

A. Petrenko

Optique Marine

I° Couleur - Interaction de la lumière avec matériaux « transparents »

1) Bref historique et rappels sur la lumière

Siècle		Particule	Onde
fin XVII	Huygens (Hollande 1629-95)		X
fin XVII	Newton (GB 1642-1727); lumière = petites particules 1675 prisme – dispersion des couleurs Théorie de l'émission (forces) -> accélération de la vitesse de la lumière ds l'eau (Théorie fautive voir ci-dessous et Foucault 1850)	X	
XIX	Fresnel (France 1788-1827) interférence; diffraction; polarisation		X
	Foucault (France 1819-68) Théorie des "ondulations"; mesure du ralentissement de la lumière dans l'eau		X
	Maxwell (Ecosse 1831 - 1879) Théorie des ondes électromagnétiques; mais les ondes devraient se propager ds quelque chose ?		X
XX	Planck 1900 émission de quanta ($i=1,2,3,\dots$) quand rayonnement de corps noir Einstein (Suisse, USA 1879-1955) Existence de « particules », expliquée par : - effet photo-électrique mesuré en 1895 - rayonnement d'un corps noir L. De Broglie Energie $E = h \gamma = hc/\lambda$ (1924) G. Lewis Particules nommées « Photons » (1926)	X X X X	 X X
	Böhr (1927) Théorie générale d'optique quantique dualité photons ($L < \lambda$) - ondes ($L > \lambda$)	X	X

Christian Huygens ([La Haye, 1629 -1695](#)) est un [mathématicien](#), un [astronome](#) et un [physicien néerlandais](#). Huygens est également connu pour ses arguments selon lesquels la [lumière](#) est composée d'[ondes](#) (voir : [dualité onde-particule](#)). En réponse aux articles d'[Isaac Newton](#) sur la [lumière](#), en [1672](#), il se lance dans l'étude de la nature de la [lumière](#). Il découvre en [1677](#), grâce aux propriétés des cristaux et de leur coupe géométrique, que les lois de [réflexion](#) et de [réfraction de Snell-Descartes](#) sont conservées si l'on suppose une propagation de la lumière sous la forme d'ondes. La [théorie ondulatoire](#), présentée en [1678](#) et publiée en [1690](#) dans son [Traité de la Lumière](#), sous une forme encore très peu développée est vite éclipsée par les succès newtoniens

Rappels : loi de Snell-Descartes: $n_i \sin i = n_r \sin r$)
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s constante de Planck

Sir **Isaac Newton** (1643 – 1727) est un [philosophe](#), [mathématicien](#), [physicien](#), [alchimiste](#) et [astronome anglais](#). Figure emblématique des sciences, il est surtout reconnu pour sa théorie de la [gravitation universelle](#) et la création, en concurrence avec [Leibniz](#), du [calcul infinitésimal](#). C'est en 1666 qu'Isaac Newton fit ses premières expériences sur la lumière et sa décomposition. Il fit passer des rayons de [Soleil](#) à travers un [prisme](#) produisant un [Arc-en-ciel](#) de couleurs du [spectre visible](#). Auparavant, ce phénomène a été considéré comme si le verre du prisme, avait de la couleur cachée. Newton, analysa alors cette expérience. Comme il avait déjà réussi à reproduire le blanc avec un mini [arc-en-ciel](#) qu'il passa à travers un deuxième prisme, sa conclusion était révolutionnaire : la couleur est dans la lumière et non dans le verre. Ainsi, la lumière blanche que l'on voit est en réalité un mélange de toutes les couleurs du spectre visible par l'œil.

En 1704, il fit publier son traité *Opticks*^[18] dans lequel est exposé sa théorie corpusculaire de la lumière, l'étude de la réfraction, la diffraction de la lumière et sa théorie des couleurs. Dans celui-ci, il démontre que la lumière blanche est formée de plusieurs [couleurs](#) et déclare qu'elle est composée de particules ou de corpuscules. De plus, il ajoute que lorsque celle-ci passe par un milieu plus dense, elle est réfractée par son accélération. Newton émet une théorie de l' "émission ». Attention, son raisonnement, brièvement indiqué ci-dessous, est faux. Lorsque un rayon de lumière passe de l'air à l'eau, la force tangentielle reste identique; la force perpendiculaire à la surface est proportionnelle à n ; comme $n_{\text{air}} = 1$ et $n_{\text{eau}} = 4/3$, du coup $c(\text{eau}) = 4/3 c(\text{air})$. Avec ce raisonnement la vitesse de la lumière serait plus rapide dans l'eau que dans l'air.

Augustin Jean Fresnel (1788 -1827) est un [physicien français](#). Fondateur de l'[optique](#) moderne, il proposa une explication de tous les phénomènes optiques dans le cadre de la [théorie ondulatoire](#) de la [lumière](#). Il a inventé la « lentille de Fresnel », qui est un type de [lentille](#) à courte [distance focale](#) pour un large diamètre (i.e., sans le poids et le volume nécessaire à une lentille standard), très utile pour équiper le système optique des [phares](#) de signalisation marine.

Jean Bernard Léon Foucault (Paris, 1819- 1868) était un [physicien](#) et [astronome français](#). Connu principalement pour son expérience démontrant la rotation de la [Terre](#) autour de son axe ([pendule de Foucault](#)), il détermina aussi la [vitesse de la lumière](#) et inventa le [gyroscope](#). Il propose la théorie des "ondulations"; 2 ondes (1 et 2) parcourant 2 chemins parallèles doivent rester en phase durant le "coude" à l'entrée de l'eau. Le rayon à la corde pénètre le premier et parcourt un chemin plus court dans l'eau que celui qui passe par l'air puis par l'eau

$$\text{distance eau 1} < (\text{distance air} + \text{distance eau 2})$$

Arrivée simultanée $\rightarrow c(\text{eau}) < c(\text{air})$

Il confirme cette théorie par l'expérience en 1850, grâce à un miroir tournant de Sir [Charles Wheatstone](#) ou il mesure la vitesse des courants électriques combiné à un dispositif de miroirs concaves, et montre que la [lumière](#) se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau, invalidant ainsi la théorie corpusculaire au profit de la [théorie ondulatoire](#) de la [lumière](#). Cette expérimentation était très astucieuse et un défi incroyable car la lumière parcourt une distance de 3 m en 1/100 000 000 ième de seconde (100 000 fois plus précis qu'une arrivée de Formule 1) grâce à un miroir tournant au centre d'autres miroirs concaves (réflexion différente pour un faisceau passant dans l'eau versus un faisceau passant dans l'air).

James Clerk Maxwell (1831 -1879, Édimbourg) était un [physicien](#) et [mathématicien écossais](#). Il est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations, les [équations de Maxwell](#), l'[électricité](#), le [magnétisme](#) et l'[induction](#), en incluant une importante modification du [théorème d'Ampère](#). Ce fut à l'époque le modèle le plus unifié de

l'[électromagnétisme](#). Il est également célèbre pour avoir interprété, dans un article en quatre parties publié dans *Philosophical Magazine* intitulé *On Physical Lines of Force*, la [lumière](#) comme étant un phénomène électromagnétique en s'appuyant sur les travaux de [Michael Faraday](#). Il a notamment démontré que les champs [électriques](#) et [magnétiques](#) se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière.

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 - 1947) est un [physicien allemand](#), lauréat du [Prix Nobel de physique](#) en 1918. Travaillant à formuler avec exactitude le second principe de la [thermodynamique](#), Planck s'intéresse dès 1894 au rayonnement électromagnétique du corps noir. Il adopte les méthodes statistiques de Boltzmann. En 1899, il introduit les [constantes de Planck](#) (h) et de [Boltzmann](#) (k) en même temps que la notion des [quanta](#). En octobre 1900, il détermine la loi de répartition spectrale du rayonnement thermique du corps noir, sans en maîtriser l'interprétation physique. C'est à la fin de 1900 qu'il présente sa découverte à la société de physique de Berlin. C'est la naissance de la théorie des quanta, à l'approfondissement de laquelle il participera peu, laissant [Einstein](#) l'étayer solidement.

Albert Einstein, (Allemagne, 1879-1955 USA), physicien, publie sa théorie de la [relativité restreinte](#) en 1905, et une théorie de la gravitation dite [relativité générale](#) en 1915. Il contribue largement au développement de la [mécanique quantique](#) et de la [cosmologie](#), et reçoit le [prix Nobel de physique](#) en 1921 pour son explication de l'[effet photoélectrique](#). Son travail est notamment connu pour l'équation $E=mc^2$, qui établit une équivalence entre la matière et l'énergie d'un système.

Einstein réinvestit les résultats de Planck pour étudier l'effet photoélectrique, et il conclut en énonçant que la [lumière](#) se comportait à la fois comme une [onde](#) et à la fois comme un flux de [particules](#). L'effet photoélectrique a donc fourni une confirmation simple de l'hypothèse des quanta de [Max Planck](#). En 1920, les quanta furent appelés les [photons](#).

Les photons ont originellement été appelés « **quanta de lumière** » (*das Lichtquant*) par [Albert Einstein](#)^[2]. Le nom moderne « photon » est dérivé du mot grec qui signifie lumière, et a été choisi en 1926 par le chimiste [Gilbert N. Lewis](#), dans la publication d'une théorie spéculative^[8] dans laquelle les photons étaient « incroyables et indestructibles ». Bien que la théorie de Lewis ne fut jamais acceptée, étant contredite par plusieurs expérimentations, son nouveau nom, *photon*, fut adopté immédiatement par la communauté scientifique.

Louis Victor de Broglie (1892-1987), était un [mathématicien](#), [physicien](#) et [académicien français](#), lauréat, en 1929, du [prix Nobel de physique](#) pour sa « théorie sur la nature ondulatoire de l'électron ». En [physique](#), l'**hypothèse de De Broglie** est l'affirmation que toute matière est dotée d'une [onde](#) : ceci donne lieu à la [dualité onde-particule](#). De plus, la [longueur d'onde](#) et la [quantité de mouvement](#) d'une particule sont reliées par une équation simple.

Niels Henrik David Bohr (1885-1962, [Copenhague](#)) est un [physicien danois](#). Il est surtout connu pour son apport à l'édification de la [mécanique quantique](#), pour lequel il a reçu de nombreux honneurs (1922 Prix Nobel de Physique). Bohr est à l'origine du [principe de complémentarité](#) : des objets peuvent être analysés séparément et chaque analyse fera conclure à des propriétés contraires. Par exemple, les physiciens pensent que la [lumière](#) est à la fois une [onde](#) et un faisceau de [particules](#), les photons. En octobre 1927, il rencontre pour la première fois [Albert Einstein](#) au cours du cinquième [congrès Solvay](#) avec qui il aura de très fréquents entretiens jusqu'en 1935. Einstein défend le caractère provisoire de la théorie quantique, ne se satisfaisant pas de cette dernière au niveau épistémologique. Bohr, au

contraire, considère qu'il s'agit d'une théorie achevée. Ces réflexions et discussions sont l'une des sources de ses *Écrits philosophiques*, publiés en quatre volumes ([1963](#) et [1998](#)).

La lumière

Théories

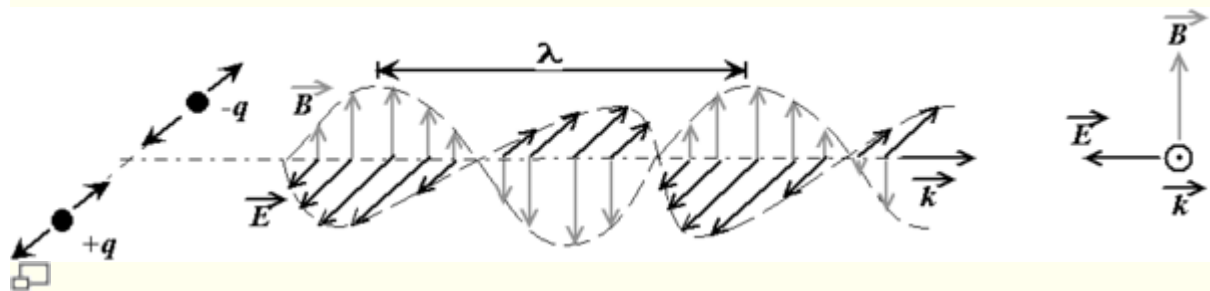
La **lumière**, comme tout phénomène de déplacement, peut se concevoir comme une [onde](#) ou comme un flux de [particules](#) (appelées en l'occurrence [photons](#)).

Les [lois de Maxwell](#), ou à une échelle plus humaine les lois de l'[optique géométrique](#), décrivent bien le comportement de ces ondes. Cette description classique est tout à fait valide et très utilisée au sein de la communauté scientifique. Cependant, elle n'explique pas la quantification de l'énergie transportée par le rayonnement, phénomène observé et expliqué par [Albert Einstein](#) dès [1913](#) en postulant l'existence des [photons](#).

Toutefois, la [physique moderne](#) considère que chacun de ces photons peut lui-même être considéré comme une [onde](#) (ce qu'on appelle la [dualité onde-particule](#) ou onde-corpuscule en [mécanique quantique](#)).

Onde

Une [onde plane](#) est une bonne approximation de la plupart des ondes lumineuses. Comme toute onde électromagnétique qui se [propage](#), elle est constituée d'un [champ électrique](#) et d'un [champ magnétique](#) tous deux perpendiculaires à la direction de propagation :



Onde lumineuse avec champ magnétique \vec{B} et champ électrique \vec{E} à angle droit l'un de l'autre (dans le cas d'une polarisation rectiligne).

Vitesse

La vitesse de la lumière dans le vide, c (comme *célérité*), est une constante de la physique. C'est la vitesse maximale permise pour tout déplacement d'information ou d'un objet matériel par la [théorie de la relativité](#). Cette propriété a été induite de l'[expérience d'interférométrie de Michelson et Morley](#) et a été clairement énoncée par [Albert Einstein](#) en 1905.

De ce fait, la vitesse de la lumière est *exacte*, car elle ne dépend pas d'une *mesure* (imprécise et susceptible de changement avec des progrès de mesure).

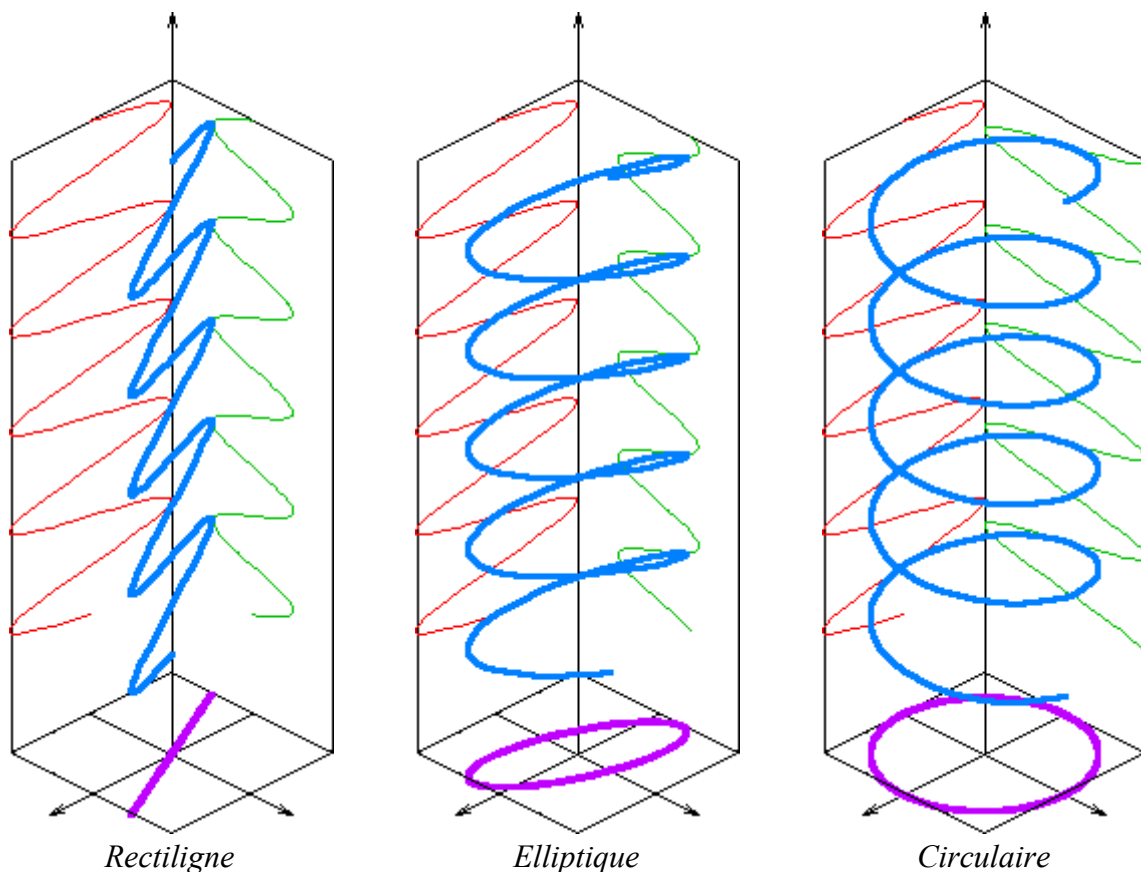
$c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ ou, approximativement: $c = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$

Polarisation

La polarisation caractérise l'orientation du champ électrique dans le plan orthogonal à la propagation.

On décide, par convention, d'ignorer le champ magnétique par la suite, car il peut être déterminé à partir du champ électrique. On considère donc uniquement le champ électrique \vec{E} perpendiculaire à la direction de propagation.

La figure décrite par le champ électrique est alors une [ellipse](#), qui peut devenir un [cercle](#), ou s'aplatir en une ligne. Ces différentes formes définissent l'**état de polarisation** de l'onde : on dit que l'onde est polarisée *elliptiquement*, *circulairement* ou *rectilignement*. Mais, cette onde se *propage*, donc l'ellipse décrite par le champ \vec{E} est en réalité une [hélice](#), comme le montrent les figures ci-dessous (en trois dimensions).



Ce phénomène s'explique grâce à l'[équation de propagation](#) de l'onde lumineuse. En décomposant le champ électrique en ses deux *composantes* orthogonales (en vert et rouge sur les schémas précédents), on s'aperçoit qu'elles ont toutes deux une évolution [sinusoïdale](#). Lorsque les deux composantes oscillent en même temps, on obtient une polarisation rectiligne. Si elles présentent un [déphasage](#) (c'est-à-dire que l'une est en retard par rapport à l'autre), alors on obtient une polarisation elliptique.

Dans le cas particulier où ce déphasage vaut 90° et que les deux composantes ont même [amplitude](#), la polarisation est circulaire. On distingue alors les cas de polarisation **circulaire gauche** et **circulaire droite** selon le sens de parcours.

Remarque : Cette décomposition en deux composantes orthogonales est arbitraire. Il est aussi possible, par exemple, de décomposer en deux polarisations circulaires tournant en sens contraires.

Monochromatisme et polychromatisme - Cohérence

La lumière est constituée d'ondes électromagnétiques. De manière générale, une onde est caractérisée par sa [longueur d'onde](#) et sa [phase](#). La longueur d'onde correspond à la couleur de la lumière. Ainsi, une lumière constituée d'ondes de la même longueur d'onde, est dite *monochromatique*.

Si en plus toutes les ondes ont la même phase, alors la lumière est cohérente : c'est ce qui se passe dans un [laser](#).

L'explication ci-dessus sur la polarisation n'est en fait strictement valable que pour une onde [monochromatique](#), et plus particulièrement une lumière [cohérente](#). Dans les autres cas, les effets sont un peu différents.

La lumière incohérente

La lumière naturelle est composée de [trains d'ondes](#), courtes (10^{-8} s) impulsions lumineuses ayant chacune une amplitude, une [fréquence](#), et une polarisation [aléatoires](#). La lumière naturelle est donc décrite comme **incohérente et non polarisée**.

De même, dans la lumière d'une [ampoule à filament](#), on observe que la lumière est non polarisée. Cela s'explique par le fait que cette lumière est elle aussi composée de [trains d'ondes](#), courtes impulsions lumineuses ayant chacune une amplitude, une [fréquence](#), et une polarisation [aléatoires](#). Ainsi, ce que nous observons est une [moyenne](#) de tous ces trains d'ondes qui nous apparaît non polarisée.

Toutefois, la lumière incohérente peut aussi présenter, en partie, une polarisation elliptique, circulaire, ou rectiligne. Pour déterminer alors quelle est la polarisation d'une lumière, on utilise des [polariseurs](#) et des [lames à retard](#).

Couleur - Définition

couleur	longueur d'onde (nm)	fréquence (THz)
rouge	~ 625-740	~ 480-405
orange	~ 590-625	~ 510-480
jaune	~ 565-590	~ 530-510
vert	~ 520-565	~ 580-530
cyan	~ 500-520	~ 600-580
bleu	~ 446-500	~ 690-600
violet	~ 380-446	~ 790-690

THz = Tera Hertz = 10^{12} Hertz

L'ensemble des couleurs est défini, actuellement, par ses trois caractéristiques de **teinte**, **valeur** et **saturation**.

L'ensemble des fréquences des ondes lumineuses forme le [spectre](#) des teintes (souvent appelé spectre des couleurs) allant des [infrarouges](#) aux [ultraviolets](#).

- On nomme « **teinte** », ou **couleur**, la (ou les) fréquences engendrant la couleur.
- On nomme « **valeur** » (ou **intensité**) l'amplitude lumineuse définissant la couleur (nombre de photons de cette couleur reçus par l'œil). Plus elle est proche du [noir](#), plus la valeur est basse.
- On nomme « **saturation** » la vivacité (la pureté) d'une couleur, et par opposition, on appelle désaturation, son mélange, plus ou moins important, avec un [gris](#) de même valeur.

On nomme « [gris](#) » les couleurs intermédiaires entre le [blanc](#) et le [noir](#). Chacun des gris peut être considéré comme une teinte dépourvue de couleur ; le noir et le blanc sont des gris extrêmes. Le noir est un gris de valeur nulle et correspond à l'absence de toute lumière (aucune lumière n'est reçue par l'œil). Le blanc est un gris de valeur maximale et peut être considéré comme l'ensemble des couleurs.

La représentation cylindrique (s, t, i) de Munsell correspond à un graphe géométrique (r,theta,z) ou r correspond à la saturation, theta à la teinte et z à l'intensité.

Synthèse additive



Le principe de la synthèse additive des couleurs consiste à s'efforcer de reconstituer, pour un œil humain, l'équivalent (l'apparence) de toute couleur visible, par l'addition, selon des proportions bien choisies, de lumières provenant de trois sources monochromatiques (par exemple des spots) dont les longueurs d'onde sont choisies une fois pour toutes pour répondre au mieux à cet objectif.

Le principe de la synthèse additive des couleurs consiste à s'efforcer de reconstituer, pour un œil humain, l'équivalent (l'apparence) de toute couleur visible, par l'addition, selon des proportions bien choisies, de lumières provenant de trois sources monochromatiques (par exemple des spots) dont les longueurs d'onde sont choisies une fois pour toutes pour répondre au mieux à cet objectif.

Ce système de mélange de lumières signifie que plus on ajoute de couleurs plus on obtient de clarté. Par exemple, le vert et le rouge donnent le jaune indéniablement plus clair. On parle dans ce cas de système additif.

En théorie, ces trois longueurs d'onde optimales, que l'on appelle [couleurs primaires](#), sont celles, complètement saturées, dont les teintes correspondent aux maxima de sensibilité des trois types de cellules en forme de cône qui tapissent la rétine d'un œil humain normal (donc non atteint de [daltonisme](#) ou autre dyschromatopsie).

Les trois couleurs primaires sont les suivantes :

- [rouge](#) primaire ;
- [Vert](#) primaire ;
- [Bleu](#) primaire.

Tout ceci correspond à ce qu'on appelle en français le système [RVB](#) ou en [anglais RGB](#) (*Red, Green, Blue*).

La décomposition de la couleur par les systèmes humains en rouge, vert et bleu, est surtout due au fait que ce sont les 3 couleurs auxquelles sont le mieux adaptés les 3 types de [cônes](#) qui servent à la réception de la couleur dans l'[œil](#) humain (les [bâtonnets](#) sont eux plutôt sensibles à l'intensité de la lumière) :

- Les cônes L, sensibles aux ondes longues (580 [nm](#)), donc les rouges
- Les cônes M, sensibles aux ondes moyennes (545 nm), donc les verts
- Les cônes S, sensibles aux ondes courtes (440 nm), donc les bleus

Les trois couleurs secondaires dans le système additif sont :

- [cyan](#) (lumières verte et bleue, complémentaire de la rouge) ;
- [magenta](#) (lumières rouge et bleue, complémentaire de la verte) ;
- [jaune](#) (lumières verte et rouge, complémentaire de la bleue).

qui sont en fait les couleurs primaires du **système soustractif**.

La synthèse dite soustractive



En [imprimerie](#)-couleurs, en [peinture](#) et dans l'art du [vitrail](#), il ne peut être question d'additionner des couleurs par mélange de lumière, mais plutôt de couleurs pigments.

Tous les corps opaques, quand ils sont éclairés, réfléchissent une partie ou toute la lumière qu'ils reçoivent et absorbent le reste. On peut donc obtenir les couleurs du spectre soit en mélangeant des pigments soit en filtrant une partie du spectre qui éclaire l'objet.

Les pigments qui se mélangent absorbent de plus en plus de lumière et deviennent de plus en plus sombre. Par exemple le jaune et le magenta donnent le rouge-orangé.

On parle dans ce cas de [synthèse soustractive](#). Et, dans ce cas, les couleurs primaires, appelées aussi couleurs fondamentales associées pour les différencier des couleurs primaires du système additif car elles correspondent aux couleurs secondaires du système additif.

- [cyan](#) fondamentale ;
- [magenta](#) fondamentale ;
- [jaune](#) fondamentale.

donne le système [CMJ](#) (en anglais CMY ou YMC).

En théorie, et si nous disposions de pigments parfaits, l'utilisation des trois fondamentales permettrait d'obtenir :

- le [bleu](#) en mélangeant le [cyan](#) et le [magenta](#) ;
- le [vert](#) en mélangeant le [cyan](#) et le [jaune](#) ;
- le [rouge](#) en mélangeant le [magenta](#) et le [jaune](#).

Dans la pratique, la synthèse soustractive à partir des colorants courants ne permet pas d'obtenir l'ensemble des couleurs visibles par l'œil humain. En effet, lorsque l'on mélange deux matériaux colorés, on en obtient bien la teinte désirée, mais celle-ci perd en vivacité, et l'ajout de blanc pour compenser cette perte n'est pas satisfaisant car le blanc désature la teinte et ne permet donc pas d'obtenir la valeur recherchée.

Le **calcul soustractif** des couleurs (ou [synthèse soustractive](#)) est le calcul fait par retrait de certaines [longueurs d'onde](#) de la lumière, et donc sur ce qui n'est pas source de lumière. Par exemple, l'herbe ou les feuilles des arbres nous paraissent vertes, car elles absorbent la complémentaire du vert, c'est-à-dire les violets et ultraviolets. Ce sont ces ondes qu'elles utilisent dans la [photosynthèse](#).

Le **calcul additif** des couleurs (ou [synthèse additive](#)) est le calcul fait par addition des longueurs d'onde de sources lumineuses. Par exemple, Si les deux composantes verte et rouge

d'un moniteur d'ordinateur sont allumées, les couleurs des phosphores associés (juxtaposés) se *superposent* en raison de la mauvaise résolution de l'œil, et on obtient une couleur jaune.

Quelques rappels de physique

Émission

Un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne (énergie microscopique) en rayonnement thermique.

Absorption

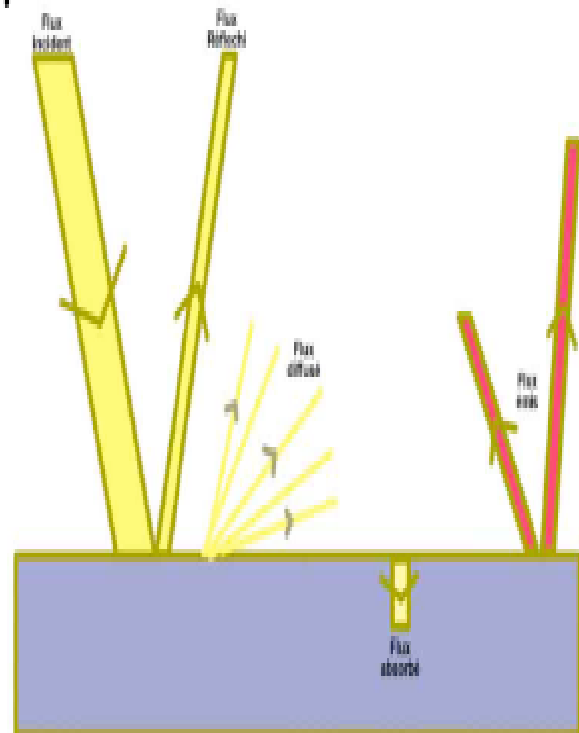
Il s'agit de l'opération inverse. Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé

Réflexion et diffusion

Au lieu d'être absorbé, le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi.

Dans ces conditions on distingue 2 cas :

- Le renvoi obéit aux lois de l'optique géométrique (un angle d'incidence, un angle de réflexion). Il s'agit alors de réflexion.
- Le renvoi se fait dans toutes les directions (même si l'on a une seule direction incidente). On parle alors de diffusion.



Transparence et opacité

Un milieu peut transmettre intégralement l'onde incidente, il est alors appelé milieu transparent. Le vide est un exemple de milieu transparent. En première approximation, le verre est aussi un milieu transparent pour des longueurs d'ondes dans le domaine du visible.

Inversement, un corps ne transmettant aucune partie du rayonnement incident est dit corps opaque.

Le corps noir

Le corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit.

Dans ces conditions, le flux réfléchi est nul et le flux partant est seulement constitué du flux émis.

2) Interaction avec un matériau transparent (ci-dessus).

3) Couleur par radiation – Emission de lumière par un corps chaud

* La **loi de Planck** définit la distribution de luminance monochromatique énergétique du rayonnement thermique du **corps noir** en fonction de la **température** thermodynamique. La formule est compliquée. Lorsque le rayonnement se propage dans un milieu d'indice de réfraction 1, ce qui est le cas du vide absolu, ou de l'air en première approximation, la loi de Planck s'exprime sous une forme plus « simple » :

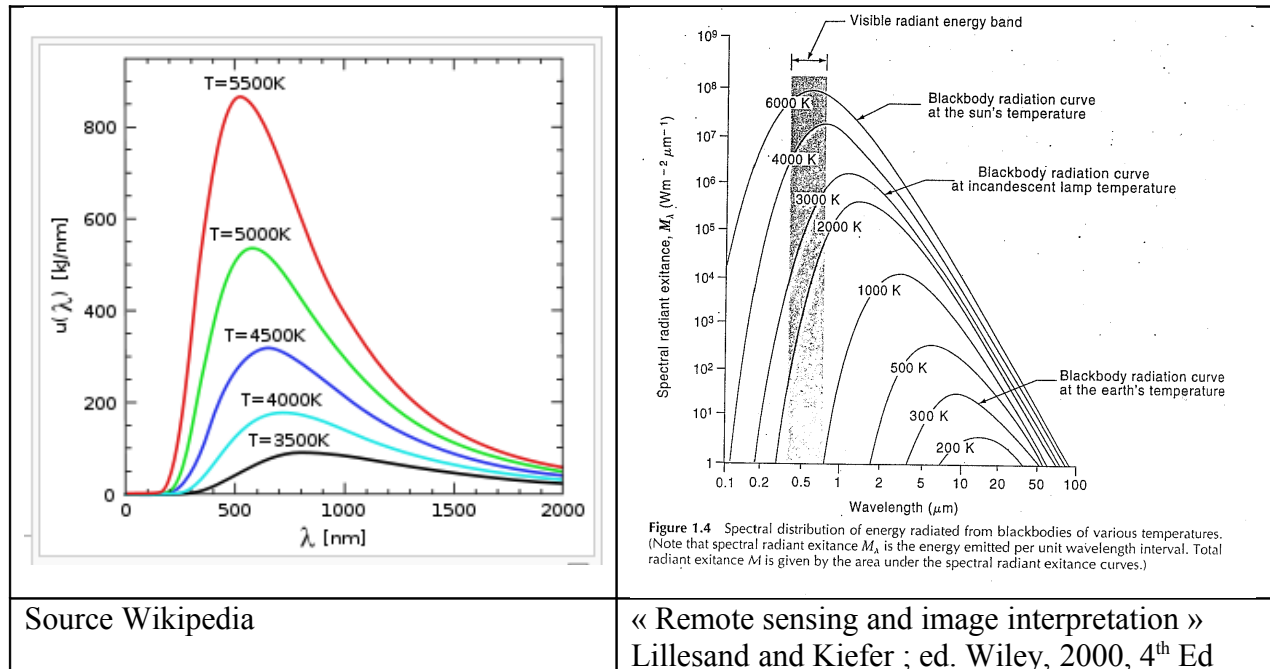
$$L_{\lambda} = \frac{1}{\pi} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

où c_1 et c_2 sont des constantes, λ longueur d'onde du rayonnement
 T est la **température** de la surface du corps noir en kelvins

[Rappel : Le **kelvin** (symbole **K**, du nom de **Lord Kelvin**) est l'unité **SI** de **température thermodynamique**.

A la différence du **degré Celsius**, le kelvin est une mesure absolue de la température qui a été introduite grâce au **troisième principe de la thermodynamique**. La température de 0 K est égale à -273,15°C et correspond au **zéro absolu** (le point triple de l'eau est à +0,01°C).

N'étant pas une mesure relative, le kelvin n'est jamais précédé du mot « degré » ni du symbole « ° », contrairement aux degrés **Celsius** ou **Fahrenheit**].



* La **loi de Stefan-Boltzmann** établit que la **puissance** totale rayonnée par unité de surface du **corps noir** (**exitance** énergétique du corps noir) s'exprime par la formule :

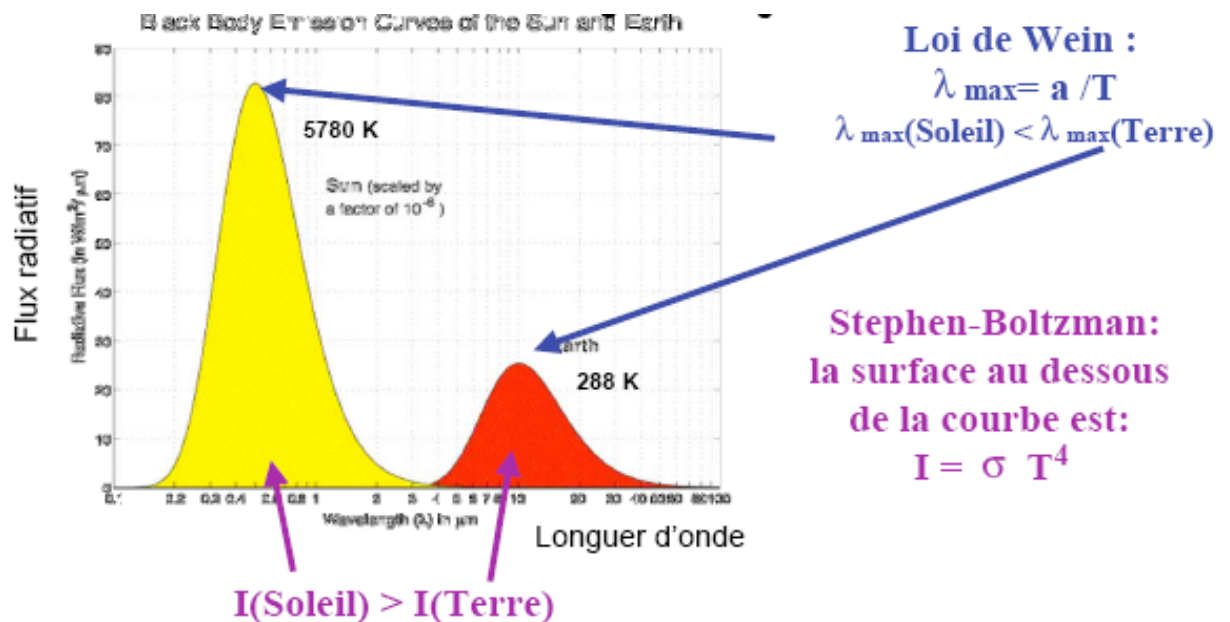
$$M = \sigma T^4$$

où σ est la [constante de Stefan-Boltzmann](#) (aussi appelée **constante de Stefan**)
 $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{/K}^4\text{]}$
 et T température en kelvin

* **La loi de Wien** indique que longueur d'onde du maximum d'intensité de la courbe de Planck est inversement proportionnelle à la température:

$$\lambda_m = a/T \quad \text{en } [\mu\text{m}]$$

avec $a = 2898 \mu\text{mK}$
 et T température en Kelvin



4) Indice de réfraction

L'**indice de réfraction** d'un milieu à une longueur d'onde donnée mesure le facteur de réduction de la [vitesse de phase](#) de la lumière dans le milieu.

Un milieu est caractérisé par son **indice de réfraction** $m = c/v$, où c est la célérité de la lumière dans le vide et v sa vitesse dans le milieu considéré.

Cet indice est un nombre complexe $m = n - i k$

Il est relié à la [permittivité diélectrique](#) ϵ , à la [perméabilité magnétique](#) μ , et à la conductivité électrique σ .

$$m^2 = (n^2 - k^2) - i 2nk = \mu\epsilon c^2 - i 2\pi\mu\sigma c^2/\gamma$$

avec c vitesse de la lumière dans le vide et γ fréquence de la lumière.

Sa partie complexe étant extrêmement petite, l'indice de réfraction est plus connu sous la forme de sa partie réelle n .

Partie réelle n

La valeur de l'indice dépend généralement de la [longueur d'onde](#) du rayon lumineux utilisé. La première conséquence est l'effet sur la réfraction : l'angle de réfraction n'est pas le même pour différentes « couleurs ». Ceci explique la décomposition de la lumière par un prisme (comme illustré sur la pochette de l'album des [Pink Floyd](#) *The Dark Side of the Moon*) ou par des gouttes d'eau ([arc-en-ciel](#)). Ce phénomène est aussi responsable des [aberrations chromatiques](#) dans les instruments d'optique. La variation de l'indice de réfraction d'un milieu transparent dans le spectre visible est appelée [dispersion](#).

L'indice d'un milieu dépend aussi des paramètres qui caractérisent le milieu : température, pression, densité, etc.... En général, si T baisse, n augmente ; si S augmente, n augmente ; et si p augmente, n augmente aussi. Les relations sont parallèles aux relations de l'augmentation de densité du milieu, donc si la densité augmente, n augmente. Ainsi, l'indice de l'[air](#) est égal à 1,000 292 6 dans les conditions normales de température et de pression, mais cet indice dépend de la masse volumique de l'air, et sa variation continue entre des couches d'air de température différente. Ceci permet d'expliquer les [mirages](#).

L'indice dépend aussi de la polarisabilité (faculté des charges électriques à s'aligner dans un champ électrique appliqué).

Partie complexe

La partie imaginaire de l'indice est appelée [coefficient d'extinction](#). Il est à noter que dans le cas où on choisit une dépendance temporelle $e^{i\omega t}$ au lieu de $e^{-i\omega t}$, l'indice complexe prend la forme $n - ik$. Si l'on prend une dépendance temporelle en $e^{-i\omega t}$, l'indice complexe prend la forme $n + ik$.

Grâce une relation liant nk ($nk = \pi\mu\sigma c^2/\gamma$) et l'équation générale de m , on peut en déduire que : $k(\lambda) = \lambda a(\lambda)/(4\pi)$ [Kerber, 1969], avec λ longueur d'onde de la lumière.

k dépend de la longueur d'onde de la lumière et de l'absorption du milieu à cette longueur d'onde.

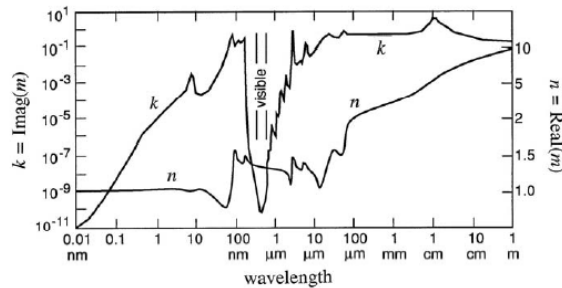


Fig. 3.3. The optical constants of pure water. The left axis gives the imaginary part of m , and the right axis gives the real part of m , where m is the complex index of refraction. [redrawn from Zolotarev and Demin (1977), with permission]

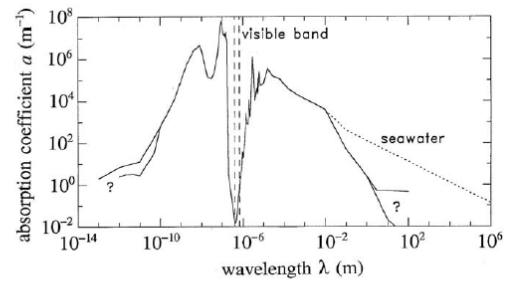


Fig. 3.4. Spectral absorption coefficient of pure water (solid line) and of pure sea water (dotted line) as a function of wavelength. [drawn from data compiled in Hale and Querry (1973), Jackson (1975), Smith and Baker (1981), and Zolotarev and Demin (1977)]

Source : « Light & Water : Radiative transfer in natural waters », Mobley, 1994, Ed Academic Press

Valeurs

$n_{\text{air}} = 1,000\,292\,6$ soit $n = 1$

$n_{\text{eau pure}} = n_w = 1,329\,128$ soit $n_w = 1,33$ pour $\lambda = 700\text{ nm}$ – $1,34$ pour $\lambda = 400\text{ nm}$

$n_{\text{eau salée}} = 1,33 - 1,367$

$\text{phyto vivant} = (1,01 - 1,09) * n_w$

$\text{particules inorganiques} = (1,15 - 1,2) * n_w$

5) Couleur par réfraction

a) Rappel sur la réfraction

La **réfraction**, en [physique](#) des [ondes](#) — notamment en [optique](#), [acoustique](#) et [sismologie](#) — est un phénomène de déviation d'une [onde](#) lorsque sa vitesse change entre deux milieux. La réfraction survient généralement à l'interface entre deux milieux, ou lors d'un changement de [densité](#) ou d'[impédance](#) du milieu.

On peut représenter une telle onde par deux approches :

- par son [front d'onde](#) : c'est la ligne que décrit une vague dans l'eau ([optique ondulatoire](#) et [sismologie](#)) ;
- par un rayon : c'est la direction de propagation de l'onde, perpendiculaire au front d'onde ([optique géométrique](#)).

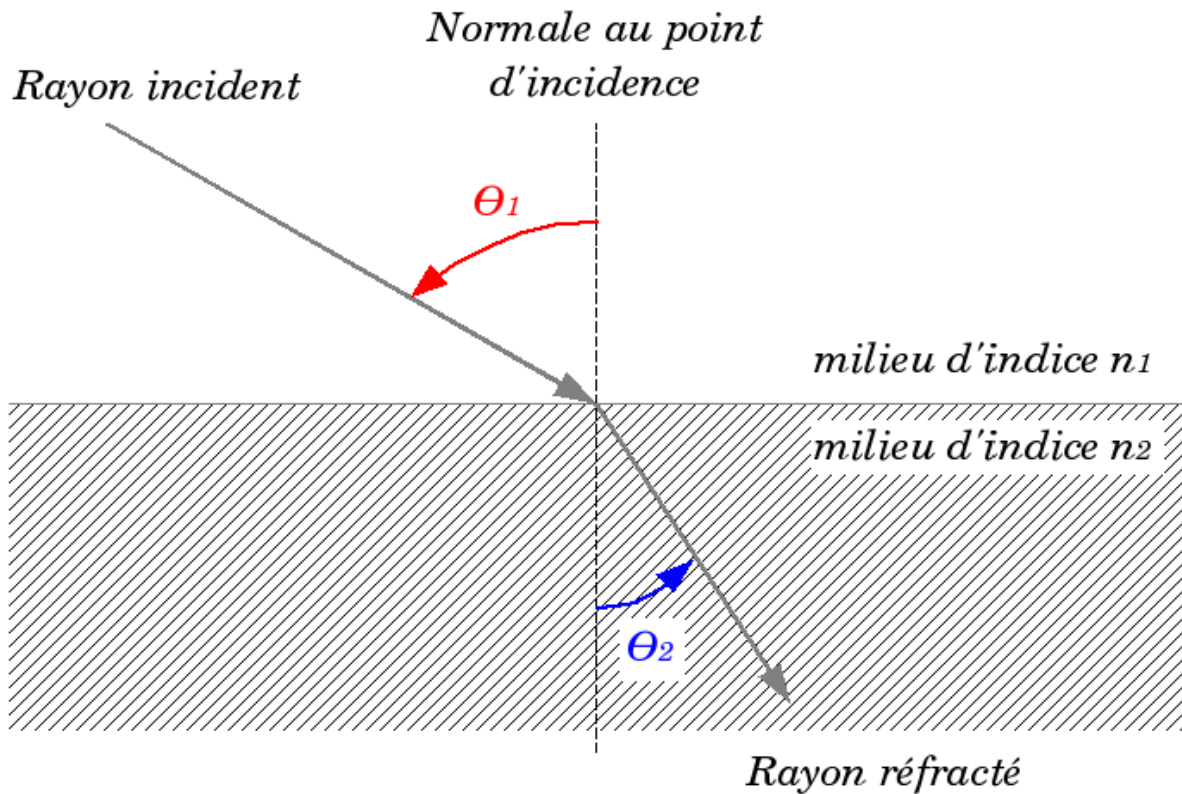
Les deux modèles sont équivalents dans le cas de la réfraction, cependant on préférera le premier pour *expliquer* le phénomène, et le second pour le *quantifier*.

Le premier qui a mentionné la loi de réfraction est *Ibn Sahl* (c. 940-1000).

Elle est souvent nommée comme la Loi de Snell-Descartes (la 2^{nde}) :

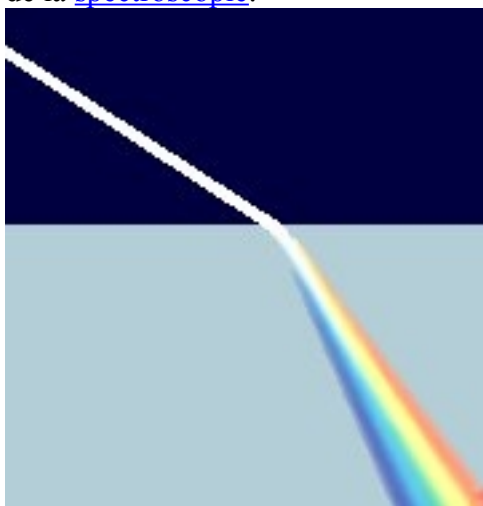
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2).$$

Pour cours de Houles-vagues, voir l'animation du phénomène de réfraction sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_réfraction

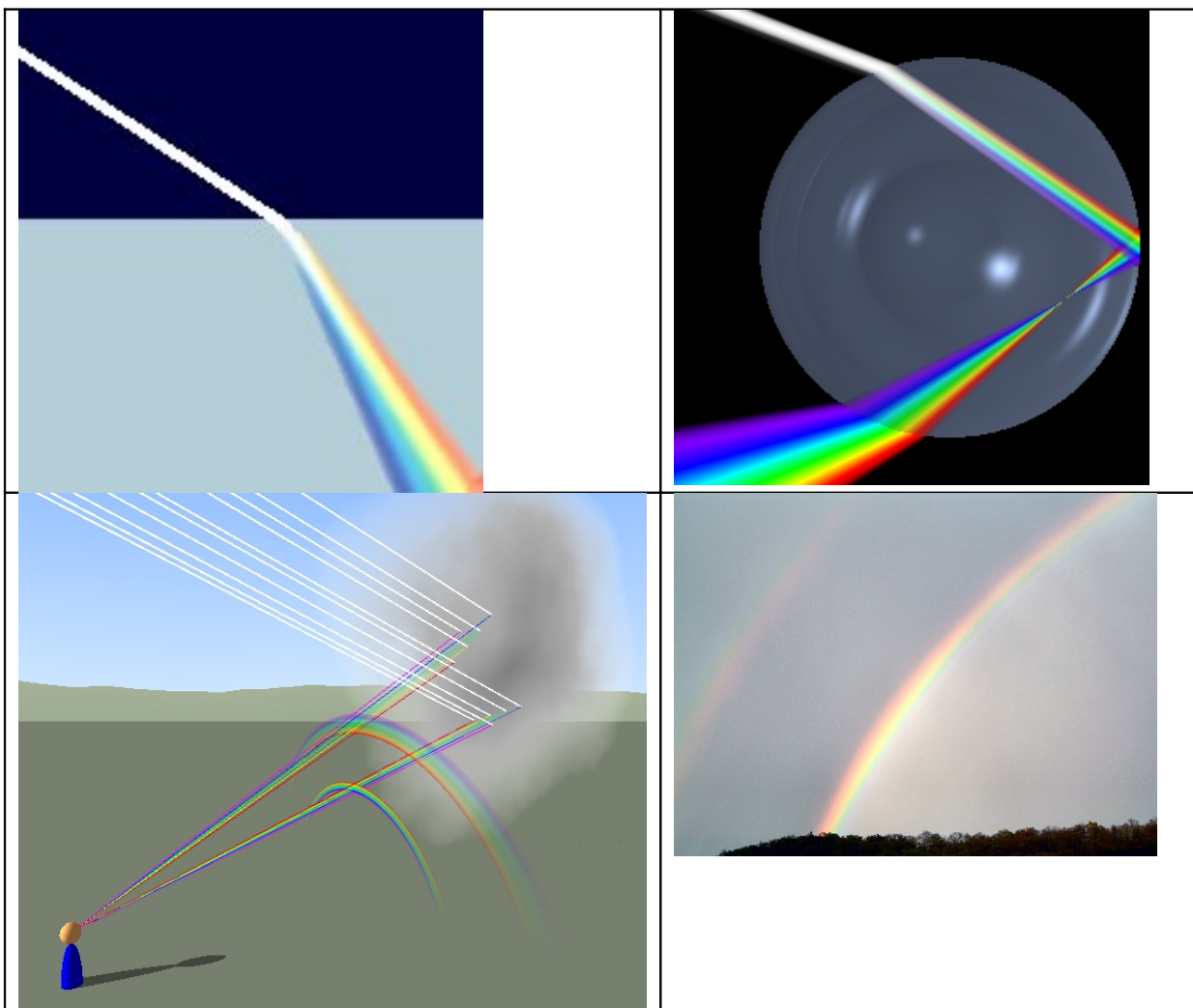


b) Couleurs dues à la réfraction

Une [onde](#) lumineuse est caractérisée par son spectre, qui est la répartition de l'intensité émise en fonction de la [longueur d'onde](#). Dans le cas de la lumière visible, la longueur d'onde est reliée à la couleur perçue par l'œil. En général, une onde lumineuse est polychromatique, c'est-à-dire qu'elle est composée de plusieurs longueurs d'onde. Ainsi, la lumière du soleil contient la plupart des couleurs visibles. La dispersion va permettre de les séparer et de visualiser ainsi les couleurs qui composent le rayonnement, ce qui permet notamment de faire de la [spectroscopie](#).



L'un des exemples visibles dans la vie courante est l'[arc-en-ciel](#). L'arc-en-ciel observable à l'extérieur est le résultat de la dispersion de la lumière du soleil par les gouttelettes d'eau en suspension dans l'[air](#). Le calcul du phénomène d'arc-en-ciel démontre que, pour le voir, il faut toujours tourner le dos au soleil ; c'est une chose facile à vérifier.



Source : Wikipedia – Arc-en-ciel

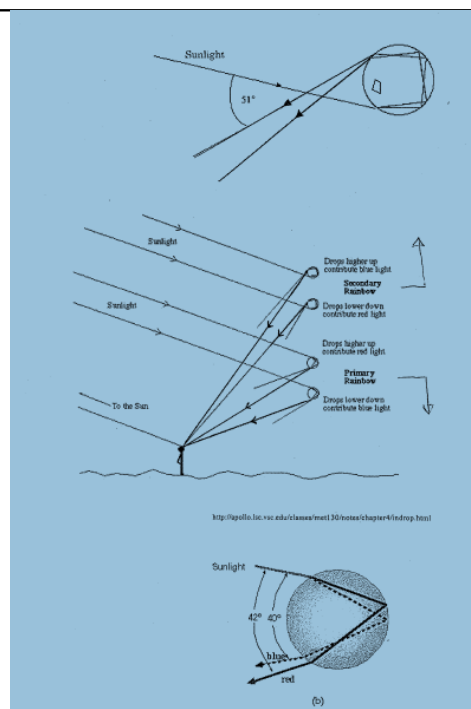
Arc-en-ciel

Primaire 1 reflexion dans la goutte

Secondaire 2 reflexions dans chaque goutte

Il existe de nombreux types de halos, tous formés par l'interaction entre la lumière solaire (directe ou renvoyée par la lune) et des cristaux de glace en suspension dans l'air ou présents dans les nuages visibles de la haute [troposphère](#), entre 5 et 10 km d'altitude, notamment dans les [cirrostratus](#). La forme et l'orientation particulière des cristaux, ainsi que l'incidence du rayonnement lumineux sont responsables du type de halo observé. La lumière est [réfléchie](#) et [réfractée](#) par ces cristaux et sa lumière peut être [dispersée](#), comme pour un [arc-en-ciel](#).

Ex « [petit halo](#) », cercle décalé de 22° par rapport à la source lumineuse, blanc avec une frange intérieure rouge ; « [grand halo](#) », cercle décalé de 46° par rapport à la source.



6) Couleur due à la réflexion

Les **coefficients de Fresnel** interviennent dans la description du phénomène de [réflexion-réfraction](#) des [ondes électromagnétiques](#) à l'interface entre deux milieux, dont l'indice de réfraction est différent. Ils expriment les liens entre les amplitudes des ondes réfléchies et transmises par rapport à l'amplitude de l'onde incidente.

Pour cela on introduit le coefficient de réflexion en amplitude r et le coefficient de transmission en amplitude t du champ électrique tels que :

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad \text{et} \quad t = \frac{E_t}{E_i}$$

où E_i , E_r et E_t sont les amplitudes associées respectivement au champ électrique incident, réfléchi et transmis (réfracté).

Considérons 2 milieux, d'indices de réfraction différents, séparés par une interface plane.

L'onde incidente est une onde plane, de vecteur d'onde \vec{k} , et de pulsation ω . En introduisant, pour chaque milieu, la relation de dispersion $k = \omega n/c$, on obtient les coefficients de Fresnel en fonction des caractéristiques de l'incidence (n_1, θ_1) et de la réfraction (n_2, θ_2) :

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad t_{TE} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

Note : les indices de réfraction étant complexes, la polarisation de l'onde transmise et réfléchie peut être modifiée par rapport à l'onde incidente.

A) cas d'une surface polie plane

Si $\theta_1 = \theta_2$, $r = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ et $t = (2n_1)/(n_1 + n_2)$

L'œil est sensible à l'intensité du signal, soit au carré de r .

Si on regarde du verre dans l'air, $r = 0,03-0,04$; soit il y a 3-4% de réflexion

C'est très peu mais peut avoir des effets non négligeables (reflet d'un cadre, de lunettes etc).

B) cas de film ou lame mince

Des phénomènes d'interférence d'ondes peuvent être observés. Si la lumière incidente est monochromatique, les interférences destructives annuleront la lumière et les positives l'intensifieront. Si la lumière est polychromatique, des couleurs peuvent apparaître (ex iridescence des bulles de savon, de taches d'huile, ailes de papillon etc...). Ces phénomènes sont utilisés dans les semi-conducteurs (chips).

Dans le monde animal (l'iridescence est particulièrement rare chez les [plantes](#)), c'est la nature des [molécules](#) (métalliques notamment), mais surtout leur agencement en [nanostructures](#) très régulières qui est responsable des [couleurs](#) et reflets irisés des écailles de papillons, de poissons, de la nacre iridescente. Chez les oiseaux c'est le réseau de barbuies des [plumes](#) qui est responsable du phénomène. Des chercheurs tentent d'ailleurs de faire des produits [bioinspirés](#) de ce phénomène.



Blue Morpho



Bulle de savon



Ammonite

7) Couleur due à la diffusion

A) rappel sur la diffusion

La **diffusion** est le phénomène par lequel un faisceau de rayonnement (lumineux, acoustique, neutronique, rayons X, etc.) est dévié dans de multiples directions (on parle aussi d'« éparpillement »). La polarisation du rayonnement incident est en général modifiée suite à la diffusion.

La diffusion peut avoir lieu à la rencontre d'une particule « obstacle », d'une interface entre deux milieux (dioptre), où à la traversée d'un milieu (cas de la décomposition de la lumière par un prisme ou effet de l'arc en ciel). Ce processus est le plus souvent « élastique », c'est-à-dire qu'il a lieu sans changement de fréquence des rayonnements composant le faisceau.

i) Diffusion de Rayleigh

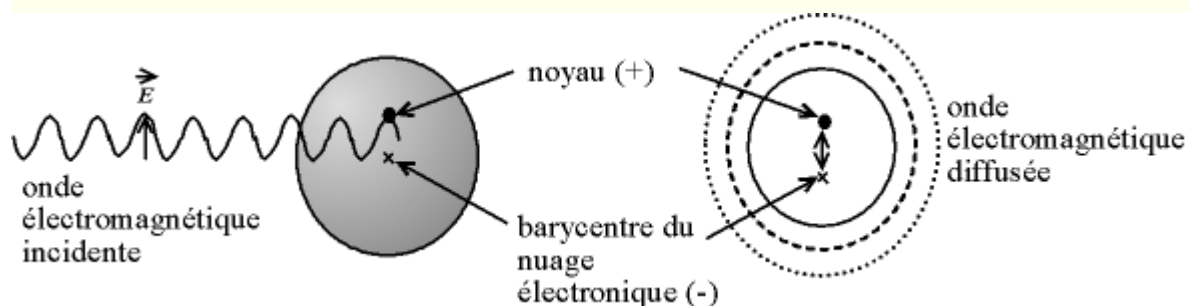
$d \text{ (particule)} \ll \lambda \text{ (énergie)}$

Intensité $\propto 1/\lambda^4$

+ forte pour λ petit

La **diffusion Rayleigh** est un mode de diffusion des [ondes électromagnétiques](#), et notamment la [lumière](#), par les [atomes](#). On parle de **diffusion élastique**, car cela se fait sans variation d'[énergie](#) des [photons](#) (l'onde conserve la même [longueur d'onde](#)).

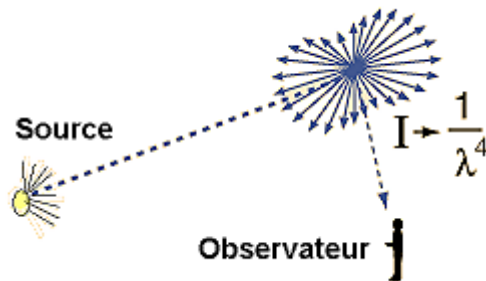
L'onde électromagnétique peut être décrite comme un champ électrique oscillant couplé à un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ce champ électrique va déformer le nuage électronique des atomes, le barycentre des charges négatives oscille ainsi par rapport au noyau (charge positive). Le [dipôle](#) ainsi créé rayonne, c'est ce rayonnement induit qui constitue la diffusion Rayleigh.



Diffusion Rayleigh : l'atome, excité par l'onde électromagnétique, réémet une onde

L'intensité dispersée par des diffuseurs formés de molécules dipôlaire beaucoup plus petits

que la longueur d'onde est la suivante:
$$I_s(r, \psi, \lambda) = I_o \cdot \frac{9\pi^2 V^2}{2r^2 \lambda^4} \cdot \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \cdot (1 + \cos^2 \psi)$$



Où :

- λ est la longueur d'onde de la lumière incidente
- m indice de réfraction relatif
 $m = n_{\text{particule}} / n_{\text{milieu ambiant}}$
- V volume de la particule « obstacle »
- R distance du centre de la particule à l'observateur

On voit que l'intensité est fortement dépendante de la longueur d'onde et de l'angle de vue dans la formule ci-dessus. Ceci, plus les particularités de la [vision photopique](#), permet d'expliquer [pourquoi le ciel est bleu](#) en plein jour et pourquoi le [Soleil](#) est rouge à son lever et à son coucher. Sur des photos ou dans la réalité, on peut voir que le ciel est de plus en plus bleu à mesure que l'on s'éloigne de la direction du soleil ce qui résulte de la sélection par la loi de Rayleigh des ondes du spectre visible.

➔ Ciel bleu diffusion la plus importante

coucher du soleil ? trajectoire + longue, diffusion (et absorption) complète des longueurs d'onde courtes -> couleurs rouge et orange

1ere cause de « flou » ds photographies ou de la couleur bleu grise des photos prises, par exemple, d'avion. Pour réduire cet effet, filtre retirant les courtes longueurs d'onde.

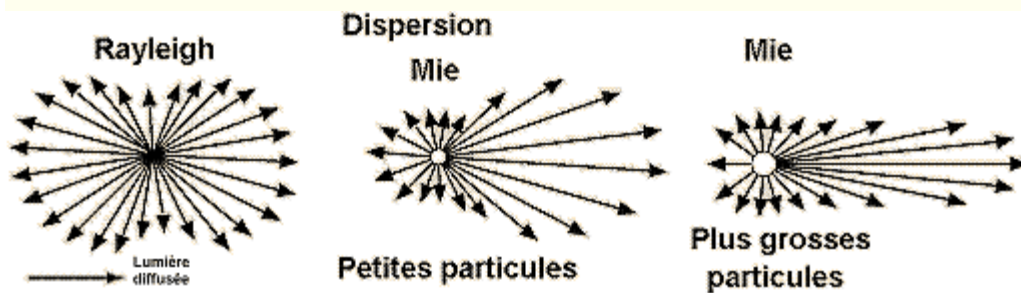
ii) Diffusion de Mie $d(\text{particule}) \approx \lambda(\text{énergie})$

vapeur d'eau, poussières

influence plutôt les longues longueurs d'onde

non négligeable / Rayleigh quand ciel est voilé, nuageux

Pour les particules de l'ordre ou plus grosses que la longueur d'onde, c'est la diffusion de Mie qui domine. Elle produit une image de réémission qui ressemble à celle des lobes d'émission d'une antenne avec un lobe plus intense vers l'avant (par rapport à l'onde incidente) dans le cas des grosses particules.



La diffusion de Mie n'est pas fortement dépendante de la longueur d'onde utilisée comme c'est le cas dans celle de Rayleigh.

iii) Diffusion non sélective d (particule) $\gg \lambda$ (énergie)

gouttes d'eau (5-100 μm)

diffusion à peu près égale des longueurs d'onde du visible et du proche et moyen IR

➔ diffusion non « sélective » par rapport à la longueur d'onde

➔ brouillards et nuages apparaissent blancs

B) Couleurs

Historique - **Tyndall** (scientifique irlandais 1820-1893) a effectué une expérience montrant le phénomène de dispersion de la lumière incidente sur des particules de matière, de dimensions comparables aux longueurs d'onde. Cet effet est visible dans les systèmes colloïdaux, les suspensions ou les émulsions. Le phénomène est facilement observable puisqu'en observant des rayons de lumière lorsqu'ils traversent des zones où des particules solides ou liquides (par exemple de la poussière ou des gouttes d'eau). Il explique la couleur bleu du ciel avec l'effet Tyndall, de nos jours appelé diffusion Rayleigh, Tyndall est le premier à donner une explication de ce phénomène tandis que Rayleigh traite le sujet dans un cadre théorique.

La diffusion est responsable de la couleur bleue des yeux de tous les nouveaux nés. L'iris est composé de régions cristallines et de vésicules d'air; la diffusion domine car la lumière transmise est absorbée sur la rétine. Par la suite, lorsque le bébé grandit, des pigments colorés se développent responsables de la couleur des yeux de l'enfant.

Certains plumages d'oiseaux sont bleus ou verts à cause de la diffusion (différent d'une couleur par pigmentation ou par iridescence). Les rayons incidents aux plumes rencontrent des vésicules d'air et des microgranules de mélanine (noire) de très petite taille et peu concentrées. Ces microgranules réfléchissent les ondes bleues et laissent filtrer les rayons à grande longueur d'onde (réchauffant l'oiseau). La combinaison des différents pigments et de ces phénomènes optiques permettent une très grande variété de couleurs. Les éleveurs d'oiseaux de compagnie mettent en place des sélections de reproduction afin de produire les teintes désirées.

7) Couleur due à la diffraction

La **diffraction** est le comportement des ondes lorsqu'elles rencontrent un obstacle qui ne leur est pas complètement transparent; le phénomène peut être interprété par la diffusion d'une onde par les points de l'objet. La diffraction se manifeste par le fait qu'après la rencontre d'un objet, la densité de l'onde n'est pas conservée selon les lois de l'optique géométrique.

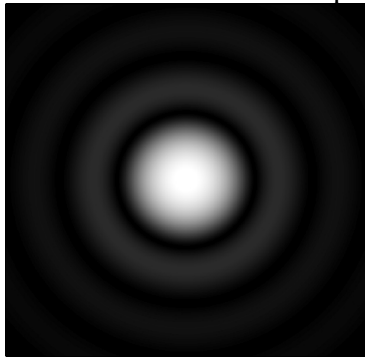
La diffraction est le résultat de l'interférence des ondes diffusées par chaque point.

La diffraction s'observe avec la lumière, mais également avec le son, les vagues, les neutrons, les rayons X (une onde électro-magnétique comme la lumière) ou la matière. Elle est une signature de la nature ondulatoire d'un phénomène.

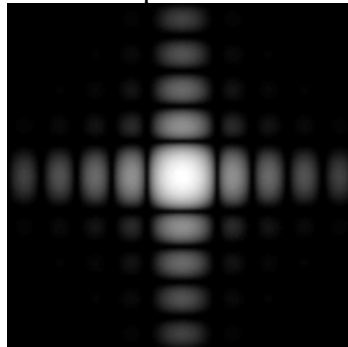
Plus la longueur d'une onde est grande par rapport à un obstacle, plus cette onde aura de facilité à contourner, à envelopper l'obstacle. La diffraction aura tendance à être observée quand l'obstacle est de taille comparable à la longueur d'onde.

Si l'observateur est près de l'objet, il observe la diffraction de Fresnel. S'il est loin, il observe la diffraction de Fraunhofer.

Diffraction de Fraunhofer pour une lumière monochromatique



Diffraction par un trou rond



Diffraction par un trou carré

Pour une lumière polychromatique, l'apparition des spectres de diffraction (arc-en-ciel) est notable.

Note : Pour des raisons historiques, on distingue encore la diffraction des interférences alors qu'il n'y a pas lieu de le faire : ces deux comportements dérivent de la nature ondulatoire d'un phénomène et ne vont pas l'un sans l'autre. La réciproque n'est pas vraie, il y a des interférences sans diffraction dans certains cas.