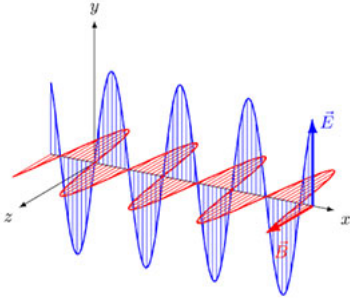


ONDES ELECTROMAGNÉTIQUES

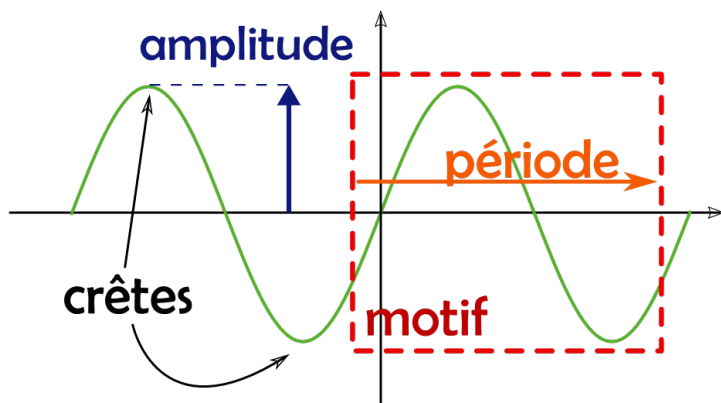


Il est courant de parler d'ondes électromagnétiques dans les thérapies quantiques. Il me semblait utile de faire un petit rappel des bases scientifiques.

Il existe deux grands types d'ondes en physique : l'onde mécanique et l'onde électromagnétique.

Il existe des types d'ondes électromagnétiques très différents : leur fréquence, leur création, leurs effets, etc., ne se ressemblent pas. On sait de quel type est une onde en connaissant seulement sa fréquence ou sa longueur d'onde.

Pour caractériser une onde, on doit connaître son amplitude et sa fréquence :



Le spectre électromagnétique a été découpé en plusieurs morceaux, et chacun d'entre eux correspond à un type d'onde particulier.

Principe des ondes mécaniques

Une onde mécanique est le déplacement d'une perturbation mécanique (secousse, vibration, etc.) dans la matière. Des exemples bien connus d'ondes mécaniques sont : le son, les tremblements de terre, les vagues... Ces ondes mécaniques ne peuvent se propager que sur un support physique : la matière : l'air, le sol, l'eau, etc. Ainsi, le son ne se propage pas dans l'espace et on ne peut entendre un téléphone portable sonner sous une cloche à vide.

Principe des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques, quant à elles, peuvent se déplacer dans le vide : c'est ainsi que l'on reçoit sur Terre la lumière du Soleil et que les astronautes en mission dans l'espace peuvent communiquer avec la Terre. Elles se propagent au travers de la plupart des matières : par exemple, on aperçoit bien le soleil à travers une vitre.

Notion de champ

Il existe en physique des champs : cela désigne une partie de l'espace dont chaque point possède une propriété que l'on étudie. Par exemple, le champ de pesanteur terrestre est l'ensemble de l'espace où la Terre exerce une influence gravitationnelle : chaque point de cet espace est attiré par la force de pesanteur produite par la Terre. On peut définir de tels champs pour toutes les forces qui agissent à distance, et notamment les forces de type électromagnétique comme le magnétisme : on aura par exemple un champ magnétique tout autour d'un aimant, parce que chaque point de l'espace est soumis à la force produite par cet aimant. Lorsque l'on s'intéresse aux champs électrique et magnétique en même temps, on parle de champ électromagnétique.

Une onde électromagnétique est une vibration de ce champ électromagnétique. La modification de la valeur du champ électrique en un point entraîne celle du champ magnétique associé autour de ce point. Cette modification du champ magnétique entraîne à son tour une modification du champ électrique tout autour, etc. On peut considérer que l'onde électromagnétique, en modifiant la valeur des champs électrique et magnétique, « crée » en quelque sorte son support : en effet, même s'il n'existait pas, par exemple, de champ magnétique à un endroit, l'arrivée d'une onde électromagnétique va en créer un, à cause de la variation du champ électrique. Finalement, les champs électrique et magnétique « vibrent » (changent de valeur alternativement puis reviennent à leur valeur de départ) ensemble et l'énergie utilisée pour créer la première variation du champ électromagnétique est transportée à chaque variation successive.

Une onde électromagnétique est donc la propagation d'un signal (les variations) grâce à un champ électrique et un champ magnétique qui vibrent ensemble.

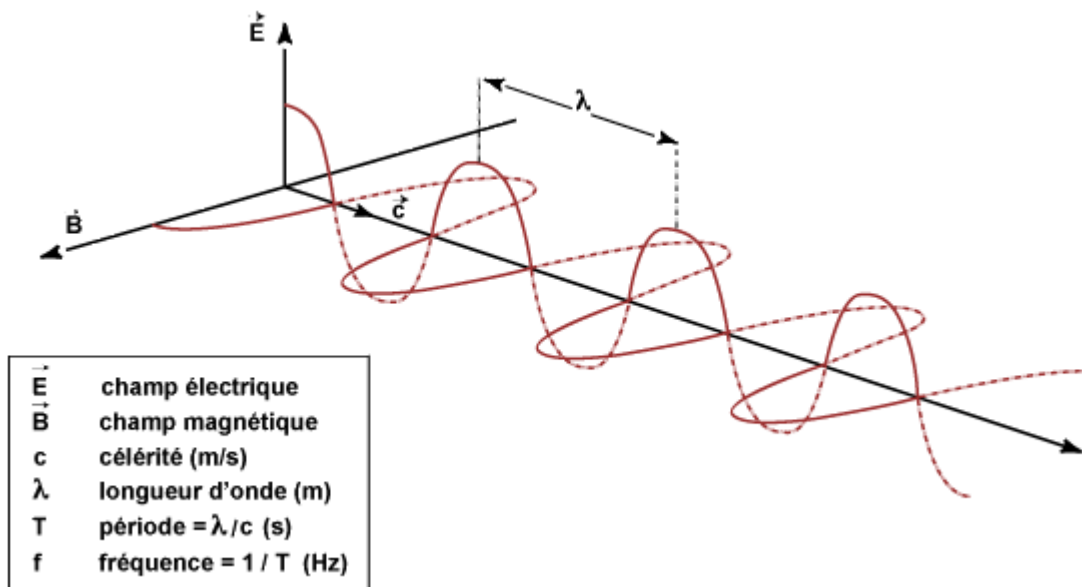
Plus formellement, l'onde électromagnétique est un modèle utilisé pour représenter les rayonnements électromagnétiques. Elle est associée à la notion de photon.

On doit distinguer le rayonnement électromagnétique, qui est le phénomène étudié, et l'onde électromagnétique, qui est une des représentations du phénomène.

Caractéristiques des ondes électromagnétiques

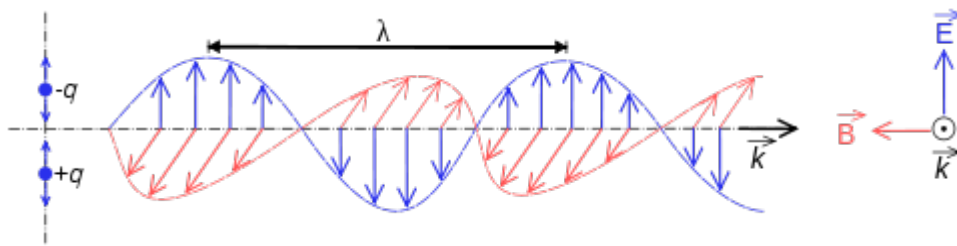
Nous pouvons définir toute onde électromagnétique comme étant l'oscillation, sur deux plans perpendiculaires, d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propagent ensemble à la vitesse dite de la lumière (dans le vide).

Elles n'ont pas de support matériel – elles se propagent donc en l'absence de matière.



La propagation d'une variation

du champ électrique sera notée \vec{E} . Elle est associée à une variation d'un champ magnétique notée \vec{B} . Les normes des champs \vec{E} et \vec{B} sont reliées entre elles par : $B = \frac{E}{c}$. Les vecteurs sont perpendiculaires entre eux et forment un trièdre direct $(\vec{k}, \vec{E}, \vec{B})$.



Comme toutes les ondes, une onde électromagnétique peut s'analyser en utilisant l'analyse spectrale ; on peut décomposer l'onde en ondes dites « monochromatiques ».

Une onde électromagnétique monochromatique peut se modéliser par un dipôle électrostatique vibrant. Les variations des champs électriques et magnétiques sont liées par les équations de Maxwell, on peut donc représenter l'onde par un seul de ces champs, en général le champ électrique. On peut alors écrire l'équation générale d'une onde plane monochromatique :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi) \cdot \vec{E}_0$$

Avec ω la pulsation, qui vaut $\frac{2\pi c}{\lambda}$. La longueur d'onde est notée λ .

\vec{r} est le vecteur position du point considéré. \vec{k} est le vecteur d'onde.

φ est la phase à l'origine.

On utilise aussi fréquemment la forme complexe : $\vec{E}(\vec{r}, t) = e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi)} \cdot \vec{E}_0$. On obtiendra alors les grandeurs physiques, réelles, en prenant la partie réelle de cette forme complexe.

Energies transportées par les ondes électromagnétiques

Toutes les ondes sont des déplacements d'énergie. La différence fondamentale entre les ondes électromagnétiques et mécaniques tient dans le type de déplacement adopté par cette énergie. Les ondes mécaniques mettent en mouvement leur support (les vagues agitent le liquide et les tremblements de terre secouent le sol) et l'énergie est transmise par ce mouvement.

La densité d'énergie transportée par une onde électromagnétique sinusoïdale est :

$$e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot E_0^2 = \frac{1}{2} \mu_0 B_0^2 \quad J/m^3$$

L'intensité moyenne (flux de puissance) associée à l'onde est :

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot C \cdot E_0^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot C \cdot B_0^2 \quad W/m^2$$

Permittivité du vide : $\epsilon^0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$ SI (système international)

Perméabilité du vide : $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ SI

Vitesse de propagation C : $C = (1/\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{1/2} = 3 \cdot 10^8$ m/s

Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques

La vitesse de propagation de l'onde EM dépend du milieu. Si on note n l'indice de réfraction du milieu, la vitesse de

propagation s'écrit : $v = C/n$.

Exemple d'indice de réfraction :

Vide	$n=1$
Air	$n=1,00029$
CO ₂ (gaz)	$n=1,00045$
Eau	$n=1,33$
Verre	$n=1,5 \text{ à } 1,7$

On remplacera alors ϵ_0 par $\epsilon=\epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ et μ_0 par $\mu=\mu_0 \cdot \mu_r$, où ϵ_r et μ_r sont les permittivité et perméabilité relatives du milieu.

Autre notation avec C, la vitesse de la lumière dans le vide, f, la fréquence (en Hz) et λ , la longueur d'onde en mètres.

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

Atténuation

Au fur et à mesure qu'une onde électromagnétique s'éloigne de sa source, son amplitude diminue. Cette décroissance est due à la dispersion spatiale. Par exemple, pour une source de lumière, il faut concentrer au maximum son faisceau au départ pour augmenter la portée.

On peut quantifier cela facilement avec E = Densité de puissance du flux, P = Puissance en W et d = distance.

$$E = \frac{P}{4\pi d^2}$$

On pourra définir un nouveau terme appelé "Atténuation de parcours en espace libre" par :

Path loss (perte de parcours) en dB, d = distance en mètres et l = longueur d'onde en mètres.

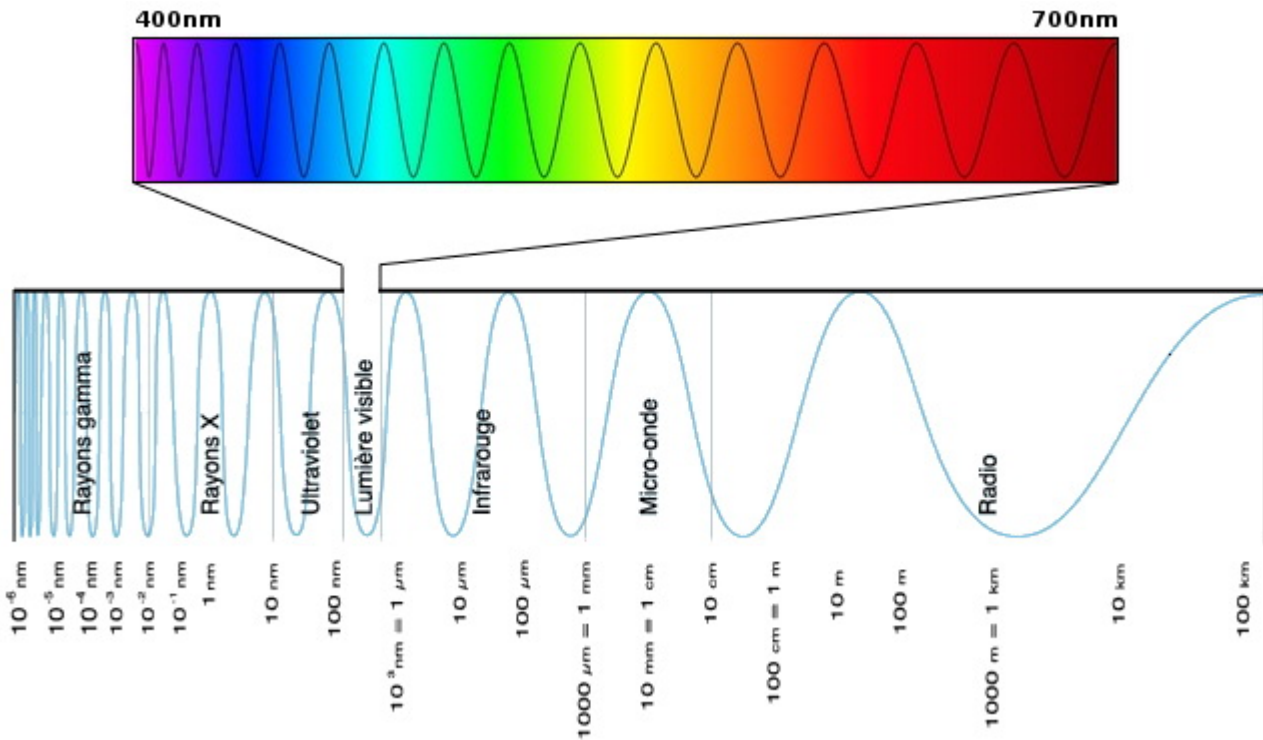
$$PathLoss = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Le rayonnement électromagnétique

Ce qui différencie tel ou tel domaine du spectre électromagnétique est la fréquence d'oscillation des deux champs magnétique et électrique.

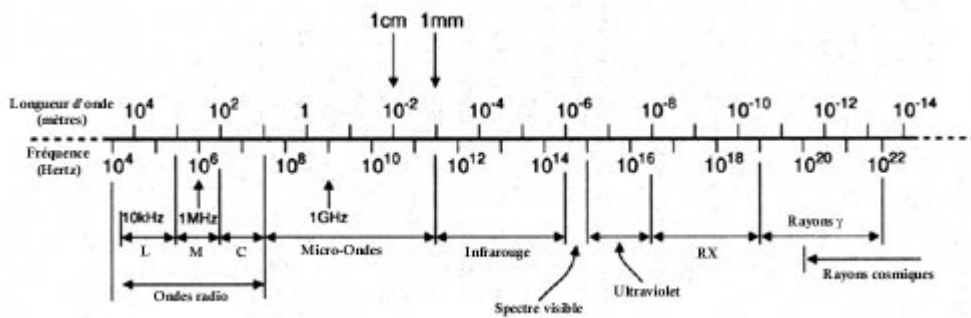
La lumière n'est qu'un petit domaine du spectre électromagnétique. La lumière est un rayonnement électromagnétique qui peut être modélisé par une onde électromagnétique (comportement ondulatoire) ou un ensemble de photons (comportement corpusculaire). Dans le premier cas, l'onde électromagnétique se décompose en un champ électrique et un champ magnétique. D'après la théorie ondulatoire de la lumière, tout rayonnement peut alors être considéré comme la superposition d'ondes planes monochromatiques caractérisées par leurs longueurs d'onde et leurs fréquences. La notion d'onde électromagnétique est complémentaire de celle du photon, une particule sans masse et sans charge électrique, qui est associée à une radiation électromagnétique monochromatique.

Nous entendons plus couramment parler de longueur d'onde qui est simplement le rapport de la vitesse de la lumière sur cette fréquence d'oscillation. La vitesse de la lumière, et donc la vitesse de toute onde électromagnétique, dans le vide, est une constante universelle.



Représentation du spectre électromagnétique et des longueurs d'onde associées

Dans la partie haute du schéma ci-dessus est détaillée la partie du spectre perçue par l'œil humain.



Le spectre des ondes électromagnétiques

Le spectre électromagnétique est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes en termes de fréquence (ν), de longueur d'onde (λ) et d'énergie des photons (E). La figure ci-dessus montre une représentation de ce spectre en fonction de la longueur d'onde. Les trois grandeurs sont liées deux à deux par la constante de Planck ($h=6.62617 \cdot 10^{-34}$ J.s) et la vitesse de la lumière dans le vide ($c=299792458$ m.s⁻¹) : $E= h.c / \lambda$

Si on veut étudier la gamme de longueurs d'onde qui s'étend du visible (0.30 à 1.30 μm) au proche infrarouge (1.30 μm à 2.50 μm) : En termes de fréquence, elle se situe autour de 10^8 MHz et est donc difficile à mesurer par les instruments actuels. Pour quantifier le rayonnement électromagnétique sur cette gamme de longueurs d'onde, il est plus aisé de se servir de la quantité de photons reçus. Les capteurs utilisés en spectroscopie sont donc basés sur ce principe. L'équation nous montre qu'il est possible de relier cette quantité de photon à une longueur d'onde donnée. La longueur d'onde sera une unité de référence dans la suite de ce travail et sera exprimée en nanomètres (nm) ou micromètres (μm).

Focus sur la lumière

La lumière est en partie de « nature ondulatoire » et de nature « corpusculaire ».

Nature ondulatoire : En 1801, Thomas Young a réalisé une célèbre expérience, appelée expérience des fentes de Young. Elle montre que, quand on éclaire un écran avec deux rayons d'une lumière qui provient de la même lampe, on n'éclaire pas cet écran de façon uniforme, mais on produit une alternance de rayures lumineuses et sombres. Cela s'explique si l'on considère la lumière comme une onde, car c'est un phénomène, très connu avec les ondes acoustiques, qui s'appelle interférences.

Les équations qui décrivent la plupart des propriétés ondulatoires des ondes électromagnétiques ont été découvertes dans la deuxième moitié du XIX^e siècle par James Clerk Maxwell, qui a réuni les travaux de plusieurs physiciens sur des sujets différents mais tous en rapport avec les ondes électromagnétiques : électricité, magnétisme, rayonnement... Le résultat consiste en quatre équations, appelées équations de Maxwell.

Nature corpusculaire : D'autres expériences ont montré que la lumière ne pouvait pas être une onde acoustique. En effet, si la lumière était une onde acoustique, il fallait forcément une matière pour lui permettre de se propager, même dans l'espace ou dans les cloches à vide : les physiciens en avaient donc déduit qu'il existait un fluide, l'éther, qui remplissait tout l'espace et conduisait la lumière. Cependant, l'expérience de Michelson-Morley a montré que ce fluide n'existait pas, ce qui remettait en doute la nature ondulatoire de la lumière.

En réalité, la lumière peut se comporter comme une onde ; c'est juste qu'elle n'a pas besoin d'éther pour se propager, ni de quoi que ce soit d'autre.

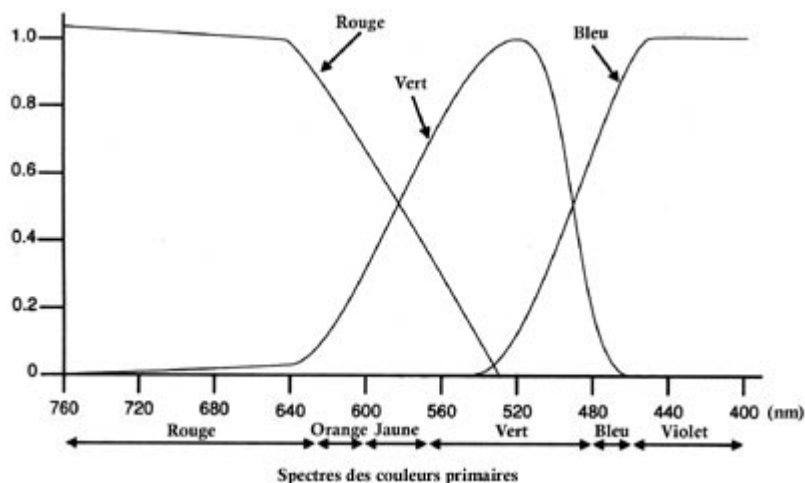
Un peu plus tard, au début du XX^e siècle, Albert Einstein a unifié les travaux de Maxwell et de Max Planck et en a déduit que la lumière (et les autres ondes électromagnétiques) étaient un déplacement de particules qui pouvait se comporter comme une onde selon les cas. Ces particules ont ensuite été nommées photons, du grec photos (φωτός) signifiant « lumière ». Ce sont des particules extrêmement petites de masse nulle.

Les photons sont partout dans la physique moderne, notamment en mécanique quantique (qui étudie les particules). Leur découverte a en particulier permis l'invention du laser.

Les ondes électromagnétiques sont considérées comme portées par le photon - ces photons ne peuvent que se déplacer qu'à la vitesse de la lumière.

Une onde lumineuse est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde correspond au spectre visible, ce qui correspond aux énergies de photon de 1.5 à 3 eV.

La lumière est donc un spectre allant du violet, 380nm, au rouge profond, 780 nm. La fréquence va d'environ 375 THz (rouge) à 750 THz (violet); L'émission de la totalité du spectre donne une impression de lumière blanche. Une lumière colorée présente simplement une forte proportion d'onde d'une partie restreinte du spectre visible. Par exemple, une lumière est rouge simplement parce qu'il y a beaucoup d'onde autour de 680 nm. A l'extrême, une lumière peut être monochromatique lorsqu'elle est constituée uniquement d'ondes de fréquence unique. La quantité du flux de lumière est définie par le mot intensité. L'étude spectrale de la lumière consiste à mesurer la contribution de chaque longueur d'onde dans l'intensité totale.



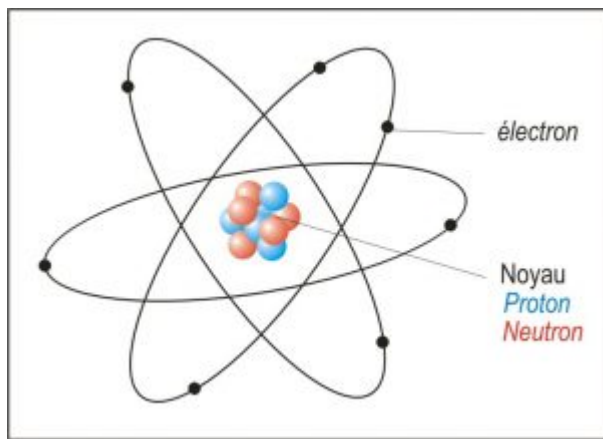
Une source lumineuse émet un flux d'une ou plusieurs ondes électromagnétiques du domaine dit visible. Mais ces ondes n'ont pas obligatoirement, et même presque jamais, leurs plans parallèles. Au niveau atomique, l'émetteur peut au temps t émettre une onde dont le champ électrique nous est vertical, puis au temps $t+1$ émettre une onde, avec la même fréquence ou non, dont le champ électrique nous est horizontal. Le flux est donc un ensemble d'ondes dont les plans d'oscillation sont aléatoirement répartis sur tous les angles possibles de 0 à 360° . Nous pouvons maintenant définir la lumière dite polarisée où toutes les ondes oscillent dans un même plan. Tous les champs électriques, dans une direction de propagation, sont parallèles entre eux (de même que les champs magnétiques qui leur sont perpendiculaires). Je souligne qu'une lumière polarisée n'est pas nécessairement monochromatique et que sa source n'émet pas nécessairement dans une seule direction. De même, les oscillations d'un même plan ne sont pas superposables car le moment d'émission d'une onde n'est pas corrélé avec celui de l'onde précédente. Le LASER est la seule source capable de fournir une lumière monochromatique, polarisée et en phase dans une seule direction. Nous avons alors un flux d'ondes dites cohérentes.

L'interaction lumière-matière peut être décrite, à un niveau macroscopique, comme purement ondulatoire. La théorie ondulatoire repose presque exclusivement sur des notions de géométrie vectorielle qui ne font pas intervenir d'énergie. Mais nous savons **que la lumière peut interagir avec la matière avec un transfert d'énergie**. Le meilleur exemple est la vision où la lumière devient un influx nerveux. Nous sommes alors obligés de définir la lumière comme étant, non plus un rayonnement d'onde, mais un flux de corpuscules matériels: les photons dont la masse est proportionnelle à leur fréquence et inversement proportionnelle au carré de leur vitesse. Chaque photon porte en lui une quantité d'énergie proportionnelle à la fréquence du rayonnement. Mais attention à ne pas se représenter le photon comme un corpuscule de volume fini oscillant le long de sa ligne de propagation. Ce serait une erreur. En fait le photon est une entité abstraite qui permet d'appliquer les lois de la physique classique là où les équations d'onde n'expliquent plus le comportement de la lumière.

Nous avons ainsi, pour comprendre tous les phénomènes, une dualité onde-corpuscule que seule la physique quantique est capable d'expliquer.

L'émission de lumière

L'atome, qui constitue la matière, est formé d'un noyau de neutrons et de protons autour duquel gravitent des électrons.



L'atome est donc un oignon où chaque « pelure », du centre à la périphérie, constitue un domaine de probabilité de présence d'électron de même énergie. Les électrons sont des charges négatives qui sont liées au noyau par diverses forces de liaison. L'énergie absolue d'un électron est l'énergie nécessaire pour l'arracher complètement de l'atome, pour rompre ses forces de liaison. Plus son domaine de présence est éloigné du noyau, moins il faut d'énergie pour l'extraire car les forces de liaison faiblissent avec la distance. Mais avant d'extraire complètement un électron de son atome, nous pouvons le faire changer de domaine en apportant à l'atome l'énergie juste nécessaire. L'électron passe alors de son état fondamental, ou de repos, à un état dit excité, plus éloigné du noyau. La quantité d'énergie absorbée est précise et est une certaine quantité unitaire et indivisible d'énergie appelé quantum, proportionnelle à la constante universelle de Planck h .

L'électron excité est dans un état instable et il va retomber dans son état fondamental en libérant l'énergie précédemment absorbée. Une des multiples formes d'énergie est l'émission d'une onde électromagnétique et le quantum peut alors être directement relié à la fréquence d'oscillation de l'onde. Le quantum, unité d'énergie, et le photon ne font plus qu'un. L'électron a ainsi émit un photon d'énergie $E=h \cdot \nu$, photon qui est, ne l'oublions pas, une onde électromagnétique de fréquence ν . Si l'énergie est d'environ 1 à 6 eV (électron-volt), l'onde électromagnétique fait partie du domaine visible. L'atome est alors source de lumière.

Le plus simple exemple d'émission est la lampe domestique à incandescence. Le filament de tungstène est porté à une température d'incandescence par effet joule, dû au courant électrique. Les électrons des couches externes des atomes de tungstène sont alors dans un état excité ; et ils vont relaxer par émission d'un spectre continu d'ondes de l'infrarouge au proche ultraviolet.

La réflexion de lumière

✘ Nous pensons tous que la réflexion est simplement la déviation des ondes électromagnétiques incidentes. Mais ce n'est pas le cas au niveau atomique. La réflexion doit plutôt être considérée comme une absorption suivie d'une réémission sans perte d'énergie. Le champ électrique de l'onde induit une oscillation des électrons comme toute charge dans un tel champ. Mais comme toute charge oscillante, l'électron est alors une source de rayonnement électromagnétique. Dans tout ce processus, la fréquence est une constante physique. Ceci implique que, dans l'absolu, la lumière réfléchi a la même composition spectrale que la lumière incidente. Mais hors théorie, la réflexion est indissociable des autres phénomènes d'interaction onde-matière. Nous pouvons donc définir la réflectance, rapport du flux réfléchi sur le flux incident, comme étant une mesure de la capacité d'une surface à réfléchir la lumière. Ce facteur de réflexion dépend de la nature de la matière mais aussi de la longueur d'onde du flux incident; Ainsi le spectre réfléchi n'est pas identique au spectre incident. La matière nous apparaît alors colorée, plus ou moins brillante, plus ou moins claire. Par exemple, les feuilles sont vertes parce que la réflectance des verts est beaucoup plus forte que la réflectance des autres couleurs du spectre. Mais **si la lumière incidente n'a pas de composantes vertes, les feuilles seront alors perçues comme noires**. Cette notion est très importante; les objets sont colorés à cause de la réflexion de la lumière mais la perception de la couleur est dépendante de la qualité de la lumière incidente.

De plus, la réflexion peut être spéculaire ou diffuse car cela ne dépend que de l'état de surface. Si les dimensions de la rugosité de surface sont plus petites que la longueur d'onde, la réflexion est dit spéculaire. Les angles de réflexion et

d'incidence sont identiques et dans un même plan perpendiculaire à la surface.

Si, en revanche, l'état de surface est rugueux, il y a, au niveau microscopique, une réflexion spéculaire sur des facettes qui ne sont plus parallèle au plan moyen de la surface. Il en résulte, au niveau macroscopique, une diffusion du flux incident dans toutes les directions. Ainsi à l'instar du miroir métallique, n'importe quelle matière suffisamment polie provoque une réflexion spéculaire.


Nous pouvons enfin aborder deux cas de la réflexion: la réflexion sur une matière diélectrique (non conductrice de courant) et la réflexion sur une surface métallique. Mais pour cela il faut associer la réflexion à une autre interaction: la réfraction.

La réfraction de la lumière

Lorsqu'un faisceau de lumière incident frappe une surface séparant deux milieux transparents, une partie de la lumière est réfléchi tandis que le reste est transmis dans le second milieu. La direction de propagation de la lumière dans ce second milieu n'est pas dans la ligne du faisceau incident. Nous disons alors que la lumière est réfractée et cette déviation est définie comme étant la réfraction. Comme dans le cas de la réflexion, ce n'est pas la courbure des rayons lumineux incidents mais la naissance d'ondes secondaires qui est à l'origine de la réfraction. Toutefois nous pouvons expliquer la réfraction de plusieurs façons qui sont toutes valables mais qui ne demandent pas la même base de connaissance. Considérons le principe d'Huygens.

L'angle de réfraction n'est pas égal à l'angle d'incidence. La vitesse de la lumière dépend du milieu de propagation ; la vitesse de propagation de l'onde sphérique n'a pas la même valeur dans les milieux d'incidence et de transmission. Si la vitesse de transmission est plus petite que la vitesse d'incidence (ou de réflexion), le plan d'ondes résultant à un retard et ce retard se traduit géométriquement par un angle de réfraction plus petit comme nous pouvons le voir sur la figure. Une vitesse plus grande conduit à un angle plus grand.

Nous pouvons calculer la déviation grâce à un seul paramètre physique caractérisant la matière: l'indice de réfraction. En fait, les milieux diélectriques (i.e. non conducteurs) ne sont pas complètement étanches aux champs électrique et magnétique. On parle alors de permittivité au champ électrique et de perméabilité au champ magnétique. Ces deux grandeurs représentent la réponse de la matière, mais aussi du vide, au champ électromagnétique. Ceci se traduit par un changement de la vitesse de propagation de l'onde. En fait la vitesse de la lumière est directement reliée à la permittivité et à la perméabilité par la relation :

 Le vide et toutes les matières transparentes peuvent donc être caractérisés par la valeur de la vitesse de l'onde électromagnétique les traversant. Mais ces grands nombres ne sont pas aisés à manipuler et ne sont pas représentatifs des phénomènes optiques aux interfaces. Nous introduisons alors une seule grandeur pour caractériser un milieu par rapport à un autre, l'indice de réfraction. L'indice de réfraction est simplement le rapport des vitesses de l'onde électromagnétique entre le milieu considéré et celui de référence. Les indices de réfraction sont ainsi relatifs à la vitesse de la lumière dans l'air. Nous parlons d'indice absolu lorsque la référence est le vide où la vitesse de la lumière est de 299.792.458 m/s. En conclusion, retenir que la réfraction est la conséquence optique d'un changement de vitesse lors du passage de l'onde d'un milieu à un autre.

Sources :

<http://photo.geneste.free.fr/technique/lum/lalumiere.html>

http://fr.wikidial.org/wiki/Onde_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique

http://meteosat.pessac.free.fr/Cd_elect/perso.wanadoo.fr/f6crp/elec/propag/prop.htm