

Master des Sciences de la Mer – Aix Marseille Université

Optique marine et applications à la biogéochimie

OPB 305

Enseignant responsable: **A. Petrenko**

Contact anne.petrenko@univ-amu.fr anne.petrenko@mio.osupytheas.fr

Bureau : Oceanomed 1^{er} étage 128 (sur rendez-vous)

Cours à décharger sur

<https://people.osupytheas.fr/~petrenko/TEACHING/OPB305/>

Plan du cours:A Fondamentaux**I Couleur - Interaction de la lumière avec matériaux « transparents »**

1. Rappels de physique
2. Bref historique et rappels sur la lumière
3. Couleur par radiation
4. Indice de réfraction
5. Couleur due à la réfraction
6. Couleur due à la réflexion
7. Couleur due à la diffusion
8. Couleur due à la diffraction

II Radiométrie et IOPs

1. Rappels – Radiométrie
2. Propriétés optiques de l'eau
3. IOPS

III IOPs dans l'eau marine

1. Absorption
2. Diffusion
3. Vision énergétique de phénomènes

IV Lumière à travers la colonne d'eau

1. Interface air /eau
2. Devenir de la lumière dans l'eau - « Règles » de disparition de la lumière
3. Profils verticaux – loi de Beer

V AOPs

1. AOPs dans l'eau marine
2. Normalisation de Gordon de Kd

VI Devenir de la lumière dans l'eau - qualitatif

1. Hypotheses pour la mise en équation
2. Equation de transfert radiatif
3. Méthodes de résolution numériques
4. Méthode inverse
5. modélisation bio-optique

B Instrumentation et Télédetection**VII Instrumentation in situ**

1. Mesures de radiométrie et dérivation d'AOPs - Disque Secchi
2. Mesures d'IOPs et fluorimétrie + produits dérivés : taille des particules, ...

VIII Télédétection océanographique

1. Instrumentation
2. Couleur de l'eau : Mesures effectuées et algorithmes ; Applications côtières

*L'objectif de cet enseignement est de donner une formation de haut niveau en océanographie optique en fournissant aux étudiants les connaissances indispensables à une utilisation correcte des données collectées *in situ* par des instruments océanographiques optiques (PAR, radiomètre, flotteurs lagrangiens biogéochimiques etc.) ou fournies par des capteurs de télédétection ; en leur permettant de comprendre l'équation de transfert radiatif d'où découlent des lois plus simples de transmission de la lumière dans l'eau, de connaître les instruments optiques et leurs produits dérivés, dans l'eau et en télédétection satellitaire.*

TDs :

A. Petrenko

Analyse (sur PCs avec Python ou Matlab) de données optiques
& utilisation d'images satellites – Rendu de rapports de TDs

*L'objectif des TDs est d'analyser des sets de données mesurées *in situ* pour mettre en pratique le cours théorique et d'effectuer des études de processus physiques et/ou biogéochimiques à partir d'images satellites mises à disposition, entre autres, par le CMEMS (Cet enseignement est inscrit dans la formation Copernicus Academy)*

Interventions extérieures :

Dr. M. Thyssen (CNRS, MIO, Marseille) : Cytométrie en flux, Type Fonc. Plancton, bactérie

Dr. E. Martinez (IRD, LOPS, Brest) : Interactions physique/biologie et variabilité (satellite)

Dr A. Fuménia (Wimereux) : Algorithmes satellites

+ CMs de **Dr. H. Claustre** (CNRS/LOV) flotteurs BGC (en commun avec OPB 301)

Manuels de référence :

* **Light and Water - Radiative Transfer in Natural Waters**
Mobley, Academic Press 1994

et site qu'il est en train d'étoffer:

<http://www.oceanopticsbook.info/view/introduction/overview>

* **Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**, Kirk, Cambridge Univ Press, 1994

* **Remote sensing and image interpretation**, Lillesand & Kiefer, Wiley, 2000

+ sites web fournis dans le cours

Remerciements :

Je tiens à remercier tout particulièrement les intervenants extérieurs, ayant participé à ce cours ces dernières années, ainsi que Curt Mobley et les collègues dont j'utilise des figures de cours et/ou de publications.

Merci aussi à Wikipédia ou j'ai puisé des informations générales et/ou historiques que j'ai utilisées soit directement soit en les adaptant pour ce cours.

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

1) Rappels de physique

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

Absorption : Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelé flux absorbé. C'est l'opération inverse de l'émission.

Transparence et opacité : Un milieu transmettant intégralement l'onde incidente est appelé milieu transparent. Ex le vide. En première approximation, le verre est aussi transparent pour les longueurs d'onde du visible. Inversement un corps ne transmettant aucune partie du rayonnement incident est dit corps opaque.

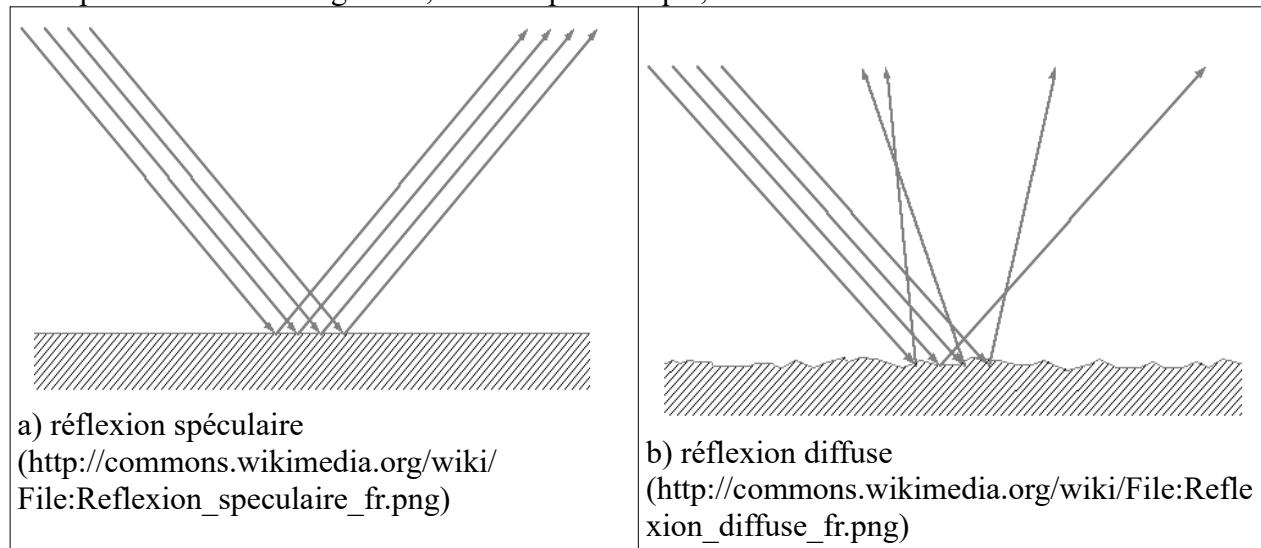
Corps noir : Un corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit. Dans ces conditions le flux réfléchi est nul et le flux partant du corps noir est seulement constitué d'un flux émis (voir définition sur l'émission).

Réflexion : Au lieu d'être absorbé, la rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par cette paroi. On distingue deux cas : a) le renvoi obéit aux lois de l'optique géométrique ; il s'agit alors de réflexion spéculaire. b) le renvoi se fait dans toutes les directions ; il s'agit alors de réflexion diffuse.

La réflexion est dite spéculaire lorsque le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi unique. Idéalement, l'énergie du rayon incident se retrouve totalement dans le rayon réfléchi, en pratique une partie de l'énergie peut être absorbée ou diffusée au niveau de l'interface.

La réflexion diffuse intervient sur les interfaces irrégulières, la lumière est réfléchie dans un grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis.

Lors d'un changement de milieu de propagation, une partie de l'onde électromagnétique repart vers le milieu d'origine, c'est la réflexion. Le cas le plus connu de la réflexion est le miroir, mais celle-ci concerne également les rayons X (miroir à rayons X) et les ondes radio : réflexion sur la ionosphère des ondes mégahertz, antenne parabolique, réflexion sur la Lune...



a) réflexion spéculaire
[\(http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflexion_speculaire_fr.png\)](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflexion_speculaire_fr.png)

Réfraction Lors d'un changement de milieu de propagation, si le second milieu est transparent pour l'onde mais avec un indice de réfraction différent du premier milieu, l'onde se propage au travers mais avec une direction différente. Cela concerne la lumière (lentille optique, mirage), les ondes dans l'eau, mais aussi les ondes radio (réfraction des ondes décimétriques dans la ionosphère).

Pour les étudiants intéressés, et en particulier ceux ayant suivi le cours de Houles-vagues, voir l'animation du phénomène de réfraction sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_réfraction

Diffusion Lorsqu'une onde rencontre un obstacle (ex, atome, molécule, ...), elle se diffuse sur celui-ci : elle change de direction. On distingue la diffusion Rayleigh, dite « diffusion électronique », au cours de laquelle l'onde ne change pas de longueur d'onde, la diffusion Raman qui est une diffusion électronique avec diminution ou augmentation de longueur d'onde, et la diffusion Compton, dans le cas des rayons X diffusant sur des atomes légers, au cours de laquelle la longueur d'onde augmente.

Interférences Comme toutes les ondes, les ondes électromagnétiques peuvent interférer. Dans le cas des radiocommunications, cela provoque un parasitage du signal (voir la notion de rapport signal sur bruit).

Diffraction L'interférence d'ondes diffusées porte le nom de diffraction (théorie de la diffraction; diffraction par une fente ; fentes de Young ; réseau de diffraction ; diffraction de rayons X...).

2) Bref historique et rappels sur la lumière

Siècle		Particule	Onde
XVII	Descartes (France 1596-1650) Traité (1633-34) publié après sa mort	X	
	Huygens (Hollande 1629-95) réflexion, réfraction, comportement onde (1670) + mesure $c \sim 3.10^8 \text{ ms}^{-1}$; mais les ondes devraient se propager dans quelque chose (à l'époque concept identique à celui des ondes acoustiques nécessitant de la matière pour se propager) -> hypothèse de l'«éther», supposé être le support matériel des vibrations des ondes EM)		X dans Ether
	Newton (GB 1642-1727); lumière = petites particules 1675 prisme – dispersion des couleurs ; 1704 publication « l'Optique » [Théorie de l'émission (forces) -> accélération de la vitesse de la lumière dans l'eau ; attention cette théorie est fausse (voir ci-dessous : Foucault)] Système planétaire + forces -> pas d'éther	X	non E
XIX	Young (GB 1773-1829) interférence – fentes de Young (1801)		X
	Fresnel (France 1788-1827) interférence; longueur d'onde ; diffraction; polarisation		X
	Foucault (France 1819-68) Théorie des "ondulations"; mesure du ralentissement de la lumière dans l'eau (1850)		X
	Maxwell (Ecosse 1831 - 1879) Théorie ondes électromagnétiques 1864 mais les ondes devraient se propager dans quelque chose ? (retour au questionnement sur l'existence de l'Ether)		X E ?
	Expérience de Michelson-Morley : 1881 (Michelson seul) et 1887 (Michelson et Morley) met en doute l'existence de l'éther (E)		non E
XX	Max Planck 1900 émission de quantas ($i=1,2,3\dots$) quand rayonnement de corps noir	X	
	Einstein (Suisse,USA 1879-1955) Existence de « particules » (1905), expliquée par : - Effet photo-électrique mesuré en 1895 - Théorie de la relativité -> pas d'éther	X	non E
	L. de Broglie Toute particule se comporte comme une onde Energie $E=hv=hc/\lambda$ (1924) $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ constante de Planck	x	X
	G. Lewis Particules nommées « Photons » (1926)	X	
	Böhr & Co (1920's) Théorie de la mécanique quantique et principe de complémentarité/dualité photons ($L < \lambda$) ondes ($L > \lambda$)	X	X

Brèves bibliographies des scientifiques cités ci-dessus (issu-adapté de Wikipédia)

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 ($n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$) 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.

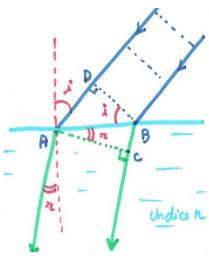
Sir Isaac Newton (1643 – 1727) est un philosophe, mathématicien, physicien, alchimiste et astronome anglais. Figure emblématique des sciences, il est surtout reconnu pour sa théorie de la gravitation universelle et la création, en concurrence avec Leibniz, du calcul infinitésimal. C'est en 1666 qu'Isaac 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 avait été interprété comme si le verre du prisme avait de la couleur cachée à l'intérieur que le rayon de lumière faisait surgir. 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 » 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. Il démontre que la lumière blanche est formée de plusieurs couleurs et déclare qu'elle est composée de particules ou de corpuscules. De plus, Newton émet sa « théorie de l'émission », soutenant que la lumière, lorsqu'elle passe par un milieu plus dense (réfraction), est accélérée. Attention, son raisonnement, brièvement indiqué ci-après, est faux. « Lorsque un rayon de lumière passe de l'air à l'eau, la force tangentielle resterait identique; la force perpendiculaire à la surface serait 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.

Thomas Young (13 juin 1773-10 mai 1829), est un physicien, médecin et égyptologue britannique. Son excellence dans de nombreux domaines non reliés fait qu'il est considéré comme un polymathe, au même titre par exemple que Léonard de Vinci, Gottfried Leibniz ou Francis Bacon. Son savoir était si vaste qu'il fut connu sous le nom de phénomène Young. Il exerça la médecine toute sa vie, mais il est surtout connu pour sa définition du module d'Young en science des matériaux et pour son expérience des fentes d'Young en optique, dans laquelle il mit en évidence et interpréta le phénomène d'interférences lumineuses. Il s'intéressa également à l'égyptologie en participant à l'étude de la pierre de Rosette.

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, 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. Comme la distance dans l'eau du rayon 1 est inférieure à la distance air + eau du rayon 2, pour que les rayons arrivent en phase, il faut que $c(\text{eau}) < c(\text{air})$.



a) Suivi d'une onde en phase - pendant le même temps t : DA est parcouru dans l'air à la vitesse c et BC dans l'eau à la vitesse c_{eau}
 $t = DA/c = BC/c_{\text{eau}}$ donc $c_{\text{eau}} = c * BC/DA$

b) Loi de Snell-Descartes : $1 \sin i = n \sin r$

$$\frac{DA}{AB} = n \frac{BC}{AB} \text{ donc } \frac{BC}{DA} = \frac{1}{n} \quad c_{\text{eau}} = \frac{c}{n}$$

Il confirme cette théorie par une expérience en 1850 montrant que la lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau, « invalidant » ainsi la théorie corpusculaire de Newton au profit de la théorie ondulatoire de la lumière. Cette expérimentation était très astucieuse et un défi incroyable car il réussit à mesurer la vitesse de courants électriques mettant en évidence les différences de temps de parcours entre un faisceau passant dans l'eau versus un faisceau passant dans l'air. Le cadre expérimental utilisait des tubes d'une longueur de 3 m. Or 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).

James Clerk Maxwell (1831 -1879, Édimbourg) était un physicien et mathématicien écossais. Il est principalement connu pour avoir uniifié 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 uniifié 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.

L'expérience de Michelson-Morley (1881 et 1887) est une expérience d'optique qui a tenté de démontrer l'existence de l'étherluminifère. Pour y parvenir, Albert Abraham Michelson et Edward Morley ont cherché à mettre en évidence la différence de vitesse de la lumière entre deux directions perpendiculaires et à deux périodes espacées de 6 mois, et concluent que cette différence était inférieure à ce que le dispositif permettait de mesurer (l'effet attendu étant environ 4 fois supérieur à la précision du dispositif). En fait, il s'agit de toute une série d'expériences entre 1881 (Michelson seul) et 1887 (ensemble), date à laquelle le résultat est définitivement admis (bien que cette expérience soit régulièrement refaite à chaque fois qu'un progrès technique permet de gagner en précision, avec toujours le même résultat). L'interprétation de ce résultat a conduit les physiciens à mettre en doute l'existence de l'éther (qui était supposé être le support matériel des vibrations d'une onde électromagnétique comme la lumière) ou tout au moins de son mouvement. Cela montrait aussi que la vitesse de la lumière était la même dans toutes les directions jusqu'au deuxième ordre en (v/c) , qui était la précision de l'expérience. C'est dans l'histoire de la physique une des plus importantes et une des plus célèbres expériences, elle valut à Michelson le prix Nobel de physique en 1907.

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 1926, les quanta furent appelés les photons. Ce 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 dans laquelle les photons étaient « incréables 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.

Niels Henrik David Böhr (1885-1962, Copenhague) est un physicien danois. Il est surtout connu pour son apport à l'édition de la mécanique quantique, pour lequel il a reçu de nombreux honneurs (1922 Prix Nobel de Physique). Böhr 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. Böhr, 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).

Böhr & Co : Böhr (Dan), L. de Broglie (France), Erwin Schrödinger et Wolfand Pauli (Autriche), Werner Heisenberg (All.), Paul Dirac (Angleterre) . Pour établir la théorie quantique, ils ont travaillé sur la nature intrinsèque de la physique atomique se heurtant à de nombreux paradoxes, avant de réussir à comprendre que la vision matérialiste ne fonctionne pas à l'échelle subatomique. En un sens, à cette échelle, la matière n'existe pas avec certitude mais a « tendance à exister », faisant appel aux probabilités. De plus, ils ont réussi aussi à montrer que, à l'échelle subatomique, la réalité n'existe pas indépendamment de l'observateur (ex incertitude d'Heisenberg ; chat de Schrödinger).

De la relativité générale (Einstein 1907 à 1915 ; avec aide de Marcel Grossmann et de David Hilbert) a découlé la cosmologie, l'astrophysique, les trous noirs... Quant à la mécanique quantique, elle est à l'origine de la physique atomique, physique nucléaire, physique des particules élémentaires, physique de la matière condensée, ... les deux marchent très bien dans leurs domaines respectifs mais sont a priori non conciliables. "Elles ne peuvent théoriquement pas être justes en même temps, du moins sous leur forme actuelle. (...en un sens, et en simplifié, pour la première) le monde est un espace courbe où tout est continu (et pour la seconde) le monde

est un espace plat où sautillent des quanta d'énergie." dixit Carlo Rovelli (« Sept brèves leçons de physique », 2014) chercheur dans le domaine de la gravité quantique à boucles qui cherche à combiner la Relativité générale et la Mécanique quantique, en prédisant que l'espace physique n'est pas continu mais formé d'"atomes d'espace" (1 milliard de milliards de fois plus petits que le plus petit des noyaux atomiques).

3) La lumière

Il existe deux grands types d'ondes en physique : l'onde mécanique et l'onde électromagnétique (EM). Une onde mécanique est le déplacement d'une perturbation mécanique (secousse, vibration, etc.) dans la matière. Les ondes électromagnétiques, elles, peuvent se déplacer dans le vide ou dans la matière. Toutes les ondes sont des déplacements d'énergie ; cependant, la différence fondamentale entre ondes électromagnétiques et mécaniques est le type de déplacement adopté par cette énergie. Les ondes mécaniques mettent en mouvement leur support (les vagues agitent le liquide, les tremblements de terre secouent le sol) et l'énergie est transmise par ce mouvement. Ce n'est pas le cas des ondes électromagnétiques : elles n'interagissent pas mécaniquement avec leur environnement. **Une onde électromagnétique est la propagation d'un signal, correspondant à des variations de champ électrique et de champ magnétique, ces derniers étant liés et vibrant ensemble.**

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

A Photon

Le photon est le quantum d'énergie associé aux ondes électromagnétiques (allant des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible), qui présente certaines caractéristiques de particule élémentaire. En théorie quantique des champs, le photon est la particule médiatrice de l'interaction électromagnétique. Autrement dit, lorsque deux particules chargées électriquement interagissent, cette interaction se traduit d'un point de vue quantique comme un échange de photons.

L'idée d'une quantification de l'énergie transportée par la lumière a été développée par Albert Einstein en 1905, à partir de l'étude du rayonnement du corps noir par Max Planck, pour expliquer l'effet photoélectrique qui ne pouvait pas être compris dans le cadre d'un modèle ondulatoire classique de la lumière, mais aussi par souci de cohérence théorique entre la physique statistique et la physique ondulatoire. La découverte de l'effet Compton en 1923, donnant également des propriétés corpusculaires à la lumière, et l'avènement de la mécanique quantique et de la dualité onde-corpuscule amènent à considérer ce quantum comme une particule, nommée photon en 1926.

Les photons sont des « paquets » d'énergie élémentaires, ou quanta de rayonnement électromagnétique, qui sont échangés lors de l'absorption ou de l'émission de lumière par la matière. De plus, l'énergie et la quantité de mouvement (pression de rayonnement) d'une onde électromagnétique monochromatique sont égales à un nombre entier de fois celles d'un photon.

Le concept de photon a donné lieu à des avancées importantes en physique expérimentale et théorique, telles que les lasers, les condensats de Bose-Einstein, l'optique quantique, la théorie

quantique des champs et l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique. Le photon est une particule de spin égal à 1, c'est donc un boson, et sa masse serait nulle ou en tout cas inférieure à environ 10-54 kg.

L'énergie d'un photon de lumière visible est de l'ordre de 2 eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), ce qui est extrêmement faible : un photon seul est invisible pour l'œil d'un animal et les sources de rayonnement habituelles (antennes, lampes, laser, etc.) produisent de très grandes quantités de photons, ce qui explique que la nature «granulaire» de l'énergie lumineuse soit négligeable dans de nombreuses situations étudiées par la physique. Il est cependant possible de produire des photons un par un grâce aux processus suivants :

transition électronique ; transition nucléaire ; annihilation de paires particule-antiparticule.

La création naturelle de photons dépend généralement de l'état d'excitation d'atomes.

Lorsqu'on apporte de l'énergie à un atome, il se retrouve dans un état instable, dit « excité » (voir section III.3). Pour redevenir stable, il libère le surplus d'énergie sous forme de photons. Au cœur du soleil, les atomes d'hydrogène fusionnent pour former de l'hélium, libérant des quantités d'énergie très importantes, sous la forme de photons gamma, les plus énergétiques des photons. Le temps qu'ils sortent du Soleil et de son atmosphère, ils sont généralement absorbés et ré-émis à de plus faibles longueurs d'ondes par les atomes environnants. La plupart sont finalement libérés sous forme de UV, lumière visible et infra-rouge (voir Sections I.3 et II.1).

Note 1: Si ce sont les électrons de l'atome qui sont excités, en revenant à leur état d'équilibre, ils émettent des photons UV ou de lumière visible. De plus, des rayonnements de plus faible énergie, dans le domaine de l'infrarouge (IR), peuvent également interagir avec les atomes et les molécules. Ce type de rayonnement n'est pas suffisamment énergétique pour exciter des électrons, mais il peut faire vibrer de différentes façons les liaisons entre les atomes d'une molécule. Tout comme l'énergie requise pour exciter un électron dans un atome est fixe, l'énergie nécessaire pour modifier la vibration d'une liaison chimique donnée est aussi fixe.

Note 2 : le chimiste est capable, en regardant un spectre d'absorption IR, d'en apprendre beaucoup sur la structure chimique d'une molécule (ex. si elle contient des liaisons simples carbone-carbone, des liaisons doubles carbone-carbone, des liaisons simples carbone-azote, ou des liaisons doubles carbone-oxygène...).

B Ondes électromagnétiques

L'onde électromagnétique est un modèle utilisé pour représenter les rayonnements EM.

En effet, on devrait distinguer :

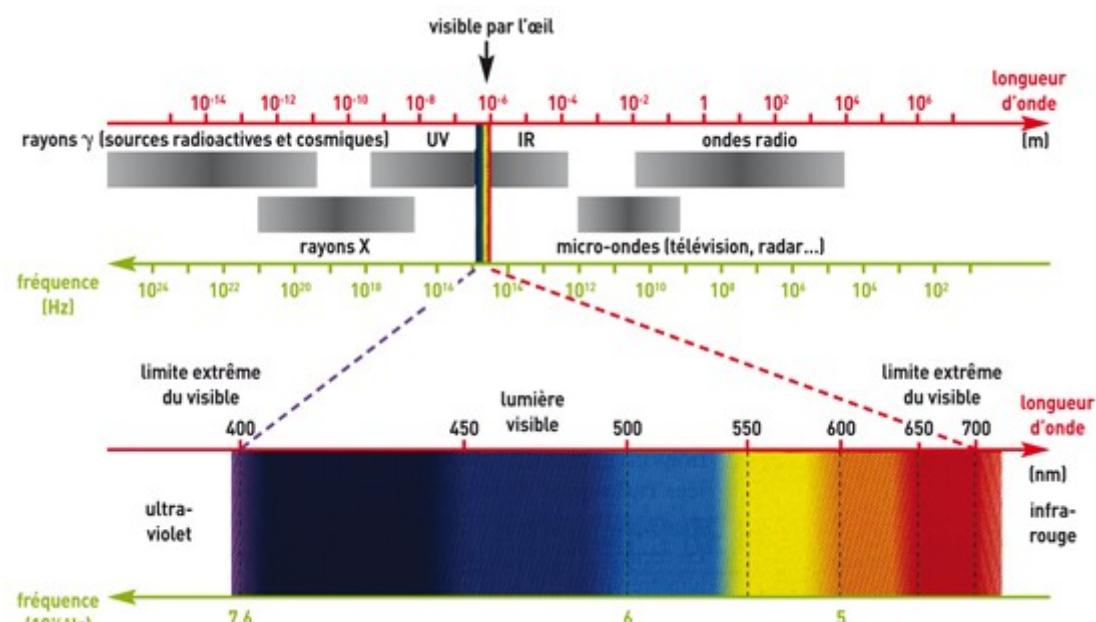
- le rayonnement électromagnétique, qui est le phénomène étudié, et
- l'onde électromagnétique, qui est une des représentations, ou modèles, du phénomène. L'onde électromagnétique représente deux choses (ex C'est comme regarder l'ombre d'un cylindre de côté ou de face ; soit on voit un disque, soit un rectangle):
 - a) la variation macroscopique du champ électrique et du champ magnétique ;
 - b) la fonction d'onde du photon, c'est-à-dire que la norme au carré de l'onde est la probabilité de présence d'un photon.

Dans un milieu homogène et isotrope, l'onde électromagnétique se propage en ligne droite. Il peut y avoir des changements de direction par exemple lors de la rencontre avec un obstacle

(diffusion); lors d'un changement de milieu (réflexion et réfraction), ou lors des changements des propriétés -ainsi hétérogènes- du milieu (réfraction).

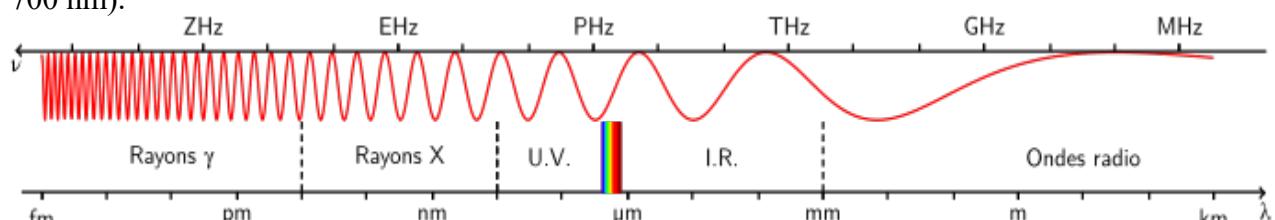
Chaque onde/photon « emporte » une quantité d'énergie déterminée, valant $E = h \cdot v$, h étant la constante de Planck et v la fréquence. On peut ainsi calculer le flux de photons à travers une surface. Le flux d'énergie est donné par le **vecteur de Poynting**., noté \vec{S} ou \vec{R} ou \vec{N} ou $\vec{\Pi}$ avec $(\vec{E}, \vec{B}, \vec{S})$ trièdre direct. En physique, le vecteur de Poynting représente le flux d'énergie directionnelle (le transfert d'énergie par unité de surface par unité de temps) d'un champ électromagnétique. L'unité SI du vecteur de Poynting est le watt par mètre carré (W / m^2). Il porte le nom de son découvreur John Henry Poynting (GB 1852-1914) qui l'a dérivé pour la première fois en 1884.

Suivant la longueur d'onde (fréquence), on emploie des termes différents



(<http://www.educonline.net/spip/spip.php?article269>)

Une onde lumineuse est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde correspond au spectre visible, soit entre les longueurs d'onde 380 et 780 nm (quelquefois raccourcies de 400 à 700 nm).



Fréquence : 10^{21} zettahertz ZHz; 10^{18} exahertz EHz; 10^{15} petahertz PHz; 10^{12} térahertz THz ; 10^9 gigahertz GHz; 10^6 mégahertz MHz

Longueur d'onde: 10^{-6} micromètre μ m; 10^{-9} nanomètre nm; 10^{-12} picomètre pm; 10^{-15} femtomètre fm

Supplément sur les micro-ondes (onde invisible cependant bien connue):

Les micro-ondes ont des longueurs d'onde approximativement dans la gamme de 30 centimètres (1 GHz) à 1 millimètre (300 GHz), entre l'infrarouge et les ondes de radiodiffusion. Le terme de micro-onde provient du fait que ces ondes ont une longueur d'onde plus courte que celles de la bande VHF, utilisée par les radars pendant la Seconde Guerre Mondiale.

Différentes utilisations:

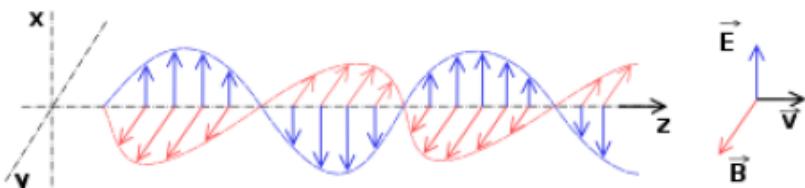
- transmissions par satellite parce que cette fréquence traverse facilement l'atmosphère terrestre et avec moins d'interférences pour les longueurs d'onde les plus élevées (ex GPS);
- radars pour détecter la distance, la vitesse et d'autres caractéristiques d'objets éloignés ;
- transmission sans fil pour réseaux locaux tels que Wi-Fi, Bluetooth (2,4 et 1,9 gigahertz);
- télévision par câble et accès Internet par câble coaxial ;
- transmetteurs locaux de vidéo sans fil (surveillance de bébé, regarder la TV dans la chambre sans y disposer d'antenne filaire...);
- téléphonie mobile (0,8, 1,8 et 2,6 gigahertz);
- fours à micro-ondes utilisent un magnétron comme générateur de micro-ondes à une fréquence approximative de 2,4 gigahertz afin de chauffer les aliments (depuis les années 1980);
- impulsion magnétique ultra-courte, qui sert au traitement du cancer;

Quizz: Avec le micro-onde, peut-on calculer la vitesse de la lumière ? (voir Le Monde Août 2015 "Micro-ondes, vitesse de la lumière et chocolat fondu", + article de J.-M. Courty dans "Pour la science", 2011)

Onde plane

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 \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B} tous deux perpendiculaires à la direction de propagation \vec{z} ou \vec{v} vecteur d'onde défini ci-dessous et généralement nommé \vec{k} .

Le trièdre ($\vec{k}, \vec{E}, \vec{B}$) doit être direct. Si ($\vec{k}, \vec{E}, \vec{B}$) est direct, ($\vec{E}, \vec{B}, \vec{k}$) l'est aussi (on voit dans l'image ci-dessous que cela correspond à (x,y,z) dans cette figure):



(http://fr.wikipedia.org/wiki/Onde_electromagnetique)

\vec{k} est le vecteur d'onde dont la norme vaut $\frac{2\pi}{\lambda}$, λ étant la longueur d'onde

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: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

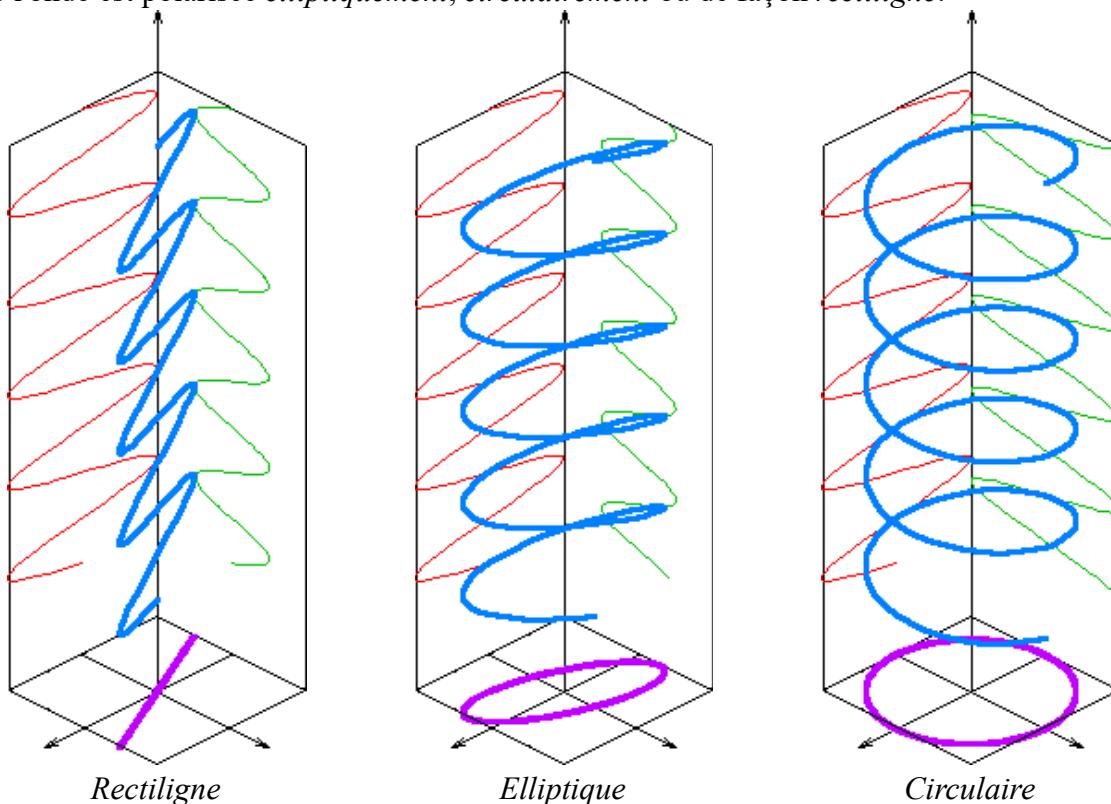
* **Note sur le FTL (Faster Than Light):** ce n'est pas qu'un jeu vidéo de stratégie en temps réel; il n'est pas possible d'accélérer et de dépasser la vitesse de la lumière; mais il serait possible -dans la théorie- d'avoir une vitesse supérieure à celle de la lumière si elle reste toujours supérieure à celle-ci (tachyons; <http://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light>).

Polarisation (Wikipédia)

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 de façon *rectiligne*.



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-dessus (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 (cas de l'onde plane)**. 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.

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.

Couleur - Définition

couleur	longueur d'onde (nm)	Fréquence (THz 10^{12} Hertz)
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

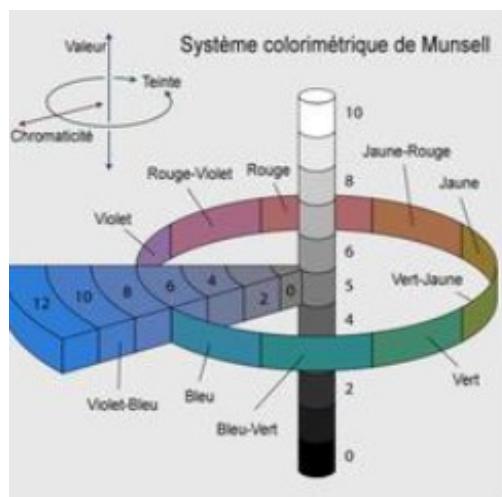
L'ensemble des couleurs est défini, actuellement, par ses trois caractéristiques de **teinte, valeur et saturation**.

1. On nomme « **teinte** » [hue, en anglais], **ou couleur**, la (ou les) fréquences engendrant la couleur.
2. On nomme « **valeur** » (**ou intensité**) [brightness, lightness] 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.
3. On nomme « **saturation** » **ou « chromaticité »** [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.

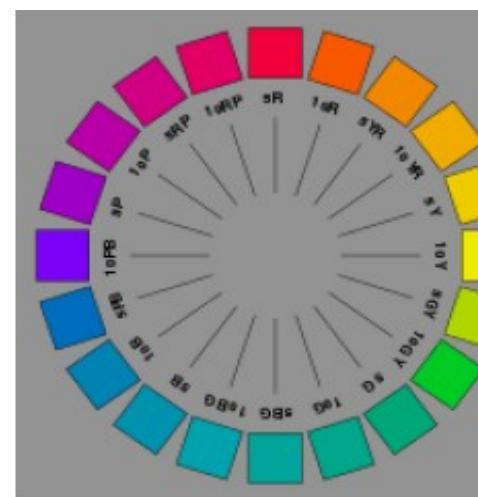
On nomme « **gris** » les couleurs intermédiaires entre le blanc et le noir. Chacun des gris peut être considéré comme une teinte dépourvue de couleur ; le noir et le blanc sont des gris extrêmes. Le noir est un gris de valeur nulle et correspond à l'absence de toute lumière (aucune

lumière n'est reçue par l'œil). Le blanc est un gris de valeur maximale et peut être considéré comme l'ensemble des couleurs.

Comme la lumière a 3 caractéristiques, elle doit être représentée sur un graphe à 3 dimensions. La représentation cylindrique de Munsell (système TVC : teinte, valeur, chromaticité) correspond à un graphe géométrique (r, θ, z) où r correspond à la chromaticité C (pureté d'une couleur basée sur la perception visuelle d'où le nom "chromaticité" et non "saturation"), θ à la teinte T et z à la valeur V.

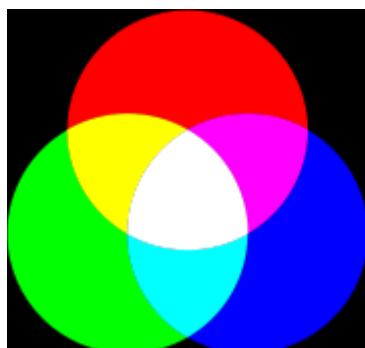


Système de Munsell montrant le cercle des teintes pour une valeur de 5 et une chromaticité de 6, les valeurs neutres de 0 à 10 et la chromaticité du Violet-Bleu pour une valeur de 5



Nuancier de Munsell
(http://fr.wikipedia.org/wiki/Nuancier_de_Munsell et figures incluses)

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.

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, vert, bleu**. Elles correspondent à ce qu'on appelle en français le système RVB ou en anglais RGB (*Red, Green, Blue*).

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.

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.



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 sont plutôt appelées **couleurs fondamentales** pour les différencier des couleurs primaires du système additif. Elles correspondent aux couleurs secondaires du système additif : **cyan ; magenta ; jaune** ; ce qui 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.

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

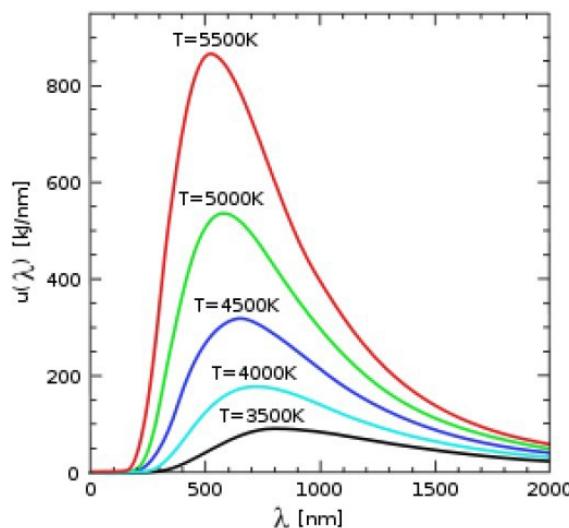
T est la température de la surface du corps noir en kelvin

[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 ; $T(^{\circ}\text{F})=1,8 T(^{\circ}\text{C})+32$

Quizz : à quoi correspond la température « Fahrenheit 451 » ?
voir roman de Ray Bradbury 1953].



Emission d'un corps noir (Source Wikipedia)

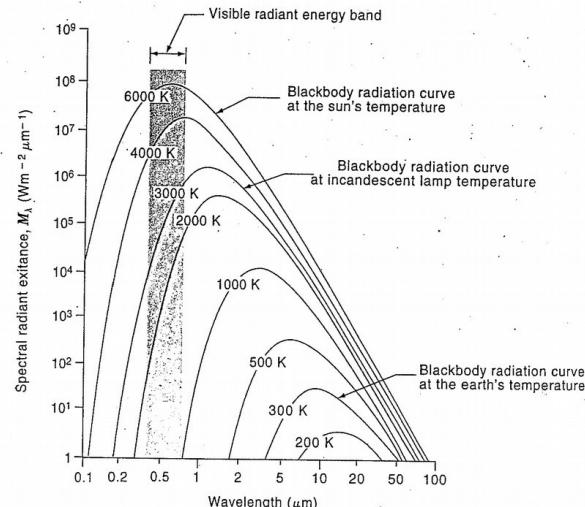
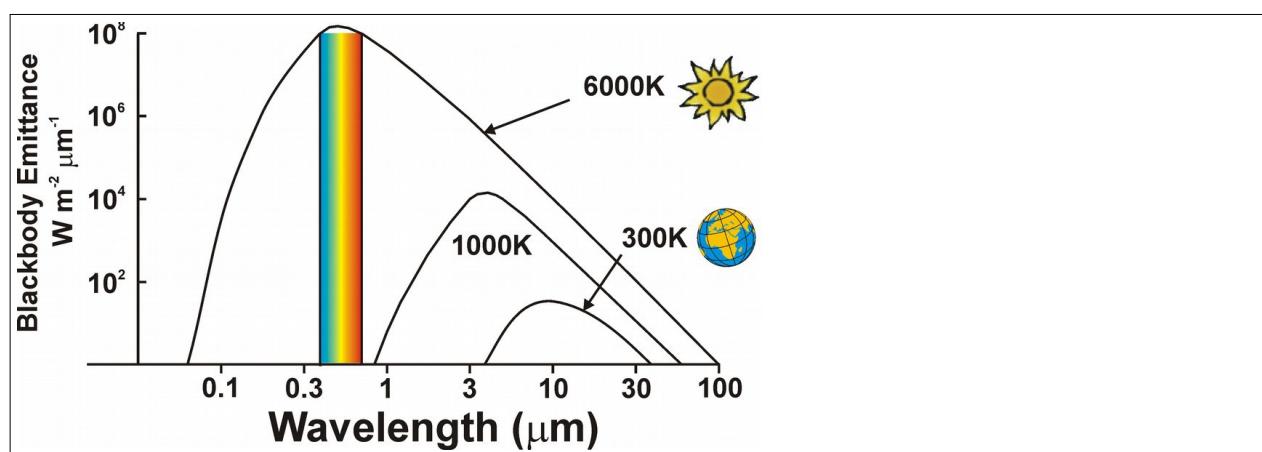


Figure 1.4 Spectral distribution of energy radiated from blackbodies of various temperatures.
(Note that spectral radiant exitance M_λ is the energy emitted per unit wavelength interval. Total radiant exitance M is given by the area under the spectral radiant exitance curves.)

« Remote sensing and image interpretation »
Lillesand and Kiefer ; ed. Wiley, 2000, 4th Ed



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

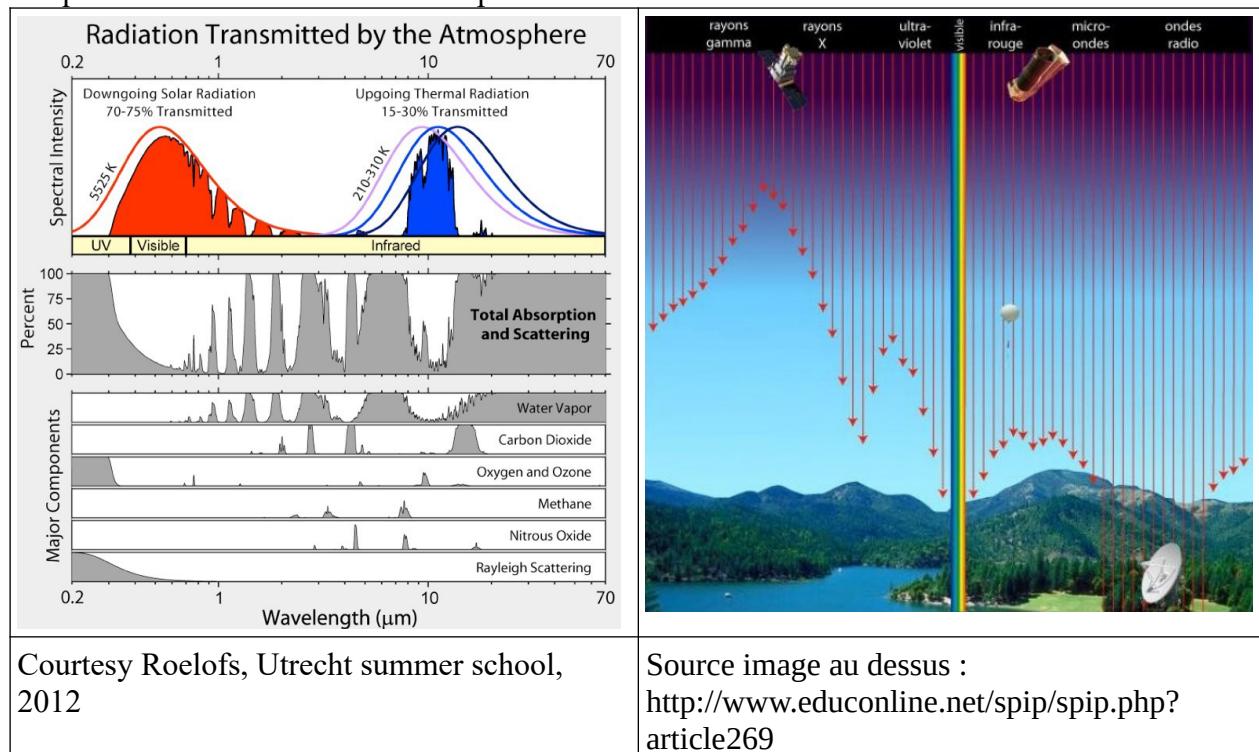
$$M = \sigma T^4 \quad \text{où } \sigma \text{ est la constante de Stefan-Boltzmann (aussi appelée constante de Stefan)} \quad \sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \quad [\text{W/m}^2/\text{K}^4]$$

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:

$$\lambda_{max} = a/T \quad \text{en } [\mu\text{m}] \quad \text{avec } a = 2898 \mu\text{m K} \quad \text{et T température en Kelvin}$$

Ce qui arrive à traverser notre atmosphère :



Dans la figure de gauche : En rouge 73-75% de la radiation solaire est transmise à travers l'atmosphère . Le reste est absorbé (ex par la vapeur d'eau, le CO₂, l'O₂, l'ozone, le méthane, protoxyde d'azote N₂O) ou diffusé (ex Rayleigh).

En bleu (courbe dont le maximum est bien inférieur au maximum de la courbe de radiation solaire quand les courbes ne sont pas normalisées), 15 à 30% de la radiation thermale émise par la terre est transmise à travers l'atmosphère (non absorbée ou diffusée).

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 .

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

avec c vitesse de la lumière dans le vide et ν 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 T , pression p , salinité S , 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 de sa variation entre des couches d'air différentes (en général la température est le premier facteur de variation). 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 l'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 ($nk = \pi \mu \sigma c^2 / v$) 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.

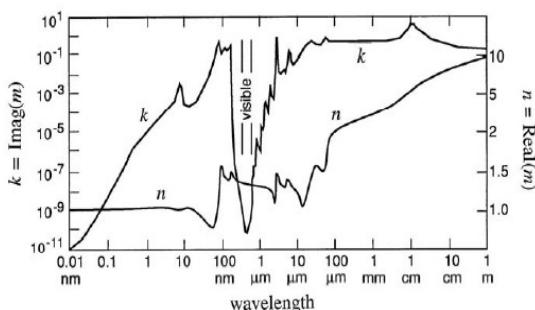
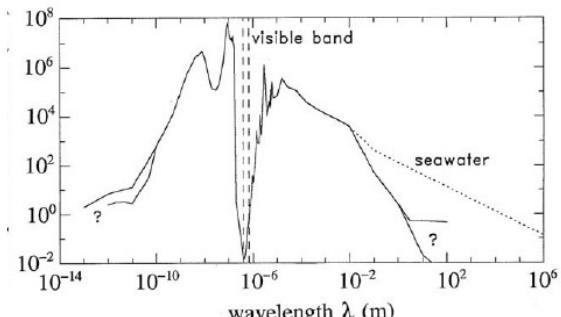


Fig. 3.3. The optical constants of pure water. The left axis gives the imaginary part of m , and the right axis gives the real part of m , where m is the complex index of refraction. [redrawn from Zolotarev and Demin (1977), with permission]



4. Spectral absorption coefficient of pure water (solid line) and of pure seawater (dotted line) as a function of wavelength. [drawn from data compiled by 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

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

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

$$n_{\text{eau salée}} = 1,33 - 1,367$$

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

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

Annexe

Les milieux dits « main gauche » ou à « indice de réfraction négatif » (théorie 1967, Victor Veselago) nécessitent une perméabilité et une permittivité négatives simultanément. Longtemps, cette double condition a été difficile à réaliser, même si l'on connaissait de longue date des milieux présentant une permittivité négative (par exemple les plasmas). En 2006, John Pendry en propose une réalisation à l'aide de structures périodiques métalliques formées d'anneaux concentriques coupés, appelés split-ring resonators (en) (SRR), et de fils métalliques continus. Cela aurait pu rester une curiosité de laboratoire, mais ce qui a réellement attiré l'attention sur ces matériaux exotiques a été la proposition par J. Pendry de réaliser une superlentille dont la résolution ne serait plus limitée par les lois classiques de l'optique. De plus, en 2006, J. Pendry (Angleterre) et U. Leonhardt (Ecosse) ont proposé la réalisation d'une cape d'invisibilité utilisant des métamatériaux. Plusieurs équipes ont démontré depuis que ces prédictions théoriques étaient matérialisables, en réalisant successivement des prototypes de superlentilles et de cape d'invisibilité en micro-onde.

voir métamatériaux <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tamat%C3%A9riaux>

en électromagnétisme, le terme métamatériaux désigne un matériau composite artificiel qui présente des propriétés électromagnétiques qu'on ne retrouve pas dans un matériau naturel.

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).

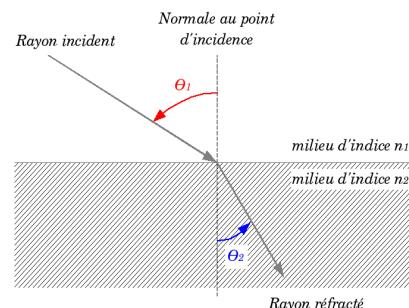
Les deux modèles sont équivalents dans le cas de la réfraction, cependant on préférera le premier pour *expliquer* le phénomène, et le second pour le *quantifier*.

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}) :

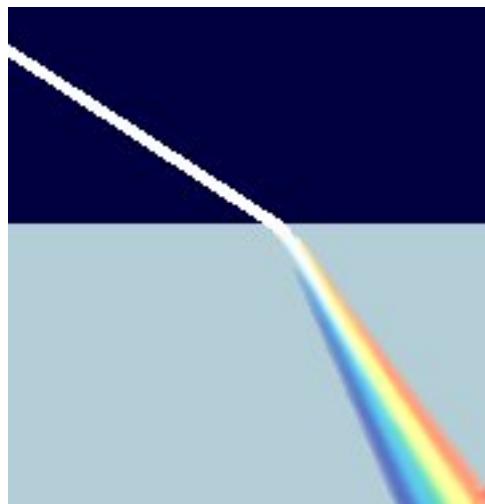
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2).$$

(Snell 1621 – Descartes 1637 dans le traité « Le Dioptrique »)

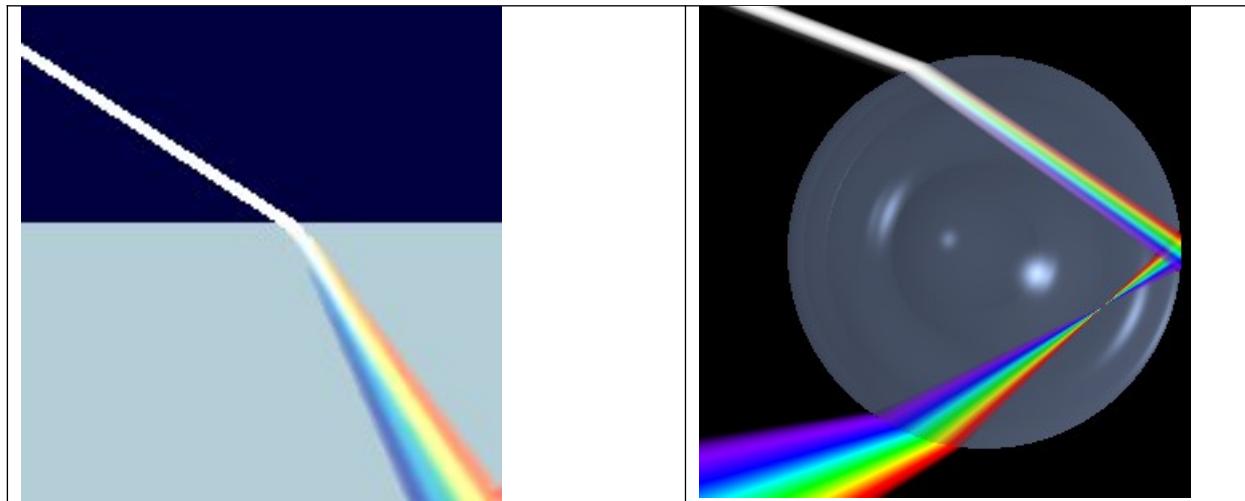


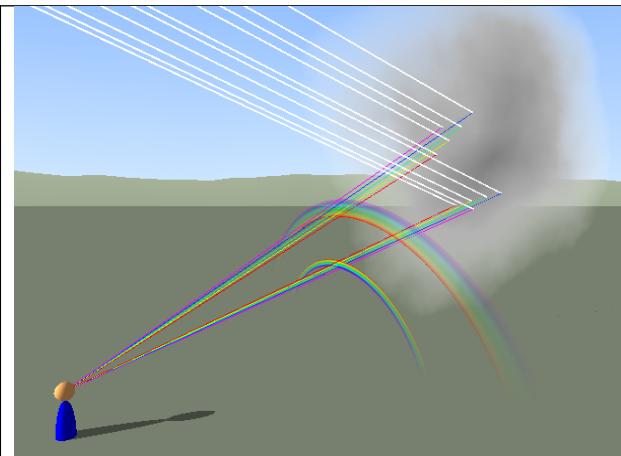
b) Couleurs dues à la réfraction

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 réfraction va permettre de les séparer et de visualiser ainsi les couleurs qui composent le rayonnement.



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



Primaire : réfraction dans la goutte suivie par 1 seule réflexion dans la goutte

Secondaire : réfraction dans la goutte suivie par 2 réflexions dans chaque goutte



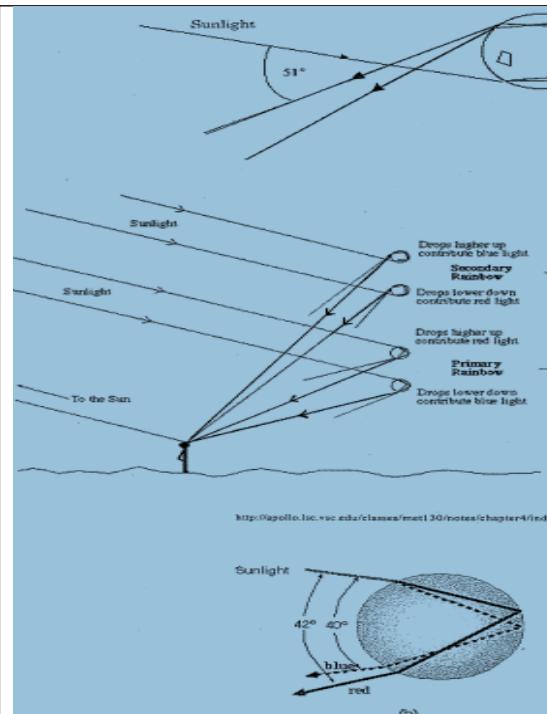
Photos remerciement M. Fieux



Note l'arc en ciel primaire contient le rouge (bleu) en haut (bas); l'ordre des couleurs est inversé dans l'arc-en ciel secondaire.

Il existe aussi 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. La forme et l'orientation particulière des cristaux, ainsi que l'incidence du rayonnement lumineux sont responsables du type de halo observé.

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.



Note : Il existe des arc-en ciel blancs ; « d'après l'Organisation météorologique mondiale, une institution des Nations Unies, le « fog bow » est un phénomène lumineux météorologique « dû à la réfraction et à la réflexion et, dans une moindre mesure, à la diffraction de la lumière solaire ou lunaire, par de très petites gouttelettes d'eau » contenues dans la brume ou le brouillard. » (Actu Strasbourg,

Il se caractérise par « une bande blanche, généralement bordée d'une fine frange rouge à l'extérieur et d'une fine frange bleue à l'intérieur »



(Grendelbruch, Bas Rhin, altitude 1000 m, France 2021 ;
https://actu.fr/meteo/photos-arc-en-ciel-blanc-eclair-surpuissant-trois-phenomenes-meteo-en-alsace-en-2021_46612677.html)

6) Couleur due à la réflexion

Pour aborder de façon simplifiée le concept du raisonnement, 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).

Mais dans le cas d'une onde EM, le processus est en fait plus complexe et fait jouer des coefficients appelés **coefficients de Fresnel**. 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.

Les coefficients de Fresnel sont plus compliqués que les coefficients r et t définis en début de section car ils dépendent de la polarisation du champ électromagnétique. On considère en général 2 cas : 1) Transverse électrique (TE) : le champ électrique incident est polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, le champ magnétique est contenu dans le plan d'incidence ; 2) Transverse magnétique (TM) : le champ magnétique incident est polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, le champ électrique est contenu dans le plan d'incidence.

Pour le cas Transverse électrique : (TE)

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

On note que $r_{TE} = t_{TE} - 1$ (et non $r_{TE} + t_{TE} = 1$).

Pour plus de détails, voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_Fresnel ou autres ouvrages de référence en optique.

A) cas d'une surface polie plane

Si la lumière incidente arrive à 90° sur la surface polie plane ($\theta_1 = \theta_2 = 0$) :

$$r_{TE} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \text{ et } t_{TE} = \frac{2 n_1}{n_1 + n_2}$$

AN n1 = 1, n2 = n(verre) = 1, 5 ; $r_{TE} = -0,5/2,5 = -0,2$

L'œil est sensible à l'intensité du signal, soit au carré de r_{TE} .

Si on regarde du verre, il y a 3 – 4 % de réflexion ; c'est très peu mais cela peut avoir des effets non négligeables (reflet d'un cadre, de lunettes etc.).

AN2 n1 = 1, n2 = n(eau) = 1, 33 ; $\theta_1 = \theta_2 = 0$ $r_{TE} = -0,33/2,33 = -0,14$

L'œil est sensible à l'intensité du signal, soit au carré de r_{TE} .

Si on regarde de l'eau du dessus, il y a 2 % de réflexion ; c'est très peu mais cela peut avoir des effets non négligeables (détection satellite). En général on regarde avec un angle ; mais on obtient le même résultat si on prend $\theta_1 = \theta_2$

$$\text{Ex } \theta_1 = \theta_2 = 60^\circ; \cos(\theta_1) = 0.5 \quad r_{TE} = \frac{0.5 - 1.33 * 0.5}{0.5 + 1.33 * 0.5} = \frac{-0.33}{2.33}$$

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 (puces électroniques).

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 barbules 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

Une description simple mais précise peut être lue dans « The strange theory of Light and Matter » de Richard Feynman* (traduit en « Lumière et Matière : une étrange histoire »).

* US 1918-1988 un des physiciens les plus influents de la seconde moitié du XXe siècle, en raison notamment de ses travaux sur l'électrodynamique quantique relativiste, les quarks et l'hélium superfluide. Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger et lui sont colauréats du prix Nobel de physique de 1965 pour leurs travaux en électrodynamique quantique.

Le diagramme de Feynman est un outil qu'il a inventé à la fin des années 1940 pour réaliser les calculs de diffusion en théorie quantique des champs.

7) Couleur due à la diffusion

A) rappels sur la diffusion - Couleurs

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 de réflexion diffuse ou 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 (le cas de la décomposition de la lumière par un prisme ou effet de l'arc en ciel est une transmission diffuse ou refraction).

Ce processus est le plus souvent « élastique », c'est-à-dire qu'il a lieu sans changement de fréquence des rayonnements composant le faisceau.

Bref 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 inférieures ou comparables aux longueurs d'onde. Cet effet est visible dans les systèmes colloïdaux, les suspensions ou les émulsions. Le phénomène est facilement observable sur des rayons de lumière lorsqu'ils traversent des zones riches en particules solides ou liquides (par exemple de la poussière). Il expliqua ainsi le bleu du ciel avant le support théorique de Rayleigh (1871) ou divers « effets Tyndall » (ex. rayons de soleil vus dans la brume).

La diffusion est responsable de la couleur bleue des yeux des nouveaux nés. L'iris est composé de régions cristallines, de vésicules d'air et de zones avec des pigments (ex la mélatonine). A la naissance, les pigments des nouveaux-nés caucasiens ont tendance à ne pas être actifs ; du coup la diffusion (en particulier bleu-grise) domine par rapport à l'absorption. Par la suite, lorsque le bébé grandit, des pigments colorés s'activent et l'absorption devient responsable de la couleur des yeux de l'enfant.

(Wikipédia) 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 diffusent 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.

B) Types de diffusion

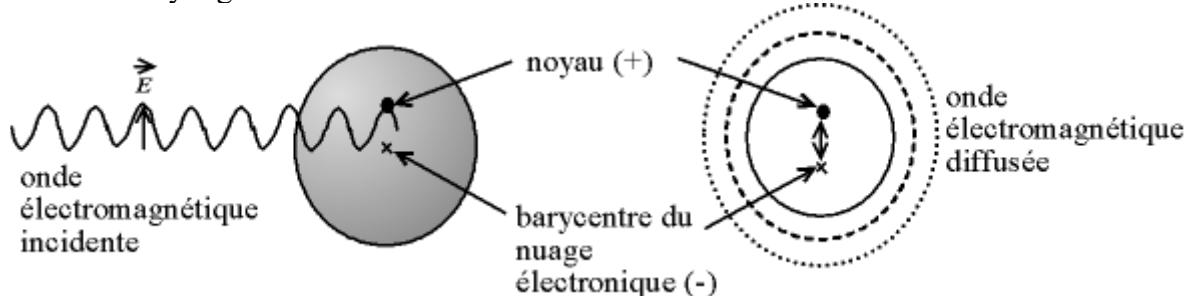
i) Diffusion de Rayleigh (1871) d (particule) $\ll \lambda$ (énergie)

Intensité est en $1/\lambda^4$ + forte pour λ petit

Historique (inspiré de Wikipédia) : John William Strutt Rayleigh est un physicien anglais (1842 - 1919) qui a donné son nom à une unité de mesure d'intensité lumineuse, à la diffusion Rayleigh dans le domaine ondulatoire (1871), à la loi de Rayleigh en probabilités et statistiques, à la loi de Rayleigh-Jeans en thermodynamique, à l'onde de Rayleigh en sismologie, au nombre de Rayleigh en mécanique des fluides, au quotient de Rayleigh en analyse numérique.

La diffusion Rayleigh est un mode de diffusion des ondes électromagnétiques, et notamment de 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).

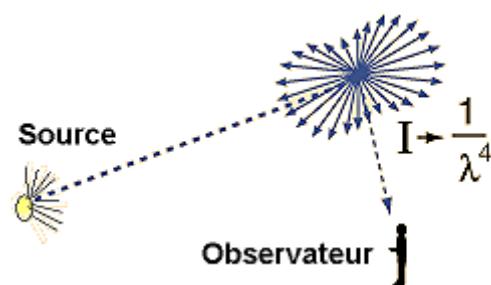
L'onde électromagnétique peut être décrite comme un champ électrique oscillant couplé à un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ce champ électrique va déformer le nuage électronique des atomes, le barycentre des charges négatives oscille ainsi par rapport au noyau (charge positive). Le dipôle 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 dipolaires beaucoup plus petits que la longueur d'onde est la suivante:

$$I_s(r, \psi, \lambda) = I_0 \frac{(9\pi^2 V^2)}{(2r^2 \lambda^4)} \left(\frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \right)^2 (1 + \cos^2 \psi)$$



Où :

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

L'angle ψ correspond à l'angle entre la direction de propagation de la lumière incidente et l'observateur.

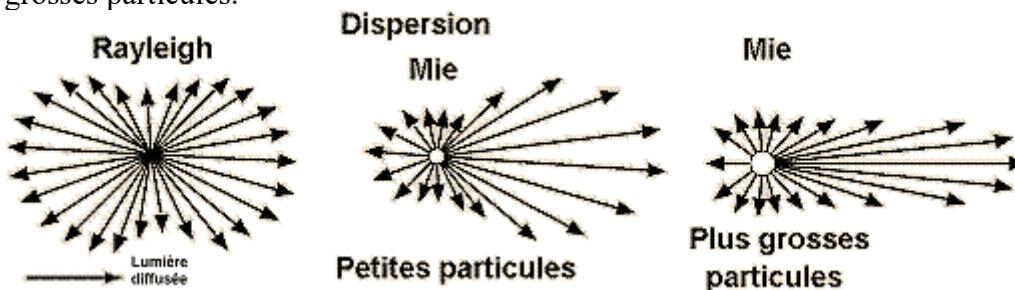
On voit que l'intensité est fortement dépendante de la longueur d'onde et de l'angle de vue dans la formule ci-dessus. Ceci permet d'expliquer pourquoi le ciel est bleu en plein jour (diffusion dominante) et pourquoi le soleil est rouge à son lever et à son coucher. Dans ce dernier cas, la trajectoire parcourue par la lumière est plus longue qu'en plein jour, il y a diffusion (et absorption) complète des longueurs d'onde courtes pour ne laisser que les longueurs d'onde longues (couleurs rouge et orange).

Cette diffusion Rayleigh est la première cause de « flou » dans les photographies ou de la couleur bleu grise des photos prises, par exemple, d'avion. Pour réduire cet effet, on peut utiliser un filtre retirant les courtes longueurs d'onde.

ii) Diffusion de Mie

d (particule) et λ (énergie) sont du même ordre de grandeur
ex. vapeur d'eau, poussières

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. Mais elle influence plutôt les longues longueurs d'onde. Elle est non négligeable par rapport à la diffusion Rayleigh quand le ciel est voilé, nuageux.

iii) Diffusion non sélective

d (particule) $\gg \lambda$ (énergie)

ex. gouttes d'eau (5-100 μm)

Cette diffusion est à peu près égale pour les longueurs d'onde du visible et du proche et moyen IR. C'est pour cela qu'elle est nommée : diffusion non « sélective » par rapport à la longueur d'onde. En conséquence, les brouillards et nuages apparaissent blancs.

7) Couleur due à la diffraction

La diffraction est le résultat de l'interférence des ondes diffusées lorsqu'elles rencontrent un obstacle qui ne leur est pas complètement transparent. Le phénomène peut être interprété comme la diffusion d'une onde par les différents points de l'objet.

Note : Pour des raisons historiques, on distingue la diffraction des interférences ; mais ces deux comportements dérivent de la nature ondulatoire d'un phénomène et ne vont souvent pas l'un sans l'autre donc certains disent qu'on ne devrait utiliser qu'un seul terme. En effet il ne peut y avoir de diffraction sans interférences. Cependant la réciproque n'est pas vraie, il y a des interférences sans diffraction dans certains cas.

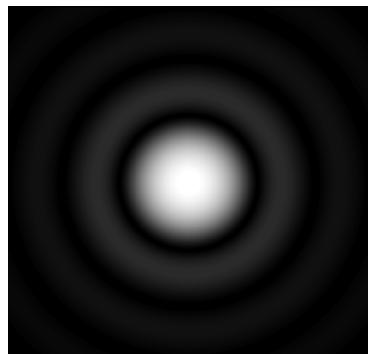
La diffraction s'observe avec la lumière, mais également avec le son, les vagues, les neutrons, les rayons X (une onde électro-magnétique comme la lumière) ou la matière. Elle est une signature de la nature ondulatoire d'un phénomène.

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.

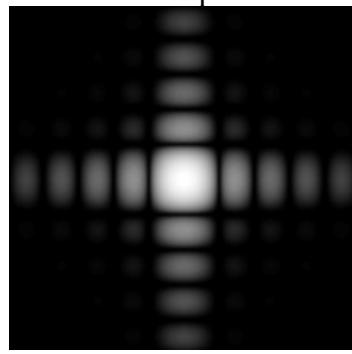
Si l'observateur est près de l'objet, il observe la diffraction de Fresnel. S'il est loin, il observe la diffraction de Fraunhofer.

Historique (Wikipédia) - Joseph von Fraunhofer est un opticien et physicien allemand (1787 - 1826). Il fut l'inventeur du spectroscope avec lequel il repéra les raies du spectre solaire.

Ex.Diffraktion de Fraunhofer pour une lumière monochromatique

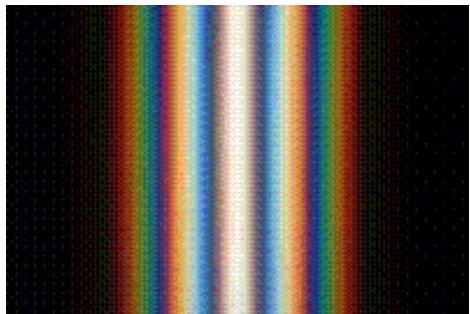


Diffraction par un trou rond

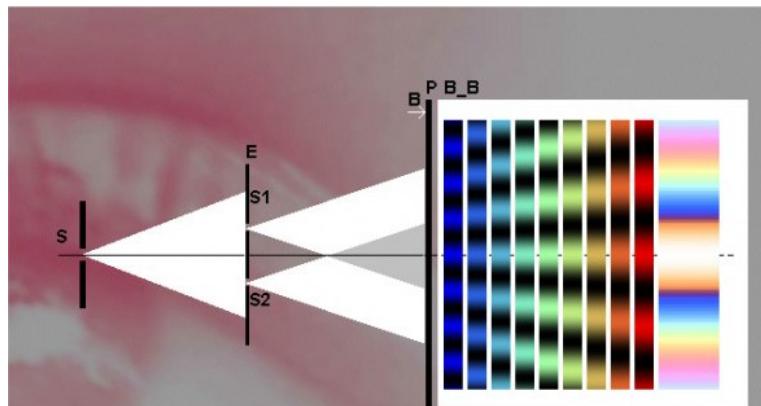


Diffraction par un trou carré

Pour une lumière polychromatique, l'apparition des spectres de diffraction (couleurs du spectre visible) est notable.



Interférence en lumière blanche
(polychromatique)
[http://d.ruze.free.fr/phcours2013/
trois/diffraction_interferences.html](http://d.ruze.free.fr/phcours2013/trois/diffraction_interferences.html)



Et à droite de l'écran, la superposition de ces différents systèmes en supposant que les différentes radiations contribuent au phénomène avec la même intensité et que les différentes intensités des franges observées s'additionnent.

Suite

[http://static.intellego.fr/uploads/1/5/1543_lumiere
polychromatique.png](http://static.intellego.fr/uploads/1/5/1543_lumiere_polychromatique.png)