

LA LUMIERE

I- QU'EST-CE QUE LA LUMIERE ?

Comme une vague sur l'eau ou le son dans l'air, la lumière est une onde.

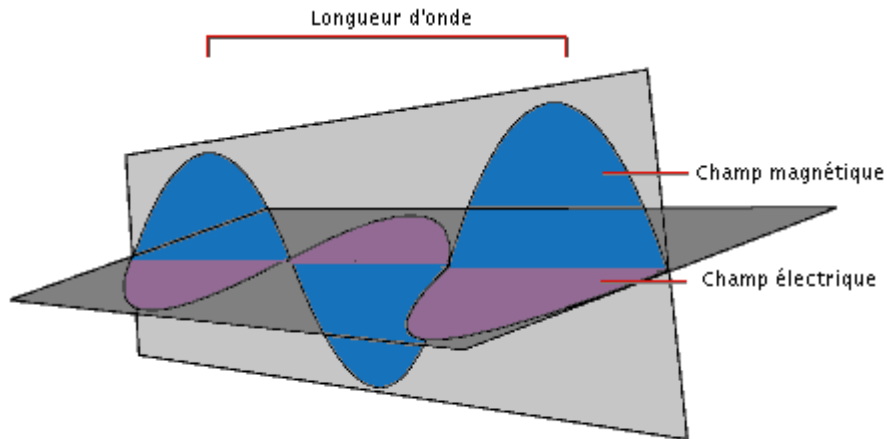
Animation : [l'onde progressive sinusoïdale](#)

Contrairement au son, **la lumière peut se propager dans le vide**, à une **vitesse** environ **un million de fois plus grande que celle du son dans l'air**. C'est une **onde électromagnétique**.

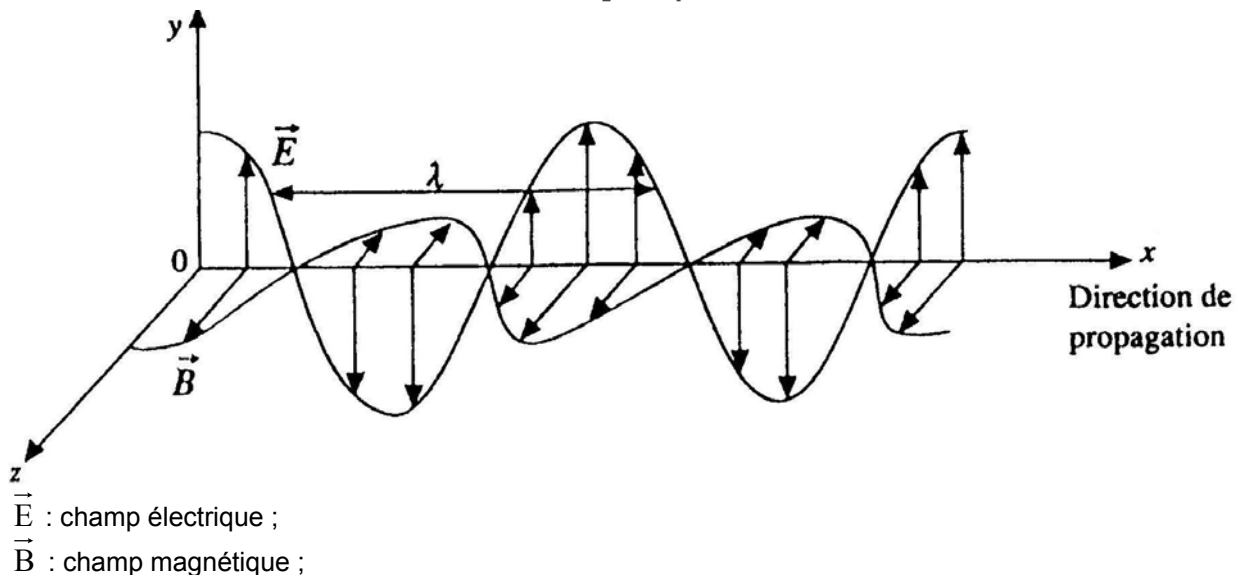
$c_{\text{son}} \approx 340 \text{ m/s}$ dans l'air

$c_{\text{lumière}} \approx 300\,000 \text{ km/s}$ dans le vide soit $300\,000\,000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

La **distance entre deux vagues successives** est la **longueur d'onde**, notée λ (lamda grec). Elle s'exprime en mètres (m).



Ondes électromagnétiques



Ces deux vecteurs sont perpendiculaires entre eux, ainsi qu'à la direction de propagation.

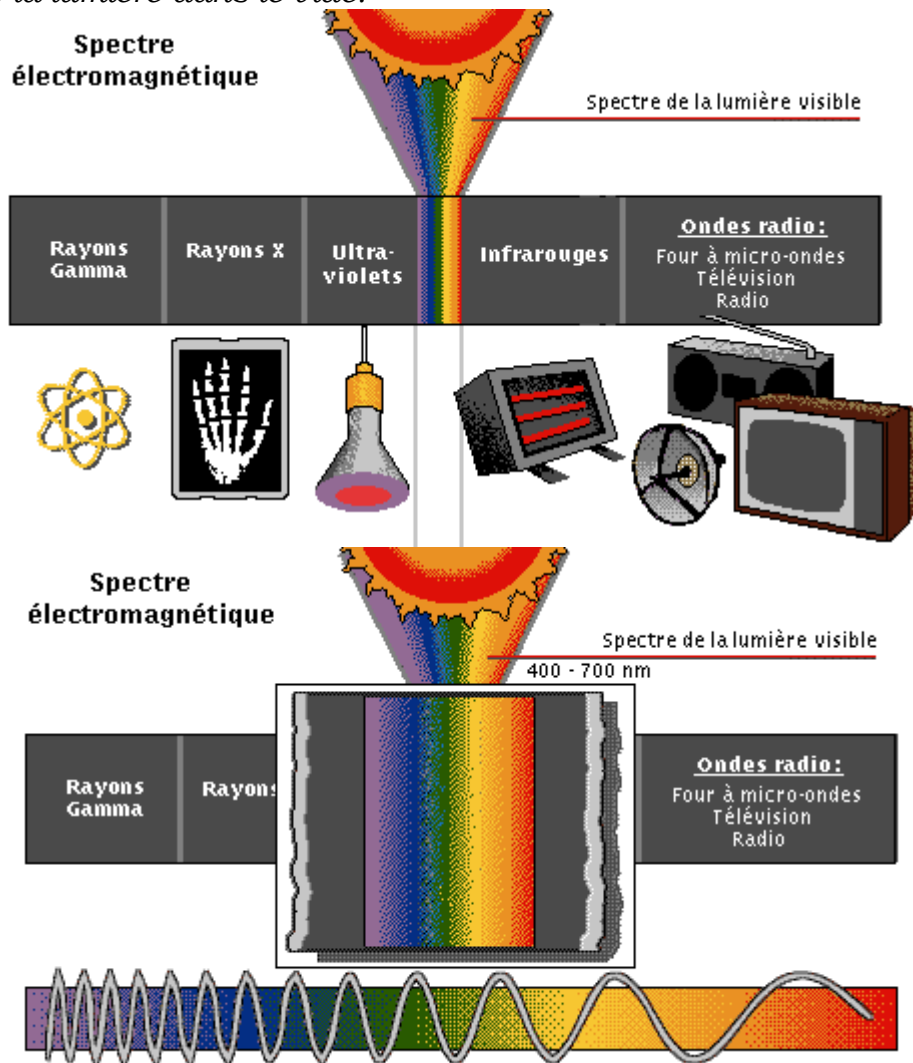
Le nombre de vagues passant en un point donné en une seconde s'appelle la **fréquence** de l'onde. Elle est notée f ou ν (nu) et s'exprime en hertz (Hz).

On appelle **période** de l'onde, le temps T en secondes mis par une vague pour avancer d'une longueur d'onde. Elle est égale à l'inverse de la fréquence de l'onde. $T = \frac{1}{f}$ donc

$$f = \frac{1}{T} \text{ de plus } c = \frac{\text{distance parcourue par une vague}}{\text{durée de ce déplacement}} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

Film : [les ondes électromagnétiques](#)

Les **rayons γ** (gamma), les **rayons X** les **ultra-violets**, les **infrarouges**, les **ondes radios** sont également des ondes électromagnétiques, invisibles à l'œil, qui se déplacent à la vitesse de la lumière dans le vide.



La **lumière visible** ne représente qu'une **infime partie du spectre des ondes électromagnétiques** dont la longueur d'onde dans le vide est comprise entre 400 nm (400 milliardièmes de mètres soit **0,4 micromètres**) pour le **violet** et $800 \text{ nm} = 800 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m} = \mathbf{0,8 \mu\text{m}}$ pour le **rouge**. A chaque longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,8 μm correspond une couleur différente.

	Ondes hertziennes LF	Micro ondes UHF	Ondes lumineuses IR visible UV	Rayons X	Rayons γ
Fréquence (Hz)	10^5	10^9	10^{11}	10^{14}	10^{20}
Longueur d'onde	1 km	10 cm	1 mm	0,5 μm	10 nm
Modes de production	émissions cosmiques				
	Circuits électriques en régime variable		Transitions électroniques		
	Emission thermique			Transitions nucléaires	
Applications	communications				
	détection		imagerie		
	chauffage / éclairage			thérapie	

La lumière visible a une couleur qui dépend de sa fréquence et de sa longueur d'onde :

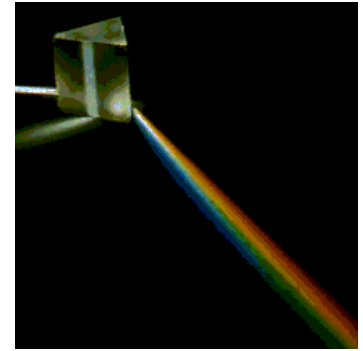
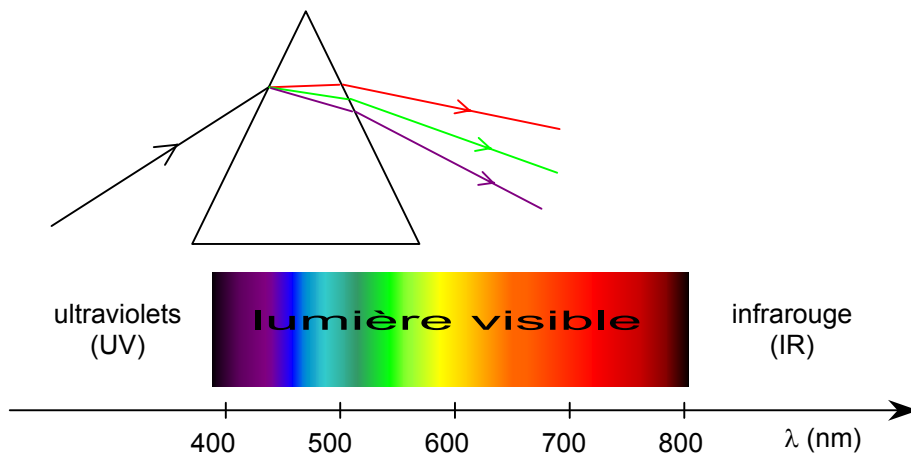
Fréquence ($\times 10^{14}$ Hz)	3	4	5	6	7	8	
Longueur d'onde (nm)	1000	750	600	500	428	375	
	Infrarouge	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet
							Ultraviolet

La transition d'une couleur à la suivante est graduelle. De part et d'autre du spectre de la lumière visible, il existe de la lumière invisible à l'œil : ce sont l'infrarouge et l'ultraviolet.

II- QU'EST-CE QUE LA LUMIERE BLANCHE ?

Film : L'expérience historique de Newton

La lumière blanche est décomposée par un prisme, on obtient un spectre ressemblant à :



En 1666, Newton explique correctement ce phénomène, déjà connu à son époque, en disant que ce n'est pas le prisme qui fabrique les couleurs mais qu'il ne fait que décomposer la lumière blanche. L'idée nouvelle est de dire que les couleurs existaient déjà dans la lumière blanche, avant que celle-ci ne traverse le prisme. Il a montré qu'en ne gardant qu'une seule couleur à l'aide d'une planche trouée et en la faisant traverser le prisme, celle-ci ne pouvait pas être décomposée et était pure. Il appela lumière monochromatique, toute lumière pure non décomposable par le prisme. Il a montré également qu'en mélangeant, à l'aide d'une lentille toutes les lumières monochromatiques du spectre de la lumière blanche, on refabriquait de la lumière blanche. Sa conclusion, encore valable aujourd'hui, fut de dire :

« La lumière blanche est un mélange complexe de rayons lumineux dotés de toutes sortes de couleurs ».

Une lumière monochromatique est une onde électromagnétique sinusoïdale de fréquence f . Elle est caractérisée par sa longueur d'onde $\lambda = c / f$ dans le vide. La lumière blanche polychromatique est la superposition de toutes les ondes électromagnétiques sinusoïdales monochromatiques dont la longueur d'onde λ dans le vide est comprise entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge).

III - LES RAYONS ULTRA-VIOLETS (UV) ET LES RAYONS INFRA-ROUGES (IR)

1) GENERALITES

Même si la lumière blanche, comme la lumière du soleil ou celle d'une lampe à incandescence, contient des radiations de longueur d'onde supérieure à 800 nm comme les infra-rouges ou inférieure à 400 nm, comme les ultra-violets, celles-ci sont invisibles par l'œil humain (comme les infrasons et les ultrasons sont inaudibles par l'oreille humaine). Certains animaux, comme les abeilles ont des yeux sensibles aux ultra-violet et cela leur donne des informations quant à la maturité des fleurs pour savoir si elles contiennent ou non du nectar à butiner. Les serpents (crotales) sont sensibles aux infra-rouges et peuvent repérer des proies (corps chauds, émetteurs d'IR) dans l'obscurité totale, mais ce sont leurs fossettes labiales et non leurs yeux qui y sont sensibles.

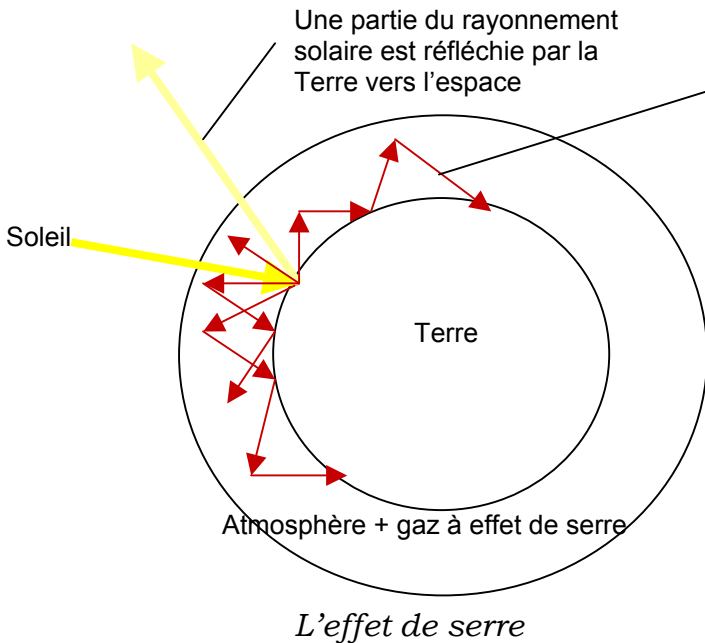
2) LES ULTRA-VIOLETS (UV), LES INFRA-ROUGE (IR) ET L'HOMME

Il existe des lunettes à IR, utilisées par les militaires, qui transforment les IR en visible, permettant de voir les corps chauds la nuit (soldats, véhicules à moteur thermique).

Les IR sont utilisés par nos télécommandes de téléviseur, lecteurs de DVD et autres appareils électroniques.

Les IR permettent de mesurer la température du corps (le thermomètre auditif mesure la température du corps grâce au rayonnement IR émis par le tympan).

Les IR sont largement impliqués dans le phénomène du réchauffement climatique, dû aux activités humaines (cf. le film de Al. Gore : *La Vérité qui dérange*) car les molécules des gaz à effet de serre (comme le dioxyde de carbone CO_2 produit par la combustion des carburants fossiles type pétrole, gaz naturel et charbon) absorbent les IR (qui excitent ces molécules à une fréquence correspondant exactement à leurs modes propres de vibration et de rotation des liaisons) et les renvoient sur la Terre.



Une autre partie du rayonnement solaire est absorbée par le sol et transformée en rayonnement infra-rouge (chaleur). Ces IR sont diffusés dans toutes les directions puis absorbés et réémis vers le sol par les gaz à effet de serre. Telle la vitre d'une serre, l'atmosphère piège l'énergie solaire, ce qui provoque une augmentation de la température à la surface de la Terre. Le réchauffement climatique est dû à une augmentation exponentielle (des mesures scientifiques objectives et irréfutables le prouvent) de la quantité de CO_2 produite par les voitures, camions, usines, maisons, centrales thermiques qui double tous les siècles depuis la révolution industrielle de la fin du XIX^{ème} siècle. Le seul remède qui existe pour endiguer ce phénomène extrêmement préoccupant pour l'humanité présente et future est d'arrêter l'augmentation de CO_2 (taxe carbone, énergies renouvelables, piégeage du CO_2) (cf. *La Vérité qui dérange* de Al Gore, *Mal de Terre* de Hubert Reeves, Pour un pacte écologique de Nicolas Hulot, etc.).

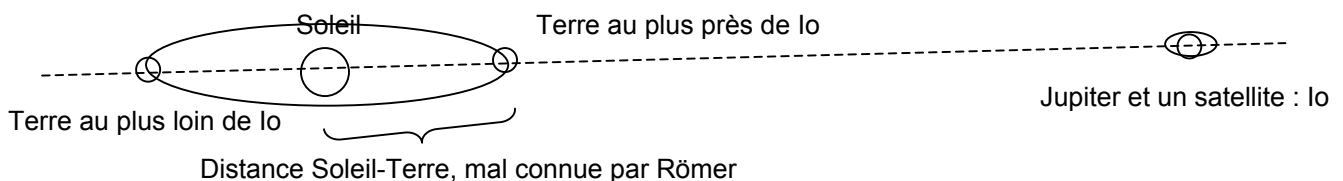
Les UV sont responsables des coups de soleil, ils sont dangereux pour la rétine et peuvent provoquer des cancers de la peau (mélanomes). Ils sont filtrés par l'ozone atmosphérique qui nous en protège. Le problème du trou d'ozone au dessus des pôles dont on parlait beaucoup dans les années 80 fut résolu par l'interdiction au niveau international des fréons (gaz utilisés dans les réfrigérateurs).

Dans son film, « *La Vérité qui dérange* » Al Gore, rappelle qu'il a pris des mesures politiques lorsqu'il était vice-président des Etats Unis pour interdire les fréons et que ces mesures ont été efficaces. Il prouve ainsi que grâce à une volonté politique forte et une entente avec l'Europe et d'autres puissances, on peut agir sur des problèmes concernant l'ensemble de la planète.

IV- LA VITESSE DE LA LUMIERE DANS LE VIDE, UNE LIMITE DE LA PHYSIQUE

1) COMMENT MESURER LA VITESSE DE LA LUMIERE ? RAPPEL HISTORIQUE

La première mesure de la vitesse de la lumière a été effectuée en 1675 par l'astronome danois Römer (voir exercice 21 p. 50 du livre). Celui-ci avait constaté une anomalie des dates des éclipses de Io, satellite de Jupiter : il existe un décalage de 16 minutes environ entre les dates prévues et les dates effectives des éclipses de Io, entre le moment où Jupiter se trouve au plus près de la Terre et le moment où les deux planètes sont les plus éloignées. Pour interpréter ce phénomène, Römer admet que la lumière a une vitesse finie et que l'écart observé est dû à la variation de la durée de sa propagation entre Jupiter et la Terre suivant la distance séparant ces deux astres. Römer calcule une vitesse de 212 000 km/s, ce qui est excellent compte-tenu de la grande incertitude sur la mesure du rayon de l'orbite terrestre à l'époque de Römer.



Exercice 1 :

- 1) D'après le schéma précédent, à quoi sont dues les éclipses de Io ?
- 2) Quelle est la différence de distance parcourue par la lumière lorsque la Terre est au plus près et lorsqu'elle est au plus loin de Io ?
- 3) On considère aujourd'hui que la Terre est séparée du Soleil de 150 millions de kilomètres. Quelle est la valeur de la vitesse de la lumière qu'aurait trouvée Römer avait connu exactement la mesure de la distance Terre-Soleil ?
- 4) Quelle était la mesure de la distance Terre-Soleil à l'époque de Römer ? A quoi est due l'erreur de Römer ?

Réponses :

- 1) Les éclipses de Io sont dues au passage périodique de Io derrière Jupiter, ce qui nous le rend invisible de la Terre, car Io est caché derrière Jupiter.
- 2) La différence entre les deux distances nous séparant de Io est égale à deux fois la distance Terre-Soleil soit 300 millions de kilomètres.
- 3) La lumière met 16 minutes pour parcourir une distance de 300 millions de kilomètres, ce qui correspond au décalage observé entre les dates prévues et les dates effectives des éclipses de Io. On peut en déduire la vitesse de la lumière dans le vide :

$$c = \frac{d}{t} = \frac{300000000 \text{ km}}{16 \times 60 \text{ s}} = \frac{3 \cdot 10^8}{960} \text{ km/s} = 312500 \text{ km/s}$$

L'erreur aurait été de $\frac{312000 - 300000}{300000} = \frac{12000}{300000} = \frac{12}{300} = \frac{4}{100} = 4\%$ avec une bonne mesure de D_{TS}

On peut donc considérer que ces 4% correspondent à l'ordre de grandeur de l'erreur de Römer sur la mesure du décalage de 16 minutes soit une erreur de $16 \cdot 0,04 = 0,64$ minute = soit environ 1 minute sur 16 minutes, ce qui est faible.

- 4) $D_{TS} = c_{Römer} \cdot t / 2 = (212\,000 \text{ km/s} \cdot 960 \text{ s}) / 2 = 203\,520\,000 / 2 = 101\,760\,000 \text{ km}$ soit environ 100 millions de kilomètres.

L'erreur de Römer sur la mesure de c est de : $\frac{300000 - 212000}{300000} = \frac{88000}{300000} = \frac{88}{300} = \frac{44}{100} = 44\%$

Ceci, est bien supérieur au pourcentage d'erreur dû à la mesure du décalage de 16 minutes. L'erreur de Römer est due avant tout à l'erreur de mesure de la distance Soleil-Terre faite à son époque, mais ce n'est pas de sa faute. Ce travail est remarquable car il donne, pour la première fois (de manière indirecte), l'ordre de grandeur de la vitesse de la lumière.

Hippolyte Fizeau (1819-1896), physicien français a été le premier à mesurer la vitesse de la lumière, en mettant au point, en 1849, la première méthode physique de mesure directe de cette vitesse. Elle consiste à mesurer le temps que met un faisceau lumineux pour parcourir le trajet entre le belvédère de sa maison de Suresnes et une fenêtre d'une maison située sur la butte Montmartre, fenêtre sur laquelle le faisceau se réfléchit pour revenir à son point de départ. Pour calculer la vitesse à laquelle la lumière avait effectué cet aller-retour, soit une distance de 8 km, Fizeau place une roue dentée devant le faisceau lumineux, de telle sorte que les dents arrêtent la lumière et que les creux la laissent passer. La vitesse de rotation de la roue est réglée de telle manière que la lumière passant entre deux dents ait juste le temps d'effectuer un aller-retour avant d'être occultée par la dent suivante. Connaissant la distance parcourue par le faisceau lumineux ainsi que la vitesse de rotation de la roue, Fizeau en déduit une mesure de la vitesse de la lumière, qu'il trouve égale à 315 300 km/s.

A l'aide d'un miroir tournant, le physicien français Léon Foucault mesure — indépendamment, en 1850 — cette même grandeur, puis l'étend à la propagation dans d'autres milieux.

2) VALEUR EXACTE DE LA VITESSE DE LA LUMIERE DANS LE VIDE

De nos jours, les physiciens ont fixé la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide qui sert d'étalon dans le système d'Unités Internationales (système SI) :

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

Le mètre est donc défini comme la longueur du chemin parcouru par la lumière dans le vide pendant $1/299\,792\,458$ s.

3) VALEUR DE LA VITESSE DE LA LUMIERE DANS DIVERS MILIEUX TRANSPARENTS

On définit l'indice de réfraction d'un milieu comme étant le rapport c/v , v étant la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu considéré. Ainsi, dans l'air, la vitesse de la lumière est à peu près égale à c ; dans l'eau, elle est égale à 75 % de c ; dans le verre, elle est égale à environ 55 ou 60 % de c selon le type de verre. On remarquera que le verre est un milieu dispersif, c'est à dire qu'il ralentit différemment les lumières selon leur couleur, le bleu est plus ralenti, donc plus dévié que le vert et que le rouge, ce qui explique la décomposition de la lumière blanche par le prisme.

Milieu	vide	air	eau	plexiglas	verre
Indice de réfraction $n = \frac{c}{v}$	1	1	1,33	1,5	1,5 à 1,8 selon le type de verre et la couleur
Vitesse de la lumière dans le milieu $v = \frac{c}{n}$	c 300 000 km/s	c 300 000 km/s	0,75 c 225 000 km/s	0,66 c 200 000 km/s	0,66 c à 0,55 c 165 000 km / s à 200 000 km / s

4) VITESSE DE LA LUMIERE DANS LE VIDE ET MESURE DE LA DISTANCE DES ETOILES

La vitesse de la lumière dans le vide, qui est une constante, permet de définir une unité de longueur bien adaptée à l'échelle de l'Univers, appelée l'année-lumière (ou année de lumière) de symbole A.L.

Exercice 2 :

Le soleil est une étoile, c'est l'étoile la plus proche de la Terre. La distance Terre-Soleil est de 150 millions de km. La lumière se propage à environ 300 000 km/s. Combien de temps faut-il à la lumière émise par le Soleil pour arriver sur Terre ?

Réponse : $t = \frac{d}{v} = \frac{150\,000\,000}{300\,000} = \frac{1500}{3} = 500 \text{ s} = 8 \text{ min } 20 \text{ s}$

Si le soleil s'éteignait brusquement, on ne s'en apercevrait que dans 8 min 20

Exercice 3 :

Calculer la distance parcourue par la lumière en 1 an à la vitesse de $3,00 \cdot 10^8 \text{ m}$. On appelle année-lumière (A.L.) cette distance.

Réponse : $1 \text{ A.L.} = 3,00 \cdot 10^8 \times 3600 \times 24 \times 365 = 9,47 \cdot 10^{15} \text{ m} \approx 9,5 \cdot 10^{15} \text{ m}$

Exercice 4 :

En 1987, des astronomes ont pu observer l'explosion d'une étoile (supernova) dans le Grand Nuage de Magellan. Cette étoile se trouvait à $1,70 \cdot 10^{20} \text{ m}$. En quelle année l'explosion observée s'est-elle produite ?



Le grand nuage de Magellan avant le 23 février 1987. La flèche indique la position d'une étoile.



Le 23 février 1987, les astronomes observent l'explosion d'une étoile située à $1,7 \times 10^{20} \text{ m}$ de la Terre. À sa place, apparaît une source lumineuse extrêmement intense.

Réponse :

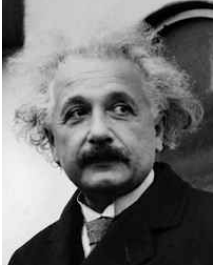
Il aura fallu : $t = \frac{d}{v} = \frac{1,7 \cdot 10^{20} \text{ km}}{9,46 \cdot 10^{15} \text{ km/an}} = \frac{1,7}{9,46} \cdot 10^5 \text{ ans} = 17970 \text{ ans}$ soit environ 18000 ans pour que la lumière de

l'explosion de la supernova arrive jusqu'à nous. L'explosion s'est donc produite en $1987 - 18000 \approx -16000$ avant J.C, soit seize millénaires avant notre ère, au moment où vivaient les hommes préhistoriques ayant peint la grotte de Lascaux (civilisation magdalénienne du paléolithique supérieur).

Quand on observe une étoile située à X a.l., on voit ce qu'elle était il y a X années. Voir loin, c'est voir dans le passé. Plus un objet lumineux est lointain, plus il est ancien.

Remarque : On ne pourra pas voir d'objet plus lointain que 15 milliards d'A.L. car on considère que notre Univers est né il y a 15 milliards d'années.

5) LA VITESSE DE LA LUMIERE DANS LE VIDE, LIMITE INFRANCHISSABLE DE LA PHYSIQUE

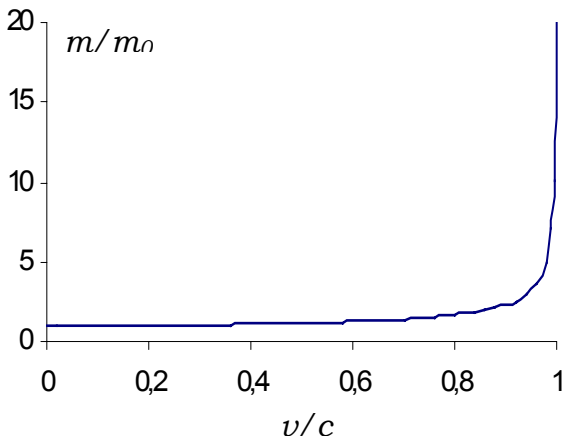


Avec la théorie de la Relativité restreinte en 1905, Albert Einstein (1879–1955) a postulé que la vitesse de la lumière dans le vide était un invariant de la physique. Par exemple, si je suis dans un TGV roulant à 360 km/h = 100 m/s et que je dirige une lampe torche vers l'avant du train, la lumière n'ira pas à 300 000 km/s + 0,1 km/s soit 300000,1 km/s mais à 300 000 km/s. De la même manière, si je dirige mon faisceau vers l'arrière du train, la lumière n'ira pas à 300000 km/s - 0,1 km/s = 299 999 km/s mais à 300 000 km/s.

Ce postulat révolutionnaire obligea à revoir entièrement toutes les notions d'espace et de temps de Newton (1642–1727). Le temps ne s'écoule pas de la même manière partout dans l'Univers, comme le pensait Newton, il est relatif à l'endroit où on se trouve et à la vitesse à laquelle on va (relativité du temps). De la même façon, la masse d'un objet, donc son énergie d'après la fameuse loi $E=mc^2$ dépendent de la vitesse de l'objet :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

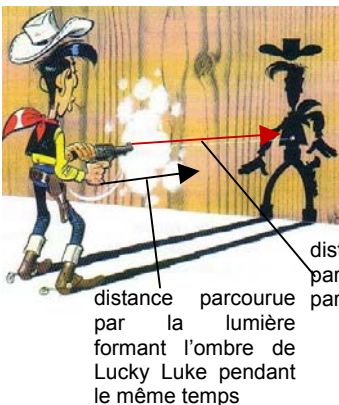
m_0 : masse au repos de l'objet en kilogrammes (kg)
 m : masse de l'objet lorsqu'il atteint une certaine vitesse v (m/s)
 c : vitesse de la lumière dans le vide



Lorsque v est inférieure à 50% de c soit 150000 km/s, la masse de l'objet reste à peu près égale à la masse au repos et les lois de Newton restent valables. Par contre, dès que l'on dépasse 90% de la vitesse de la lumière soit 270000 km/s, l'augmentation de masse devient énorme et les lois de Newton ne sont plus valables, la relativité est de rigueur. Si l'on pouvait atteindre la vitesse de la lumière, soit 300000 km/s, la masse de cet objet, si petit soit-il, deviendrait infinie. Une masse infinie nécessiterait une énergie infinie donc celle de l'Univers tout entier, qui finirait englouti dans le trou noir que constituerait cet objet monstrueux !

D'après le postulat d'Einstein, La vitesse de la lumière dans le vide constitue une limite de vitesse infranchissable pour tout objet et inatteignable pour un objet massif.

Exercice 5 :



- 1) En observant l'ombre de la main de Lucky Luke, peut-on dire que cette ombre nous permet de voir dans le proche passé de Lucky Luke ?
 - 2) Cependant, l'impact de la balle dessiné « dans l'ombre » contredit les lois de la physique. Pourquoi ?
- 1) La lumière met un certain temps pour aller de Lucky Luke à la palissade donc l'ombre se forme avec un très léger temps de retard et montre un passé très proche correspondant pratiquement au présent de Lucky Luke. Paradoxe : la balle est partie alors que Lucky Luke n'a pas encore appuyé sur la gâchette !
 - 2) La balle ne peut pas atteindre la palissade avant la lumière qui forme l'ombre car les objets massifs n'ont pas le droit d'aller plus vite que la lumière dans le vide et l'air.