

LA VITESSE DE LA LUMIERE

I- Généralité :

Qu'est-ce que la lumière ?

D'où vient-elle ?

Comment se propage-t-elle ?

1- Définition :

La lumière **s'oppose à l'obscurité**. Il y a de la lumière quand il fait **jour**, ou quand on allume une **lampe**.

La question de la nature de la lumière est l'une des plus anciennes énigmes de la science.

Si le Soleil et un arbre sont bien tous les deux « visibles », le premier semble produire lui-même la lumière qui nous parvient, tandis que le second a besoin d'être éclairé pour être vu. Il existe donc deux types de source lumineuse : les **sources primaires** et les **sources secondaires**.

2- Les Sources :

Une **source primaire de lumière**, comme le Soleil ou l'écran d'un ordinateur, **produit elle-même la lumière** qui nous parvient. Le Soleil ou une ampoule électrique émettent par ailleurs de la chaleur : ce sont des corps incandescents. D'autres types de sources primaires existent, comme les lasers, les lucioles ou une lampe au néon.

Une **source secondaire de lumière**, comme un arbre ou une personne, **ne peut être vue que si elle est éclairée**. La lumière est projetée sur l'objet qui en réfléchit une partie (l'autre partie étant absorbée) : on dit que **la lumière est diffusée par l'objet**.

Toutes les sources secondaires ne diffusent pas la lumière de la même façon. Par exemple, le miroir d'un phare réfléchit dans une direction particulière toute la lumière qu'il reçoit de la lampe, nous permettant d'observer cette lumière à très grande distance. Un arbre diffuse moins de lumière qu'un miroir, mais il le fait dans toutes les directions. Un objet totalement noir ne réfléchit quasiment pas de lumière. La Lune tire sa luminosité de la lumière du Soleil qu'elle réfléchit dans toutes les directions, notamment vers la Terre.

Les récepteurs de lumière **détectent la lumière et la transforment** en un type d'information. Il en existe de très simples — comme la **pellicule d'un appareil photo** qui convertit la lumière en énergie chimique — ou de plus élaborés — comme une **cellule photoélectrique** qui convertit la lumière en signal électrique.

L'**œil humain** est un récepteur de lumière particulièrement sophistiqué : il s'adapte aux conditions de luminosité, permet de voir de près comme de loin et distingue les couleurs.

3- Propagation :

Le trajet de la lumière dans un milieu peut être représenté par un **segment de droite** appelé **rayon lumineux**.

La lumière se propage en ligne droite dans les milieux homogènes

Dans les milieux **homogènes** (même composition en tout point) **et transparents** (comme l'eau, l'air, le verre, etc.), la lumière se propage **en ligne droite** sans être atténuée, ou très peu.

Diffusion et réflexion de la lumière

Lorsqu'elle rencontre un objet, la lumière est **partiellement diffusée** par cet objet (qui devient une source secondaire de lumière) : c'est la **réflexion de la lumière** (le vide est un milieu transparent parfait, dans lequel la lumière n'est ni absorbée, ni réfléchi).

L'autre partie du rayon lumineux est **absorbée** par l'objet.

Si l'objet est **opaque**, la lumière absorbée ne peut traverser l'objet.

Si l'objet est **translucide** ou **transparent**, une partie de la lumière absorbée peut traverser l'objet en changeant généralement de direction : c'est la **réfraction de la lumière**.

C'est pour cela qu'il est difficile de déterminer l'emplacement exact d'un objet plongé dans l'eau : il semble se trouver plus proche de la surface qu'il ne l'est vraiment, du fait de la réfraction des rayons lumineux. De même, une règle plongée dans un verre d'eau ne semble plus très droite lorsqu'on la regarde à travers le verre.

II- Vitesse de la lumière :

La lumière **semble se propager instantanément** : lorsque l'on pointe le faisceau d'une lampe électrique vers un objet, n'est-il pas éclairé immédiatement ?

Pourtant la lumière possède une vitesse dont la mesure a constitué l'un des plus grands défis de la science.

1- Mesure :

Au **XVII^e siècle**, le savant italien **Galilée** tente de mesurer la vitesse de la lumière grâce à un ingénieux système de lampes clignotantes. Pourtant son système s'avère inadapté, la lumière se propageant à une vitesse trop rapide pour être mesurée de cette façon.

Puis les physiciens, notamment le Danois **Ole Rømer** et le Britannique **James Bradley**, se tournent vers l'astronomie et mettent à profit leurs connaissances des mouvements réguliers des planètes. C'est ainsi qu'ils effectuent les premières mesures de la vitesse de la lumière : environ **225 000 km/s** pour Rømer en **1676** et **301 000 km/s** pour **Bradley** en **1728**. Au **XIX^e siècle**, **Hippolyte Fizeau** puis **Léon Foucault** obtiennent des résultats encore plus précis (**299 796 km/s**) en utilisant un système mécanique de miroirs mobiles.

Finalement, en **1983**, grâce notamment aux progrès réalisés dans la fabrication des **lasers**, les physiciens fixent la valeur de la **vitesse de la lumière dans le vide** (appelée aussi **célérité** et notée **c**) à **299 792 458 m/s**, soit environ **300 000 km/s**.

Autrement dit, la lumière parcourt **299 792 458 m en 1 s** (ce qui permet de redéfinir le mètre comme la longueur du chemin parcouru par la lumière dans le vide pendant **1/299 792 458 s**). **Par exemple**, la lumière du **Soleil** parcourt le chemin entre le Soleil et la **Terre** en **8 minutes** environ.

La vitesse de la lumière dans le vide est ainsi devenue une **constante physique fondamentale** qui sert d'étalon dans le Système international d'unités et qui intervient dans de nombreuses équations, en particulier dans la célèbre équation d'Einstein : $E = mc^2$, qui associe à toute masse m une énergie E , c étant la vitesse de la lumière.

2- Variations :

Alors qu'ils cherchent à déterminer la vitesse de la lumière, les scientifiques constatent également que la lumière se propage plus lentement dans les milieux non transparents. En effet, la vitesse de la lumière (v) dépend de la **densité du milieu** (**eau, air, verre, etc.**) : $v = c/n$ où n est l'**indice de réfraction du milieu** (en rapport avec sa densité).

Plus un milieu est dense, plus la vitesse de la lumière qui s'y propage est faible. Dans le vide $n = 1$, tandis que $n > 1$ dans tous les autres milieux. **Par exemple**, dans l'eau ($n = 1,33$), la vitesse de la lumière vaut environ **225 400 km/s** ; dans le **diamant** ($n = 2,42$), elle n'est plus que de **124 000 km/s**.

Il est même possible de **ralentir la vitesse de la lumière à 1,5 km/h** (au lieu de **300 000 km/s** dans le vide) en la faisant traverser un **milieu extrêmement froid** (proche du zéro absolu fixé à **-273,16 °C**), appelé **condensat de Bose-Einstein**. Dans une expérience de ce type (la première a été réalisée par la physicienne danoise **Lene Hau** en **2000**), si on marche vite à côté du dispositif de l'expérience, on va plus vite que la lumière !

III- Propagation de la lumière :

Le trajet de la lumière dans un milieu peut être représenté par un **segment de droite** appelé **rayon lumineux**. On ajoute généralement une flèche sur le segment de droite pour indiquer le sens de propagation du rayon lumineux. La lumière se propage sans être atténuée (ou très peu) dans les **milieux transparents** comme l'eau, l'air, le verre ou certains plastiques.

Lorsqu'elle rencontre un objet, la lumière est **partiellement réfléchi** (ou **diffusée**) par cet objet (qui devient une source secondaire de lumière), tandis qu'une autre partie du rayon lumineux est **absorbée** par l'objet. Si celui-ci est **opaque**, la lumière absorbée est **entièrement dissipée** par interaction avec le milieu (l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique, en chaleur, etc.). Mais si l'objet est **transparent** (ou **translucide**), une partie de la lumière absorbée peut traverser l'objet, en changeant généralement de direction : c'est la **réfraction de la lumière**.

1- Vitesse :

Dans le **vide**, la vitesse de la lumière — également appelée **célérité** et notée **c** — est égale à environ **300 000 km/s**.

Mais dans tous les autres milieux, sa vitesse (**v**) dépend de la densité du milieu (eau, air, etc.) dans lequel elle se propage : **$v = c/n$**

où **n** est l'**indice de réfraction du milieu** (en rapport avec sa densité). Plus un milieu est dense (plus **n** est élevé), plus la vitesse de la lumière qui s'y propage est faible. Dans le vide, où la lumière ne subit aucune modification, **$n = 1$** , tandis que **$n > 1$** dans tous les autres milieux (**$n = 1,33$** dans l'eau **par exemple**).

Pour aller d'un point à un autre, la lumière empruntera non pas le plus court chemin, mais le plus rapide. C'est ainsi que dans un milieu donné, à densité et donc vitesse données, le rayon lumineux adopte la trajectoire la plus rapide.

Dans un milieu dit **homogène** (comme l'air, l'eau ou le vide dont la densité est nulle), la densité est constante ; par conséquent, la trajectoire du rayon lumineux ne change pas et **la lumière se propage en ligne droite**.

2- Réflexion et réfraction :

Lorsque la densité du milieu varie — comme lorsqu'un rayon lumineux se propage dans l'air et atteint la surface d'un plan d'eau —, une partie de la lumière se reflète (**réflexion**) et l'autre partie pénètre dans l'eau (**réfraction**). L'eau et l'air étant considérés comme deux milieux homogènes, les trajectoires des rayons lumineux dans l'un et l'autre sont des lignes droites. L'angle selon lequel la lumière est réfléchi (**r**) est égal à celui du rayon incident (**i**), au signe près : **$r = -i$** .

L'angle de réfraction est tel que le produit de son sinus par l'indice de réfraction de l'eau est égal au produit du sinus de l'angle d'incidence par l'indice de réfraction de l'air. Cette formule peut se généraliser à n'importe quel milieu d'indices de réfraction n_1 et n_2 , c'est la **loi de Snell -Descartes** :

$$n_1 \times \sin a_1 = n_2 \times \sin a_2$$

où a_1 et a_2 sont respectivement les angles des rayons incident et réfracté. Les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction sont ceux que forment les rayons lumineux avec la **perpendiculaire** (ou **normale**) à la surface du second milieu.

C'est ainsi que lorsque l'on observe un objet plongé dans l'eau, il est difficile de déterminer son emplacement exact : les rayons lumineux étant déviés lorsqu'ils passent de l'eau à l'air, l'objet semble se trouver plus proche de la surface qu'il ne l'est vraiment. De même, une règle plongée dans un verre d'eau n'apparaît plus très droite lorsqu'on la regarde à travers le verre.

3- Les Mirages :

Si la **variation de la densité se fait en continu**, c'est-à-dire sans changement brutal, la **trajectoire du rayon lumineux est une courbe** (et non plus une ligne droite). Dans le désert, où la température peut atteindre de très grandes valeurs à la surface du sol, la densité de l'air varie fortement et de manière continue. L'air n'est alors plus un milieu homogène, et la trajectoire des rayons lumineux est courbe. C'est ainsi que se forment les **mirages**, pour lesquels une **image renversée d'objets lointains** peut nous apparaître, puis disparaître quand on s'en rapproche. L'image que l'on perçoit est bien celle de l'objet, mais portée par des rayons lumineux courbés qui, s'ils étaient droits, seraient cachés par le relief de la Terre.

4- Les Lentilles :

Une lentille optique est un disque transparent (en verre ou en plastique), dont les faces peuvent être **concaves**, **convexes** ou parfois **plane** pour l'une d'elles. Lorsqu'un rayon lumineux traverse une lentille, il est dévié deux fois : une première fois en pénétrant dans la lentille, une seconde fois lorsqu'il en sort. Chaque déviation obéit à la loi de Snell-Descartes, grâce à laquelle il est donc possible de prévoir exactement le parcours de la lumière à travers la lentille. Il existe deux sortes de lentilles :

- **les lentilles convergentes**, pour lesquelles les rayons sortant se dirigent vers un même point

appelé **foyer** ;

- **les lentilles divergentes**, pour lesquelles les rayons lumineux sortant s'éloignent les uns des

autres suivant différentes directions.

Les lentilles sont utilisées dans différents instruments optiques, en particulier dans les **objectifs des appareils photo**, les **microscopes** et les **télescopes**.

IV- Le Spectre électromagnétique :

1- Définition :

Le spectre électromagnétique regroupe **tous les types d'ondes électromagnétiques** ; des fréquences les plus élevées aux plus faibles, on trouve : les rayons gammas, les rayons X, les ultraviolets, la lumière visible, les infrarouges, les micro-ondes et les ondes radio. **Le spectre électromagnétique couvre ainsi toutes les gammes de fréquences (ou de longueurs d'ondes).**

2- Typologie :

a- Les ondes radio :

Les ondes radio possèdent des **longueurs d'onde bien plus grandes que celles de la lumière visible**. Émises par des antennes conçues à cet effet, elles permettent notamment de transmettre les signaux de la **télévision** ou de la **radio**.

b- Les micro-ondes :

Les micro-ondes sont des **ondes radio très courtes**. Elles sont notamment utilisées dans les fours du même nom (**four micro-ondes**) pour chauffer ou réchauffer des aliments, ou encore (à une intensité bien moindre) dans les **téléphones mobiles**, pour émettre ou recevoir des appels.

c- Les infrarouges :

Les infrarouges sont situés (comme leur nom l'indique) juste sous la couleur rouge de la partie visible du spectre. Ils sont surtout **émis par des corps chauds**, comme notre corps par exemple ; ce phénomène est notamment exploité en **thermographie** pour réaliser une carte de température d'un corps humain.

d- La lumière visible :

L'ensemble des longueurs d'ondes que l'œil humain peut percevoir est appelé lumière visible (ou domaine visible). C'est la seule partie du spectre que l'on peut voir à l'œil nu : on parle d'ailleurs de **spectre lumineux** pour cette gamme de longueurs d'onde (400-800 nm).

C'est à la fin du **XIX^e siècle** que **James Maxwell** puis **Heinrich Hertz** démontrent la nature électromagnétique de la lumière. La lumière se compose de plusieurs ondes électromagnétiques de longueurs d'onde différentes ; ces ondes sont autant de couleurs différentes : du violet (la plus petite des longueurs d'onde de la lumière visible) au rouge (la plus grande), en passant par le bleu et le vert.

Au-delà de ces longueurs d'ondes spécifiques, l'onde électromagnétique n'est plus visible. La lumière blanche, c'est-à-dire celle qui nous vient notamment du Soleil, est composée de toutes les couleurs du spectre lumineux. Lorsqu'un objet éclairé en plein jour nous apparaît d'une certaine couleur (rouge par exemple), c'est parce qu'il réfléchit cette couleur et absorbe toutes les autres.

e- Les rayons ultraviolets :

À partir de la lumière visible, **les rayonnements de plus faibles longueurs d'onde transportent de plus en plus d'énergie.** Bien qu'on ne les voit pas, les rayons ultraviolets se font sentir lorsque l'on reste trop longtemps exposé au Soleil (**coups de soleil**).

f- Les rayons X :

Les rayons X présentent, quant à eux, des longueurs d'onde dix mille fois plus petites que celle de la lumière : ils sont donc **extrêmement énergétiques et dangereux à haute dose, mais aussi extrêmement pratiques à faible dose.** En effet, ils sont largement utilisés en médecine : contrairement à la lumière, les rayons X ne sont pas totalement bloqués par la matière, et peuvent donc être utilisés pour localiser des corps étrangers (des balles par exemple) ou certaines maladies (un cancer, des os cassés...) à l'intérieur du corps humain.

g- Les rayons gamma :

Les rayons gamma sont les **rayonnements les plus énergétiques** et par conséquent les plus dangereux. Ils sont essentiellement produits par des **réactions nucléaires.** C'est pourquoi les murs protecteurs des réacteurs de centrales nucléaires sont constitués d'une forte épaisseur de béton pour les arrêter.

3- Utilisation :

Le spectre électromagnétique est très utilisé en astronomie pour l'**observation du ciel**. En effet, toutes les sources de rayonnements électromagnétiques du ciel sont observées à l'aide de divers **télescopes** sensibles à une gamme précise de longueurs d'onde : radiotélescopes (pour les ondes radio), télescopes à infrarouges, rayons X et gamma, etc. L'étude des ondes électromagnétiques provenant du cosmos nous permet de connaître la nature chimique des astres (planètes, étoiles, astéroïdes, comètes, etc.) qui nous entourent, et de lever un peu plus le voile sur l'origine de l'Univers.

V- Les Ondes :

Quel est le point commun entre la lumière, le son et les vagues ? Ces trois phénomènes physiques, de natures différentes, sont des **ondes**. Mais qu'est-ce qu'une onde ? Comment se propage-t-elle ? Et quels sont les différents types d'ondes ?

1- Définition :

Lorsque l'on jette une pierre dans l'eau, de petites vagues successives se forment à la surface de l'eau. Ces vaguelettes progressent dans toutes les directions (en cercles concentriques à partir de l'endroit où est tombée la pierre) et s'atténuent petit à petit : ce sont des ondes. Une onde est donc un phénomène physique qui résulte d'une perturbation (ici l'impact de la pierre dans l'eau), dont les effets se propagent dans un milieu (comme la surface de l'eau).

De manière générale, on peut dire qu'**une onde est une perturbation qui se déplace** (dans l'eau, dans l'air, etc.).

2- Typologie :

Il existe différents types d'ondes en fonction du milieu dans lequel elles se forment puis se propagent (eau, air, champ électromagnétique), et du type de perturbation qui en est à l'origine.

a- Les vagues :

Lorsque la pierre jetée dans l'eau atteint les premières molécules d'eau, celles-ci sont « déplacées » et déplacent leurs voisines, qui à leur tour déplacent les molécules avoisinantes, créant ainsi ce phénomène de **vagues qui avancent à la surface de l'eau**.

b- Le son :

Lorsque l'on perturbe les molécules d'air (en parlant par exemple), on crée des **ondes sonores** (c'est-à-dire des sons). Si on pouvait les voir, on verrait une **alternance de fines couches d'air comprimées et d'autres dilatées** (un peu comme les creux et les bosses des vagues à la surface de l'eau).

c- La lumière :

La lumière est **une onde qui se propage dans le vide, l'air, l'eau ou certains matériaux dits transparents** (comme le verre). Ce type d'ondes très particulier (les ondes électromagnétiques) résulte des **variations, dans l'espace et le temps, du champ électromagnétique**. Fluide immatériel, invisible et omniprésent dans l'Univers, le champ électromagnétique est à l'origine de nombreux phénomènes comme les aurores polaires ou le comportement d'une boussole.

3- Caractéristiques :

Une onde se caractérise par sa **direction** et sa **vitesse de propagation**. Dans le vide, la vitesse de la lumière est égale à environ **300 000 km/s**. Mais dans tous les autres milieux, sa vitesse varie en fonction du milieu (eau, air, etc.) dans lequel elle se propage.

Une onde se caractérise également par son **amplitude**, qui dépend de l'intensité avec laquelle se produit la perturbation qui en est à l'origine : plus l'on tape fort sur une cloche, et plus le son émis est intense.

Enfin, une onde se caractérise par sa **longueur d'onde** (distance qui sépare deux crêtes ou deux creux), ou sa **fréquence** (nombre de crêtes ou de creux qui défilent au même endroit par seconde).

4- Utilisation :

Nos yeux sont des récepteurs de lumière ; ils nous permettent de voir l'onde lumineuse, tandis que nos oreilles nous permettent de capter les ondes sonores. Voir, entendre... **une onde transporte**

donc des informations qu'un capteur (les yeux, les oreilles, un microphone, etc.) peut enregistrer, analyser et déchiffrer, parfois restituer sous une forme ou une autre.

Dans le cas du son, l'onde peut être captée par un microphone, transformée en courant électrique, amplifiée puis à nouveau transformée en onde sonore grâce à un haut-parleur : c'est le **principe du téléphone**. Les propriétés remarquables des ondes sont depuis longtemps mises en application par les hommes : la **radio**, la **télévision**, le **laser**, etc.

5- Fréquence :

De manière générale, une onde est caractérisée par l'une des deux grandeurs suivantes : **sa fréquence** ou **sa longueur d'onde**. Ces notions fondamentales s'appliquent à toutes les ondes, y compris le son et la lumière.

Pour comprendre ce que représentent ces deux notions essentielles, il suffit de prendre l'exemple d'une pierre lancée dans de l'eau calme :

- **la longueur d'onde** correspond à **la distance qui sépare deux crêtes successives** (ou deux creux successifs) ; elle se mesure **en mètres (m)** ;

- **la fréquence** correspond au **nombre de vagues qui défilent au même endroit par seconde** ;

elle se mesure **en hertz (Hz)**, en référence au physicien allemand **Heinrich Hertz** (pionnier de l'étude des ondes électromagnétiques).

Dans le cas du son, la fréquence de l'onde détermine la **hauteur d'un son** : **plus la fréquence est élevée et plus le son est aigu**. Inversement, **plus la fréquence est basse et plus le son est grave**. Par exemple, le *la* de référence (utilisé notamment par les musiciens pour s'accorder) correspond à une fréquence de **440 Hz**.

La fréquence (notée ν , prononcée « nu ») et la longueur d'onde (notée λ , prononcée « lambda ») sont liées par la formule suivante :

$$\lambda = V/\nu$$

où V est la vitesse de propagation de l'onde. Autrement dit, **plus la fréquence est grande, plus la longueur d'onde est petite** (et inversement).

De même qu'un son peut être constitué de différentes longueurs d'ondes, la lumière peut être décomposée en différentes longueurs d'ondes que nous percevons comme autant de **couleurs** : du violet (la plus petite longueur d'onde) au rouge (la plus grande longueur d'onde). L'ensemble de ces longueurs d'onde constitue le **spectre lumineux** (ou **spectre visible de la lumière**).

Comme la lumière visible, les ondes radio sont des **ondes électromagnétiques**. Mais les ondes radio ont des longueurs d'onde bien plus élevées. Émises par des antennes conçues à cet effet, les ondes radio permettent notamment de transmettre les signaux de la télévision ou de la radio, grâce à la

« **modulation de fréquence** ». Il s'agit d'un système qui permet d'intégrer à l'onde radio, dite **onde porteuse**, une seconde onde, le **signal porté**, qui sera transformé en signal électrique puis en son (dans le cas de la radio) ou en son et image (dans le cas de la télévision).

Chaque station de radio ou de télévision possède sa propre fréquence d'onde porteuse, comprise entre **88** et **108 MHz** pour ce qui est des stations de radio FM.