1}{a'_2} - \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{0,015} - \frac{1}{0,012} = -17 \delta \text{ donc } a_2 = -0,060 \text{ m}$$

$$C_1 = \frac{1}{O_1 O_2 + a_2} = \frac{1}{0,022 - 0,060} = \frac{1}{-0,038} = -26 \delta$$

Il faut des verres de **-26 δ** pour corriger la vue de ce patient myope. Cette vergence est négative donc les verres correcteurs sont divergents.

C - Le microscope

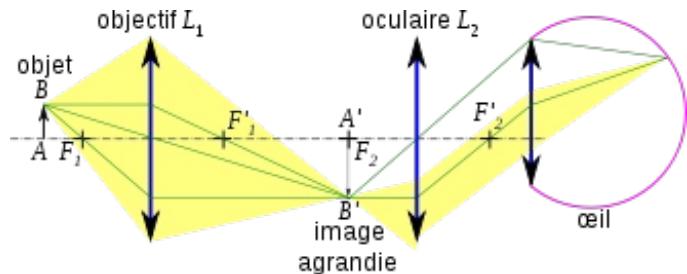
Maintenant que tout le monde voit clair, que diriez-vous d'un peu de Biologie pour changer ? Penchons-nous sur le monde des cellules et organismes microscopiques. Admirez par exemple cette magnifique **paramécie**, l'un des plus petits animaux que l'on connaisse :



Elle mesure environ 200 µm de long, 0,2 mm, si vous préférez. Pour la voir aussi bien, on doit naturellement se servir d'un instrument d'optique : un **microscope**. Cette fois-ci, pas moins de 3 lentilles convergentes interviennent :

- L'**objectif**, situé du côté de l'*objet* observé.
- L'**oculaire**, auquel nous accolons notre *œil*.
- L'**œil** lui-même, bien entendu.

La lumière arrive par en bas. Un miroir l'envoie vers la plateforme où se trouve l'échantillon à analyser. Celui-ci doit être très fin, pour que la lumière puisse passer et atteindre la première lentille : l'**objectif**.



Comme toute lentille convergente, l'**objectif** produit de l'*objet* AB une image réelle A'B'. Grâce aux mollettes de mise au point, on règle la distance entre l'**objectif** et l'**oculaire** jusqu'à ce que A'B' se retrouve dans le **plan focal objet** de l'**oculaire**.



Le **plan focal objet** d'une lentille est un plan passant par le foyer objet et perpendiculaire à l'axe optique. Les rayons de lumière issus d'un même point de ce plan sont parallèles entre eux après avoir franchi la lentille.

Donc, tous les rayons de lumière passant par le point B' sont parallèles entre eux après avoir franchi l'oculaire. Ils sont donc toujours parallèles entre eux quand ils atteignent la cornée. Et comme on l'a vu au début de ce chapitre, des rayons parallèles entre eux finissent par converger dans le plan focal image de l'œil : sur la rétine, donc. Pour chaque point de la paramécie observée, on obtient un et un seul point de lumière sur la rétine. Donc on voit la paramécie.



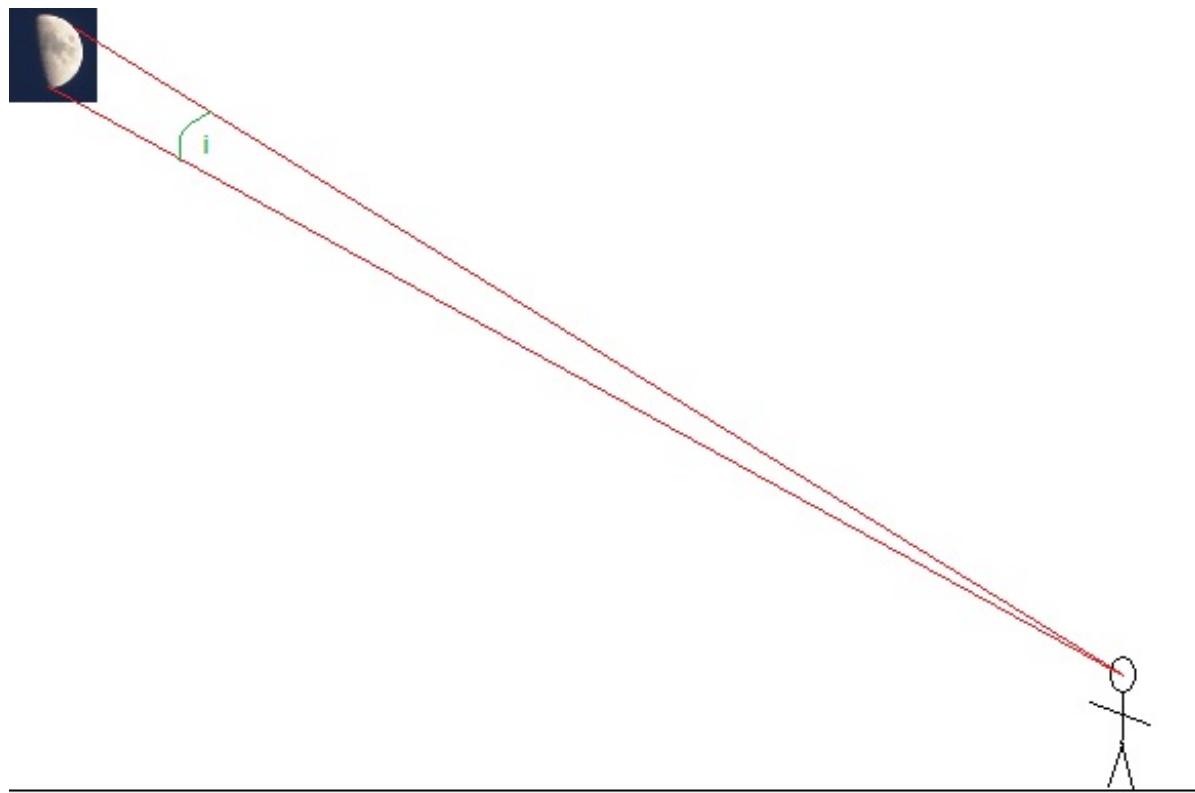
Et pourquoi l'image est-elle plus grosse que la paramécie réelle ?

Parce que l'image A'B' est plus loin de l'objectif que l'objet AB. La formule du grandissement, vue au chapitre précédent (qui découle tout simplement du théorème de Thalès), nous montre que si $OA' > OA$, alors $A'B' > AB$.

D - La lunette astronomique

Allez, maintenant, on lève le nez. Regardez vers la Lune. Comme le microscope, la **lunette astronomique** fait intervenir trois lentilles convergentes : l'**objectif** (vers l'objet), l'**oculaire** (vers l'œil) et l'**œil** lui-même. Mais cette fois, l'objet à observer n'est pas 2 mm plus bas. Il est au minimum à des centaines de milliers de kilomètres plus haut. Autrement dit : à l'infini. Et il est clair que deux rayons issus d'un même point de la Lune sont tout à fait parallèles entre eux quand ils arrivent sur l'objectif.

L'important, quand on regarde la Lune, c'est l'angle sous lequel on la voit. L'angle noté i' sur le schéma suivant :



Plus l'angle i' est grand, plus on peut voir de détails sur la Lune. Le rôle de la **lunette astronomique** est donc d'augmenter cet angle.

Le **grossissement** d'un instrument d'optique est une grandeur physique sans unité, de symbole G , définie par :

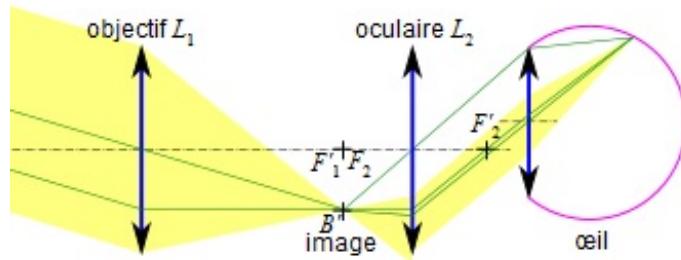
$$G = \frac{i'}{i}$$

- i' : Angle sous lequel on voit un objet à travers un l'instrument. Ici, la Lune à travers la lunette.
- i : Angle sous lequel on voit cet objet à l'œil nu.



Ne confondez pas **grossissement** et **grandissement** ! On s'intéresse au **grandissement** d'un microscope mais au **grossissement** d'une lunette astronomique.

Alors, voyons comment fonctionne la lunette :



Les deux rayons verts à gauche proviennent du même point de la Lune. Ils sont parallèles entre eux donc se croisent en un certain point du plan focal image de l'objectif L_1 . On appelle ce point B' . C'est une image réelle. En glissant une pellicule photographique dans ce plan focal, on pourrait photographier la Lune.

L'observateur règle la longueur de la lunette, c'est-à-dire la distance entre L_1 et L_2 . Il s'arrange pour que le point B' se retrouve aussi dans le plan focal objet de l'oculaire L_2 . Ce plan focal commun à L_1 et à L_2 doit se trouver plus près de L_2 que de L_1 pour que l'image de la Lune soit plus grosse que l'originale.

Les rayons de lumière passant par B' sont parallèles entre eux après avoir franchi l'oculaire. L'angle qu'ils forment avec l'axe optique est plus grand que ne l'était l'angle entre ce même axe optique et les rayons lunaires. Ces rayons parallèles arrivent sur l'œil et donnent donc lieu à un unique point image sur la rétine.

En fait, le grossissement d'une lunette astronomique est tout simplement égal à $\frac{f'_1}{f'_2}$. Plus le plan focal commun est proche de L_2

et loin de L_1 , plus la lune est grossie. Du coup, on peut avoir intérêt à augmenter artificiellement la valeur de f'_1 en plaçant juste derrière l'objectif une **lentille divergente**. On y gagne en grossissement mais on y perd en luminosité. C'est donc intéressant pour la Lune, qui est très lumineuse au départ, mais à éviter quand on observe des étoiles peu brillantes.

Il existe bien d'autres types d'instruments d'optiques, depuis les **télescopes** jusqu'aux **rétroprojecteurs**. En plus des lentilles, certains font intervenir des miroirs.

Et puis il y a ceux que nous allons maintenant découvrir, et qui ont permis de mesurer la **vitesse de la lumière**.

c : la vitesse de la lumière

On sait maintenant que la lumière se propage en ligne droite, sauf accident, et on sait dans quel sens. Mais on ne sait toujours pas à quelle vitesse. La lumière, en effet, se propage extraordinairement vite. Si vite qu'on a longtemps cru que son déplacement était instantané, au moins dans l'air. Galilée avait bien essayé de mesurer sa vitesse, mais cela n'avait rien donné. Mais Galilée s'était aussi intéressé aux satellites de Jupiter. Et c'est justement l'un de ces satellites qui va faire tomber le mythe de l'instantanéité.

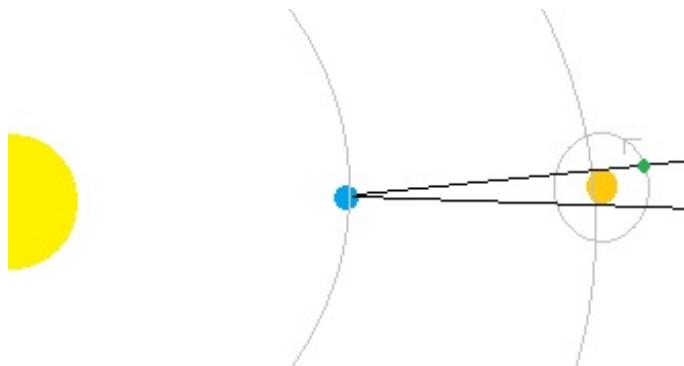
A - Io est en retard

Io est l'un des quatre satellites de Jupiter découverts par Galilée à l'aide de sa **lunette astronomique**. Il tourne autour de Jupiter en respectant les lois de la gravitation universelle trouvées par Isaac Newton et par Johannes Kepler.



Ou du moins, le croyait-on... Mais en 1676, on a mesuré plus précisément à quelle heure Io disparaissait derrière Jupiter et à quelle heure elle en ressortait. Répétée à plusieurs reprises au cours de l'année, cette expérience a donné des résultats étonnans. 😳 Parfois, Io respectait bien les horaires calculés à l'aide des lois de Kepler. Et plus tard dans l'année, voilà-t-y pas qu'elle réapparaît avec plusieurs minutes de retard. Elle trainait en route ou quoi ? 😕 Les lois de Kepler seraient-elles fausses ?

C'est un astronome danois, **Ole Christensen Rømer**, qui a compris la raison de ce retard, et pourquoi il n'était pas systématique. Jupiter et la Terre tournent toutes les deux autour du Soleil. La distance entre les deux planètes n'est pas toujours la même.

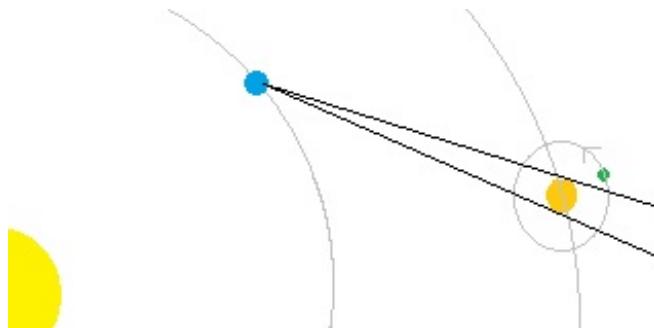


Quand la Terre et Jupiter sont alignées avec le Soleil, la distance entre elles est minimale. Io tourne autour de Jupiter et passe un certain temps dans le cône d'ombre entre les deux traits noirs. Là, elle est invisible depuis la Terre.

Io, bien sûr, diffuse dans toutes les directions la lumière qu'elle reçoit du Soleil. Dès qu'elle sort du cône d'ombre, une partie de cette lumière peut aller vers la Terre. Mais elle n'atteint pas immédiatement notre planète. Entre Io et la Terre, il y a plusieurs centaines de millions de kilomètres qu'elle doit parcourir. Même à la vitesse de la lumière, cela prend tout de même quelques minutes.

Un observateur terrestre ne voit donc Io émerger de l'ombre de Jupiter que plusieurs minutes après qu'elle en soit effectivement sortie. Jusque là, pas de problème pour autant : Io respecte bien les horaires de Kepler, qui ont été élaborés à partir d'observations.

Mais quelques mois plus tard, Jupiter et la Terre ont bougé.



De nouveau, quand Io sort du cône d'ombre, sa lumière doit voyager jusqu'à la Terre. Mais la distance a augmenté, donc elle met quelques minutes de plus. Ces minutes supplémentaires, les lois de Kepler ne les ont pas prévues, et voilà pourquoi tout le monde s'étonne du retard de Io. Retard apparent, en fait. Io est bien sortie à l'heure du cône d'ombre. Mais c'est nous,

observateurs terriens, qui avons mis quelques minutes de plus à nous en rendre compte.

Ouf, les lois de Kepler sont sauvées ! 🎉

Maintenant qu'on connaît le temps supplémentaire mis par la lumière pour parcourir la distance supplémentaire, on peut calculer sa vitesse. En effet :

$$c = \frac{d}{t}$$

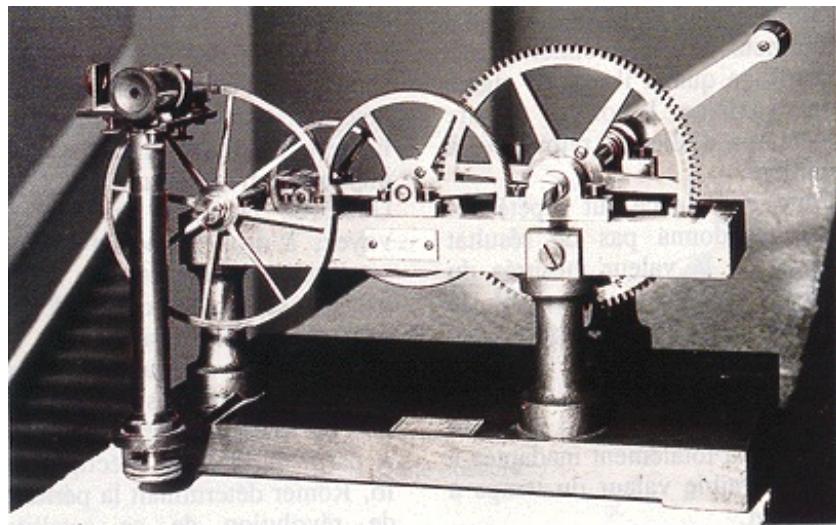
- d : distance supplémentaire parcourue (en kilomètres)
- t : temps mis pour la parcourir (retard constaté, en secondes)
- c : vitesse de la lumière (en kilomètres par seconde)

Rømer fait le calcul et trouve $c = 212\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur est fausse. En effet, à l'époque, on ne connaissait pas avec précision les distances entre planètes. Mais c'est tout de même un événement : c'est la première fois que l'on a une idée de l'ordre de grandeur de la vitesse de la lumière !

En 1729, d'autres observations astronomiques conduisent **James Bradley** à proposer une autre valeur : $c = 300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

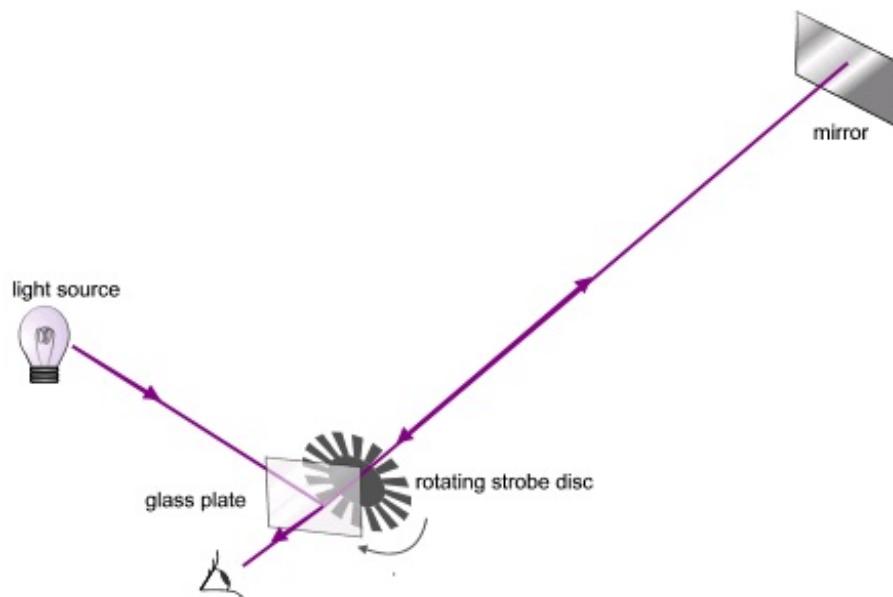
B - La roue dentée de Fizeau

Au XIX^e siècle, **Hippolyte Fizeau** tente de mesurer la vitesse de la lumière sur Terre. Son dispositif est un peu artisanal mais très bien pensé. Il place la machine que voici sur son balcon, à Suresnes :



La roue la plus à gauche est une **roue dentée**, avec des dents très fines, si fines qu'on ne les voit pas sur la photo. Les engrenages à sa droite ne servent qu'à lui donner une grande vitesse de rotation, tout en mesurant cette vitesse. Le cœur du dispositif se situe en haut du pilier que vous voyez à gauche.

Fizeau place une source de lumière à l'extrême gauche, et regarde dans l'oculaire.



La lumière de l'ampoule arrive tout de suite sur une lame semi-réfléchissante (*glass plate*). La lame de verre laisse passer une partie de la lumière, qui est perdue, et réfléchit le reste à 90°. Le rayon réfléchi arrive sur la roue dentée. Là, il y a deux possibilités.

- Soit le rayon heurte une dent et s'arrête.
- Soit il passe entre deux dents et continue son chemin jusqu'au miroir.

Le miroir en question se trouve à plusieurs kilomètres de là, sur un autre balcon, à Montmartre. Réfléchi par le miroir, le faisceau de lumière revient vers la roue dentée. Sa vitesse est si grande qu'il passe au retour entre les deux mêmes dents qu'à l'aller et arrive à nouveau sur la lame réfléchissante. Là, une partie du faisceau est réfléchie vers la lampe et donc perdue. L'autre traverse la lame et arrive enfin dans l'oeilleton où Fizeau l'attend.

Résultat, la lumière reçue par l'oeilleton clignote : un coup les rayons passent, un coup ils sont arrêtés par la roue dentée. Mais Fizeau ne les voit pas clignoter. En raison du phénomène de persistance rétinienne, il voit de la lumière tout le temps.

Fizeau augmente alors la vitesse de rotation de la roue dentée. Progressivement. Et au bout d'un moment, cette vitesse est telle que le faisceau de lumière qui est passé à l'aller est arrêté par une dent au retour. Dès lors, plus aucun rayon n'atteint l'oeilleton et Fizeau voit donc la lumière s'éteindre.

Bingo ! 😊 Le temps mis par la lumière pour faire l'aller-retour Suresnes-Montmartre est égal au temps mis par une dent pour passer devant le faisceau. Fizeau connaît la vitesse de rotation de la roue, il connaît l'angle entre deux dents. Il connaît la distance entre son balcon et celui de Montmartre. Il n'a plus qu'à calculer la vitesse de la lumière.

$$t = 2 \cdot d \cdot c = \frac{\theta}{\omega}$$

- t : Temps mis par la lumière pour faire l'aller-retour entre les deux balcons.
- d : Distance entre les deux balcons.
- c : Vitesse de la lumière.
- θ : angle entre deux dents.
- ω : vitesse de rotation de la roue.

$$c = \frac{\theta}{2 \cdot d \cdot \omega} = 315 \ 300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

Bien sûr, **Hippolyte Fizeau** est conscient du caractère artisanal de sa mesure. C'est en 1874 qu'**Alfred Cornu**, formé par Fizeau, reproduit l'expérience de la roue dentée à l'échelle "industrielle".

Il trouve le moyen de mesurer avec plus de précision la vitesse de rotation ω de la roue. Il place quelques lentilles sur le trajet du faisceau, avant la roue dentée, pour mieux le maîtriser. Il augmente aussi considérablement la distance à parcourue par la lumière : 46 km aller-retour



entre l'**Observatoire de Paris** et la **Tour de Montlhéry**, dans l'Essonne, une tour médiévale déjà utilisée par **François Arago** en 1822 pour mesurer la vitesse du son. Et surtout, il répète son expérience plus de 500 fois, avant de faire la moyenne des vitesses ainsi mesurées :

$$c = (300\ 400 \pm 300) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$



i Le symbole \pm ("plus ou moins") indique la précision de la mesure. Plus la valeur qui suit est petite, plus la mesure est précise. Ici, $(300\ 400 \pm 300) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ signifie que, d'après Alfred Cornu, c est comprise entre $300\ 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ et $300\ 700 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

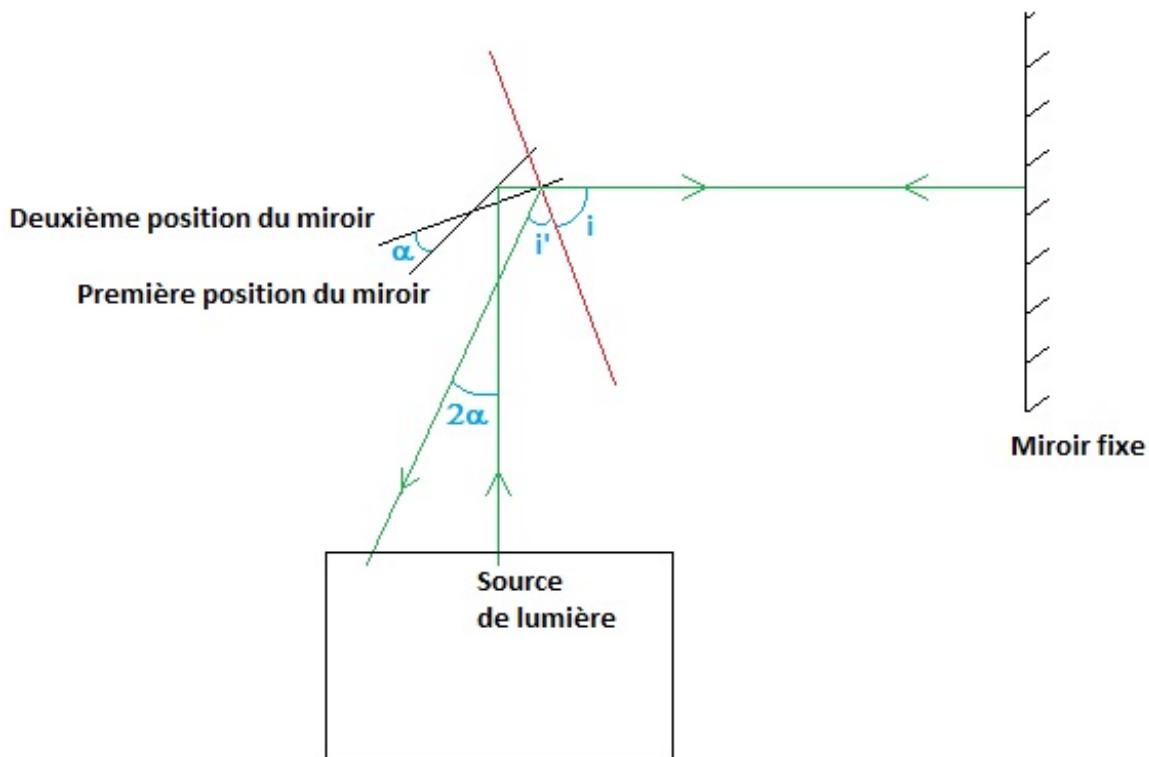
La méthode de la roue dentée sera utilisée pour la dernière fois en 1902 : $c = (299\ 880 \pm 84) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Mais, entre-temps, une autre méthode aura donné de meilleurs résultats.

C - Les miroirs de Foucault

Léon Foucault était un ancien complice d'Hippolyte Fizeau. Ensemble, ils avaient pris en 1845 la première photographie nette du Soleil. Mais la course à la vitesse de la lumière va les brouiller définitivement.

En 1862, pour mesurer c , Léon Foucault utilise un miroir, qu'une soufflerie fait tourner à très grande vitesse.



Quand le faisceau de lumière venu de la source atteint le miroir tournant, celui-ci se trouve dans une position que j'appellerai la "première". La lumière est réfléchie et part vers droite, où elle rencontre un miroir fixe. Le miroir fixe la renvoie vers le miroir tournant mais, le temps qu'elle y arrive, ce dernier a tourné. Il est désormais dans sa "deuxième" position, qui forme un angle α avec la première.

La normale au miroir tournant, dans sa deuxième position, est représentée en rouge. La deuxième loi de Descartes nous indique que $i' = i$ (pour la première réflexion aussi, d'ailleurs). En définitive, le faisceau revient vers la source en formant un angle 2α avec sa direction de départ.

En bas, une graduation permet de mesurer la distance entre le point de départ et le point d'arrivée de lumière. On détermine ainsi l'angle 2α . Comme on connaît la vitesse de rotation du miroir tournant, on sait combien de temps a duré le "voyage" de la lumière et on peut calculer sa vitesse.

Voilà pour le principe. Le dispositif réel de Foucault était plus compliqué : pour que le miroir ait le temps de tourner d'un angle α mesurable, le faisceau de lumière était envoyé suivre tout un parcours jalonné par 5 miroirs fixes au lieu d'un seul.

Résultat :

$$c = (298\ 000 \pm 500) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

La méthode de Foucault n'a eu qu'un succès limité en France, où tout le monde est resté fidèle à la roue dentée. Par contre, elle a triomphé de l'autre côté de l'Atlantique. En 1882, l'astronome américain **Simon Newcomb** trouve :

$$c = (299\ 860 \pm 30) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

En 1926, **Albert Michelson** voit les choses en grand et impose à son faisceau un parcours de 70 km entre les monts Wilson et San Antonio, en Californie :

$$c = (299\ 796 \pm 4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

Aujourd'hui, on donne la valeur de **c** avec 9 chiffres significatifs : $c = 299\ 792\ 458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Et cette fois, on est certain que c'est la bonne, car on a trouvé une combi... 😊



En 1983, la Conférence générale des poids et mesures a adopté une nouvelle définition du mètre. Désormais, le **mètre** est défini comme étant la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant $\frac{1}{299\ 792\ 458}$ secondes.

Partie 2 : Onde ou corpuscule ?

Un grand débat sur la nature de la lumière a éclaté au XVIIème siècle. D'un côté, nous avions **Isaac Newton**, pour qui la lumière se composait de **corpuscules** : des particules microscopiques. Bon, vous voyez ce que c'est qu'une particule.

De l'autre : **Christian Huygens**, pour qui la lumière est une **onde**. Vous voyez ce qu'est une onde ? Non ? Alors il faut peut-être que je commence par vous expliquer ça. 😊

Les ondes

Pour que vous compreniez bien ce qui a pu amener les scientifiques à considérer la lumière comme une **onde**, je vais maintenant vous expliquer ce que sont les **ondes** et les **phénomènes périodiques**.

A - Les phénomènes périodiques

Les phases de la Lune, la parution d'un journal hebdomadaire, Noël : tous ces phénomènes sont **périodiques** : ils se répètent, identiques à eux-mêmes, à intervalles de temps réguliers. On appelle **période** le temps qui s'écoule entre deux répétitions du phénomène.

Voici quelques exemples de **périodes** :

- Les phases de la Lune : 1 mois.
- La parution d'un journal hebdomadaire : 1 semaine.
- Noël : 1 an.
- Le mouvement de la grande aiguille d'une horloge : 1 heure.
- Nos battements de cœur : 1 seconde.

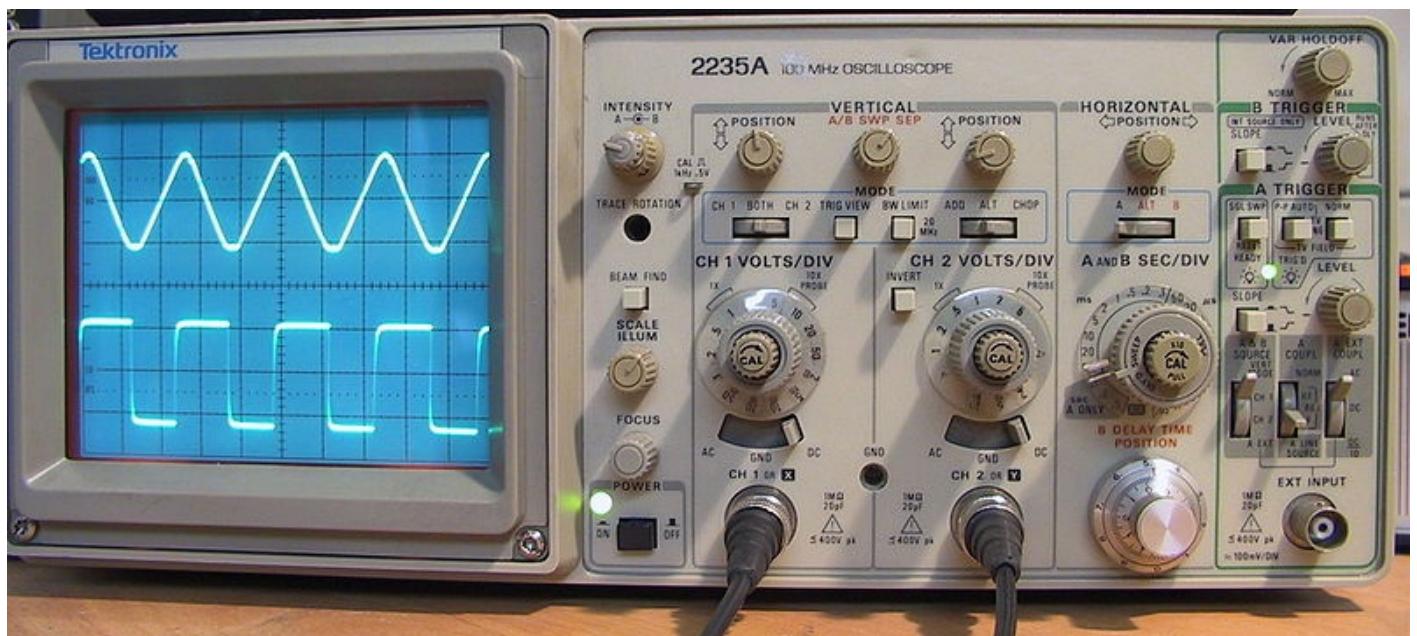
La **période** est donc une grandeur physique, de symbole **T**, dont l'unité est la **seconde (s)**. On lui associe souvent une autre grandeur physique : la **fréquence**, c'est-à-dire le nombre de périodes par seconde.

Il existe deux symboles différents pour désigner la **fréquence** : **f**, bien sûr, mais aussi **v**. Et dans le cas de la lumière, justement, on utilise presque toujours **v**. Pour ne pas vous embrouiller, j'écrirai donc toujours **v** dans ce tutoriel.

En tout cas, l'unité de **fréquence** est le **Hertz (Hz)**. Le nombre de **Hertz** est tout simplement le nombre de périodes par secondes. Typiquement, la fréquence des contractions cardiaques est donc de l'ordre de **1 Hz**.

Par exemple, quand on dit que la **tension électrique** des prises de courant a une fréquence de 50 Hz (en France), cela signifie qu'en une seconde, elle passe 50 fois par sa valeur maximale et 50 fois par sa valeur minimale.

En effet, cette tension n'est pas constante au cours du temps. Elle varie de manière **périodique**. Et on peut observer ses variations avec un oscilloscope :



Un oscilloscope mesurant deux tensions différentes

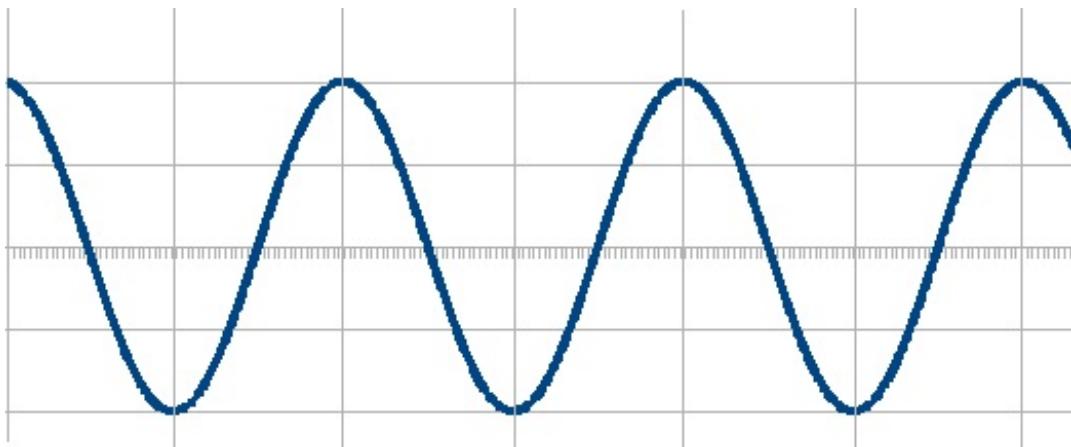


Aïe Aïe Aïe ! Mais il y a combien de boutons, là-dessus ?

Impressionnant, n'est-ce pas ? Il s'agit de représenter des courbes, comme les $y = f(x)$ qu'on rencontre en mathématiques. Ici, on veut visualiser l'évolution d'une tension au cours du temps. On place donc le temps en **abscisse** (axe horizontal) et la **tension** en ordonnée (axe vertical).

Les trois grosses molettes au milieu servent à régler les échelles horizontale (SEC/DIV : secondes par carreau) et verticale (VOLTS/DIV : volts par carreau). Il y en a deux pour l'échelle verticale, ou **sensibilité** verticale, car cet oscilloscope peut mesurer deux tensions à la fois.

La courbe correspondant au courant d'une prise classique ressemble à ceci :



La **base de temps** (échelle horizontale) est de **10 ms** par carreau. Vous voyez qu'un motif se répète régulièrement : la tension est périodique. Saurez-vous calculer sa période et sa fréquence ?

Secret (cliquez pour afficher)

Il y a deux carreaux entre deux répétitions du motif élémentaire.

$$\text{Donc } T = 2 \cdot 10 \text{ ms} = 20 \text{ ms} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\text{Et } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ Hz}$$

50 Hz. Je vous l'avais bien dit !

La **sensibilité verticale**, quant à elle, est ici de 160 V par carreau. La tension est **alternative** et elle oscille entre une tension maximale U_{\max} et une tension minimale U_{\min} . On suppose que le 0 a préalablement été réglé au centre. Donc $U_{\min} = -U_{\max}$. Calculez ces deux tensions.

Secret (cliquez pour afficher)

Il y a quatre carreaux entre la valeur maximale et la valeur minimale. La différence de tension entre U_{\max} et U_{\min} est donc :

$$U_{CC} = 4 \cdot 160 = 640 \text{ V.}$$

U_{CC} signifie **tension crête à crête**. C'est la différence entre le maximum et le minimum.

$$U_{\max} - U_{\min} = 640 \text{ V or } U_{\min} = -U_{\max} \text{ donc :}$$

$$U_{\max} = 320 \text{ V et } U_{\min} = -320 \text{ V.}$$



320 V ? J'ai toujours entendu dire que la tension du secteur, c'était 220 V. C'est pas ça ?

La tension du secteur n'est pas continue. Elle ne reste pas en permanence à 320 V. On considère que, globalement, elle fournit autant d'énergie qu'une tension continue dont la valeur constante serait comprise entre 220 V et 230 V. C'est ce qu'on appelle la **tension efficace**.



Pour vous entraîner à régler un oscilloscope et à mesurer une période ou une tension maximale, vous pouvez essayer cette [simulation](#). N'oubliez pas de positionner le zéro au centre avant d'interpréter chaque courbe.

B - Notion d'onde

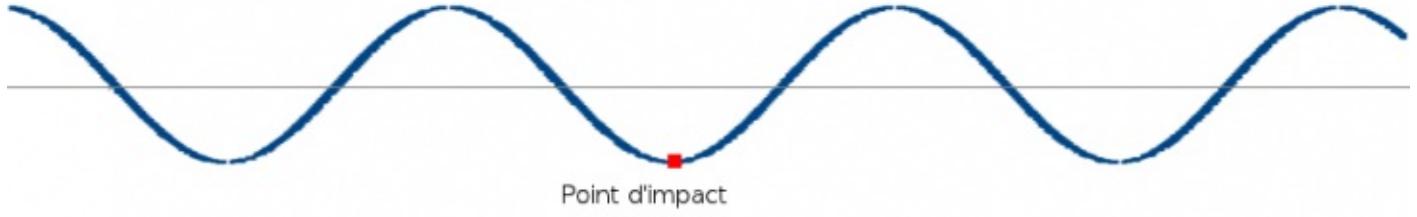
Citation : Jean de La Fontaine

Un Agneau se désaltérait
Dans le courant d'une onde pure.
Un Loup survient à jeun qui cherchait aventure,
Et que la faim en ces lieux attirait.

Imaginez un lac paisible 😊 ... dans lequel un malotru lance soudain un gros caillou ! 😱 Aussitôt, la surface de l'eau s'agit autour du point d'impact. De petites vaguelettes se forment et dessinent des cercles concentriques, qui se répandent la surface du lac. Vu de dessus, ça donne :

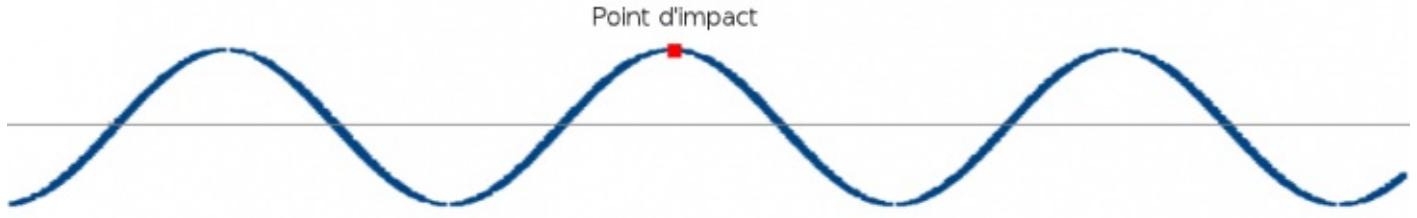


Et si on regarde en coupe la surface de l'eau, on retrouve une figure connue :



La ligne grise horizontale représente le niveau habituel du lac

Oui, c'est bien la même forme que pour la tension du secteur. On appelle cette forme une **sinusoïde**, car c'est celle de la courbe de la fonction mathématique $y = \sin x$. Chaque point de la surface de l'eau se déplace verticalement, certains vers le haut et d'autres vers le bas. Puis ils reviennent à leur position initiale avant de repartir dans l'autre sens. Si on regarde la même coupe quelques dixièmes de seconde plus tard, on verra :



Chaque point fait donc un va-et-vient entre une position haute et une position basse. Ce va-et-vient, vous l'aurez compris, est un **phénomène périodique**. Chaque point de la surface met exactement le même temps pour faire l'aller-retour entre sa position haute et sa position basse. Ce temps est donc la **période T** de nos oscillations.

Il est intéressant de remarquer que l'eau se déplace verticalement et pas horizontalement. Mais le phénomène, lui, se propage bien horizontalement. Au tout début, il est limité au seul point d'impact. Puis, de plus en plus de vaguelettes se forment tout autour. Ce n'est donc pas de la matière qui se propage horizontalement mais une information abstraite : une **onde**. C'est un peu

comme si chaque molécule d'eau disait à sa voisine : 😊 "Hé, tu sais quoi ? Quelqu'un a lancé un caillou dans le lac. Gigotons verticalement en signe de protestation." Et la nouvelle se répand de proche en proche, comme un bouche à oreille, jusqu'à ce que l'énergie du choc se dissipe.

Par ailleurs, il y a plusieurs éléments constants dans ces oscillations. On a déjà parlé de la **période T**, qui est la même en chaque point du lac. Ce n'est pas tout : la distance entre les crêtes de deux vagues voisines est toujours et partout la même. On appelle cette distance une **longueur d'onde** et on la note λ .

La vitesse à laquelle une onde se propage est appelée **célérité** et notée c .



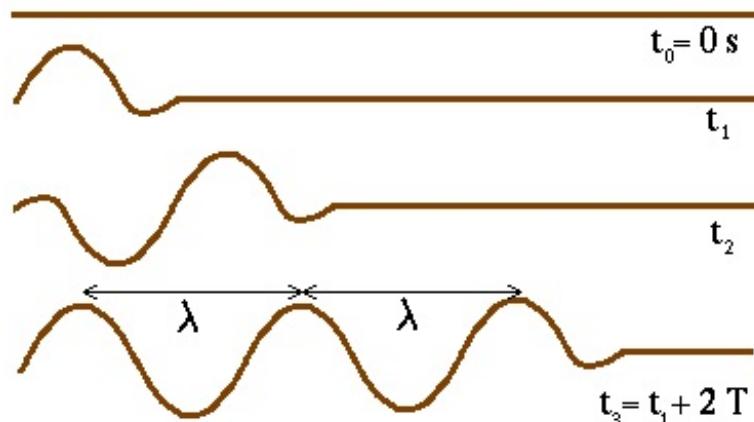
c ? Comme la vitesse de la lumière ?

En effet, et nous verrons bientôt que ce n'est pas un hasard. 😊

Mais là où ça devient vraiment fascinant, c'est qu'il existe une relation entre la période **T**, la longueur d'onde λ et la célérité **c** :

$$\lambda = c \cdot T$$

Vous comprendrez mieux pourquoi avec un autre exemple : une corde.



Au début, à l'instant t_0 , la corde est au repos. Puis, on agite son extrémité gauche. Un petit bourrelet se forme (voir l'instant t_1) et commence à se déplacer vers la droite.



Ce mouvement est une illusion : aucun objet matériel ne se déplace vers la droite. Chaque point de la corde se déplace seulement verticalement. C'est pour ça qu'on ne parle pas de **vitesse** mais de la **célérité** de l'onde immatérielle.

Remarquez quand-même que, bien que ces ondes soient *immatérielles*, elles ne pourraient pas exister si elles ne se propageaient pas dans des milieux tout ce qu'il y a de plus *matériel* : l'eau du lac et la corde.

Le bourrelet avance, donc, comme on le constate à l'instant t_2 . Il avance avec la célérité c . Et tandis qu'il progresse, d'autres bourrelets se forment. Et on obtient encore une **sinusoïde**.

Deux périodes **T** après l'instant t_1 , on arrive donc à l'instant t_3 et on peut observer 3 bourrelets régulièrement espacés. La distance entre deux "sommets" est λ , la longueur d'onde.

La distance parcourue par le premier bourrelet entre t_1 et t_3 est donc **2 λ**. Et le temps qu'il a mis pour la parcourir, c'est **2 T**. Donc :

$$c = \frac{2 \lambda}{2 T} \text{ donc } \lambda = c \cdot T$$

C - Les ondes sonores

Il existe toutes sortes d'**ondes**. Une onde sonore, par exemple, est une vibration de l'air, de l'eau, ou de n'importe quel milieu matériel dans lequel il lui plaît de se propager. En gros, chaque molécule oscille périodiquement autour d'une position d'équilibre

et transmet à ses voisines, de proche en proche, l'idée de se dandiner de la même manière.

La **longueur d'onde**, dans ce cas, est la distance séparant deux molécules qui sont à la même distance de leurs positions d'équilibre respectives. La **période** est naturellement le temps que met chaque molécule pour faire un aller-retour. Et la **célérité**, c'est donc la vitesse à laquelle l'onde se propage.



François Arago a mesuré la célérité du son en 1822, en faisant tirer des coups de canon en haut de la Tour de Montlhéry, dont nous avons déjà parlé.

Cette célérité dépend du milieu traversé. Dans l'air, elle est de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, c'est à dire environ $1200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. C'est le fameux **Mach 1**, le "Mur du son", que franchissent les **avions supersoniques**.



Mais dans l'eau, les ondes sonores se propagent bien plus vite : $c_{\text{eau}} = 1480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Et dans un solide comme l'acier, on approche de $6000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. En fait, c'est logique : plus le milieu traversé est **dense**, plus il est facile de trouver des molécules pour transmettre le mot d'ordre d'agitation.



Une onde sonore ne peut pas se propager dans le vide. En effet, elle n'existe que s'il y a des molécules qui s'agitent.

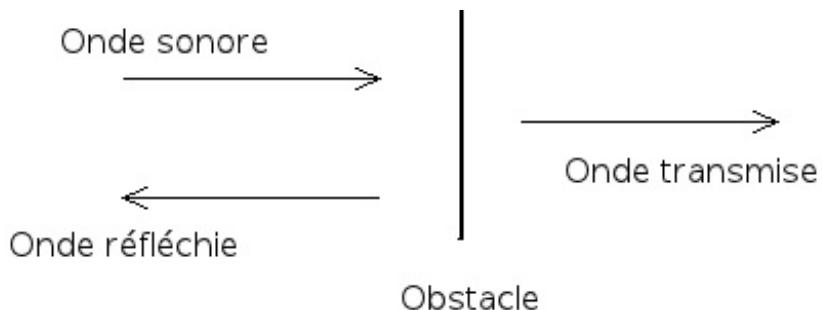
Toutes les **ondes sonores** ne sont pas forcément perceptibles par une oreille humaine. Tout dépend de leur période, et donc de leur **fréquence**.

- Si $\nu < 20 \text{ Hz}$: L'oreille ne remarque rien. C'est un **infrason**.
- Si $20 \text{ Hz} < \nu < 20 \text{ kHz}$: L'onde est, normalement, détectable. C'est un **son**.
- Si $\nu > 20 \text{ kHz}$: Là encore, l'oreille humaine est hors jeu (pas celle de certains animaux, par contre). C'est un **ultrason**.

Certes, on n'entend pas les **ultrasons**. Mais n'allez pas en déduire pour autant qu'ils sont inutiles. Oh non ! L'homme leur a trouvé plusieurs applications. Pas seulement l'homme, d'ailleurs...

L'échographie

Quand une onde sonore arrive sur un obstacle, une partie est transmise et le reste est réfléchi. C'est l'**écho**.



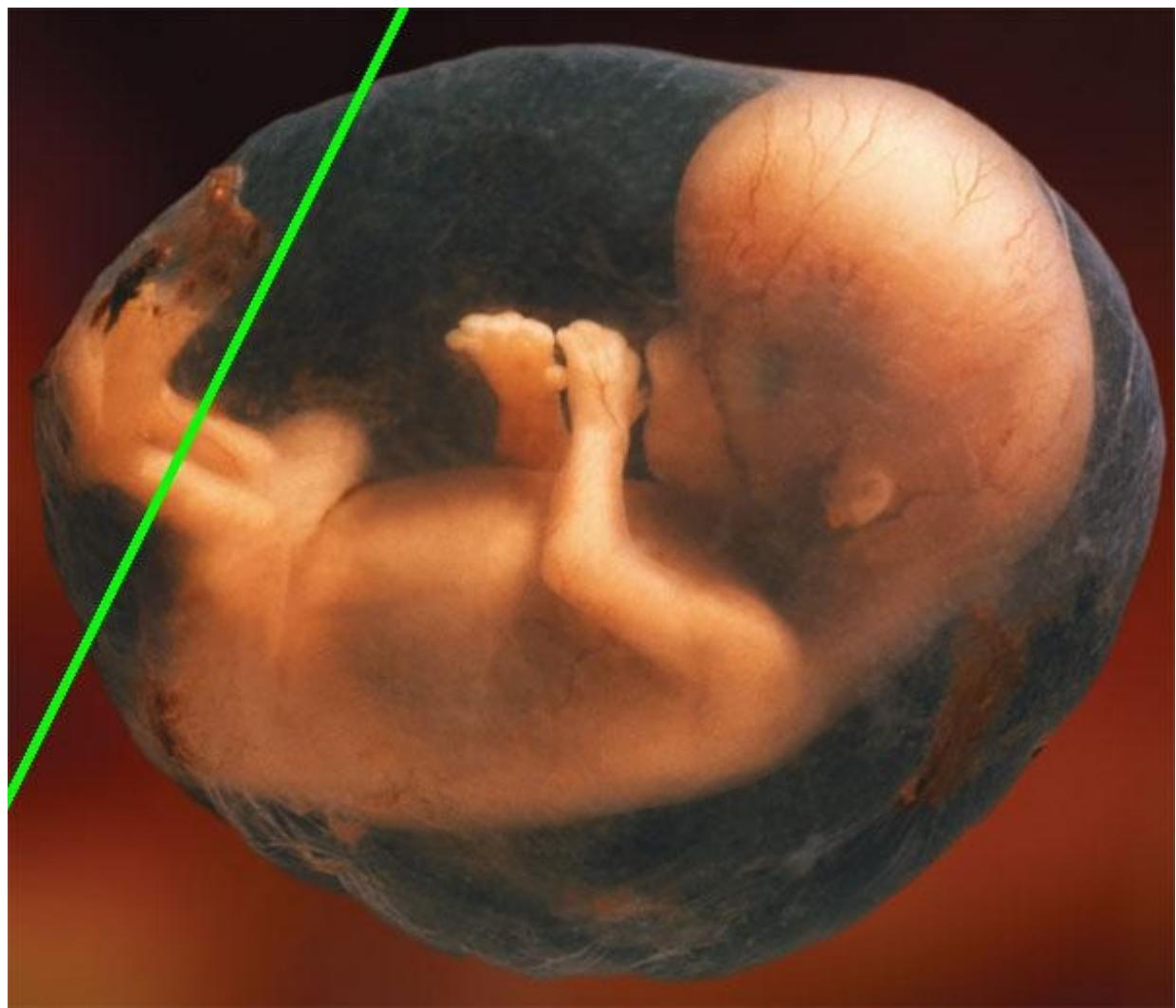
Naturellement, les ondes réfléchies et transmises sont moins intenses que celle qu'on a envoyée au départ. La proportion de l'une et de l'autre dépend de la fréquence du signal et de la nature de l'obstacle. En mesurant l'amplitude de l'onde réfléchie, on peut donc en savoir plus sur l'obstacle. Mais c'est surtout intéressant s'il y a un deuxième obstacle derrière le premier, un obstacle qu'on ne peut pas voir directement. L'onde transmise par le premier obstacle est partiellement réfléchie par le second et nous rapporte donc des informations sur ce dernier.

C'est ce qui se passe lors d'une **échographie**. Cette technique d'imagerie médicale consiste à envoyer un faisceau d'ultrasons dans le corps d'un patient (ou, plus souvent, d'une patiente 😊) et à mesurer l'amplitude des ondes réfléchies par les différents tissus que les ultrasons ont traversés. En effet, les tissus les plus denses (comme les os) réfléchissent beaucoup les ultrasons alors que d'autres (les liquides) ne les réfléchissent pratiquement pas.

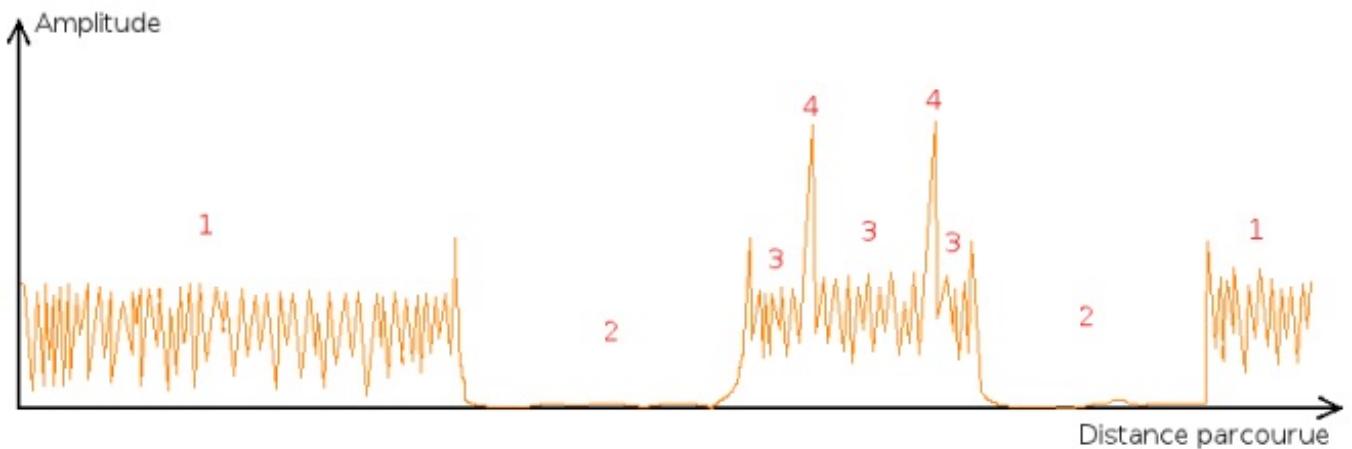


L'échographie peut servir à visualiser divers organes. Elle ne concerne pas uniquement la surveillance des grossesses. Mais c'est naturellement ce cas qui est le plus fréquent.

Voici un foetus dans le ventre de sa mère. On envoie un faisceau d'ultrasons représenté ici en vert. Chacun des tissus traversés va en renvoyer une partie.



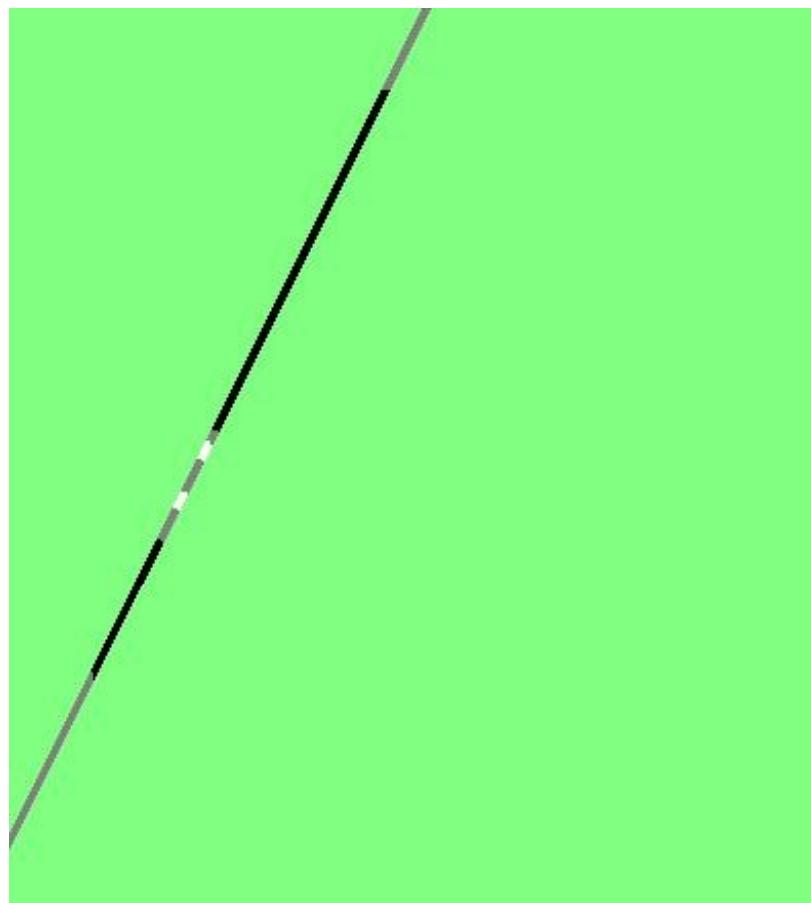
La sonde qui émet les ultrasons est également munie d'un capteur qui mesure l'amplitude des ondes réfléchies en fonction de la distance qu'elles ont parcourue.



La courbe obtenue permet de distinguer différentes zones :

- 1 : La chair de la mère. C'est un milieu très hétérogène. Les ultrasons sont donc renvoyés en petite quantité tout au long de leur progression.
- 2 : Le liquide amniotique. Milieu homogène peu dense. Aucune réflexion. Par contre, on remarque des pics de réflexion à chaque changement de milieu.
- 3 : La chair du foetus. Même principe que pour celle de sa mère.
- 4 : Les os du foetus (un dans chaque jambe). Réflexion importante.

Muni de ces informations, un programme informatique trace l'image des différents tissus traversés par le faisceau d'ultrasons. Là où l'onde réfléchie est intense, il affiche du blanc, là où elle est négligeable, il affiche du noir et là où elle est modérée, il utilise des niveaux de gris :

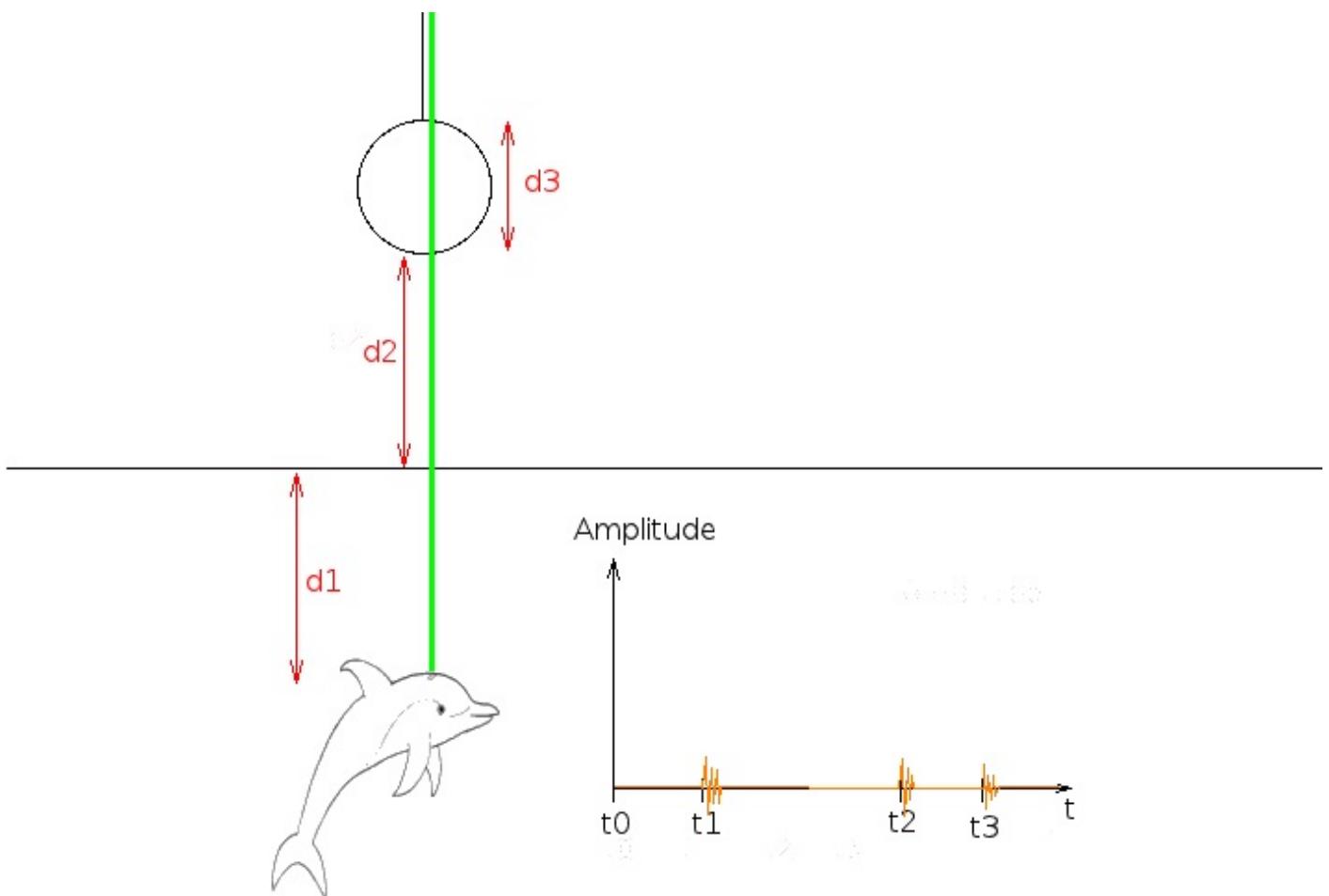


Pour l'instant, nous n'avons envoyé les ultrasons que dans une seule direction donc une seule ligne apparaît sur l'image. Il faut ensuite modifier l'orientation du faisceau et balayer toutes les autres directions. Cela se fait automatiquement et on construit peu à peu l'image en niveaux de gris du foetus dans son liquide amniotique.



Le sonar

Le **sonar** des dauphins et des chauves-souris est une autre manière d'exploiter l'écho des ultrasons. Imaginons un dauphin dans un bassin qui, lors d'un spectacle, doit frapper avec le bout de son rostre un ballon suspendu au bout d'une corde. Il émet une salve d'ultrasons (représentés en vert) à l'instant **t₀**.



À chaque changement de milieu, une partie des ultrasons est réfléchie. Cela se produit donc trois fois :

- À la surface de l'eau.
- À l'entrée du ballon.
- À la sortie du ballon.

Chaque salve réfléchie revient vers le dauphin, qui peut mesurer le temps écoulé entre **t0** et le moment où les ultrasons lui reviennent. Une première salve a mis le temps **t1** pour faire l'aller-retour entre le dauphin et la surface de l'eau. Prenons **t1 = 4,0 ms**. Le dauphin connaît bien la célérité des ultrasons dans l'eau (**1480 m · s⁻¹**). Il peut donc déterminer la distance **d1** qui le sépare de la surface :

Secret (cliquez pour afficher)

$$d1 = \frac{c_{eau} \cdot t1}{2} = \frac{1480 \cdot 4,0 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,0 \text{ m}$$

Le dauphin est donc à **3,0 m** de la surface.

Il ne faut pas oublier de diviser la distance par **2** car les ultrasons ont fait l'aller-retour entre le dauphin et la surface de l'eau. Par contre, ce **2** est infiniment précis : il y a très exactement **1** aller et **1** retour. Il ne réduit donc ni la précision de la mesure de **d1** ni le nombre de chiffres significatifs à utiliser pour écrire le résultat.

Voyons maintenant la deuxième salve réfléchie. Elle rejoint le dauphin à l'instant **t2**. Le temps qu'elle a mis pour faire l'aller-retour entre la surface du bassin et le bas du ballon est donc (**t2 - t1**). Et comme le dauphin connaît aussi la célérité des ultrasons dans l'air (**340 m · s⁻¹**), il peut localiser le ballon. Calculez **d2**, à présent. Nous allons voir si vous êtes aussi futés qu'un dauphin.

😊 Disons, par exemple... **t2 = 18,0 ms**.

Secret (cliquez pour afficher)

$$d2 = \frac{c_{air} \cdot (t2 - t1)}{2} = \frac{340 \cdot (18,0 - 4,0) \cdot 10^{-3}}{2} = \frac{340 \cdot (14,0) \cdot 10^{-3}}{2} = 2,38 \text{ m}$$

Le ballon est suspendu à **2,38 m** au dessus de l'eau. Cette fois-ci, on a droit à 3 chiffres significatifs.

Le dauphin sait maintenant où se trouve le ballon à frapper. Il peut prendre son élan et sauter. Remarquez, par contre, qu'il ne connaît pas la célérité des ondes sonores dans le ballon. L'information **t3** ne lui permet donc pas de calculer le diamètre **d3** du ballon.

D - L'effet Doppler

Avez-vous déjà entendu un camion de pompiers passer devant vous ? Certainement. Vous avez dû entendre son *PIIN-PON* si caractéristique. Et si vous avez fait attention, vous avez peut-être même remarqué que la tonalité de ce *PIIN-PON* n'est pas la même lorsque le camion s'approche de vous et lorsqu'il s'éloigne.

Cela a dû vous sembler bizarre, n'est-ce pas ? 😊 Pourquoi ces pompiers ont-ils changé leur sirène à l'instant précis où ils sont passés devant vous ? Vous ne les connaissiez pas, pourtant.



Les pompiers, bien sûr, n'ont pas modifié leur sirène. C'est la même qui s'approchait de vous et qui maintenant s'en éloigne. Mais alors pourquoi l'entendez-vous différemment ?

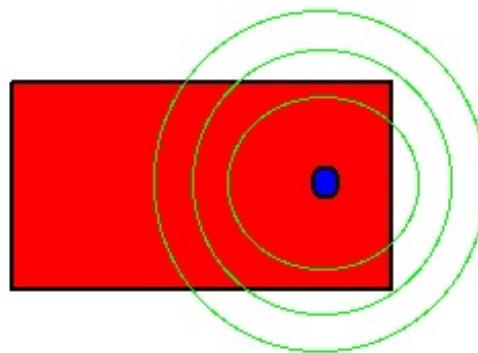


Ce ne serait pas à cause de l'**effet Doppler**, par hasard ?

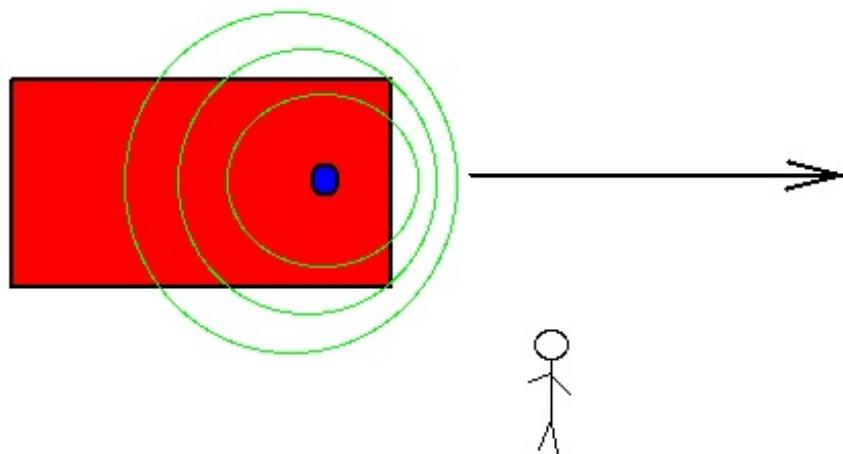
Vous m'avez vu venir. C'est bien l'**effet Doppler** qui intervient ici. On l'appelle aussi parfois "**effet Doppler-Fizeau**" en référence à notre cher Hippolyte. Regardez en quoi il consiste.

On appelle **fronts d'onde** les lieux où l'onde est à son amplitude maximale. C'est-à-dire ceux où les molécules sont les plus éloignées de leurs positions d'équilibre respectives. La distance entre deux fronts d'onde est λ . Sur le schéma suivant, ils sont représentés en vert.

La sirène (en bleu) envoie des ondes sonores dans toutes les directions. Les fronts d'onde forment des cercles régulièrement espacés.

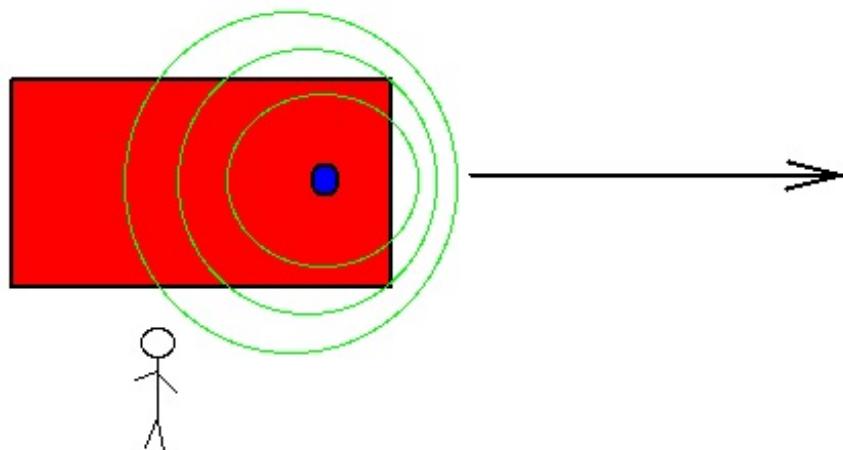


Du moins, ça, c'est qui se produit quand le camion est immobile. Mais dès lors que la sirène avance, le deuxième front d'onde ne part pas du même endroit que le premier. Les cercles ne sont plus concentriques.



Prenons maintenant un passant situé devant le camion. Les fronts d'onde qui arrivent à son oreille sont espacés les uns des autres d'une distance inférieure à λ . Plus le camion va vite, plus la longueur d'onde apparente λ' est réduite. Et comme $\nu = \frac{c}{\lambda}$, la **fréquence apparente** ν' est plus élevée que la fréquence réelle ν . Le son de la sirène semble à ce passant plus aigu qu'il ne l'est en réalité.

Quelques secondes plus tard, le même passant se trouve derrière le camion, qui s'éloigne de lui. Les fronts d'onde qui lui parviennent sont espacés d'une longueur d'onde apparente $\lambda' > \lambda$.



Cette fois, la fréquence apparente est plus basse que la fréquence réelle. Le son semble plus grave. La relation entre ces deux fréquences est :

$$\nu' = \nu \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

- v : vitesse du camion par rapport au passant
- c : célérité de l'onde

Si la source sonore se rapproche ($v < 0$), alors $\nu' > \nu$.

Si elle s'éloigne ($v > 0$), alors $\nu' < \nu$.

Plus v est grande, plus la différence entre ν' et ν est prononcée.

Si $v = c$, alors $\nu' = 0$: tous les fronts d'onde se rattrapent et forment comme un obstacle devant le camion : le fameux "**mur du son**". Ceci dit, cela arrive rarement à un camion de pompiers, même en cas d'urgence.

En tout cas, il y en a une qui maîtrise parfaitement l'effet Doppler, et ce depuis des temps immémoriaux : c'est la chauve-souris.



La chauve-souris envoie des sons et des ultrasons vers ses proies, qui ne peuvent pas s'empêcher de les lui renvoyer. Comme on l'a vu avec les dauphins, cela lui permet de déterminer à quelle distance sont les proies en question.

Mais en plus, elle compare la fréquence ν' des ondes récupérées à la fréquence ν de celles qu'elle a émise. Elle détermine ainsi la vitesse de ses proies, donc leur trajectoire future. Et elle n'a plus qu'à fondre sur elles.

Parfait. 😊 Maintenant que vous connaissez les ondes, nous allons pouvoir nous demander si la lumière en est une.

Diffraction et interférences

La contribution d'**Isaac Newton** au développement de la Physique est colossale. Il n'y a pas que la gravitation et la mécanique : il a aussi beaucoup étudié la lumière. Pour lui, la lumière était faite de **corpuscules**. Des **corpuscules** trop petits pour qu'on puisse les voir, et trop légers pour que la gravité agisse sur eux de manière significative.

Tous les phénomènes connus à son époque confirment cette théorie :

- Les **rayons de lumière** sont la trajectoire des corpuscules.
- La **réflexion** correspond à leur rebond sur un miroir ou sur un dioptrre.
- La **réfraction** s'explique par le fait que les corpuscules de lumière interagissent avec la matière.
- Les **couleurs** peuvent aussi être vues comme autant de variétés de corpuscules.

Tous les phénomènes concordent, donc. Tous sauf un...



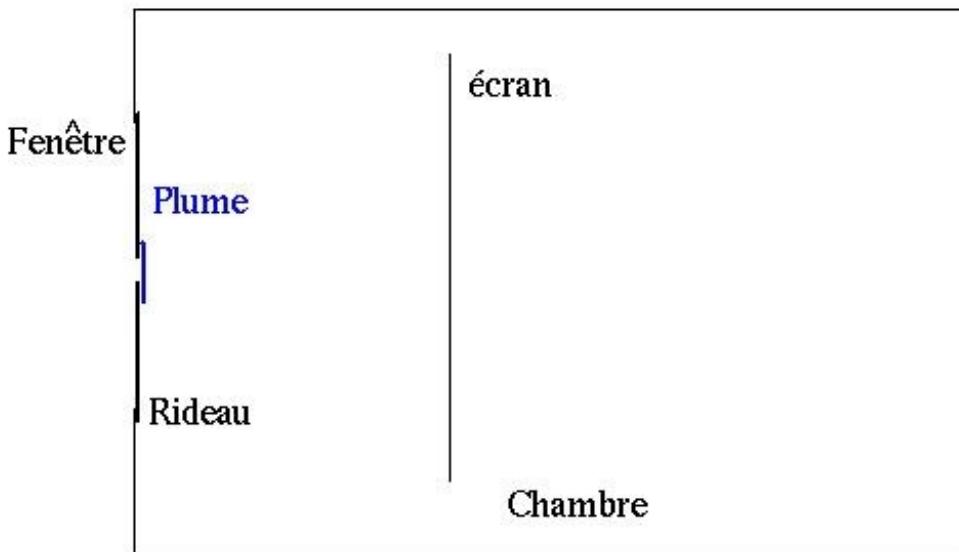
Ce chapitre est assez difficile, et riche en rebondissements. Concentrez-vous et prenez bien votre temps pour le lire.

A - La diffraction

Découverte

En 1665, **Francesco Grimaldi** (non, rien à voir avec Monaco ! 😊) décrit un curieux phénomène qu'il a remarqué : la **diffraction** de la lumière.

Après avoir percé une fente dans ses rideaux fermés, Grimaldi observe, très logiquement, un rectangle lumineux sur un écran, juste en face de la fente. Jusque là, tout va bien.



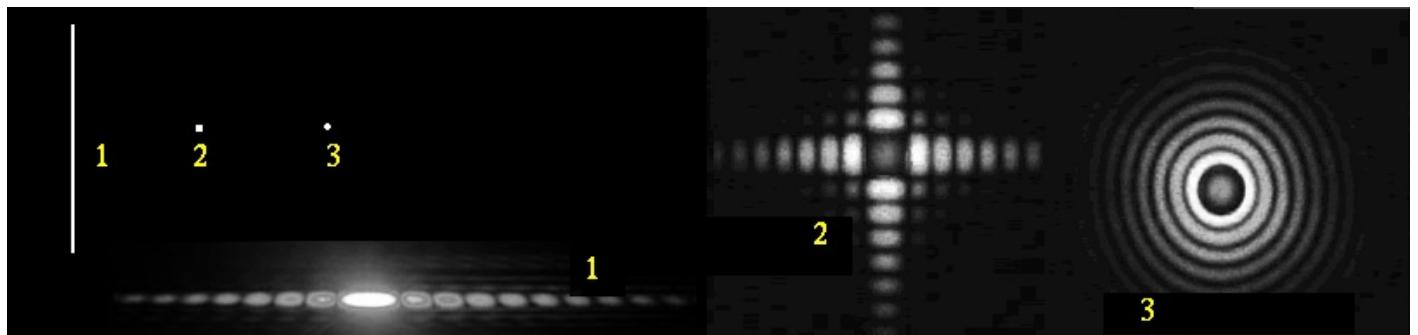
Il place ensuite une plume d'oiseau devant la fente. La lumière ne peut donc plus entrer que par les tous petits interstices séparant les poils de la plume.



Cette fois, l'image sur l'écran est bien plus surprenante. D'abord, elle n'a pas du tout la forme de la plume et ressemble plutôt à des franges iridescentes. Ensuite, certains points de l'écran, qui ne sont pas en face de la fente du rideau, sont éclairés quand même. Il n'y a pourtant pas de dioptrre dans cette expérience, rien qui puisse justifier une déviation de la lumière.

En remplaçant la plume par des tissus et d'autres objets qui n'offrent chaque fois qu'un mince passage à la lumière, Grimaldi observe d'autres figures, toutes plus étranges les unes que les autres.

Voici trois exemples de fentes (à gauche) et les figures obtenues sur l'écran dans chaque cas (à droite) :



L'épaisseur d'un cheveu

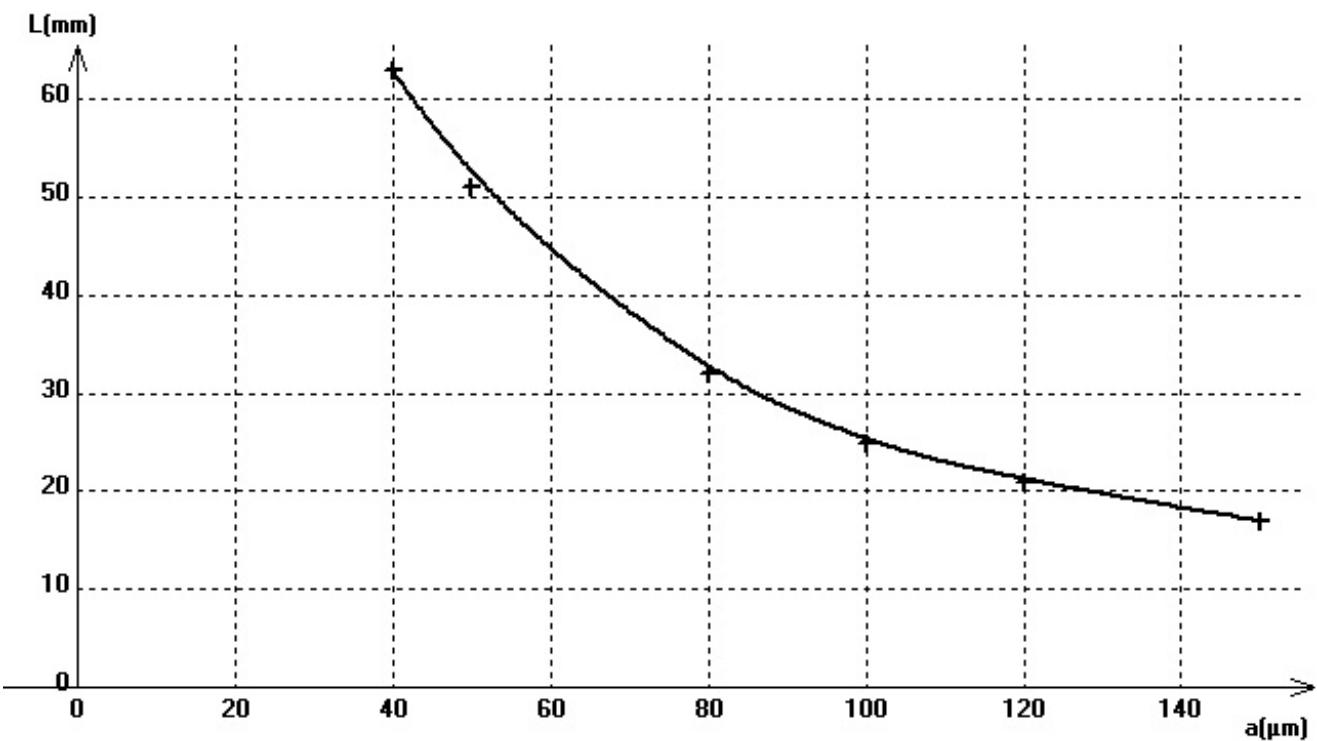
La figure n°1 peut aussi être obtenue en plaçant sur le trajet de la lumière un fil très fin : un cheveu, par exemple. De nos jours, on peut d'ailleurs exploiter le phénomène pour mesurer la largeur du cheveu.



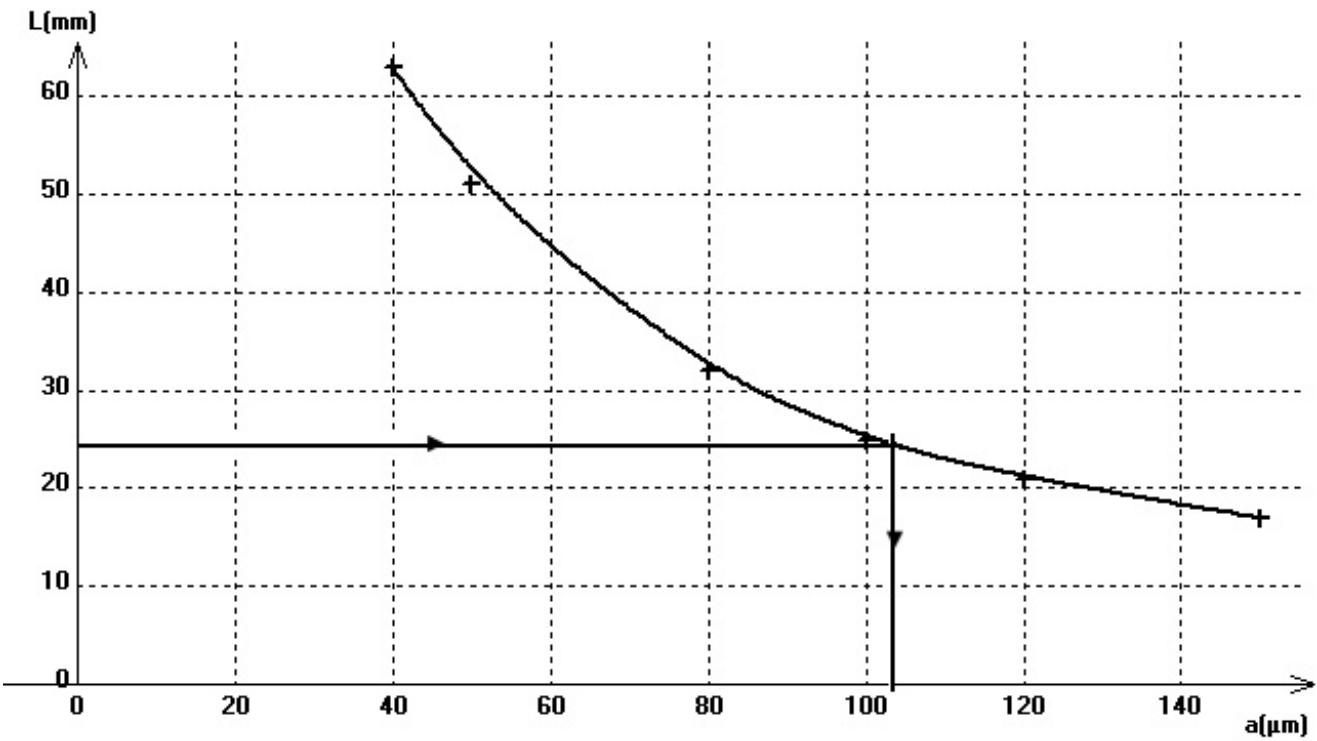
Commençons par quelques fils de diamètre **a** connu et mesurons à chaque fois la largeur **L** de la tache de diffraction centrale.

a (mm)	L(mm)
0,040	63
0,050	51
0,080	32
0,100	25
0,120	21
0,150	17

Avec ces mesures, on peut tracer un graphe :



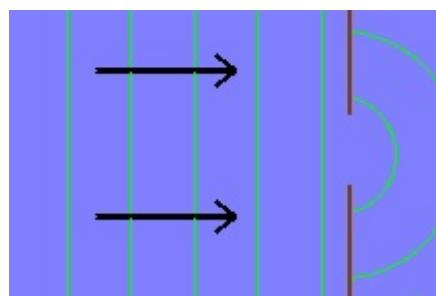
Recommençons maintenant l'expérience avec un cheveu de diamètre inconnu. On mesure la largeur L de la tache de diffraction centrale et, en la reportant sur le graphe précédent, on trouve l'épaisseur a du cheveu. Par exemple, si $L = 24 \text{ mm}$, alors $a = 102 \mu\text{m} = 0,102 \text{ mm}$:



Interprétation

La théorie corpusculaire semble incapable d'expliquer la diffraction. Il faudra attendre 30 ans pour que **Christian Huygens** propose une explication originale, et totalement à contre-courant : la lumière serait une **onde**.

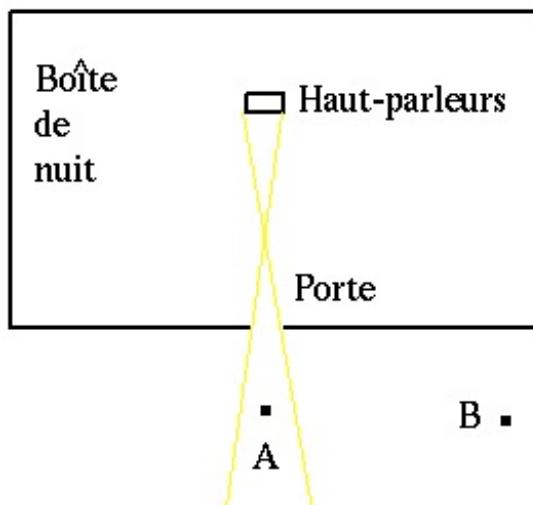
Considérons une **onde plane** : une onde dont les **fronts** sont des droites parallèles entre elles (ou des plans si on est en 3D). Nous allons lui faire franchir une petite ouverture, dont la largeur est de l'ordre de grandeur de λ , ou plus petite.



Après l'obstacle, l'onde devient **sphérique** : ses fronts d'onde sont maintenant des cercles concentriques (ou des sphères si on est en 3D). Vous pouvez penser à des vagues à la surface de l'eau, par exemple. C'est valable pour toutes les ondes, même celles qui étaient déjà sphériques avant la fente, et dont les fronts d'onde seront désormais centrés sur la fente. Le seul cas où l'onde continue son chemin sans déformation, c'est quand l'ouverture est beaucoup plus large que λ .

Du fait de la diffraction, un observateur placé dans le coin en haut à droite du schéma va recevoir l'onde. Cela ne se serait pas produit si l'onde avait continué tout droit après la fente.

Pensez par exemple aux ondes sonores dans une boîte de nuit dont on laisse la porte ouverte. Les sons aigus ont un petit λ , bien plus petit que la largeur de la porte. Ils ne sont donc pas diffractés en sortant de la boîte. Du coup, seul l'observateur A peut les entendre. Pas l'observateur B.

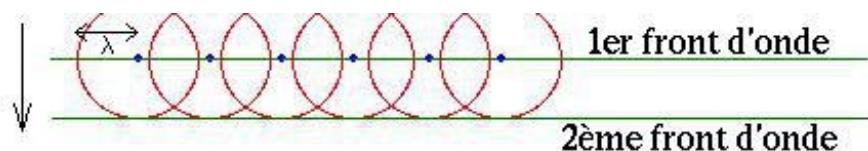


Par contre, les sons graves ont un grand λ , du même ordre de grandeur que la largeur de la porte. Ils sont diffractés et se répandent donc dans toutes les directions.

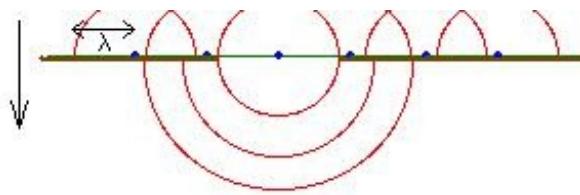
L'observateur A entend toute la musique 😊 : les sons aigus comme les sons graves. Par contre, l'observateur B entend uniquement les sons graves. Et peut-être qu'il se demande ce que les gens à l'intérieur de la boîte peuvent bien trouver à une musique qui se contente de faire BOUM ! BOUM ! BOUM ! 😕

Christian Huygens ne connaissait sans doute pas les boîtes de nuit. Peut-être avait-il remarqué ce phénomène à l'extérieur d'un bar.

En tout cas, ce qu'il s'est dit, c'est que chaque point d'un front d'onde se comporte comme une nouvelle source d'ondes. En combinant les ondes émises par toutes ces nouvelles sources, on obtient le front d'onde suivant. En l'absence d'obstacle, cela donne :



Mais si on ajoute un obstacle, avec un passage dont la largeur est de l'ordre de λ , seules quelques ondes vont pouvoir passer :



Et donc, l'onde devient sphérique, avec des fronts centrés sur la fente. Elle est propagée dans toutes les directions, et non plus dans une seule.

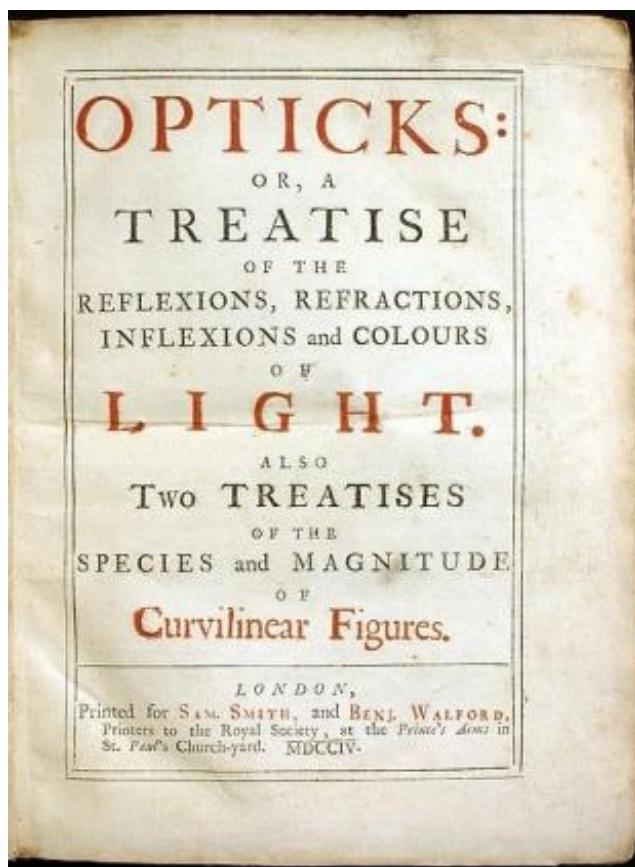
Entre certains poils d'une plume d'oiseau, la distance n'est que de quelques dixièmes de micromètre. Pour **Huygens**, cette distance doit correspondre à la longueur d'onde de la lumière. Voilà comment des points de l'écran peuvent être éclairés alors qu'ils ne sont pas en face de la fente.

Ajoutant à ces principes des calculs mathématiques assez poussés, Huygens parvient donc à expliquer les figures observées par Grimaldi. La **théorie ondulatoire** de la lumière est née.

Il y a quand même un problème : le phénomène de réfraction montre que la lumière se propage plus vite dans l'air que dans les milieux denses. Or, les ondes se propagent au contraire plus vite dans les milieux denses que dans l'air. Pour le son, souvenez-vous, c'est **$6000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$** dans l'acier contre "seulement" **$340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$** dans l'air.

De plus, la lumière est manifestement capable de voyager à travers le vide interstellaire. Alors qu'une onde, on l'a vu, a besoin d'un milieu de propagation matériel pour exister.

Huygens ne se laisse pas désarçonner pour autant. Il explique que le milieu de propagation de la lumière n'est pas la matière que nous connaissons, mais un fluide inconnu et subtil, qu'il appelle **l'éther**. Il est persuadé qu'on découvrira cet **éther** un jour. Dans les milieux denses, il n'y a pas beaucoup de place pour l'éther donc la lumière avance moins vite que dans l'air ou dans le vide. Le vide qui, pour Huygens, serait en réalité plein d'éther.



Newton réaffirme sa théorie corpusculaire et toutes ses autres idées sur la lumière en 1704, dans son traité "**Opticks**". Lui-même avait beaucoup d'estime pour **Huygens**, qu'il qualifiait de "génie". Mais ses partisans, largement majoritaires dans la communauté scientifique, vont vite enterrer l'excentrique théorie ondulatoire. Pour la diffraction, on trouverait bien une explication "acceptable" plus tard.

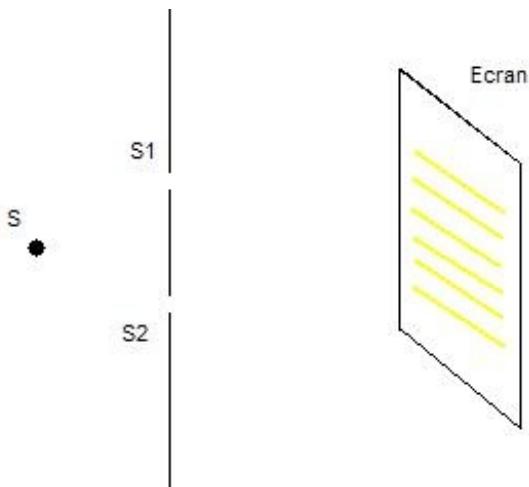
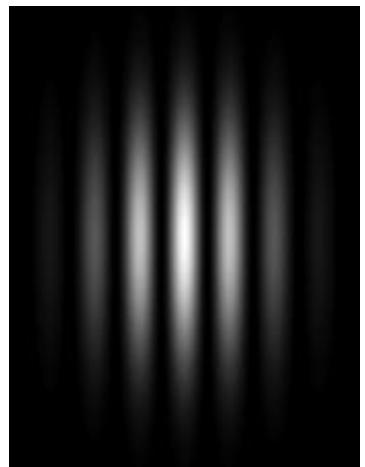
B - Les interférences

À partir de maintenant, et jusqu'à la fin du tutoriel, vous allez rencontrer des calculs un peu complexes. C'est pour ça que ce chapitre est indiqué comme difficile. Si vous êtes vraiment intéressés, vous pouvez suivre ces calculs en détails. S'ils vous font peur, vous pouvez vous contenter de les survoler. Faites-moi confiance : ils sont justes. 😊 Par contre, regardez bien d'où on part, à quelle conclusion on arrive et ce que montrent ces calculs.

Malgré leurs certitudes, les "newtoniens" doivent pourtant se rendre à l'évidence en 1801, lorsque **Thomas Young** découvre le phénomène des **interférences**. L'expérience de **Young** ressemble beaucoup à celle de Grimaldi, sauf qu'il ajoute une deuxième fente à côté de la première. Avec deux fentes fines verticales, il observe l'image ci-contre.

La première chose qui choque, ici, c'est que certains points, qui étaient éclairés quand il n'y avait qu'une fente, sont maintenant sombres. En ajoutant de la lumière, il a assombri des points qui étaient précédemment éclairés ! 😮 La contradiction avec la théorie corpusculaire est flagrante.

Voici le dispositif de Young, vu de dessus. S est la source de lumière. Elle émet une onde sphérique dans toutes les directions. Les deux fentes se conduisent ensuite comme des sources secondaires de lumière S_1 et S_2 : c'est le phénomène de **diffraction**.



Comme le dispositif est symétrique, les ondes émises par S_1 et S_2 sont identiques. Mais si on considère un point M quelconque de l'écran, les distances S_1M et S_2M ne sont, la plupart du temps, pas égales.

Ce point M reçoit 2 ondes lumineuses : une qui vient de S_1 et l'autre qui vient de S_2 . L'amplitude A de chacune des deux ondes varie au cours du temps, de manière périodique et sinusoïdale.

i Dans le cas de la lumière, l'**amplitude** correspond à la luminosité. Plus précisément, l'**intensité lumineuse** est le carré de l'amplitude.

Si A_0 est l'amplitude maximale (commune aux deux ondes puisqu'elles viennent au départ de la même source S), alors l'amplitude au point M de l'onde venue de S_1 s'exprime ainsi :

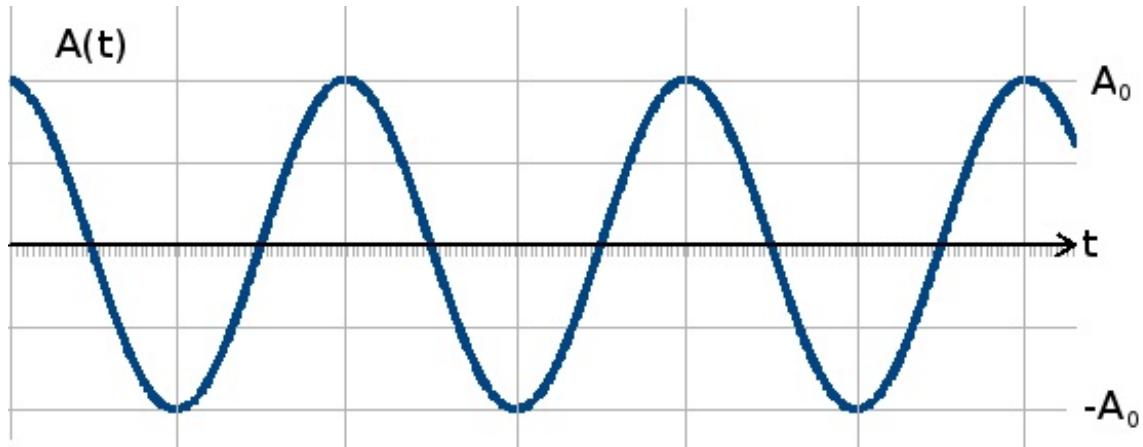
$$A_1(t) = A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Cette formule correspond aux **ondes sinusoïdales** vues au chapitre précédent. On est bien d'accord que, pour l'instant, Thomas Young ne sait pas si elle est valable pour la lumière. Mais il essaie de l'appliquer. C'est son **hypothèse**. Nous verrons à la fin du calcul si cette hypothèse est confirmée ou contredite par l'expérience.

Dans cette formule, donc, ω est une grandeur physique qu'on appelle la **pulsation** de l'onde. Son unité est le **radian par seconde** ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$). Elle est liée à la fréquence par la formule $\omega = 2 \pi \nu$.

$\omega \cdot t$ est donc un angle exprimé en radians, dont la valeur varie au cours du temps. Son sinus oscille entre 1 et -1. Et $A_1(t)$

oscille donc entre A_0 et $-A_0$.



Pour $A_2(t)$, les choses se compliquent. En effet, l'onde venue de S_2 a parcouru, avant d'arriver en M , une autre distance que celle qui venait de S_1 . Il y a donc un décalage entre ces deux ondes.

$$A_2(t) = A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

L'angle ϕ , exprimé en radians, est le **déphasage** entre les deux ondes. Pour le calculer, nous allons faire un peu de géométrie.



Le triangle MAS_1 est rectangle en A . D'après le théorème de Pythagore : $MA^2 + S_1A^2 = S_1M^2$. Donc $(x-a)^2 + D^2 = d_1^2$, donc $d_1 = \sqrt{(x-a)^2 + D^2}$.

Le triangle MBS_2 est rectangle en B . D'après le théorème de Pythagore : $MB^2 + S_2B^2 = S_2M^2$. Donc $(x+a)^2 + D^2 = d_2^2$, donc $d_2 = \sqrt{(x+a)^2 + D^2}$.

On recherche la **différence de marche** δ entre les deux ondes qui arrivent en M .

$$\delta = d_2 - d_1$$

$$\delta = \sqrt{(x+a)^2 + D^2} - \sqrt{(x-a)^2 + D^2}$$

$$\delta = D \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{(x+a)^2}{D^2}} - \sqrt{1 + \frac{(x-a)^2}{D^2}} \right]$$

On suppose que l'écran est situé assez loin des deux fentes. Autrement dit, D est beaucoup plus grand que $(x+a)$ ou que $(x-a)$.

Donc on peut largement faire l'approximation que $\frac{(x+a)^4}{4D^4} = 0$ et $\frac{(x-a)^4}{4D^4} = 0$. Continuons maintenant notre calcul :

$$\delta = D \cdot [\sqrt{1 + \frac{(x+a)^2}{D^2} + \frac{(x+a)^4}{4D^4}} - \sqrt{1 + \frac{(x-a)^2}{D^2} + \frac{(x-a)^4}{4D^4}}]$$

$$\delta = D \cdot [\sqrt{(1 + \frac{(x+a)^2}{2D^2})^2} - \sqrt{(1 + \frac{(x-a)^2}{2D^2})^2}]$$

$$\delta = D \cdot [(1 + \frac{(x+a)^2}{2D^2}) - (1 + \frac{(x-a)^2}{2D^2})]$$

$$\delta = D \cdot \frac{(x+a)^2 - (x-a)^2}{2D^2}$$

$$\delta = \frac{(x^2 + 2ax + a^2) - (x^2 - 2ax + a^2)}{2D}$$

$$\delta = \frac{4ax}{2D}$$

$$\delta = \frac{2ax}{D}$$

Ouf !  En voilà un calcul. Et ça ne fait que commencer... 

L'onde venue de S_2 parcourt donc une plus grande distance que celle venue de S_1 pour arriver en M . Et cette distance supplémentaire, la **différence de marche**, est égale à $\frac{2ax}{D}$.

Il faut maintenant trouver le **déphasage** ϕ correspondant à cette **différence de marche**.

Si ce déphasage valait 2π rad, ce qui correspond à un tour complet, on aurait :
 $A_2(t) = A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + 2\pi) = A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) = A_1(t)$

Les deux ondes auraient alors la même valeur : elles seraient **en phase**. Dans cette hypothèse, la différence de marche entre elles serait λ . Eh oui ! C'est la définition même de λ : la distance entre deux points où l'onde a la même amplitude. Par exemple, entre deux maximums, ou entre deux minimums.

Et, ce qui est bien pratique, c'est que le déphasage est proportionnel à la différence de marche. Cela nous permet de faire un produit en croix :

δ	ϕ
λ	2π
$\frac{2ax}{D}$?

$$\text{Donc } \phi = \frac{2ax}{D} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{4\pi ax}{D\lambda}$$

Au point M, les deux ondes se rejoignent. Et comme elles ont la même fréquence (normal, elles viennent au départ de la même source S), elles vont **interférer**, ce qui veut dire que leurs amplitudes vont s'ajouter :

$$A_M(t) = A_1(t) + A_2(t) = A_0 \cdot \sin(\omega t) + A_0 \cdot \sin(\omega t + \frac{4\pi ax}{D\lambda}) = A_0 \cdot [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + \frac{4\pi ax}{D\lambda})]$$

En mathématiques, il existe une formule de trigonométrie qui dit que : $\sin(a) + \sin(b) = 2 \sin(\frac{a+b}{2}) \cdot \cos(\frac{a-b}{2})$.

Ici, $a = \omega t$ et $b = \omega t + \frac{4\pi ax}{D\lambda}$. Donc :

$$A_M(t) = A_0 \cdot \sin\left(\frac{\omega t + \omega t + \frac{4\pi ax}{D\lambda}}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega t - \omega t - \frac{4\pi ax}{D\lambda}}{2}\right) = A_0 \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi ax}{D\lambda}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi ax}{D\lambda}\right)$$

L'intensité lumineuse I_M au point M est définie comme le carré du module de l'amplitude $A_M(t)$.

- $\sin\left(\omega t + \frac{2\pi ax}{D\lambda}\right)$ oscille périodiquement au cours du temps entre -1 et 1. Son module est $1 - (-1) = 2$.
- $A_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi ax}{D\lambda}\right)$ ne dépend pas de t . Son module est égal à sa valeur absolue.

On obtient donc $I_M = 4 A_0^2 \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi ax}{D\lambda}\right)$. L'intensité maximale I_0 est : $I_0 = 4 A_0^2$

L'intensité lumineuse observée sur l'écran varie en fonction de x uniquement. Il est donc normal qu'on obtienne des franges droites verticales.

$$I(x) = I_0 \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi a}{D\lambda} \cdot x\right)$$

Là où $\left(\frac{2\pi a}{D\lambda} \cdot x\right)$ est un multiple entier de π , le cosinus carré vaut 1 donc l'intensité lumineuse est maximale. C'est une **interférence constructive**.

Par contre, là où $\left(\frac{2\pi a}{D\lambda} \cdot x\right)$ est un multiple entier impair de $\frac{\pi}{2}$, le cosinus carré s'annule. Il n'y a aucune lumière en ce point. C'est une **interférence destructive**.



Vous n'allez peut-être pas me croire, mais j'ai quand-même un peu simplifié. Si, si ! Je n'ai pas tenu compte d'un phénomène parasite à cause duquel les franges lumineuses correspondant aux interférences constructives ne sont pas toutes aussi lumineuses les unes que les autres. Mais je pense que c'est déjà assez difficile à digérer comme ça.

En tout cas, ces résultats correspondent bien à ce qu'on observe sur l'écran. L'hypothèse de **Thomas Young**, selon laquelle la lumière est une onde sinusoïdale, se voit confirmer par l'expérience. La théorie ondulatoire, que tout le monde avait oubliée pendant un siècle, gagne enfin ses lettres de noblesse. Elle vient de montrer avec brio qu'elle peut expliquer des phénomènes complexes là où les corpuscules de Newton en sont incapables.

Les newtoniens jouent leur va-tout en 1817 : ils organisent un concours et offrent un prix à quiconque saura expliquer la diffraction dans le cadre de la théorie corpusculaire. Mais personne ne leur répond. Au contraire, **Augustin Fresnel** profite de l'occasion pour leur envoyer un mémoire dans lequel il explique par le calcul intégral et la théorie ondulatoire toutes sortes de figures de diffraction et d'interférences.

Après ça, tout le monde l'admet : la lumière est une onde.

C - L'interféromètre de Michelson-Morley

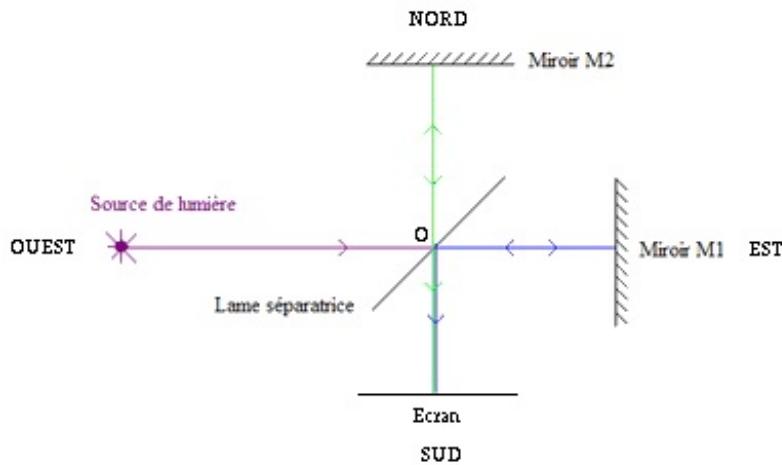


C'était donc la théorie ondulatoire, la bonne. C'est sûr, maintenant ?

Les corpuscules ne sont pas seulement morts : ils sont enterrés. La théorie ondulatoire a fait ses preuves tout au long du XIXème siècle. Et pourtant, l'une de ses hypothèses de départ n'a toujours pas été vérifiée. Où est cet **éther** dans lequel les ondes lumineuses sont censées se propager ? On ne l'a pas encore découvert.

Albert Michelson, celui qui mesurera la vitesse de la lumière en 1926, part en 1881 à la recherche de l'**éther** perdu. Après un premier échec, il s'associe à **Edward Morley** pour mettre au point un puissant **interféromètre**.

L'idée est la suivante : l'espace serait rempli d'éther. La lumière venue des étoiles arrive sur Terre en se propageant à travers lui. Comme la Terre tourne sur elle-même, elle doit donc être en mouvement par rapport à l'éther. C'est ce mouvement, ce **vent d'éther**, que **Michelson et Morley** espèrent détecter avec leur **interféromètre**.



Le faisceau de lumière émis par la source à l'ouest est divisé par une lame semi-réfléchissante et envoyé vers deux miroirs. Réfléchi par M_1 , à l'est, un premier faisceau (bleu) revient vers la lame semi-réfléchissante, qui le dévie vers un écran, au sud. L'autre faisceau (vert) est réfléchi par M_2 , au nord, et file droit vers ce même écran. Les deux faisceaux vont **interférer** et dessiner sur l'écran une **figure d'interférences**.

L'axe source- M_1 est orienté selon un **parallèle** tandis que l'axe M_2 -écran est orienté selon un **méridien**. $OM_1 = OM_2 = D$

Par rapport à l'éther, la lumière se déplace à la vitesse c , que nous connaissons bien, et la Terre se déplace, d'ouest en est, à la vitesse v .

$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v = 3,0 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. v est donc beaucoup plus petite que c .

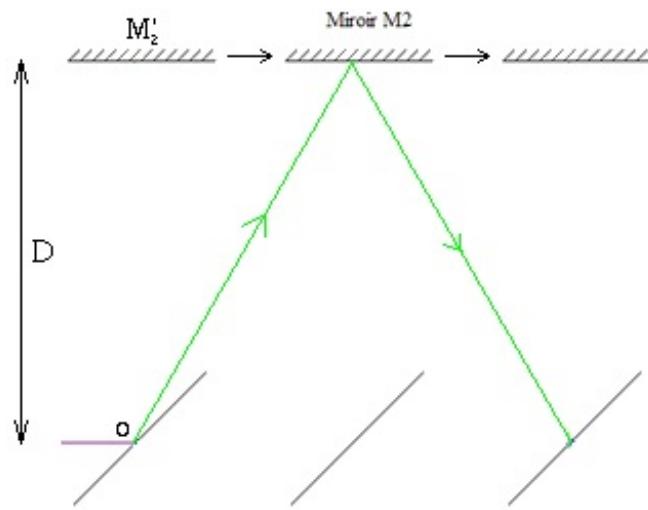
Je vous rappelle la formule qui lie la distance parcourue à la vitesse et au temps mis pour la parcourir : $d = v \cdot t$ donc $t = \frac{d}{v}$.

Ici, le temps mis par le faisceau bleu pour faire l'aller retour entre O et M_1 est :

$$t_1 = \frac{D}{c-v} + \frac{D}{c+v}$$

En effet, la vitesse de la lumière par rapport à la Terre est $c-v$ à l'aller et $c+v$ au retour.

Pour le faisceau vert, c'est un peu plus compliqué, car le miroir M_2 se déplace, lui-aussi, vers l'est, pendant que la lumière voyage.



Soit M'_2 la position du miroir M_2 au moment où la lumière était au point O . Le triangle $OM_2M'_2$ est donc rectangle en M'_2
 $OM'_2 = D$

Soit t'_2 le temps mis par la lumière pour aller de O à M_2 . $OM_2 = c \cdot t'_2$

Pendant ce même temps t'_2 , le miroir a parcouru vers l'est la distance $M'_2M_2 = v \cdot t'_2$

D'après le théorème de Pythagore : $OM_2^2 = OM'^2 + M'_2M_2^2$ donc :

$$(ct'_2)^2 = D^2 + (vt'_2)^2$$

$$c^2t'^2 = D^2 + v^2t'^2.$$

$$t'^2 \cdot (c^2 - v^2) = D^2$$

$$t'^2 = \frac{D}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Au retour, c'est exactement la même chose. Le temps total t_2 mis par le faisceau vert pour faire l'aller-retour entre O et M_2 est donc $t_2 = 2t'_2 = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}}$

Les deux faisceaux n'ont pas mis le même temps pour revenir à la lame semi-réfléchissante. Le décalage entre eux est :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} - \frac{D}{c - v} - \frac{D}{c + v} = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} - \frac{D \cdot (c + v + c - v)}{c^2 - v^2}$$

$$\Delta t = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} - \frac{2Dc}{c^2 - v^2} = 2D \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{c^2 - v^2}} - \frac{c}{c^2 - v^2} \right)$$

$$\Delta t = 2D \cdot \left(\frac{1}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{c}{c^2(1 - \frac{v^2}{c^2})} \right) = \frac{2D}{c} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

Pour continuer le calcul, nous avons maintenant besoin d'un autre outil mathématique : le **développement limité**.

En effet, v est beaucoup plus petit que c donc $\frac{v^2}{c^2}$ est minuscule. Or, quand x est petit, on peut faire un **développement limité** de

$\frac{1}{1-x}$ et un autre de $\frac{1}{\sqrt{1-x}}$.

$\frac{1}{1-x} = 1 + x + \epsilon$ et $\frac{1}{\sqrt{1-x}} = 1 + \frac{1}{2}x + \epsilon'$. Les deux termes ϵ étant négligeables.

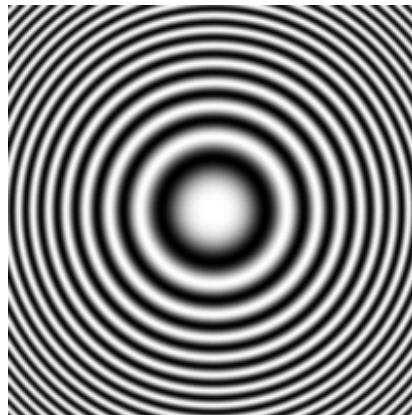
$$\text{Donc } \Delta t = \frac{2D}{c} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \epsilon' - 1 - \frac{v^2}{c^2} - \epsilon \right) = \frac{2D}{c} \cdot \left(-\frac{v^2}{2c^2} \right) = -\frac{Dv^2}{c^3}$$



Mais ... Il est minuscule, ce décalage. Comment espérer le mesurer ?

Une mesure directe avec un chronomètre est totalement inenvisageable. Mais, ce qui est bien avec les interférences, c'est que le moindre mini-micro-décalage entre les deux ondes suffit à faire apparaître les figures sur l'écran.

Ayant mené à bien ce calcul, Michelson et Morley s'attendaient à obtenir une figure de ce type :



Seulement voilà : ce n'est pas du tout ça qui apparaît sur l'écran ! À leur grande surprise, ils n'observent AUCUNE interférence. Rien qu'un point lumineux au centre. Il n'y a manifestement aucun décalage entre les deux faisceaux d'ondes lumineuses.

Naturellement, ça ne leur plaît pas du tout ! 😞



On s'est trompé dans le calcul ?

Non. Le calcul est correct. Le problème est ailleurs. Soit ils ont mal manipulé, soit c'est leur hypothèse de départ qui est fausse.

Pendant des années, Michelson et Morley recommencent encore et encore leur mesure, améliorant régulièrement leur dispositif. Mais en 1887, ils doivent se rendre à l'évidence : leur méthode infaillible pour détecter le vent d'éther n'a rien détecté du tout. 🤦 Parce qu'il n'y avait rien à détecter : *l'éther n'existe pas*. Impossible, par conséquent, de parler d'une vitesse entre lui et la Terre.

L'ETHER N'EXISTE PAS !!!



On peut quand-même observer la figure d'interférences ci-dessus en plaçant les miroirs à des distances différentes de O. Les interférences n'ont alors plus rien à voir avec la rotation de la Terre et s'expliquent simplement par le fait que les deux faisceaux n'ont pas parcouru la même distance.

Les supposées "ondes lumineuses" n'ont pas de milieu dans lequel se propager. Finalement trahie par les interférences, la théorie ondulatoire s'avère être un colosse aux pieds d'argile. Privée d'une de ses hypothèses de base, elle s'effondre comme un château de cartes.

À moins que...

D - Les ondes électromagnétiques

C'est une autre branche de la Physique qui va voler au secours de l'optique ondulatoire. L'**électromagnétisme** s'est développé, lui aussi, au cours du XIXème siècle, suite à la découverte de **Hans Christian Ørsted** (1820), selon laquelle un courant électrique peut dévier l'aiguille d'une boussole située à proximité.

En quelques décennies, l'électromagnétisme avance à pas de géant. Et en 1873, **James Clerk Maxwell** le résume en quelques équations.

Voici la manière actuelle d'écrire ces équations, dans le cas le plus simple (dans le vide) :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

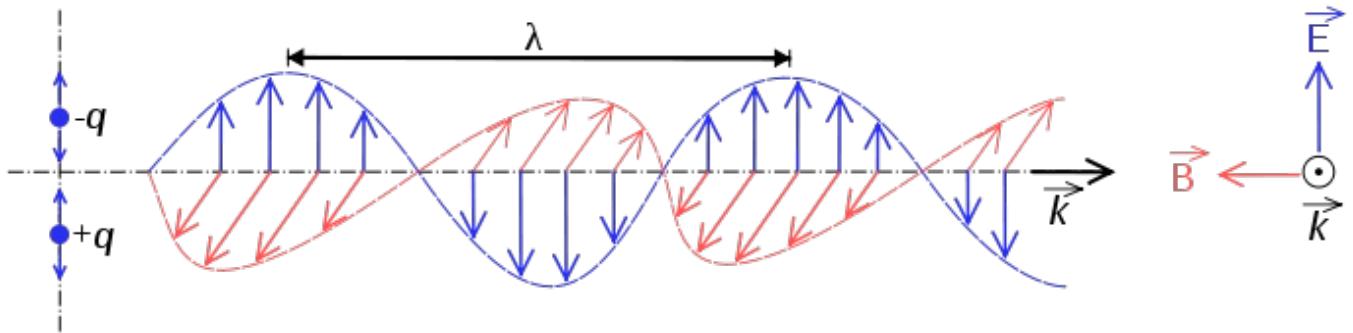
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Le vecteur \vec{E} représente le champ électrique tandis que \vec{B} est le champ magnétique. Je ne vais pas vous expliquer ces équations. Il faudrait un tutoriel entier pour ça. Un tutoriel bien costaud, d'ailleurs... 😊 Un jour, peut-être...



Remarquez, au passage, que les symboles \cdot et \times ne sont pas toujours équivalents. Évitez donc les \times .

Mais ces équations montrent quelque chose d'intéressant : quand un champ magnétique varie au cours du temps, cela peut générer un champ électrique. Et quand un champ électrique varie au cours du temps, cela peut générer un champ magnétique. \vec{E} et \vec{B} peuvent donc se générer mutuellement, du moment qu'ils varient. On peut se retrouver ainsi avec une onde électromagnétique, dans laquelle électricité et magnétisme s'entretiennent de manière réciproque. Du coup, ces ondes n'ont pas besoin d'un milieu de propagation. Elles peuvent traverser le vide sans aucun problème.



Les équations révèlent aussi qu'une onde de ce genre n'a qu'une seule célérité possible : $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$

- μ_0 est la **perméabilité magnétique** du vide. C'est une constante universelle, qui vaut : $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ (henrys par mètre).
- ϵ_0 est la **permittivité électrique** du vide. C'est aussi une constante universelle. Elle vaut : $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ (farads par mètre).

L'unique célérité possible pour une onde électromagnétique (dans le vide) est donc :

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = \frac{1}{\sqrt{111 \cdot 10^{-19}}} = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3,00 · 10⁸ m · s⁻¹ ! Cette valeur ne vous rappelle rien ? 😊

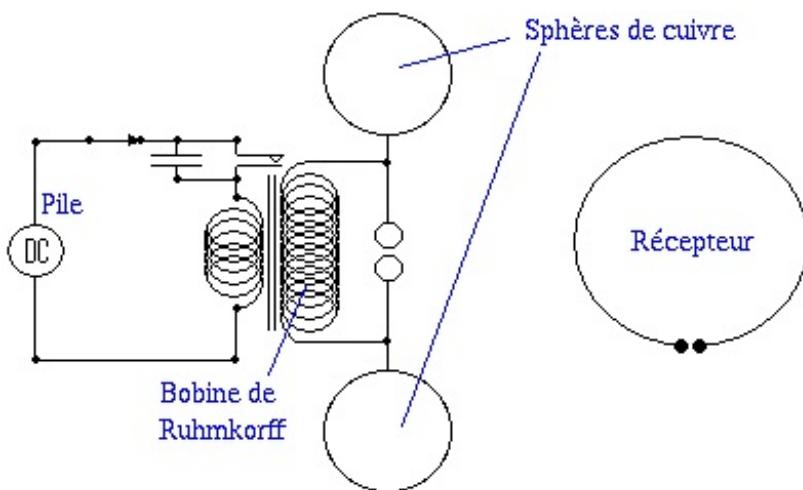
Mais oui ! C'est **c**, la **célérité de la lumière** dans le vide. Tout s'explique : la lumière est une **onde électromagnétique**.

Ne nous emballons pas quand-même. 😕 Tout ceci reste très théorique. Est-ce qu'elles existent vraiment, ces ondes électromagnétiques ? Est-ce qu'il y a d'autres ondes que la lumière dans cette famille ? En 1873, on n'en connaît encore aucune.



Mais en 1887, la nouvelle de l'échec de Michelson et Morley tombe comme un coup de tonnerre : l'éther n'existe pas. Les Physiciens ont cruellement besoin d'une théorie de rechange et seul Maxwell propose une réponse crédible. Si seulement on pouvait vérifier sa théorie...

C'est alors que **Heinrich Hertz** se dit que, si on a donné son nom à l'unité de la fréquence, c'est qu'il doit bien avoir un rôle à jouer dans cette affaire. 😊 Il met au point un **excitateur électrique** destiné à produire des ondes électromagnétiques invisibles.



Les deux sphères de cuivre accumulent des charges électriques. La tension ainsi créée provoque des étincelles entre les deux petites sphères.

Quelques dizaines de mètres plus loin, une boucle de cuivre sert de récepteur. Si l'écartement des petites sphères du récepteur est le bon, des étincelles apparaissent là aussi et un courant parcourt la boucle. Un champ électrique a donc été transmis entre l'excitateur et le récepteur. À cette distance, il n'a pu l'être que par une onde électromagnétique. C'est la première fois qu'une telle onde est mise en évidence.

Après les **ondes hertziennes** (ou **ondes radio**), un autre type d'onde électromagnétique est découvert par **Wilhelm Röntgen** en 1895 : les **rayons X**.



Photographie en rayons X de la main de Mme Röntgen

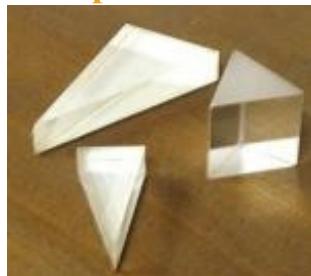
Les ondes électromagnétiques existent donc bel et bien et la lumière en est une. La théorie ondulatoire, que l'absence d'éther a bien failli mettre à bas, sort encore grandie de cette épreuve.

Les couleurs

Maintenant que l'on sait que la lumière est une onde électromagnétique, nous allons pouvoir comprendre les **couleurs**.

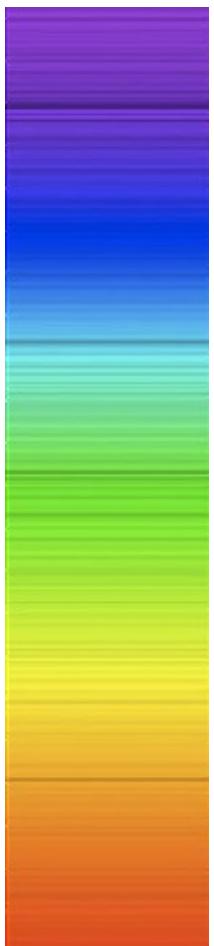
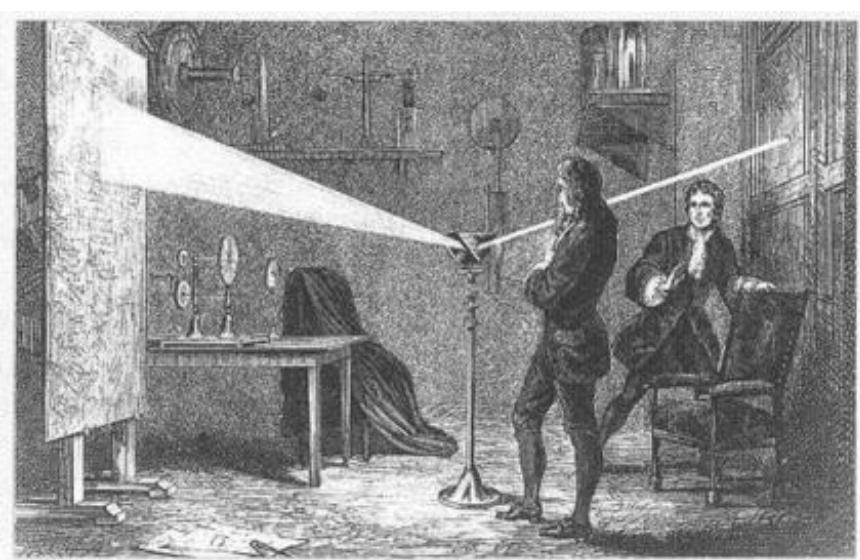
Mais l'étude des couleurs a commencé bien avant le XIXème siècle...

A - Dispersion de la lumière par un prisme



Les **prismes** sont des objets transparents de forme triangulaire, comme sur la photo ci-dessus. Quand une lumière blanche les traverse, il se produit quelque chose d'étonnant.

Ce chapitre commence comme le précédent : dans une pièce sombre, avec une fente dans les rideaux (ou les volets). Le mince rai de lumière ainsi obtenu est dirigé, cette fois-ci, vers un **prisme**, au centre de la pièce. Et derrière le prisme, il y a de nouveau un écran blanc.



 Gardez à l'esprit que l'image ci-dessus est une gravure et non une photographie et que les **faisceaux de lumière**, représentés ici en blanc, ne sont pas réellement visibles de profil.

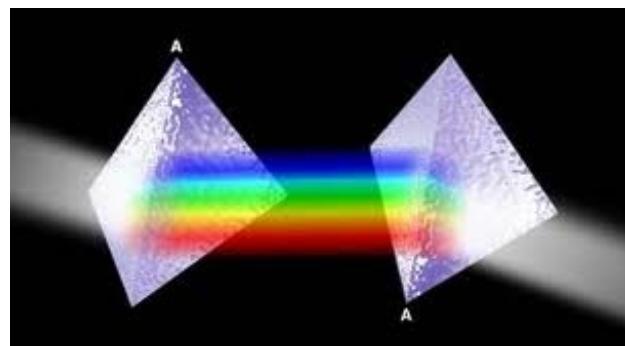
On observe alors sur l'écran la figure ci-contre (à droite).

Cette image ne se forme pas en face de la fente. Mais ça, c'est normal : la lumière a été réfractée deux fois par le prisme : une fois en entrant et une autre en sortant.

Plus surprenant : il y a toutes sortes de couleurs dans cette image, alors qu'on n'a utilisé que la blanche lumière du Soleil. Comment est-ce possible ?

Avant Newton, on pensait que la lumière était fatiguée, affaiblie par la traversée du prisme. On pensait que le blanc correspondait à une lumière en pleine forme, le rouge à une lumière légèrement fatiguée et le violet à une lumière vraiment à bout de souffle. Comme l'épaisseur de prisme traversée n'est pas la même pour tous les rayons, on expliquait ainsi pourquoi certains devenaient rouges et d'autres violettes.

Isaac Newton rejette cette hypothèse. Pour lui, c'est autre chose qui se passe : toutes ces lumières colorées étaient déjà présentes dans la lumière blanche, et le prisme n'a fait que les **disperser**. Et pour vérifier s'il a raison, il a l'idée de placer un second prisme derrière le premier, dans l'autre sens.



Et là, waouuu...💡 On retrouvait de la lumière blanche à la sortie du second prisme.

Le premier prisme avait donc "décomposé" (on dit **dispersé**) la lumière blanche et un autre prisme pouvait la recomposer.

Cela signifie que la lumière blanche **polychromatique** du Soleil est en réalité le résultat de la superposition de très nombreuses lumières **monochromatiques**. Autrement dit, dans un faisceau de lumière blanche, il y a des rayons rouges, verts, bleus, etc. Et ces rayons monochromatiques sont si intimement mêlés qu'on ne peut pas les distinguer. Quand le prisme disperse la lumière blanche, il écarte tous ces rayons colorés les uns des autres.



On qualifie de **monochromatique** une lumière dont tous les rayons ont la même couleur. Par contre, s'il y a plusieurs couleurs mélangées, la lumière est **polychromatique**.

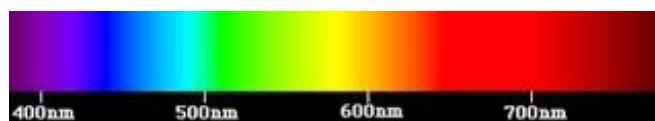


Mais comment fait le prisme pour écarter les différents rayons ?

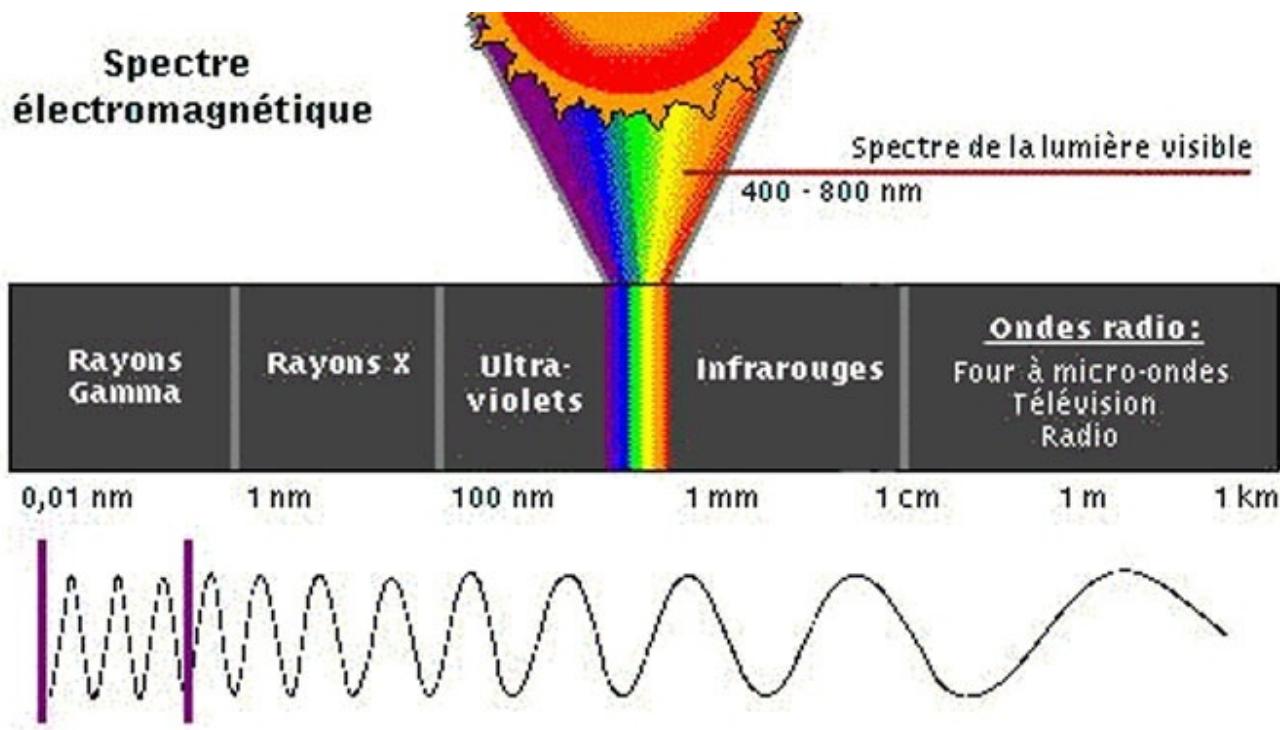
Vous vous souvenez que l'**indice de réfraction** d'un milieu représente la difficulté qu'éprouve la lumière à le traverser, n'est-ce pas ? Eh bien, sachez que cette difficulté dépend de la couleur de la lumière.

Ainsi, un rayon de lumière rouge arrive plus facilement à se faufiler à travers l'eau ou le verre qu'un rayon de lumière bleue. Pour Newton, cette différence vient du fait que les corpuscules de lumière bleue sont plus gros ou moins agiles que ceux de la lumière rouge. Pour la théorie ondulatoire, par contre, les diverses lumières colorées se distinguent les unes des autres par leur **longueur d'onde**. Chaque valeur de λ correspond à une couleur bien précise.

L'œil humain n'est capable de percevoir que les radiations lumineuses dont la longueur d'onde est comprise entre **400 nm (violet)** et **800 nm (rouge)**.

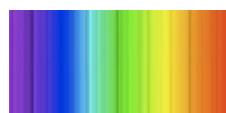


Une **longueur d'onde** de 500 nm, par exemple, correspond à un bleu vert, tandis qu'à 600 nm, on est dans un jaune orangé. Les autres types d'**ondes électromagnétiques** ont une longueur d'onde inférieure à 400 nm ou supérieure à 800 nm :



L'indice de réfraction du verre pour une lumière rouge de $\lambda = 656 \text{ nm}$ vaut $n_{656} = 1,514$ mais celui du même verre pour une lumière bleue de $\lambda = 486 \text{ nm}$ vaut $n_{486} = 1,522$.

Par conséquent, quand le faisceau de lumière blanche arrive sur un prisme, tous les rayons ont le même angle d'incidence. Mais comme chacun a ensuite son propre indice de réfraction, chaque longueur d'onde va avoir un angle de réfraction différent. Chaque lumière monochromatique part donc dans une direction différente et atteint l'écran en un lieu différent. Voilà pourquoi, sur l'écran, on voit toutes ces couleurs les unes à côté des autres.



C'est le phénomène de **dispersion** d'une lumière polychromatique. Sachez d'ailleurs que le prisme n'est pas le seul dispositif permettant de la réaliser. On peut aussi se servir d'un **réseau de diffraction**, c'est-à-dire d'une série de fentes très fines et très rapprochées percées dans une feuille de papier. La **diffraction**, qui dépend justement de λ , aboutit dans ce cas à la **dispersion** de la lumière et à l'apparition de deux spectres. Cette fois, c'est la lumière rouge qui est plus déviée que la lumière violette.



B - Les spectres



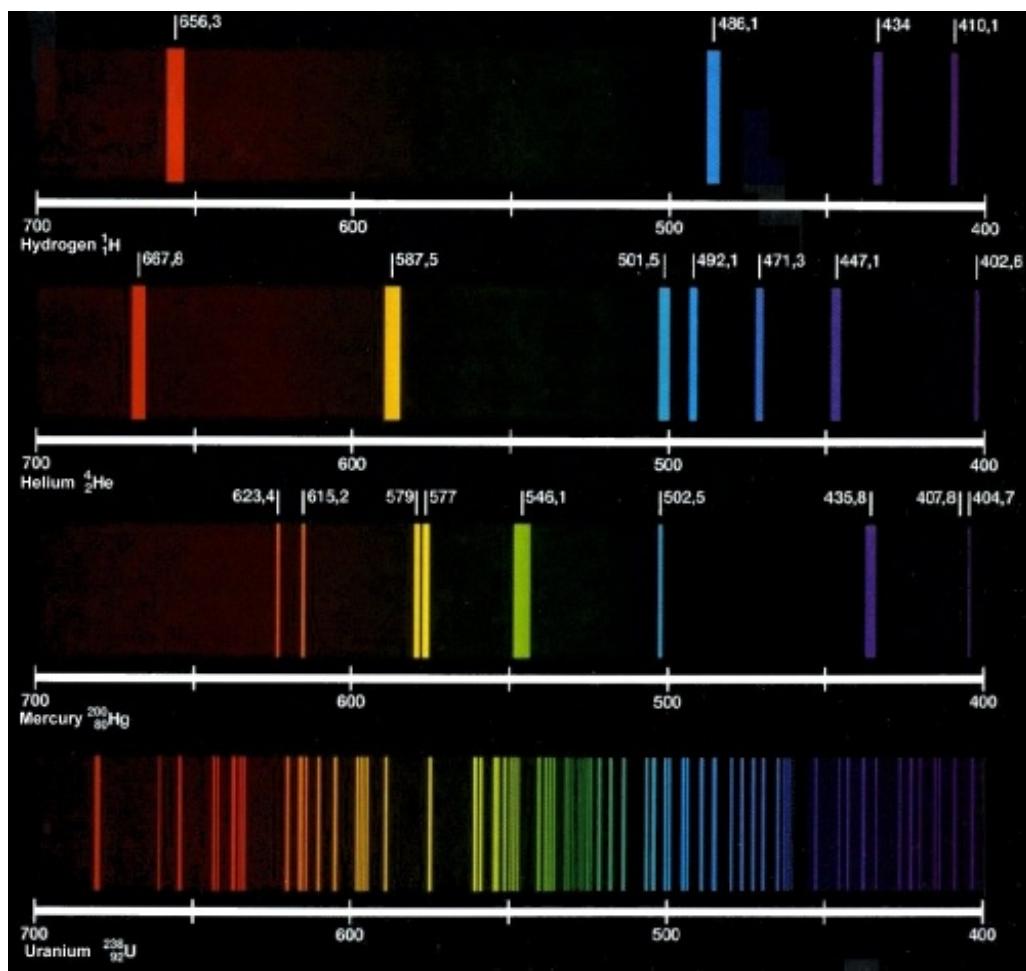
Le **spectre** d'une lumière, c'est l'image qu'on obtient sur un écran après l'avoir dispersée avec un prisme ou un réseau. Nous venons de voir celui de la lumière du Soleil. Il existe toutes sortes de lumières et toutes n'ont pas un spectre "continu avec des raies noires". Voyons un peu les différents types de spectres, et donc les différents types de lumières que l'on peut rencontrer.

L'image ci-contre montre une **lampe à vapeur de sodium**. Elle contient du sodium (Na) à l'état gazeux. Quand ce gaz est excité par une tension électrique, il émet de la lumière, que l'on peut disperser avec un prisme afin d'observer son spectre sur un écran. Ce spectre, appelé **spectre d'émission du sodium**, est très différent de celui de la lumière du Soleil :



Il n'y a que deux raies lumineuses jaunes dans le spectre. Cette lumière est donc **polychromatique**, mais de justesse (2 nuances de jaune).

On peut obtenir des **spectres d'émission** en excitant toutes sortes de gaz. Voici, par exemple, les spectres d'émission de l'hydrogène (H), de l'hélium (He), du mercure (Hg) et de l'uranium (U) :



Le nombre et la position des raies lumineuses dépend de la nature du gaz excité mais tous ces spectres ont en commun d'être discontinus.

Un gaz donné aura toujours le même spectre. Par contre, deux gaz différents auront des spectres différents. Le spectre d'émission

permet donc d'identifier un gaz. Un peu comme une empreinte digitale permet d'identifier un individu.

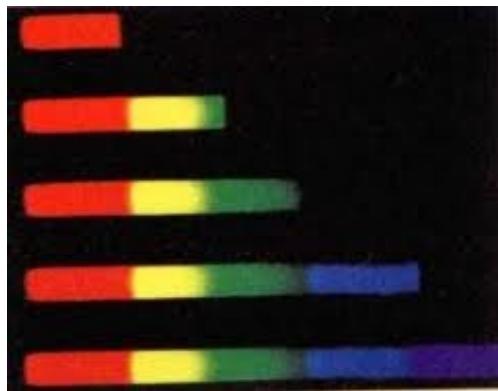
Prenons maintenant une **ampoule à incandescence** tout ce qu'il y a de plus classique. Le passage du courant électrique à travers un **filament** en tungstène fait chauffer ce dernier. À partir d'une certaine température, le filament commence à émettre une faible lumière rouge. Si on augmente légèrement la tension, et donc la température du filament, cette lumière devient orange puis jaune. Par ailleurs, elle commence à briller de plus en plus. Et si on chauffe beaucoup, la lumière atteint finalement un blanc éclatant.



Ce phénomène ne se limite pas aux filaments des ampoules. N'importe quel objet, du fait de sa température, émet des ondes électromagnétiques. Plus sa **température** est élevée, plus l'objet peut émettre des radiations ayant de petites longueurs d'onde. Un corps humain, par exemple, est relativement froid. Il n'émet donc que des radiations ayant de grandes longueurs d'ondes : des infrarouges, invisibles mais détectables par des capteurs spéciaux comme ceux des caméras thermiques :



Si on observe le spectre de la lumière de l'ampoule, on constate que ce spectre est continu. À "basse" température, il ne comporte que des radiations rouges. Plus on augmente la tension électrique, et donc la température du filament, plus il s'enrichit en radiations orange, puis jaunes, puis vertes, puis bleues, puis indigo, puis violettes.



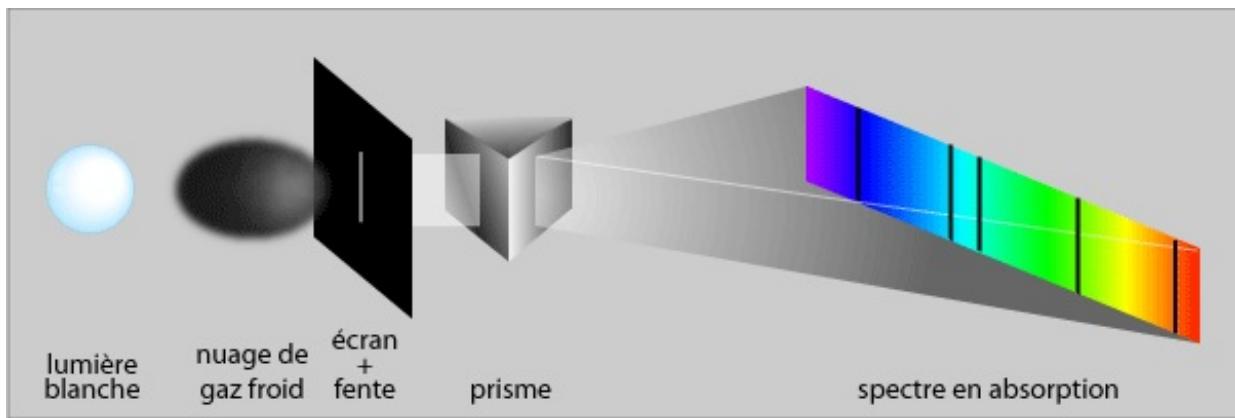
Remarquez que ces spectres ne dépendent pas de la nature de l'objet qui chauffe, contrairement aux spectres d'émission, mais plutôt de sa **température**. Ce sont des **spectres d'origine thermique**. Quand cet objet est très chaud, son spectre est complet : il comprend toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. La lumière émise est alors blanche. On dit que l'objet est "chauffé à blanc".



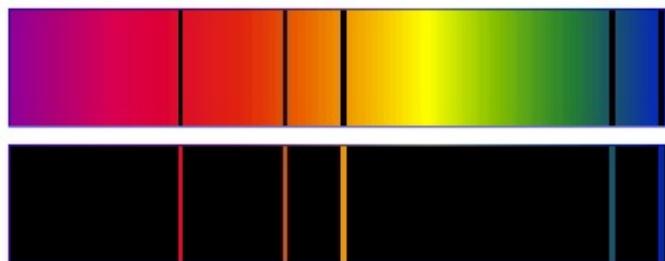
Il est parfois possible de chauffer encore plus, lorsque cela ne détruit pas l'objet considéré. La lumière émise peut alors devenir bleue. Les radiations rouges n'ont pas disparu du spectre mais, comme les radiations bleues deviennent beaucoup plus intenses, l'ensemble apparaît globalement bleu.

Culturellement, nous avons l'habitude d'associer le rouge au chaud et le bleu au froid. Pourtant, une flamme ou une étoile produisant une lumière bleue est plus chaude qu'une flamme ou une étoile produisant une lumière rouge. Par exemple, la flamme de ce petit béc蓉sen est plus chaude en bas qu'en haut.

La troisième catégorie est celle des **spectres d'absorption**. Pour en observer un, il faut prendre une lumière blanche d'origine thermique, avec un spectre continu bien complet, et lui faire traverser une cuve contenant un gaz non excité. Ce gaz va alors absorber certaines des radiations de la lumière. Du coup, quand on analyse le spectre de la lumière qui sort de la cuve, on s'aperçoit qu'il n'est plus tout à fait complet : il manque des raies.



Les raies manquantes dépendent bien entendu du gaz traversé. D'ailleurs, si on compare le spectre d'absorption et le spectre d'émission d'un même gaz (ci-dessous, le mercure), on remarque...



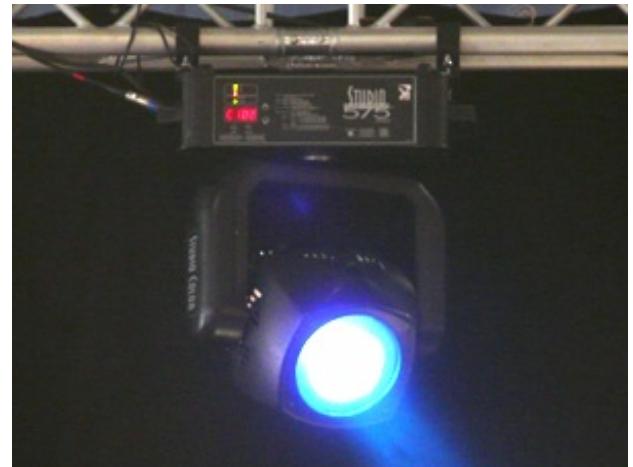
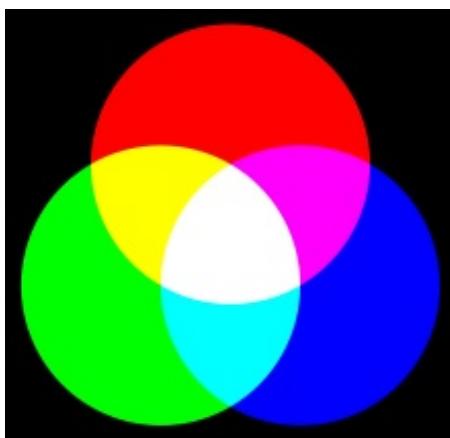
On remarque que les radiations absorbées par un gaz sont très précisément celles qu'il est capable d'émettre. Il est donc possible, pour identifier un gaz ou un mélange de gaz, de laisser une lumière blanche le traverser. C'est souvent plus simple que de l'exciter.

C - Synthèse des couleurs

Quand on superpose plusieurs lumières colorées, on peut former de nouvelles couleurs. La lumière du Soleil en est un très bon exemple. Mais on peut faire des mélanges plus simples.

Voici par exemple un **projecteur de lumière bleue**. On voit sa lumière car il y a de la poussière devant lui. Si on utilise également un projecteur **rouge** et un autre **vert**, et si on braque les trois faisceaux au même endroit, cela suffit à obtenir une lumière **blanche**.

Bleu, rouge et **vert** sont les trois **couleurs primaires**. En les associant, on peut former d'autres couleurs.



Voici la **synthèse additive** des couleurs. On peut former cette image à l'aide des trois projecteurs ci-dessus. Là où deux halos colorés se croisent, les couleurs "s'additionnent".

- Rouge + Bleu = Magenta (une nuance de rose)
- Bleu + Vert = Cyan
- Rouge + Vert = Jaune

Le centre de l'image est éclairé par les trois projecteurs et, comme je vous l'ai indiqué, on y obtient du **blanc**.



Rouge + Vert = Jaune ? Ce ne serait pas plutôt Bleu + Jaune = Vert ? ou Rouge + Vert = Marron ?

Non. Ce sont des faisceaux de lumière que l'on combine ici, pas des encres ou des peintures. On ajoute ici des lumières les unes aux autres donc on obtient des couleurs de plus en plus claires.

Le cas des encres correspond plutôt à une **synthèse soustractive** :



Si les objets qui nous entourent nous apparaissent colorés, c'est donc parce qu'ils émettent des lumières qui sont, elles-mêmes, colorées. La plupart du temps, ils reçoivent la lumière blanche du Soleil, en absorbent une partie, et diffusent le reste. Un tomate, par exemple, est **rouge** parce qu'elle absorbe les lumières violette, bleue, verte et jaune. Si on l'éclaire en lumière blanche, elle rediffuse le orange et le rouge et cela détermine sa couleur.

Si on éclaire cette tomate avec une lumière monochromatique **bleue**, elle l'absorbe et ne diffuse rien. Elle semble **noire**.

Prenons maintenant un cas un peu plus complexe : une tâche de peinture **jaune**. Nous la voyons jaune car elle diffuse le **rouge** et le **vert** et car ces couleurs, en s'ajoutant, donnent du **jaune**. Eclairons-là maintenant avec une lumière **cyan**.

La lumière **cyan** est un mélange de lumière **bleue** et de lumière **verte**. La lumière bleue sera absorbée par la tache de peinture. Par contre, la lumière **verte** fait partie de celle qui sont diffusées. Éclairée en lumière **cyan**, cette tâche de peinture **jaune** paraîtra **verte**.

Maintenant, on mélange une encre **jaune** avec une encre **cyan**, et on éclaire le tout avec de la lumière **blanche**. Que se passe-t-il ?

L'encre **cyan**吸 absorbe tout sauf les lumières **bleue** et **verte**. La lumière **bleue** est absorbée par l'encre **jaune** et seule le **vert** est diffusé.

C'est ça, la **synthèse soustractive** des couleurs. Une synthèse soustractive du **jaune** et du **cyan** donne du **vert**.



De même, une synthèse soustractive du **jaune** et du **magenta** donne du **rouge**, tandis qu'une synthèse soustractive du **magenta** et du **cyan** donne du **bleu**. C'est probablement ainsi que fonctionne votre imprimante, par exemple.

Cette fois, on retire des lumières, donc on obtient des couleurs de plus en plus sombres.

Exercice

Remplissez le tableau suivant en indiquant de quelle couleur on voit chaque objet.

Objet éclairé en lumière...

	Blanche	Bleue	Rouge	Vert	Magenta	Cyan	Jaune
Noir	-	-	-	-	-	-	-
Blanc	-	-	-	-	-	-	-
Bleu	-	-	-	-	-	-	-
Rouge	-	-	-	-	-	-	-
Vert	-	-	-	-	-	-	-
Magenta	-	-	-	-	-	-	-
Cyan	-	-	-	-	-	-	-
Jaune	-	-	-	-	-	-	-

Secret ([cliquez pour afficher](#))

Objet éclairé en lumière...

	Blanche	Bleue	Rouge	Vert	Magenta	Cyan	Jaune
Noir	Noir	Noir	Noir	Noir	Noir	Noir	Noir
Blanc	Bleu	Rouge	Vert	Magenta	Cyan	Jaune	
Bleu	Bleu	Noir	Noir	Bleu		Bleu	Noir
Rouge	Noir	Rouge	Noir	Rouge		Noir	Rouge
Vert	Noir	Noir	Vert	Noir		Vert	Vert
Magenta	Bleu	Rouge	Noir	Magenta	Bleu		Rouge
Cyan	Bleu	Noir	Vert	Bleu	Cyan		Vert
Jaune	Noir	Rouge	Vert	Rouge	Vert		Jaune

Ce chapitre était plus reposant que le précédent, n'est-ce pas ? J'espère que vous en avez bien profité car nous allons maintenant faire une entrée fracassante dans le XXème siècle...

Les photons

La Physique a tellement progressé au cours du XIXème siècle, et tant de mystères y ont été élucidés, que **Lord Kelvin** annonce, en 1900, qu'il n'y a plus que "deux petits nuages dans le ciel serein de la Physique théorique".

L'un de ces deux nuages concerne le **rayonnement du corps noir**.

A - Le rayonnement du corps noir

Un **corps noir** est un objet idéal qui ne diffuse aucune onde électromagnétique venue de l'extérieur. Il n'est toutefois pas obligatoirement noir, s'il assez chaud, car il peut produire des radiations d'origine thermique (comme je vous l'ai expliqué au chapitre précédent). Par exemple, beaucoup d'étoiles peuvent, en première approximation, être considérées comme des **corps noirs**.

En pratique, les expériences sont menées en utilisant l'intérieur d'un four comme **corps noir**. Un four entièrement opaque et fermé. Une toute petite ouverture laisse passer le rayonnement sortant, ce qui permet de l'étudier.

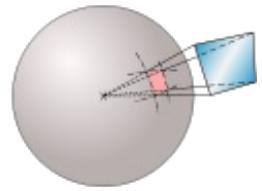
Au début, quand le four est moyennement chaud, ce rayonnement sortant ne comporte que des infrarouges. Puis, quand la température augmente, on commence à obtenir de la lumière rouge, puis orange, puis ... enfin, vous connaissez le principe. 😊

Chacune des radiations émises, dans toutes les directions, par un corps noir a une certaine longueur d'onde et une certaine intensité énergétique. On s'intéresse à la **luminance énergétique** émise dans chaque direction.



La lumi-quoi ?

La **luminance énergétique** est une grandeur physique de symbole L dont l'unité est le **watt par mètre cube et par stéradian** ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$). C'est le flux d'énergie rayonné dans une certaine direction, dans un certain **angle solide** de valeur **1 sr**.



En 2D, on peut diviser un cercle en **angles**. Le **radian** est une unité d'angle. $2\pi \text{ rad}$ (ou 360°) correspondent à un tour complet. En 3D, on peut diviser une sphère en **angles solides**. Le **stéradian** est une unité d'angle solide. $4\pi \text{ sr}$ correspondent à la sphère complète.

Chacune des radiations émises par le corps noir a sa propre **luminance énergétique** L_λ , qui dépend de sa longueur d'onde.

En combinant les équations de l'optique ondulatoire, de l'électromagnétisme et de la thermodynamique, on aboutit à la **loi de Rayleigh-Jeans** :

$$L_\lambda = \frac{2k c T}{\lambda^4}$$

- c est la vitesse de la lumière : $3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- T est la température du four (en kelvins)
- k est la constante de Boltzmann : $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ (joules par kelvin)

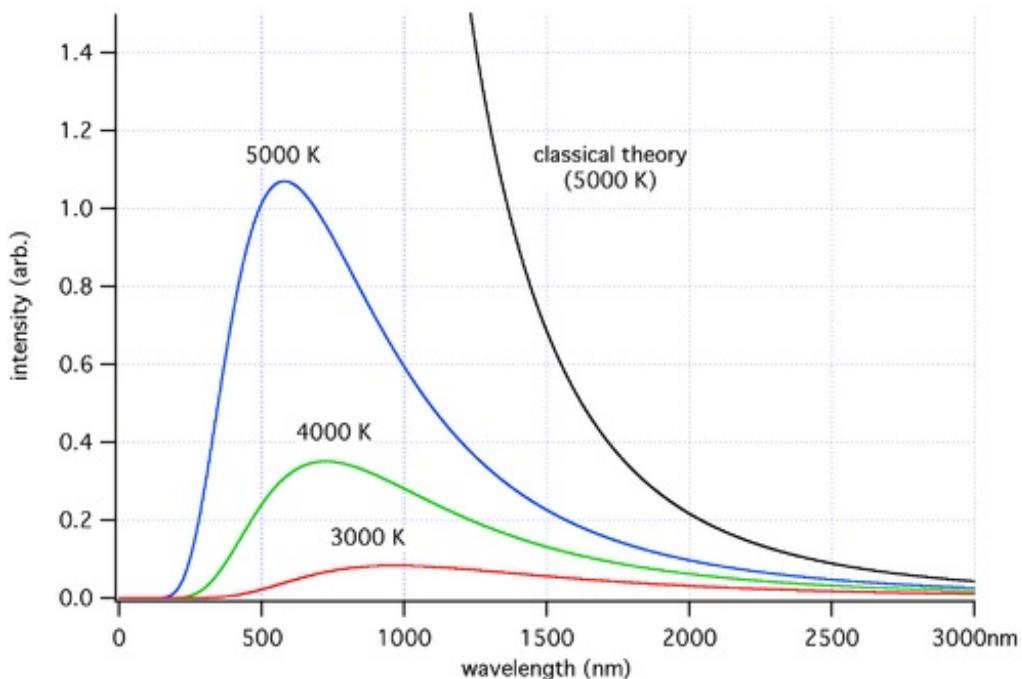


Si vous avez quelques connaissances en Chimie, sachez que $k = \frac{R}{N_{Av}}$, où R est la constante des gaz parfaits et N_{Av} le nombre d'Avogadro.

L'ennui, avec cette formule, c'est que plus λ est petit, plus L_λ augmente. Sans aucune limite, apparemment. Des ultraviolets auraient donc une luminance énergétique énorme ! 😱

C'est absurde. Et voilà pourquoi **Lord Kelvin** parle d'un nuage dans le ciel de la Physique théorique. Il l'appelait la "*catastrophe ultraviolette*". Comment un corps noir pourrait-il rayonner une énergie pareille, bien plus grande que celle qu'on lui a fournie en chauffant.

L'expérience, d'ailleurs, donne un résultat tout différent :

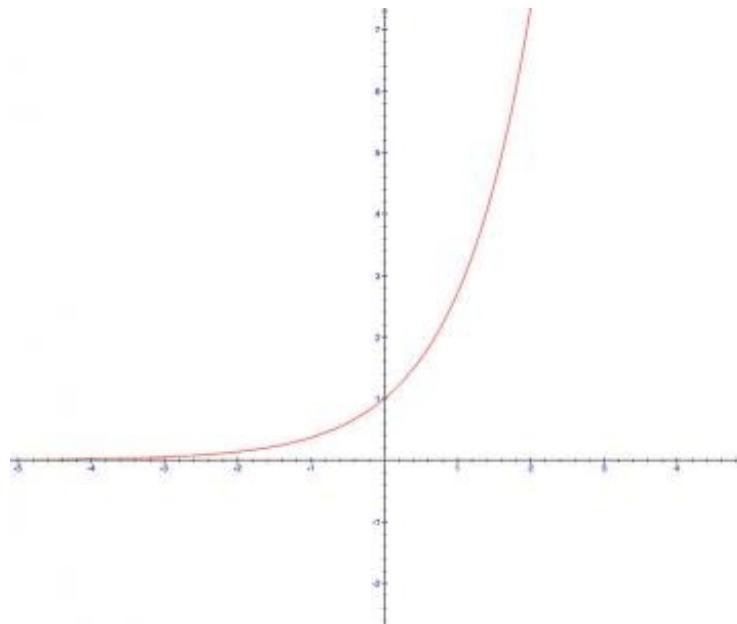


Ce graphique montre, pour quelques valeurs de température, l'intensité de chacune des ondes électromagnétiques émises en fonction de leur longueur d'onde. À 5000 K, l'intensité est maximale vers 600 nm, donc la lumière qui sort du corps noir est jaune-orangée. Mais cette lumière a une intensité finie, et non pas infinie (ou presque) comme le voudrait la théorie. Voilà le mystère qu'il faut résoudre.

Laissant de côté la théorie, **Max Planck** part des résultats expérimentaux et formule une loi pour les décrire :

$$L_\lambda = \frac{2hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

Si vous ne connaissez pas la fonction mathématique exponentielle (e^x), voici sa courbe :



Bon, vous connaissez déjà λ , c, T, et même k, la constante de Boltzmann. Le seul symbole nouveau pour vous dans cette formule, c'est **h**.

h est une constante introduite par **Max Planck** pour l'aider dans ses calculs. Il l'a appelée **h** comme *hilfe* : aide, en Allemand. Très vite, tout le monde s'est mis à l'appeler **constante de Planck**.

h = 6,626 J · s (joule seconde) (*et pas "joule par seconde"*).

Maintenant que **Max Planck** a traduit les résultats expérimentaux en termes mathématiques, il doit encore expliquer cette nouvelle loi. Et ça s'annonce compliqué car elle ne correspond pas à ce qu'il pensait jusque là !

La thermodynamique nous dit que l'énergie rayonnée dépend du nombre de **modes propres** que peuvent avoir les ondes électromagnétiques à l'intérieur du corps noir. Les résultats expérimentaux montrent que ce nombre de **modes propres** possibles est beaucoup plus petit que ne le prévoit la théorie ondulatoire.



Pour une onde, un mode est une manière de vibrer. Un **mode propre**, est une manière que l'onde peut adopter spontanément, sans qu'on la force.

Max Planck comprend qu'il y a beaucoup moins de modes propres que prévu parce que l'énergie d'une onde électromagnétique ne peut pas varier de manière continue, comme on le croyait. Elle ne peut augmenter ou diminuer que par paquets.

Toute variation d'énergie est obligatoirement un multiple entier de $h\nu$ (h est la constante de Planck et ν la fréquence de l'onde).

Planck donne à ce $h\nu$, ce paquet d'énergie minimum, le nom de **quantum** d'énergie.



Orthographe : un **quantum**, des **quanta**.

Tout n'est pas réglé pour autant, loin de là. On a constaté expérimentalement qu'il existait une contrainte sur les valeurs énergie. Mais d'où sort-elle, cette contrainte ? La théorie ondulatoire n'en prévoit aucune.

Ah, c'est sûr, avec la bonne vieille **théorie corpusculaire**, il serait facile de répondre à cette question. Le **quantum** serait tout simplement l'énergie d'un corpuscule, l'énergie totale ne pouvant augmenter ou diminuer que d'un nombre entier de corpuscules à la fois.

Seulement, vous l'avez compris : en ce début de XXème siècle, cela fait bien longtemps que plus personne ne croit aux corpuscules de lumière.

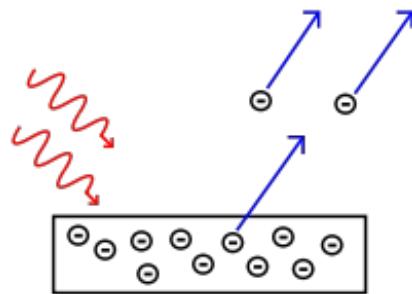
Plus personne, sauf ... **Albert Einstein**.

B - L'effet photoélectrique



Voici un **panneau photovoltaïque**, comme on en voit aujourd'hui de plus en plus sur nos toits. Il sert à convertir l'énergie lumineuse du Soleil en énergie électrique.

L'**effet photoélectrique** a été découvert à la fin du XIXème siècle : dans certaines conditions, des électrons peuvent jaillir d'un métal lorsque celui-ci reçoit de la lumière.



Il faut pour cela que l'énergie de la lumière reçue dépasse une certaine limite E_L (énergie de liaison), dont la valeur varie d'un métal à l'autre, et correspond à l'attraction exercée par les noyaux des atomes sur les électrons susceptibles d'être arrachés.

Si cette condition est satisfaite, les électrons (de masse m) quittent le métal avec une **énergie cinétique** E_C telle que :

$$E_C = E_{lumière} - E_L$$



L'**énergie cinétique** est l'énergie d'un corps en mouvement. Elle est liée à la masse et à la vitesse de ce corps par la formule $E_C = \frac{1}{2}mv^2$.

On ne mesure pas E_C directement : on mesure l'intensité du courant électrique ainsi produit et la tension électrique entre le métal et une référence, et on en déduit E_C .

On pourrait penser que le meilleur moyen d'apporter une énergie suffisante consiste à envoyer une lumière très intense. On pourrait penser que c'est l'amplitude des ondes électromagnétiques qui détermine leur énergie.

Voyons ce qu'il en est en réalité en choisissant comme métal du **potassium**, par exemple. Dans ce cas, on s'apperçoit qu'une lumière rouge, orange ou jaune, même très intense, échoue lamentablement à produire le moindre courant. Par contre, une lumière verte, bleue ou violette n'a pas besoin d'être très intense pour déclencher l'effet photoélectrique.

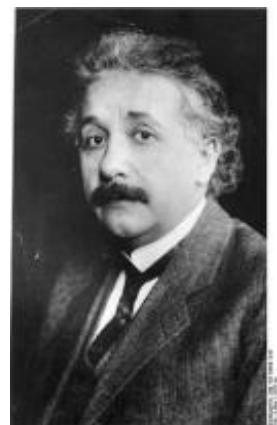
Ce n'est donc pas l'amplitude d'une onde électromagnétique qui détermine sa capacité à arracher des électrons, mais sa fréquence.

En 1905, **Albert Einstein** compare la fréquence de la lumière utilisée à la vitesse des électrons éjectés. Il ne fait pas l'expérience lui-même mais consulte les mesures publiées par d'autres.

Il remarque que la quantité $E_C + E_L$ est toujours proportionnelle à la fréquence ν de la lumière. Et que le coefficient de proportionnalité n'est autre que h , la **constante de Planck** !

$$\frac{E_C + E_L}{\nu} = h$$

Les résultats expérimentaux de l'effet photoélectrique concordent avec ceux du rayonnement du corps noir, et Einstein ose lâcher le mot tabou : les **quanta** d'énergie ($h\nu$) sont transportés par des **corpuscules**, qu'il appelle **quanta de lumière**.

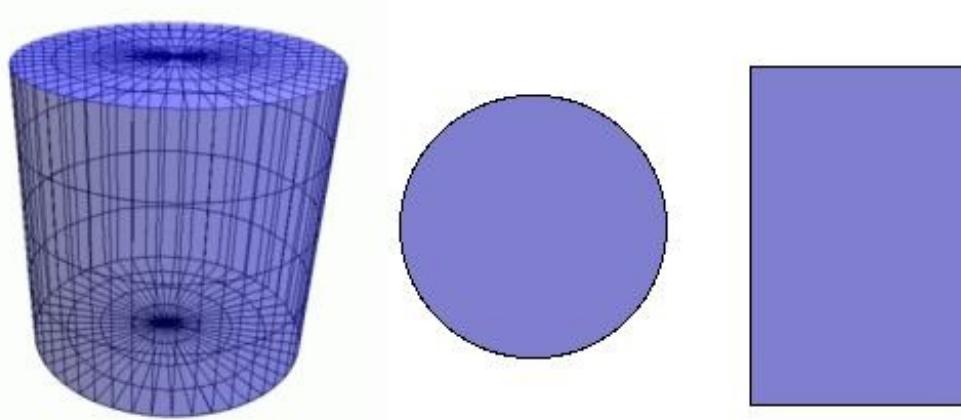


? Mais il mélange tout, là, Einstein ! Comment des corpuscules peuvent-ils avoir une fréquence ?

C'est bien ça : Einstein mélange la **théorie ondulatoire** et la **théorie corpusculaire**. Il comprend que la lumière n'est *ni* une onde *ni* un corpuscule.

? Mais alors, qu'est-ce que c'est ?

Pensez à un cylindre.



Vu de dessus, un cylindre ressemble à un cercle et présente toutes les propriétés d'un cercle. Vu de face, par contre, il ressemble à un rectangle et présente toutes les propriétés d'un rectangle. Pourtant, un cylindre n'est ni un cercle ni un rectangle : c'est autre chose, de plus complexe.

Pour la lumière, c'est pareil. Etudiée d'une certaine manière, à travers des expériences comme la diffraction ou les interférences, elle ressemble à une onde et présente toutes les propriétés d'une onde. Par contre, étudiée d'une autre manière, à travers des expériences comme le rayonnement du corps noir ou l'effet photoélectrique, elle ressemble à un flux de corpuscules et en présente toutes les propriétés. Pourtant, la lumière n'est ni une onde, ni un ensemble de corpuscules : c'est autre chose, de plus complexe.

L'optique ondulatoire reste donc valable. Mais il faut désormais tenir compte de la double nature de la lumière : la **dualité onde-corpuscule**.

Revenons à l'interprétation de l'**effet photoélectrique**. Ce qui se passe est finalement très simple. Les atomes du métal sont bombardés par des corpuscules : des **quanta de lumière**. Chacun a une énergie E égale à $h\nu$, où ν est la fréquence de l'onde associée. Si $E > E_L$, le quantum est absorbé par l'atome. Une partie de son énergie, E_L , sert à libérer un électron. Le reste, E_C , est légué à l'électron et lui fournit donc une certaine vitesse.

Inutile de vous dire qu'une théorie aussi farfelue n'a pas été acceptée immédiatement. Max Planck lui-même, en 1913, écrit en parlant d'Einstein :

Citation : Max Planck

Il ne faut pas trop lui tenir rigueur de ce que, dans ses spéculations, il ait occasionnellement pu dépasser sa cible, comme par exemple avec son hypothèse des quanta de lumière.



Robert Millikan, par exemple, rejette violemment l'idée de **dualité onde-particule** et continue à mener des expériences sur l'effet photoélectrique jusqu'en 1916. Mais chacune de ses expériences vérifie davantage encore la validité de la théorie d'Einstein.

C'est donc pour son interprétation de l'effet photoélectrique, et pas pour sa fameuse **théorie de la relativité**, qu'Albert Einstein reçoit finalement le **Prix Nobel de Physique** en 1921. Deux ans plus tard, **Robert Millikan** le reçoit à son tour, pour avoir (involontairement) apporté la confirmation expérimentale à cette théorie, et aussi pour avoir mesuré la charge électrique de l'électron : $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

C - L'effet Compton

Cette même année 1923, **Arthur Compton** fait taire les derniers sceptiques, en découvrant que le quantum de lumière respecte non seulement le principe de **conservation de l'énergie**, mais aussi le principe de **conservation de la quantité de mouvement**, l'une des plus vieilles lois de la mécanique classique, et l'une des rares à n'avoir jamais été remise en cause.

La **quantité de mouvement** d'un solide, parfois appelée **impulsion**, est une grandeur physique vectorielle, de symbole \vec{p} , dont l'unité est le **newton seconde** ($N \cdot s$). Elle est définie par $\vec{p} = \mathbf{m} \cdot \vec{v}$.

- \mathbf{m} : masse du solide
- \vec{v} : vecteur vitesse du solide : sa direction et son sens sont ceux du mouvement, et sa norme est égale à v .

Tous les solides respectent le principe de **conservation de la quantité de mouvement** : si deux d'entre eux entrent en collision, et si aucune force extérieure n'intervient :

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$$

Par exemple, au début d'une partie de billard, la somme vectorielle des quantités de mouvement de chacune des boules dispersées est égale à la quantité de mouvement qu'avait la boule blanche (celle qu'on lance) avant le choc.



Si le quantum de lumière existe bien en tant que particule, alors il doit, lui-aussi, avoir une **impulsion**. Dans son cas, l'impulsion est définie par :

$$\vec{p} = \frac{\hbar \vec{k}}{2\pi}$$

\vec{k} est le **vecteur d'onde** de l'onde associée au quantum d'énergie. Sa direction et son sens sont ceux de la propagation de l'onde, et sa norme est égale à $\frac{2\pi}{\lambda}$. La norme de \vec{p} se résume donc à $\frac{\hbar}{\lambda}$.

Je ne peux pas vous démontrer cette formule ici. Il va falloir que vous l'admettiez. Tout comme vous allez devoir admettre deux formules issues de la théorie de la relativité d'Einstein, qui concernent l'énergie d'une particule : $E = mc^2$ pour une particule au repos et $E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$ pour une particule en mouvement.

Expérience

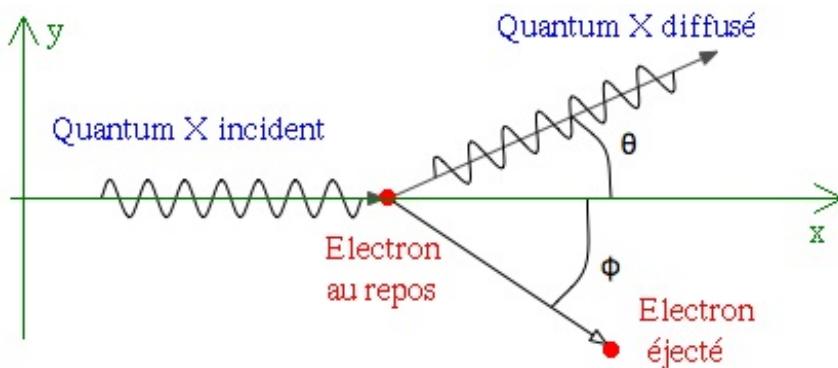
Voyons maintenant l'expérience de **Compton**. Il utilise des **rayons X**, qu'il envoie sur un bloc de verre pyrex. Il constate que le pyrex dévie une partie de son faisceau de rayons X d'un angle θ , même lorsqu'il prend soin d'éviter la réfraction en l'envoyant perpendiculairement au dioptre air/pyrex. De plus, les rayons X diffusés par le pyrex n'ont plus la même longueur d'onde que celle des rayons X incidents.

La nouvelle longueur d'onde, λ' est plus importante que l'ancienne, ce qui veut dire que les rayons ont perdu de l'énergie. En comparant ces différentes mesures, Compton constate que :

$$\lambda' = \lambda + \frac{\hbar}{mc} \cdot (1 - \cos \theta)$$

Où m est la masse d'un électron.

Voilà ce qui s'est passé à l'intérieur du bloc de pyrex :



Certains quanta de rayons X sont entrés en collision avec des électrons du Pyrex et les ont éjectés.

Interprétation

Soit \vec{p}_1 l'impulsion du quantum X incident. \vec{p}_2 , l'impulsion de l'électron au repos, est nulle, puisque cet électron était au repos avant le choc. \vec{p}'_1 est l'impulsion du quantum de rayons X diffusé et \vec{p}'_2 celle de l'électron éjecté.

Les coordonnées de ces 4 vecteurs \vec{p} selon les axes x et y sont :

$$\begin{array}{ll} \vec{p}_1 (p_1, 0) & \vec{p}'_1 (p'_1 \cos \theta, p'_1 \sin \theta) \\ \vec{p}_2 (0, 0) & \vec{p}'_2 (p'_2 \cos \phi, -p'_2 \sin \phi) \end{array}$$

Or $p_1 = \frac{h}{\lambda}$ et $p'_1 = \frac{h}{\lambda'}$. Par contre, on ne connaît pas p'_2 .

Donc :

$$\vec{p}_1 \left(\frac{h}{\lambda}, 0 \right) \quad \vec{p}'_1 \left(\frac{h}{\lambda'} \cos \theta, \frac{h}{\lambda'} \sin \theta \right)$$

$$\vec{p}_2 \left(0, 0 \right) \quad \vec{p}'_2 \left(p'_2 \cos \phi, -p'_2 \sin \phi \right)$$

En ce qui concerne les énergies, on a vu plus haut que celle du quantum était donnée par la formule $E = h\nu$. Or, $\lambda = c \cdot T$ et $\nu = \frac{1}{T}$. Donc $E = h\nu = \text{frac}\{h\}\{\text{T}\} = \text{frac}\{hc\}\{\lambda\}$.

On a donc $E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ avant l'impact et $E'_1 = h\nu' = \frac{hc}{\lambda'}$ après.

L'énergie E_2 de l'électron au repos est donnée par la célèbre formule d'Einstein : $E_2 = mc^2$, où m est la masse de l'électron. Une fois l'électron en mouvement, la mécanique relativiste nous dit que $E'_2 = \sqrt{m^2c^4 + p'_2{}^2c^2}$.

Donc :

$$E_1 = \frac{hc}{\lambda} \quad E'_1 = \frac{hc}{\lambda'}$$

$$E_2 = mc^2 \quad E'_2 = \sqrt{m^2c^4 + p'_2{}^2c^2}$$

La prochaine étape consiste à appliquer les lois de conservation de l'impulsion et de l'énergie, et à vérifier si la nouvelle longueur d'onde λ' prévue par ces lois a bien la valeur trouvée expérimentalement par Compton, c'est à dire, je vous le rappelle :

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos \theta)$$

Les lois de conservation donnent :

$$(Equation 1) : p_{1x} + p_{2x} = p'_{1x} + p'_{2x}$$

$$(Equation 2) : p_{1y} + p_{2y} = p'_{1y} + p'_{2y}$$

$$(Equation 3) : E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2$$

C'est-à-dire :

$$(Equation 1) : \frac{h}{\lambda} + 0 = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + p'_2 \cos \phi$$

$$(Equation 2) : 0 + 0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - p'_2 \sin \phi$$

$$(Equation 3) : \frac{hc}{\lambda} + mc^2 = \frac{hc}{\lambda'} + \sqrt{m^2c^4 + p'_2{}^2c^2}$$

On se retrouve donc avec un système de 3 équations à 3 inconnues : λ' , p'_2 et ϕ . Mais une seule de ces 3 inconnues nous intéresse réellement : λ' . Nous allons donc essayer de faire disparaître les deux autres dans les calculs.

$$(Equation 1) : \frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \theta = p'_2 \cos \phi$$

$$(Equation 2) : \frac{h}{\lambda'} \sin \theta = p'_2 \sin \phi$$

$$(Equation 3) : \frac{hc}{\lambda} + mc^2 - \frac{hc}{\lambda'} = \sqrt{m^2 c^4 + p_2'^2 c^2}$$

Maintenant, j'élève toutes ces équations au carré :

$$(Equation 1) : \left(\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \theta \right)^2 = p_2'^2 \cos^2 \phi$$

$$(Equation 2) : \left(\frac{h}{\lambda'} \sin \theta \right)^2 = p_2'^2 \sin^2 \phi$$

$$(Equation 3) : \left(\frac{hc}{\lambda} + mc^2 - \frac{hc}{\lambda'} \right)^2 = m^2 c^4 + p_2'^2 c^2$$

Il existe une formule mathématique appelée **identité trigonométrique**. Cette formule nous dit que pour tout angle α , $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$. Par conséquent, on peut faire disparaître l'inconnue ϕ en additionnant les équations 1 et 2 :

$$(Equation 1 + Equation 2) : \left(\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \theta \right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'} \sin \theta \right)^2 = p_2'^2 \cdot 1$$

$$(Equation 3) : c^2 \cdot \left(\frac{h}{\lambda} + mc - \frac{h}{\lambda'} \right)^2 - m^2 c^4 = p_2'^2 c^2$$

Bien. 😊 Nous n'avons déjà plus que 2 équations à 2 inconnues. Prochain objectif : faire disparaître p_2' . Je vais commencer par développer l'équation (1+2) et par diviser chacun des deux membres de l'équation 3 par c^2 :

$$(Equation 1 + Equation 2) : \frac{h^2}{\lambda^2} - \frac{2h^2}{\lambda \lambda'} \cos \theta + \frac{h^2}{\lambda'^2} \cos^2 \theta + \frac{h^2}{\lambda'^2} \sin^2 \theta = p_2'^2$$

$$(Equation 3) : \left(\frac{h}{\lambda} + mc - \frac{h}{\lambda'} \right)^2 - m^2 c^2 = p_2'^2$$

En haut, on reconnaît l'**identité trigonométrique**, qui va nous permettre de simplifier un peu le calcul. Mais surtout, les membres de gauche des deux équations sont tous les deux égaux à $p_2'^2$. Donc ils sont égaux entre eux :

$$\frac{h^2}{\lambda^2} - \frac{2h^2}{\lambda \lambda'} \cos \theta + \frac{h^2}{\lambda'^2} = \left(\frac{h}{\lambda} + mc - \frac{h}{\lambda'} \right)^2 - m^2 c^2$$

Génial ! Partis d'un système de 3 équations à 3 inconnues, nous n'avons plus maintenant qu'une équation simple.



Simple ??? 🤔

D'accord, pas si simple que ça. Mais il n'y a plus qu'une seule inconnue : λ' . Je commence par deux réductions au même dénominateur : l'une à gauche et l'autre dans la parenthèse de droite.

$$\frac{h^2 \lambda'^2 + h^2 \lambda^2}{\lambda^2 \lambda'^2} - \frac{2h^2}{\lambda \lambda'} \cos \theta = \left(\frac{h \lambda' - h \lambda}{\lambda \lambda'} + mc \right)^2 - m^2 c^2$$

Je développe la parenthèse de droite :

$$\frac{h^2 \lambda'^2 + h^2 \lambda^2}{\lambda^2 \lambda'^2} - \frac{2h^2}{\lambda \lambda'} \cos \theta = \frac{(h \lambda' - h \lambda)^2}{\lambda^2 \lambda'^2} + \frac{2mch(\lambda' - \lambda)}{\lambda \lambda'} + m^2 c^2 - m^2 c^2$$

$$\frac{h^2 \lambda'^2 + h^2 \lambda^2}{\lambda^2 \lambda'^2} - \frac{2h^2}{\lambda \lambda'} \cos \theta = \frac{(h \lambda' - h \lambda)^2}{\lambda^2 \lambda'^2} + \frac{2mch(\lambda' - \lambda)}{\lambda \lambda'}$$

Je regroupe à gauche tout ce qui est sur $\lambda^2 \lambda'^2$, et à droite tout ce qui est sur $\lambda \lambda'$:

$$\frac{h^2\lambda'^2 + h^2\lambda^2}{\lambda^2\lambda'^2} - \frac{(h\lambda' - h\lambda)^2}{\lambda^2\lambda'^2} = \frac{2h^2}{\lambda\lambda'} \cos \theta + \frac{2mch(\lambda' - \lambda)}{\lambda\lambda'}$$

Puis je développe la parenthèse de gauche :

$$\begin{aligned}\frac{h^2\lambda'^2 + h^2\lambda^2 - (h^2\lambda'^2 - 2h^2\lambda\lambda' + h^2\lambda^2)}{\lambda^2\lambda'^2} &= \frac{2h^2 \cos \theta + 2mch(\lambda' - \lambda)}{\lambda\lambda'} \\ \frac{h^2\lambda'^2 + h^2\lambda^2 - h^2\lambda'^2 + 2h^2\lambda\lambda' - h^2\lambda^2}{\lambda^2\lambda'^2} &= \frac{2h^2 \cos \theta + 2mch(\lambda' - \lambda)}{\lambda\lambda'} \\ \frac{2h^2\lambda\lambda'}{\lambda^2\lambda'^2} &= \frac{2h^2 \cos \theta + 2mch(\lambda' - \lambda)}{\lambda\lambda'} \\ \frac{2h^2}{\lambda\lambda'} &= \frac{2h^2 \cos \theta + 2mch(\lambda' - \lambda)}{\lambda\lambda'}\end{aligned}$$

Je multiplie les deux membres de l'équation par $\lambda\lambda'$ et je divise tout par 2 :

$$\begin{aligned}h^2 &= h^2 \cos \theta + mch(\lambda' - \lambda) \\ h^2 \cdot (1 - \cos \theta) &= mch(\lambda' - \lambda) \\ h \cdot (1 - \cos \theta) &= mc (\lambda' - \lambda) \\ \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos \theta) &= \lambda' - \lambda \\ \lambda' &= \lambda + \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos \theta)\end{aligned}$$

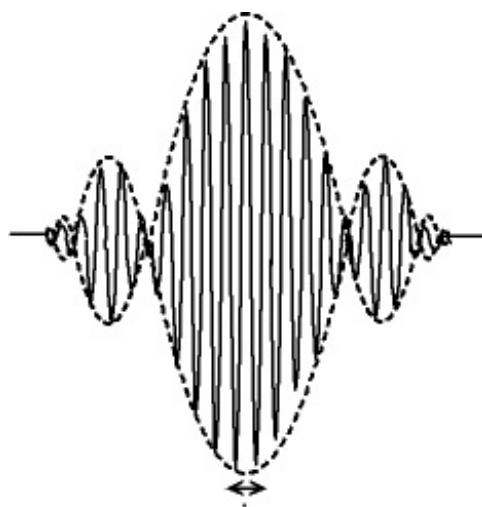
GAGNÉ! 😊😊🏆

La longueur d'onde λ' annoncée par les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement est bien la même que celle qu'on mesure expérimentalement.

Comme toutes les particules, le quantum de lumière a donc une impulsion $\vec{p} = \frac{h\vec{k}}{2\pi}$ et une énergie $E = h\nu$. Et ces deux grandeurs respectent bien les lois de conservation habituelles. Ce sont donc bien des particules, et Newton avait raison depuis le début !

Einstein et Compton ont réconcilié les théories ondulatoire et corpusculaire : les deux sont complémentaires et il faut parfois les utiliser ensemble.

Dès lors, le principe de la dualité onde-corpuscule est tellement bien accepté que **Louis de Broglie** (prononcez "de Breuil") pose en 1924 l'hypothèse que toutes les particules microscopiques (les électrons, par exemple) peuvent, elles aussi, être vues comme des paquets d'ondes. C'est la naissance de la **Physique quantique**.



Paquet d'onde associé à une particule

Ultime consécration, le corpuscule de lumière, ou "quantum de lumière", reçoit en 1926 un nom définitif beaucoup plus court : le chimiste américain **Gilbert Lewis** le rebaptise **photon**.

La masse d'un **photon** est nulle. Sa charge électrique aussi. Mais sa vitesse est celle de lumière. Son espérance de vie est infinie, sauf mauvaise rencontre. Il a une énergie proportionnelle à la fréquence de son onde associée et une impulsion proportionnelle au vecteur d'onde de cette dernière.

L'étude des photons a bien sûr continué tout au long du XXème siècle. Et elle n'est pas finie...

Terminons par un grand merci à tous les scientifiques qui apparaissent dans ce tutoriel. Tous ont contribué à l'élucidation des mystères de la lumière. Combien saurez-vous en reconnaître ?



Secret (cliquez pour afficher)

- 1 - Albert Einstein
- 2 - Arthur Compton
- 3 - Edward Morley

- 4 - Robert Millikan
- 5 - James Clerk Maxwell
- 6 - Augustin Fresnel
- 7 - James Jeans
- 8 - John Rayleigh
- 9 - Euclide
- 10 - Akhénaton
- 11 - Léon Foucault
- 12 - Max Planck
- 13 - Ole Christensen Rømer
- 14 - Hippolyte Fizeau
- 15 - Isaac Newton
- 16 - Christian Huygens
- 17 - Aristote
- 18 - Willebrord Snell
- 19 - René Descartes
- 20 - Heinrich Hertz
- 21 - Alfred Cornu
- 22 - Alhazen
- 23 - Thomas Young
- 24 - James Bradley
- 25 - Francesco Grimaldi
- 26 - Robert Grossetête
- 27 - Albert Michelson
- 28 - Wilhelm Röntgen
- 29 - Simon Newcomb