

Cours E314

Principe d'éclairagisme

Module 1

La Lumière
Anatomie de l'œil
La vision
Diagramme de Chromaticité
Contraste
Luminance de Voile

Professeur:
Peer Eric Moldvar
Consultant en éclairage
peer-eric.moldvar@polymtl.ca

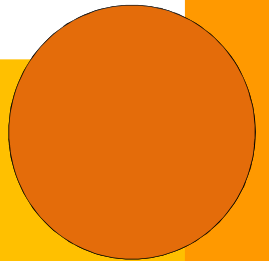


Module 1:

- La Lumière
Définition
- Anatomie de l'œil
Rétine ,cônes, bâtonnets.
- La vision
photopique, mésopique, scotopique, daltonisme
- Diagramme de Chromaticité
- Contraste
- Luminance de Voile

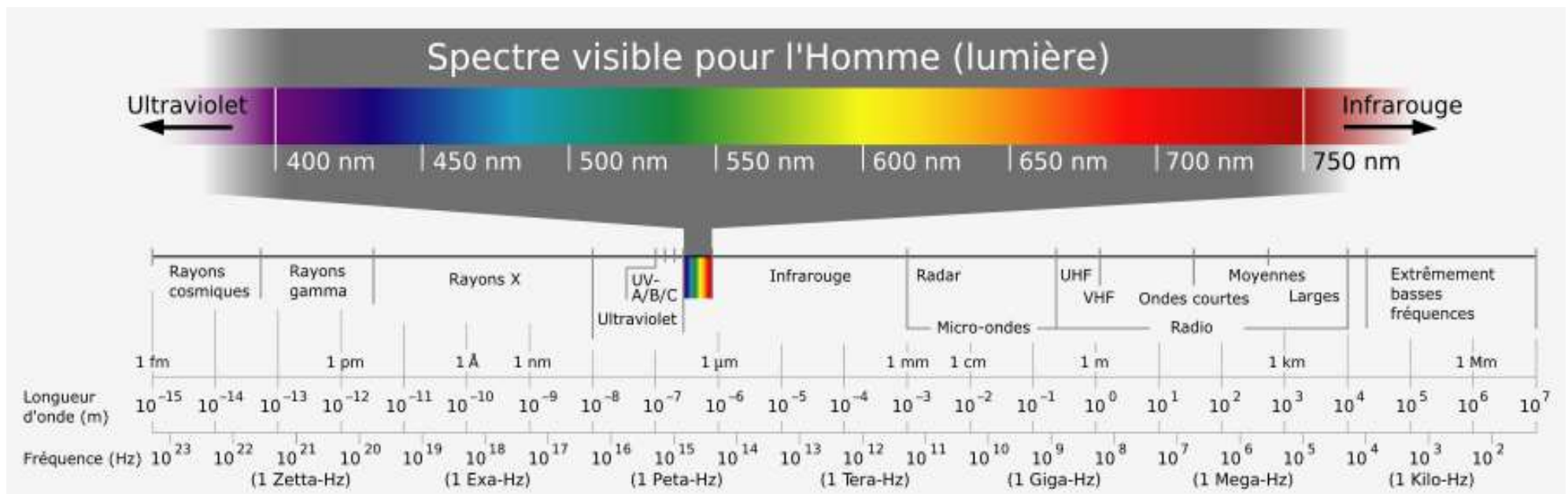


La Lumière



Lumière

On appelle **lumière** l'ensemble des ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain, c'est-à-dire comprises dans des longueurs d'onde de 380nm (violet) à 780nm (rouge). La lumière est intimement liée à la notion de couleur tel que perçu par l'homme.

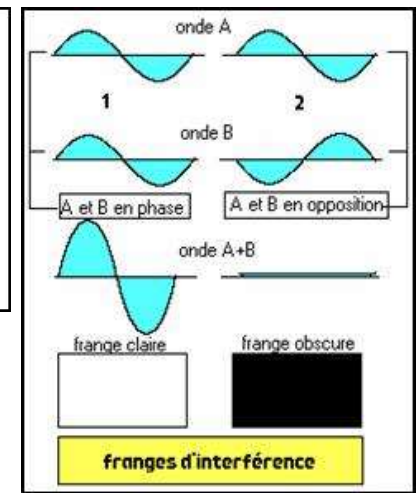
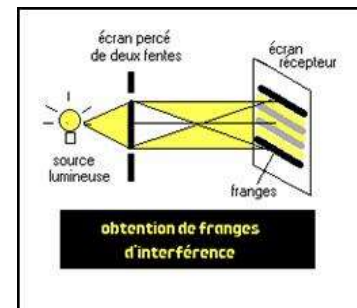
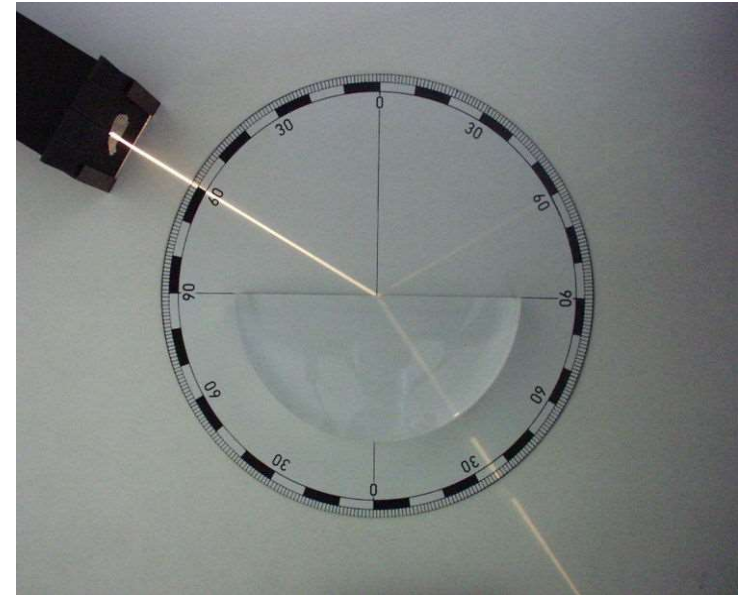


Un être humain dont la vision des couleurs est considérée comme normale est capable de percevoir **15000 nuances**.

Propriété de la lumière

En 1678, Huygens propose une théorie ondulatoire de la lumière, publiée en 1690. Dans son *Traité de la lumière*, **Thomas Young** expérimente en 1801 la diffraction et les interférences de la lumière. En 1821, **Augustin Fresnel** énonce que la conception ondulatoire de la lumière est seule capable d'expliquer de façon convaincante tous les phénomènes de polarisation en établissant la nature transversale des ondes lumineuses et en 1850, **Newton** avait développé une théorie purement corpusculaire de la lumière. Elle est rejetée avec la mise en évidence de phénomènes d'interférence (dans certains cas, additionner deux sources de lumière donne de l'obscurité, ce qui n'est pas explicable par une théorie corpusculaire). **Foucault** fait prévaloir la théorie ondulatoire sur la théorie corpusculaire newtonienne avec son expérience sur la vitesse de propagation de la lumière.

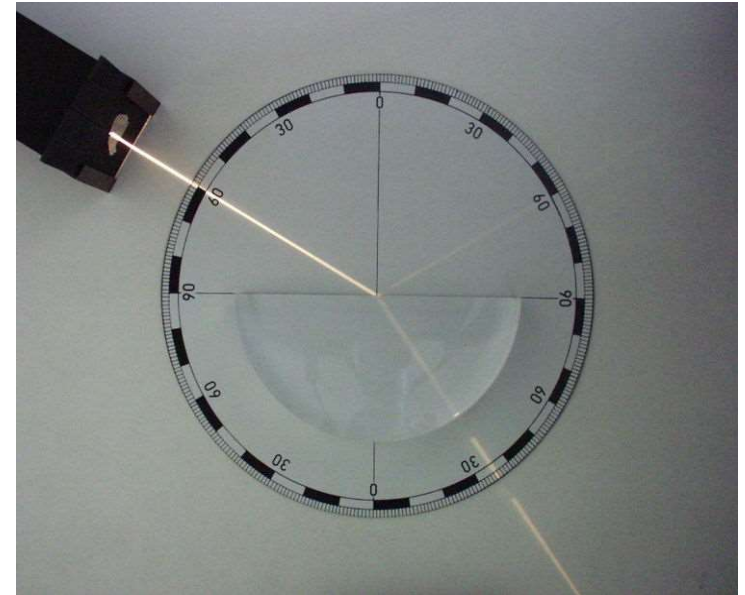
Il faudra attendre les travaux de **Maxwell** pour expliquer le phénomène ondulatoire : il publie en 1873 un traité sur les ondes électromagnétiques, définissant la lumière comme une onde qui se propage sous la forme d'un rayonnement, le spectre de ce rayonnement n'étant qu'une partie de l'ensemble du rayonnement électromagnétique, beaucoup plus large : infrarouge, ultraviolet, ondes radio, rayons X... Les équations de **Maxwell** permettent de développer une théorie générale de l'électromagnétisme.



Propriété de la lumière

La physique du XXe siècle a montré que l'énergie transportée par la lumière est quantifiée. **On appelle photon le quantum d'énergie (la plus petite quantité d'énergie, indivisible), qui est aussi une particule.** L'existence de cette particule ne contredit pas la théorie ondulatoire, au contraire : la dualité onde-particule (ou onde-corpuscule) en mécanique quantique dit qu'à chacune des particules est associée une onde. Finalement, si on considère le déplacement d'un unique photon, les points d'arrivée possibles sont donnés sous forme de probabilités par l'onde associée. Sur un très grand nombre de photons, chaque lieu d'arrivée est illuminée avec une intensité proportionnelle à la probabilité... ce qui correspond au résultat de la théorie classique. Le concept de photon a donné lieu à des avancées importantes en physique expérimentale et théorique. **Le photon est une particule de masse nulle.**

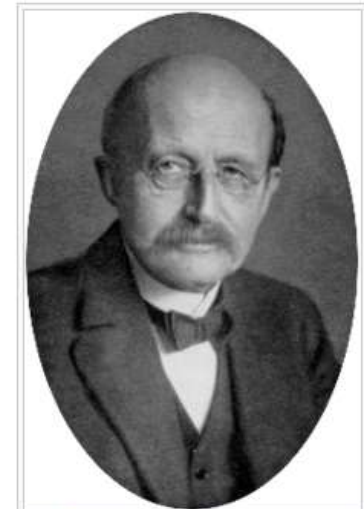
■ ■ ■



La physique quantique

La **physique quantique** est l'appellation générale d'un ensemble de théories physiques nées au XX^e siècle qui, comme la théorie de la relativité, marque une rupture avec ce que l'on appelle maintenant la physique classique, l'ensemble des théories et principes physiques admis au XIX^e siècle. Les théories dites « quantiques » décrivent le comportement des atomes et des particules — ce que la physique classique, notamment la mécanique newtonienne et la théorie électromagnétique de Maxwell, n'avait pu faire — et permettent d'élucider certaines propriétés du rayonnement électromagnétique.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Physique_quantique



Max Planck est considéré comme le père de la physique quantique. La constante de Planck, h , joue un rôle central dans la physique quantique, bien au-delà de ce qu'il imaginait lorsqu'il l'a introduite.

La physique quantique

Panorama général

La physique quantique a apporté une révolution conceptuelle ayant des répercussions jusqu'en philosophie (remise en cause du déterminisme) et en littérature (science-fiction). Elle a permis nombre d'applications technologiques : énergie nucléaire, imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire, diode, transistor, circuit intégré, microscope électronique et laser. Un siècle après sa conception, elle est abondamment utilisée dans la recherche en chimie théorique (chimie quantique), en physique (mécanique quantique, théorie quantique des champs, physique de la matière condensée, physique nucléaire, physique des particules, physique statistique quantique, astrophysique, gravité quantique), en mathématiques (formalisation de la théorie des champs) et, récemment, en informatique (ordinateur quantique, cryptographie quantique). Elle est considérée avec la relativité générale d'Einstein comme l'une des deux théories majeures du XXe siècle.

La physique quantique est connue pour être contre-intuitive, choquer le « sens commun » et nécessiter un formalisme mathématique ardu. Feynman, l'un des plus grands théoriciens spécialistes de la physique quantique de la seconde moitié du XXe siècle, a ainsi écrit :

« Je crois pouvoir affirmer que personne ne comprend vraiment la physique quantique¹. »

La raison principale de ces difficultés est que le monde quantique (limité à l'infiniment petit, mais pouvant avoir des répercussions à plus grande échelle²) se comporte très différemment de l'environnement macroscopique auquel nous sommes habitués. Quelques différences fondamentales qui séparent ces deux mondes sont par exemple :

la quantification : Un certain nombre d'observables, par exemple l'énergie émise par un atome lors d'une transition entre états excités, sont quantifiés, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent prendre leur valeur que dans un ensemble discret de résultats. A contrario, la mécanique classique prédit le plus souvent que ces observables peuvent prendre continûment n'importe quelle valeur.

la dualité onde-particule : La notion d'onde et de particule qui sont séparées en mécanique classique deviennent deux facettes d'un même phénomène, décrit de manière mathématique par sa fonction d'onde. En particulier, l'expérience prouve que la lumière peut se comporter comme des particules (photons, mis en évidence par l'effet photoélectrique) ou comme une onde (rayonnement produisant des interférences) selon le contexte expérimental, les électrons et autres particules pouvant également se comporter de manière ondulatoire.

le principe d'indétermination de Heisenberg : Une indétermination fondamentale empêche la mesure exacte simultanée de deux grandeurs conjuguées. Il est notamment impossible d'obtenir une grande précision sur la mesure de la vitesse d'une particule sans obtenir une précision médiocre sur sa position, et vice versa. Cette incertitude est structurelle et ne dépend pas du soin que l'expérimentateur prend à ne pas « déranger » le système ; elle constitue une limite à la précision de tout instrument de mesure

le principe d'une nature qui joue aux dés : Si l'évolution d'un système est bel et bien déterministe (par exemple, la fonction d'onde régie par l'équation de Schrödinger), la mesure d'une observable d'un système dans un état donné connu peut donner aléatoirement une valeur prise dans un ensemble de résultats possibles.

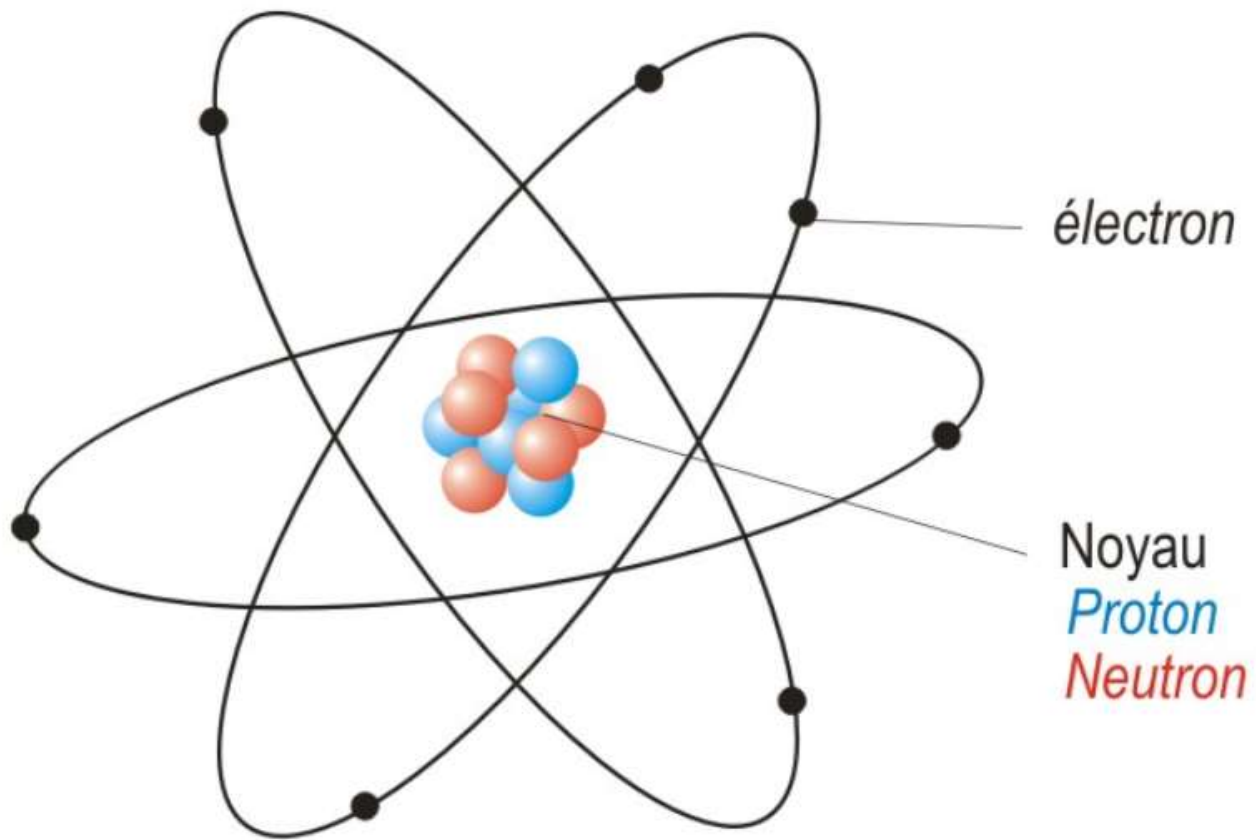
l'observation influe sur le système observé : Au cours de la mesure d'une observable, un système quantique voit son état modifié. Ce phénomène, appelé réduction du paquet d'onde, est inhérent à la mesure et ne dépend pas du soin que l'expérimentateur prend à ne pas « déranger » le système.

la non-localité ou intrication : Des systèmes peuvent être intriqués de sorte qu'une interaction en un endroit du système a une répercussion immédiate en d'autres endroits. Ce phénomène contredit en apparence la relativité restreinte pour laquelle il existe une vitesse limite à la propagation de toute information, la vitesse de la lumière ; toutefois, la non-localité ne permet pas de transférer de l'information.

la contrafactualité : Des événements qui auraient pu se produire, mais qui ne se sont pas produits, influent sur les résultats de l'expérience.

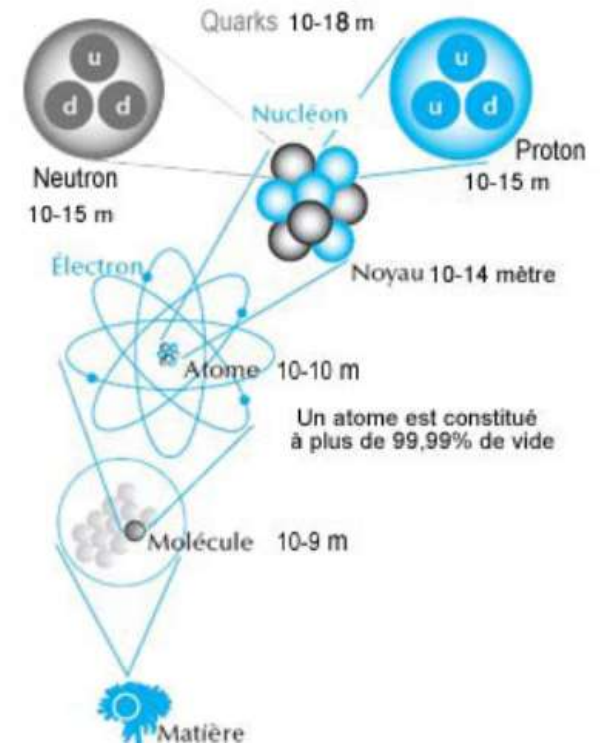
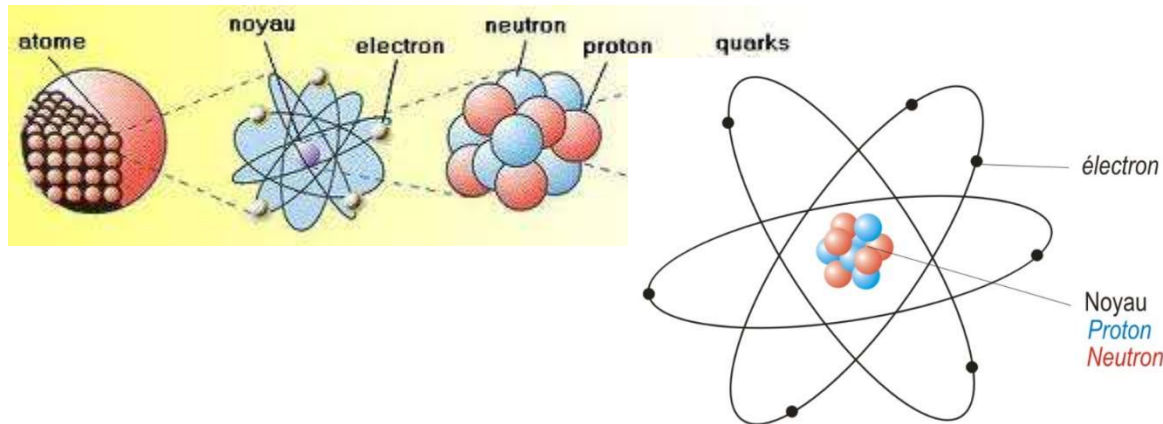
Propriété de la lumière

Particules Subatomiques



Propriété de la lumière

Particules Subatomiques



Photon (γ)			
Leptons		Electron (e^-), Neutrino (ν)	
Hadrons	Mésons	Pi (π^+ , π^0 , π^-), K (K^+ , K^0 , \bar{K}^0 , K^-), η^0 , ...	
	Baryons	Nucléons	Proton (p), Neutron (n)
		Hypérons	Delta (Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-), Sigma (Σ^+ , Σ^0 , Σ^-), Ksi (Ξ^0 , Ξ^-), Λ^0 , ...

Propriété de la lumière

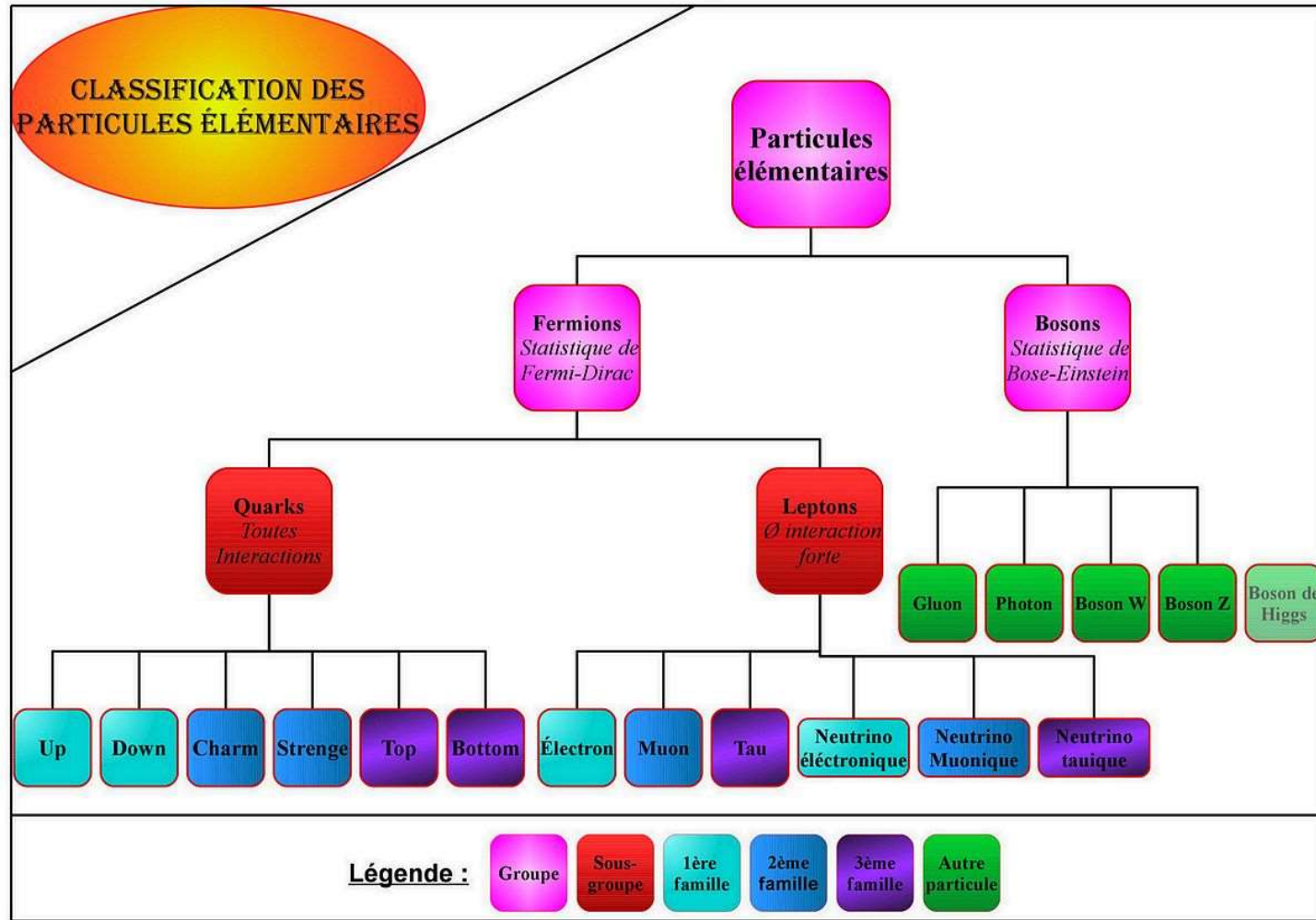
Particules Sub-atomique

TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD FERMIER

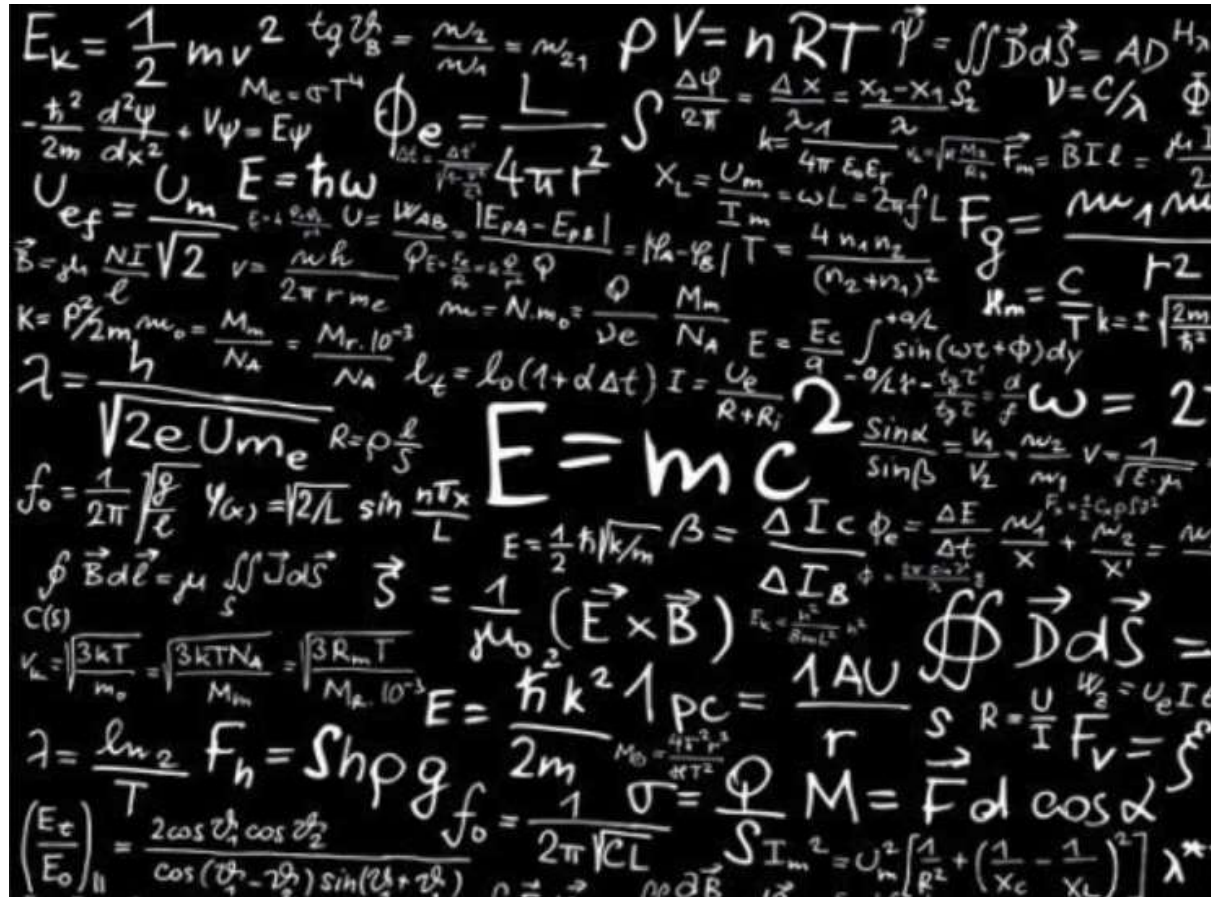
		LEPTONS		QUARKS	
		peuvent se déplacer librement		prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
FERMIONS La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.	Première famille	ÉLECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est de -1 .	NEUTRINO ÉLECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.	BAS Sa charge électrique est $-1/3e$. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.	HAUT Sa charge électrique est $+2/3e$. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.
	Deuxième famille	MUON Un compagnon plus massif de l'électron.	NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du Neutrino électronique.	ÉTRANGE Un compagnon plus lourd du "Bas".	CHARME Un compagnon plus lourd du "Haut".
	Troisième famille	TAU Un compagnon encore plus lourd que le Muon.	NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du Neutrino électronique.	BEAUTÉ Un compagnon encore plus lourd du "Bas".	VÉRITÉ ou TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut".
BOSONS VECTEURS Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	PHOTON Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.	GLUON Porteur de la force "forte" entre Quarks.	BOSONS INTERMÉDIAIRES : W, W^\dagger et Z^0 Porteurs de la force "faible", responsables de certaines forces de désintégrations radioactives.		
BOSON DE HIGGS ? <small>Modèle standard</small>	Hypothétique	Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"		Hypothétique	GRAVITON ?

Propriété de la lumière

Particules Subatomiques



Propriété de la lumière

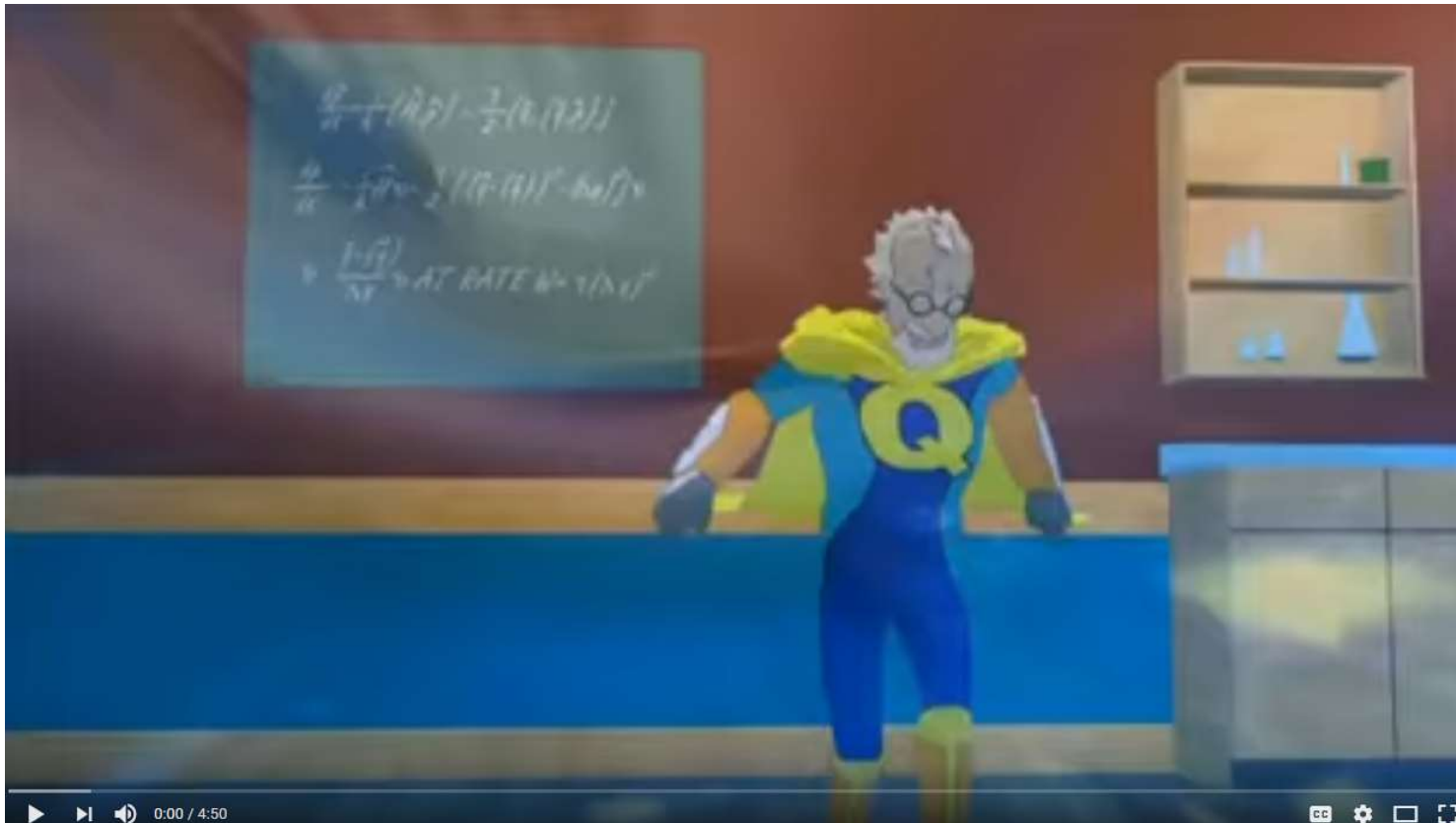


E= énergie de masse

M= masse

C= vitesse de la lumière

Propriété de la lumière



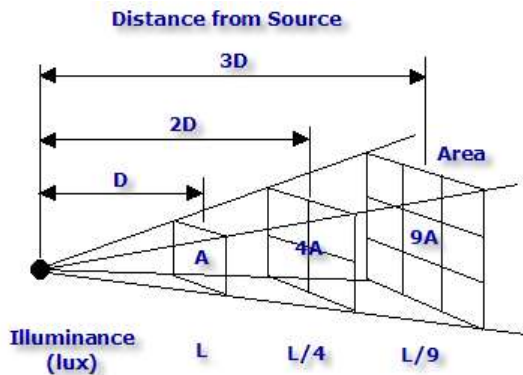
La fente de Young

<https://www.youtube.com/watch?v=fwf1kPlvcAY>

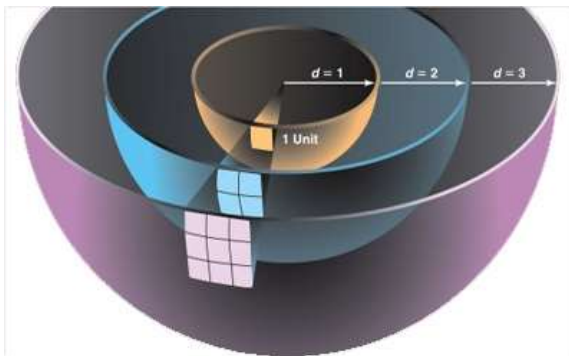
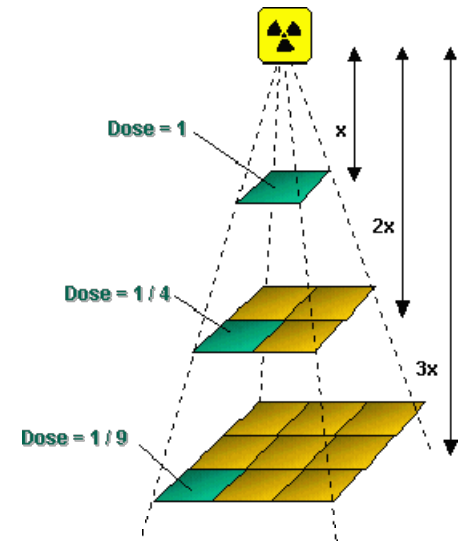
La lumière répond à l'équation fondamentale

Loi de l'inverse du carré

S'applique à plusieurs domaines de la physique



Niveaux sonore en acoustique
Dose reçue d'une source radioactive
Force gravitationnelle
Lumière
Etc...



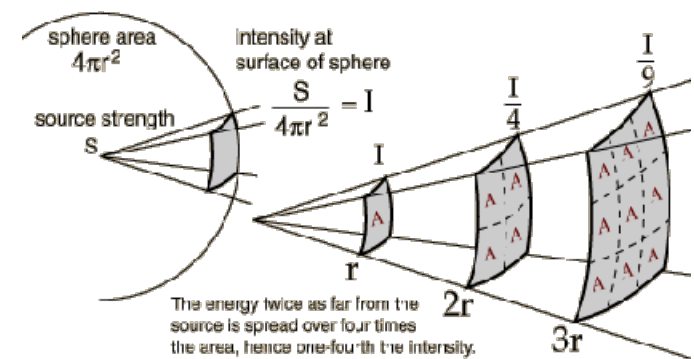
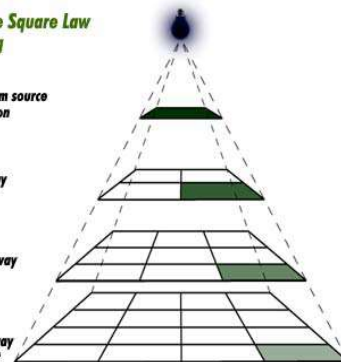
The Inverse Square Law for Lighting

ONE FOOT from source
full illumination

TWO FEET away
1/4 as bright

THREE FEET away
1/9 as bright

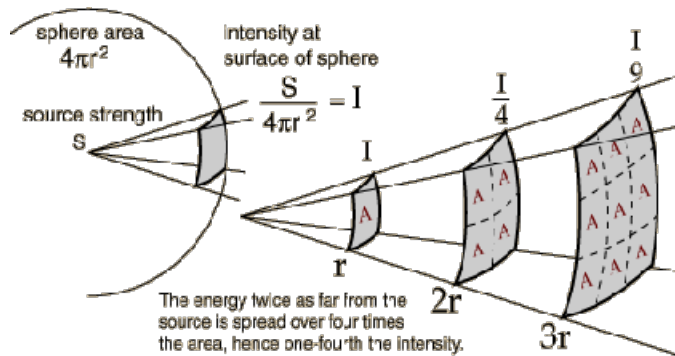
FOUR FEET away
1/16 as bright



Propriété de la lumière

Pour mieux comprendre Intensité lumineuse I Candela (cd)

(Luminance Primaire)



L'intensité du lancé frappé est le même qu'il soit fait de la ligne bleu ou du fond de la patinoire.



Propriété de la lumière

Pour mieux comprendre Éclairement ou illuminance: flux lumineux reçu par unité de surface
E Footcandle (fc) or Lux (lx)



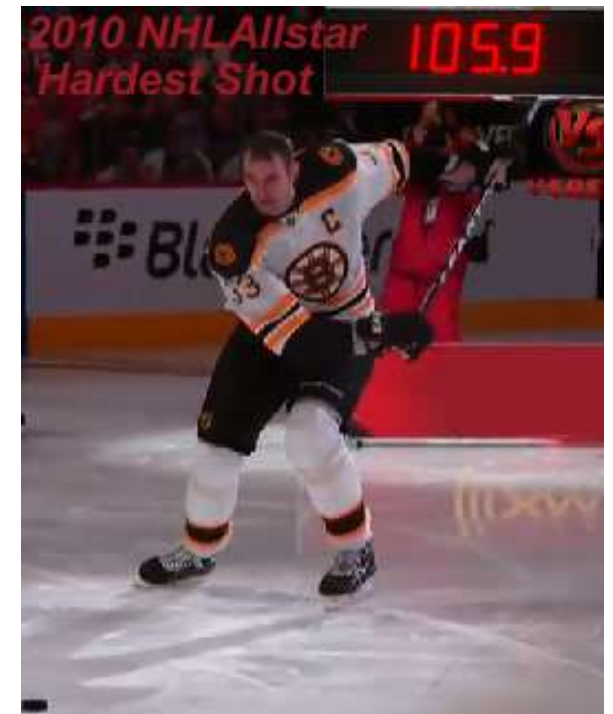
Le FC ou lux en en relation avec la distance d'où a lieu le lancé frappé.

Propriété de la lumière

Pour mieux comprendre la luminance



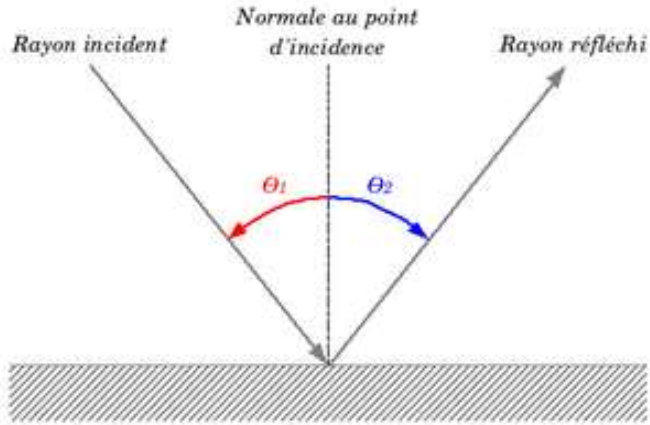
Rebond, nouvelle intensité
Luminance secondaire
Luminance du poteau



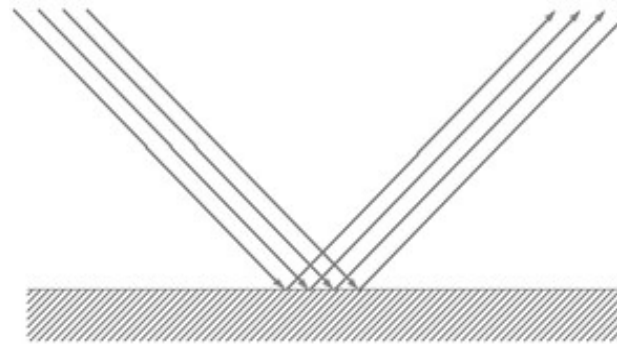
Intensité, du lancée frappé
Luminance primaire

Propriété de la lumière

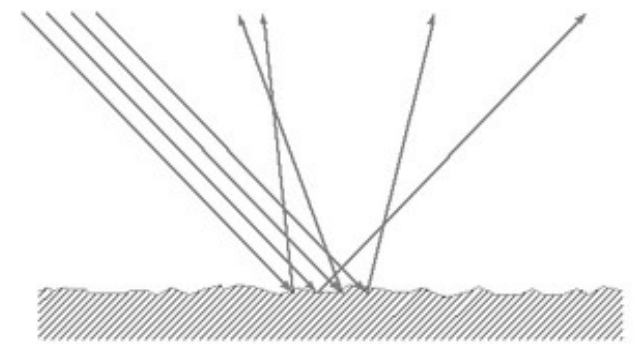
La réflexion en optique géométrique



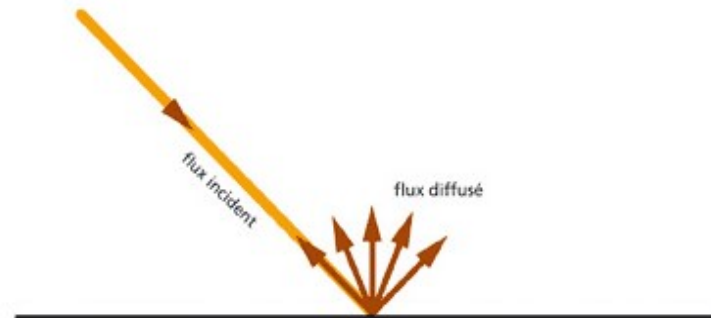
Réflexion spéculaire



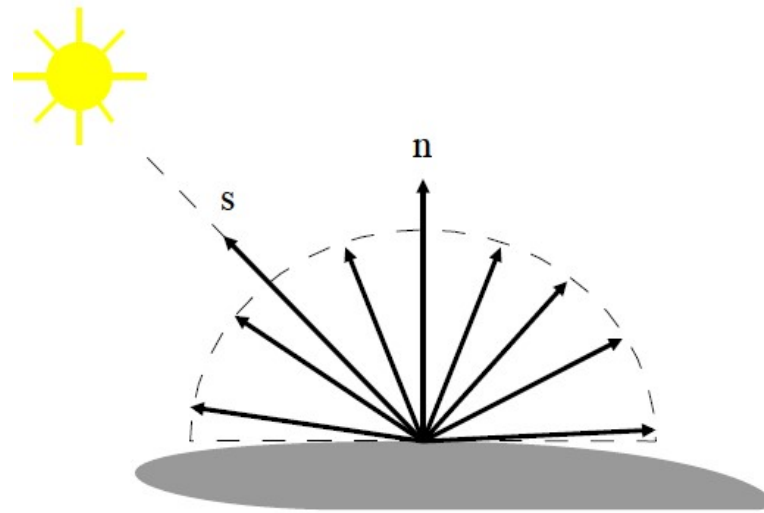
La réflexion diffuse



La réflexion diffuse parfaite



Réflexion lambertienne



Réflexion lambertienne. La lumière est réfléchi uniformément dans toutes les directions de l'espace.

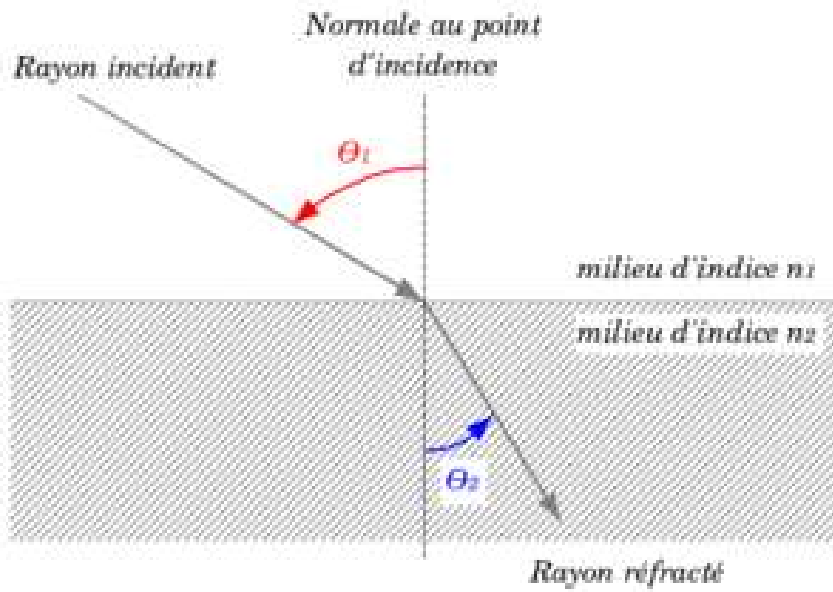
Pour chaque longueur d'onde incidente d'intensité L_s , l'intensité réfléchi

vaut : $L_r = k_d n \cdot s L_s$

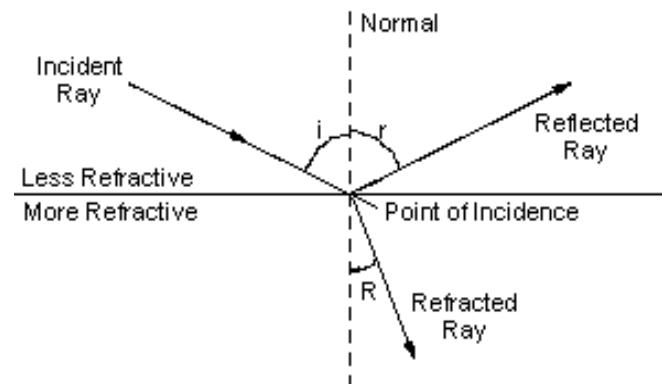
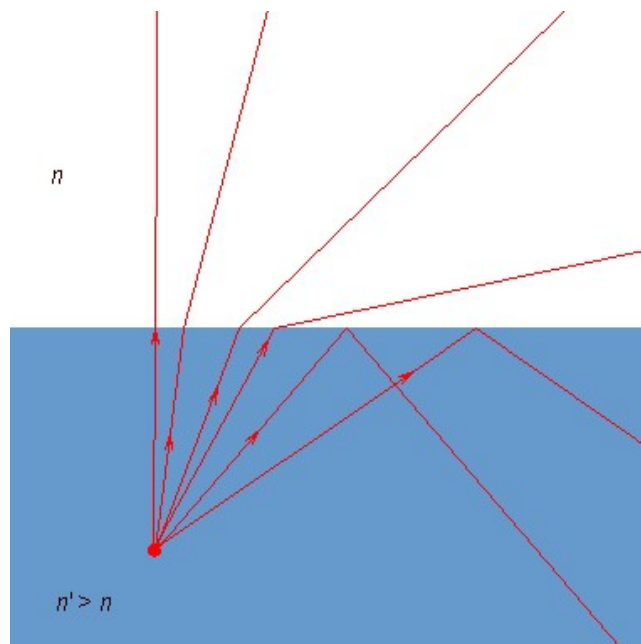
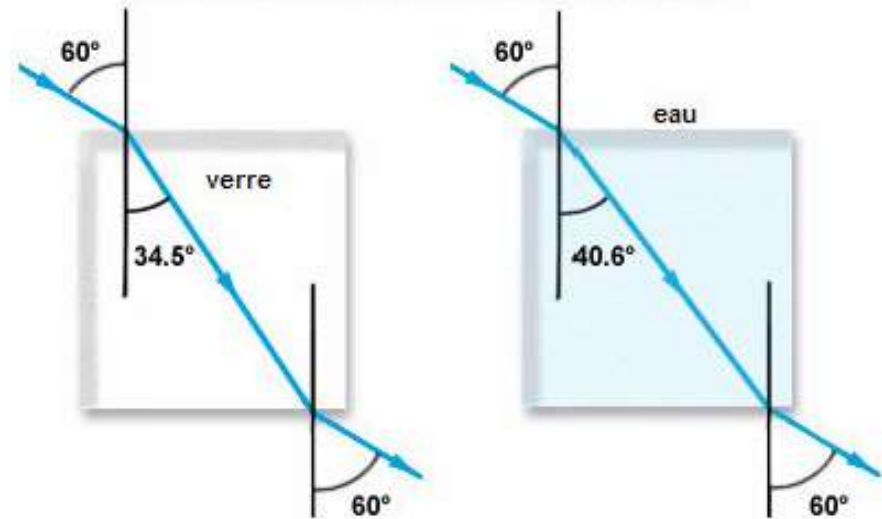
ou k_d est un coefficient fonction du matériau et de la longueur d'onde.

Loi de Lambert : Exitances = La luminance $\times \pi$ ($M = \pi \times L$)

Propriété de la lumière



Réfraction de la lumière à travers le verre et l'eau



Propriété de la lumière

Vitesse de propagation des ondes lumineuses

Dans le vide, la vitesse de propagation des ondes lumineuses est de $c=299\,792\text{ km/s}$ (soit à peu près $300\,000\text{ km/s}$) Dans un milieu transparent, la vitesse de la lumière dépend de la nature de ce milieu et de la couleur de la lumière. Elle est toujours plus faible que dans le vide

Indice de réfraction

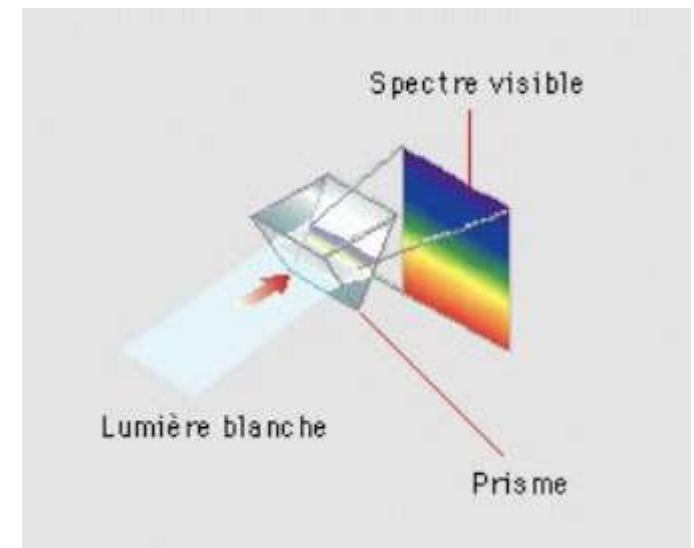
On appelle indice de réfraction d'une substance transparente le rapport $n = c/v$ ou c est la vitesse de propagation dans le vide et v la vitesse de propagation dans la substance.

Les indices de réfraction sont toujours plus grand que 1: la lumière se propage toujours moins vite dans un milieu transparent que dans le vide; plus l'indice de réfraction est grand, plus la vitesse de propagation de la lumière est petite dans ce milieu.

L'indice de réfraction d'une substance dépend de la couleur de la lumière.

Indice de réfraction du verre ordinaire selon la couleur de la lumière

Couleur	longueur d'onde dans le vide (en μm)	fréquence (en 10^{13} Hz)	Indice n	Vitesse de propagation (en km/s)
Ultraviolet proche	0,361	83,0	1,539	194 797
Bleu sombre	0,434	69,2	1,528	196 198
Bleu-vert	0,486	61,8	1,523	196 840
Jaune	0,589	51,0	1,517	197 621
Rouge moyen	0,656	45,7	1,514	198 013
Rouge sombre	0,768	39,1	1,511	198 406

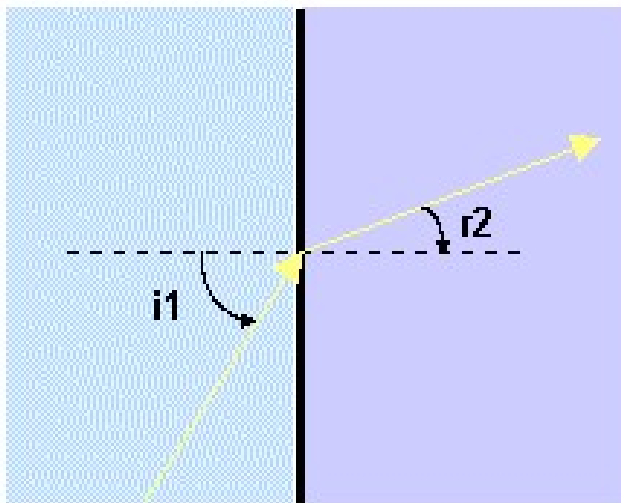


Propriété de la lumière

L'indice de réfraction n d'un milieu déterminé pour une radiation monochromatique donnée est égale au rapport de la vitesse de la lumière c dans le vide, à la vitesse de phase v de cette radiation dans ce milieu :

$$n = \frac{c}{v}$$

milieu transparent d'indice n_1 milieu transparent d'indice n_2



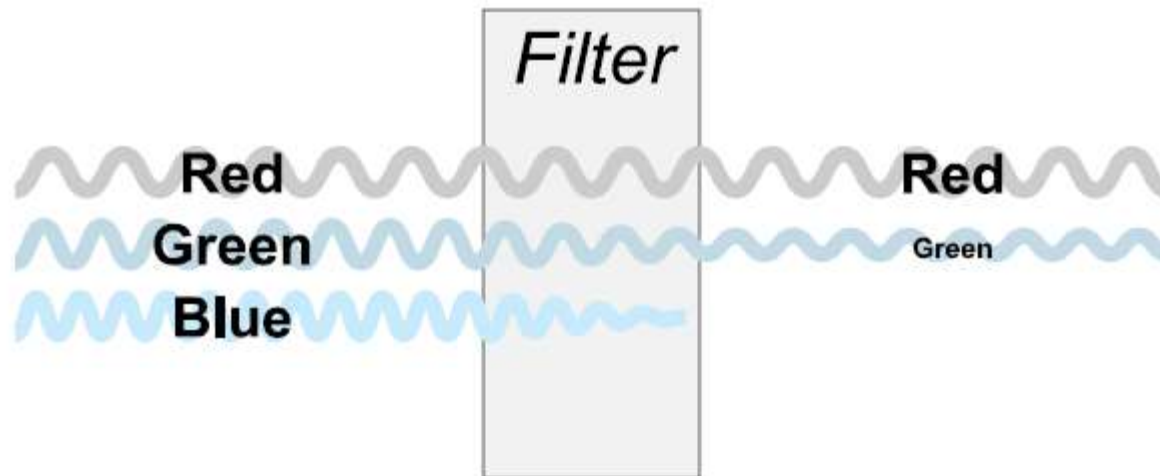
$$n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(r_2)$$

Indice de réfraction de quelques substances à 20°C

Air	1.00	Opaline	1.45
Acétone	1.36	Plexiglass	1.51
Alcool pur	1.32	Polystyrène	1.20
Ambre	1.54	Rubis	1.78
Cristal	1.60 à 2.00	Quartz	1.55 ou 1.64
Diamant	2.42 à 2.75	Saphir	1.77
Eau	1.33	Topaze	1.61
Émeraude	1.57	Tourmaline	1.27
Glace	1.31	Verre	1.50
Glycérine	1.47	Verre crown	1.52
Lapis lazuli	1.61	Verres flint	1.56 - 1.65 - 1.89

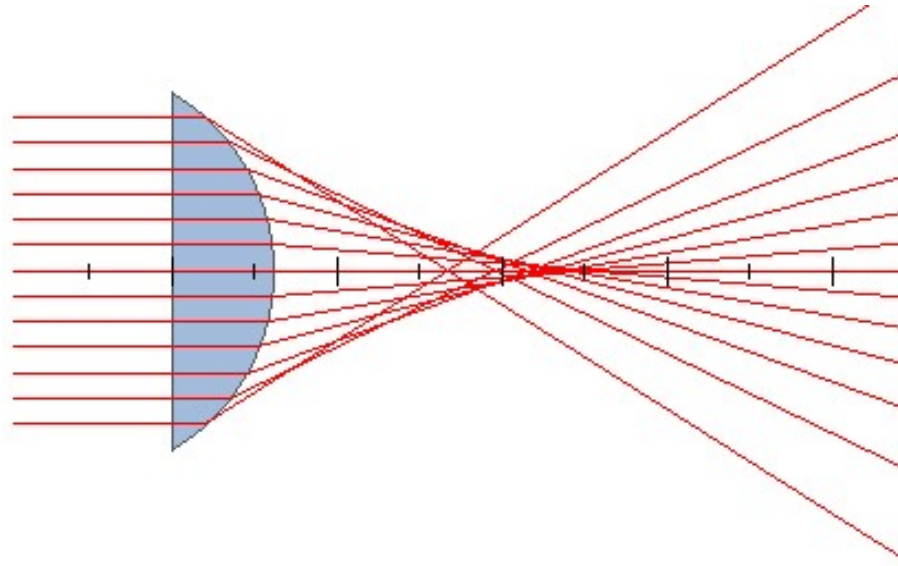
Propriété de la lumière

Des filtres optiques peuvent filtrer selon les longueurs d'ondes la lumière

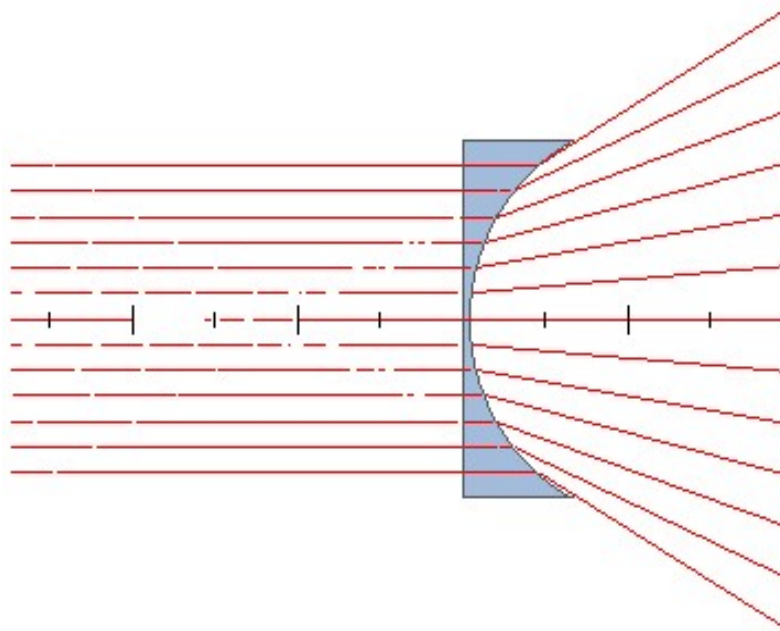


Propriété de la lumière

Lentille plan convexe convergente

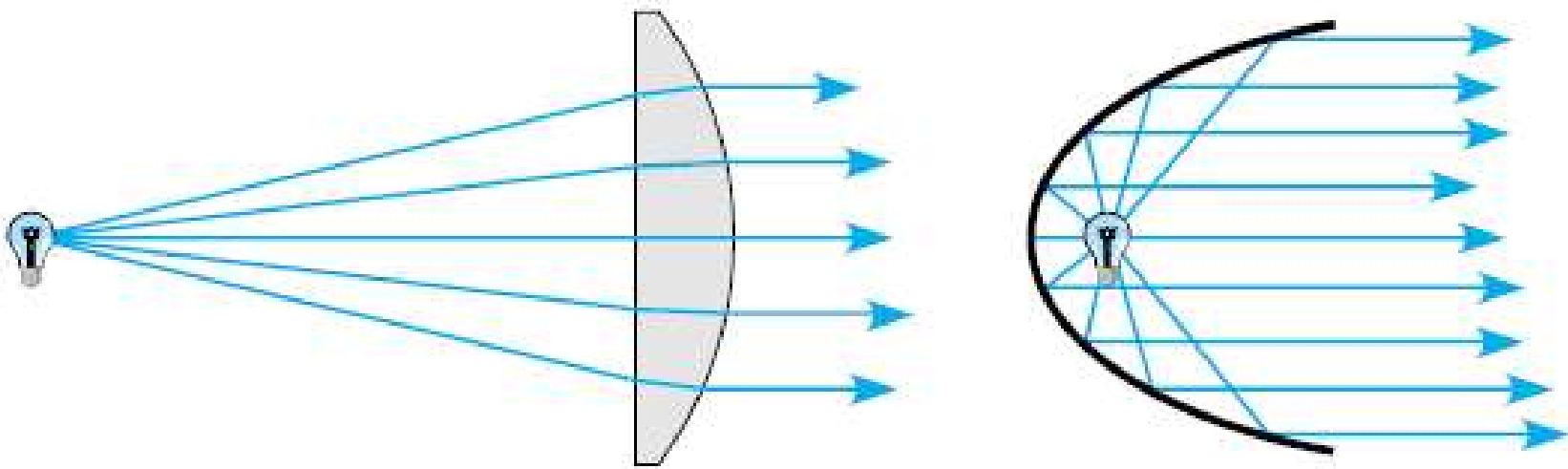


Lentille plan concave divergente



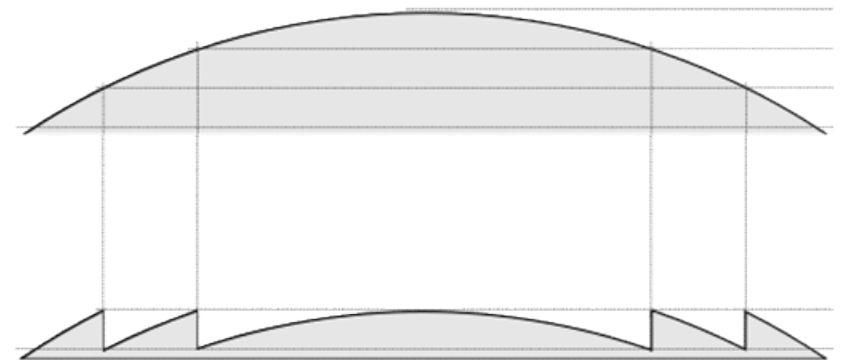
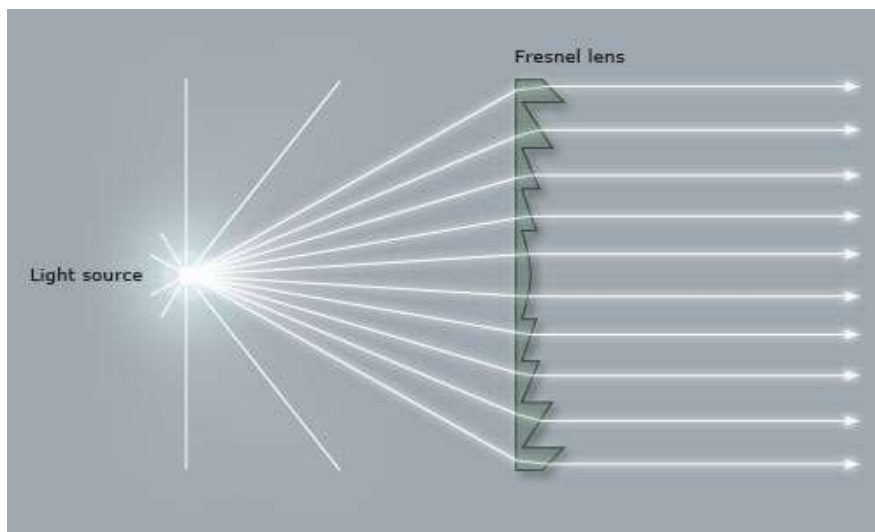
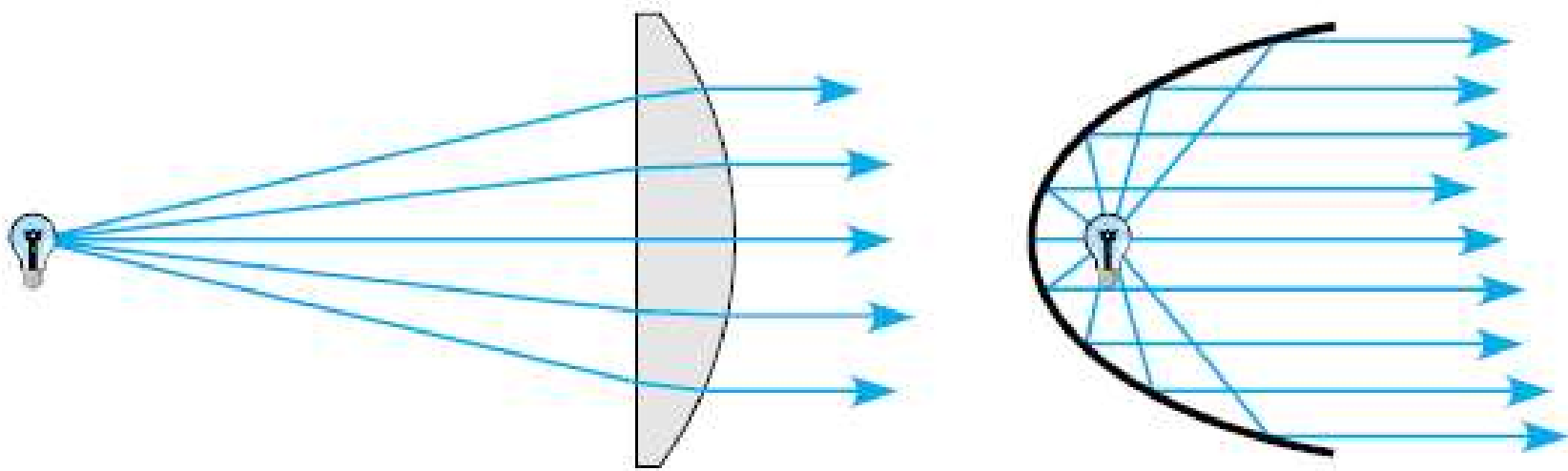
Propriété de la lumière

Un **collimateur** est un dispositif optique permettant d'obtenir un faisceau de rayons de lumière parallèles à partir d'une source de lumière.



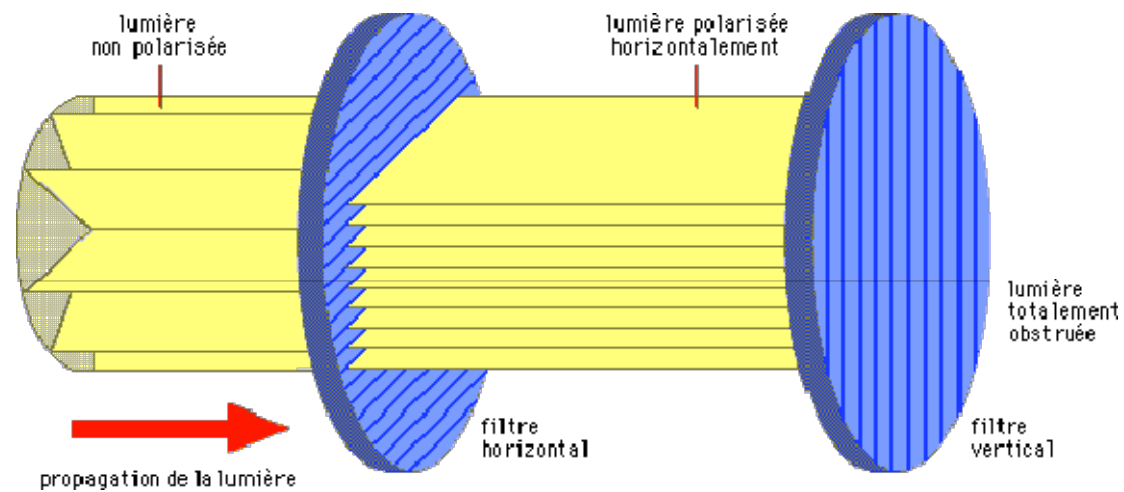
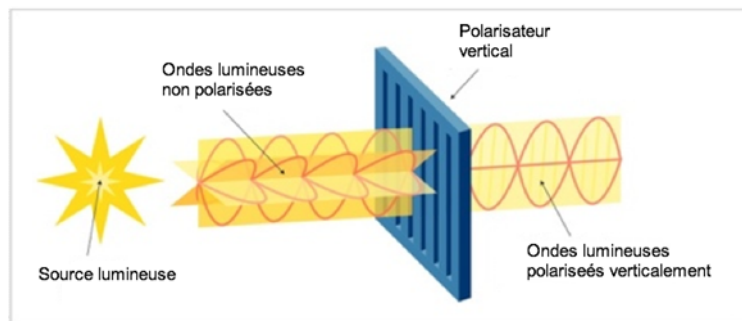
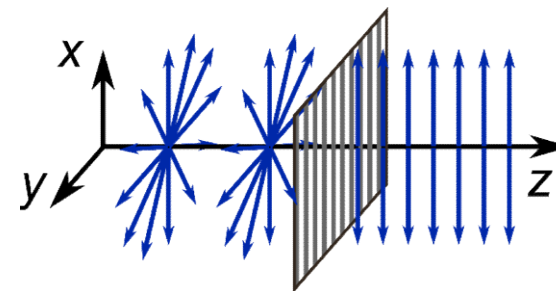
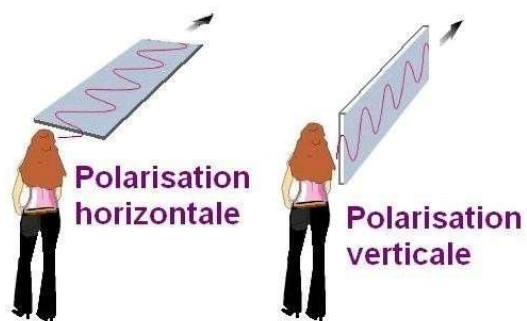
Propriété de la lumière

Réflecteurs et lentilles peuvent créer une distorsion des résultats de La loi de l'inverse du carré dans certain cas d'exception



Propriété de la lumière

À l'aide de lentille, il est possible de polariser la lumière



Réflexion



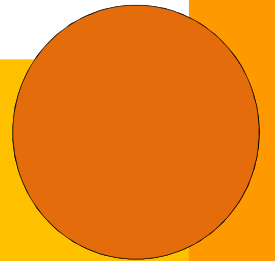
Luminaire à système optique qui utilise des surfaces spéculaires pour réfléchir la lumière

Réfraction

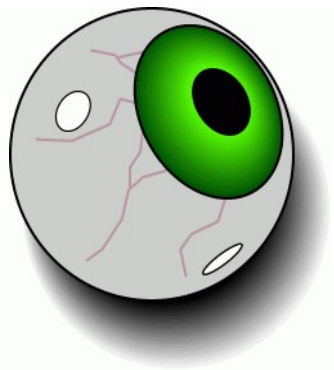


Luminaire à système optique qui utilise un réfracteur pour réfracter la lumière

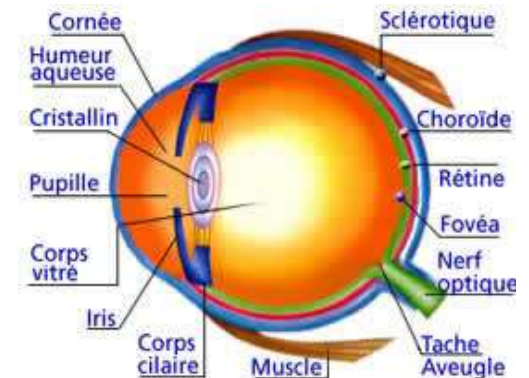
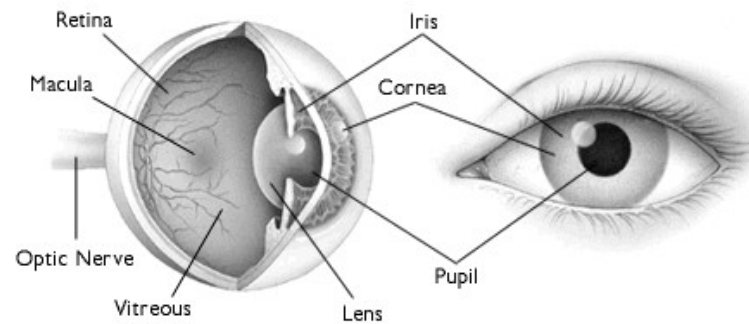
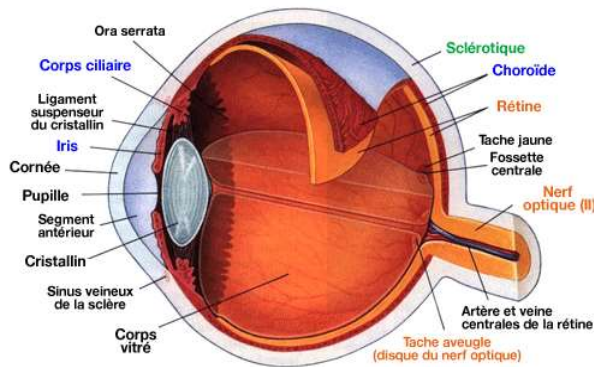
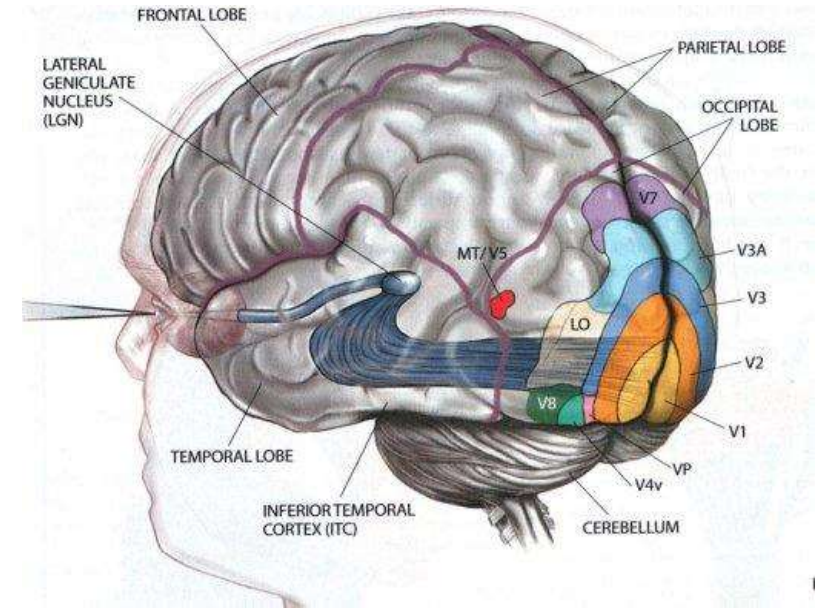
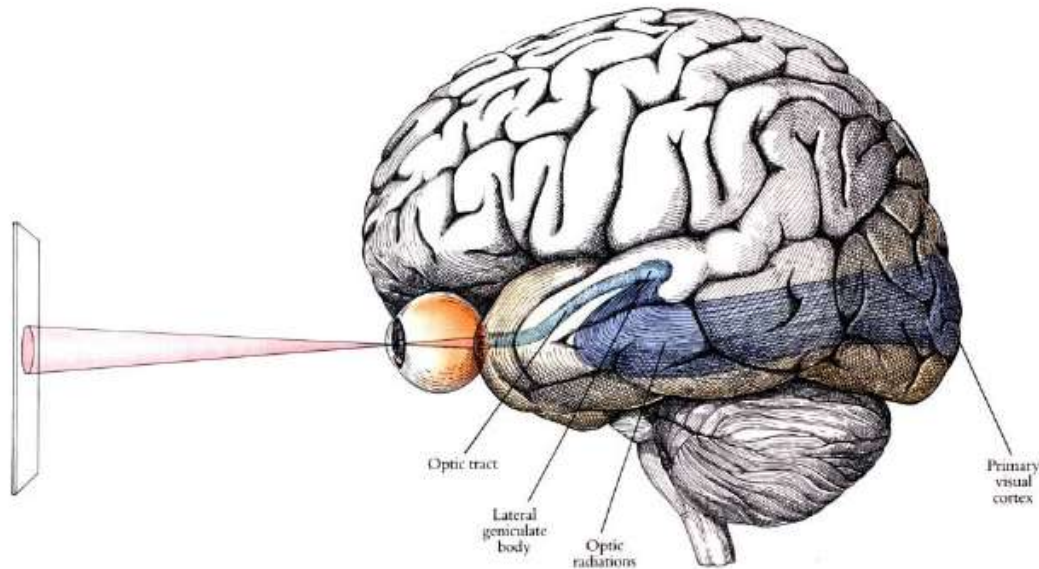
Anatomie 101 de l'oeil



Anatomie 101 de l'oeil

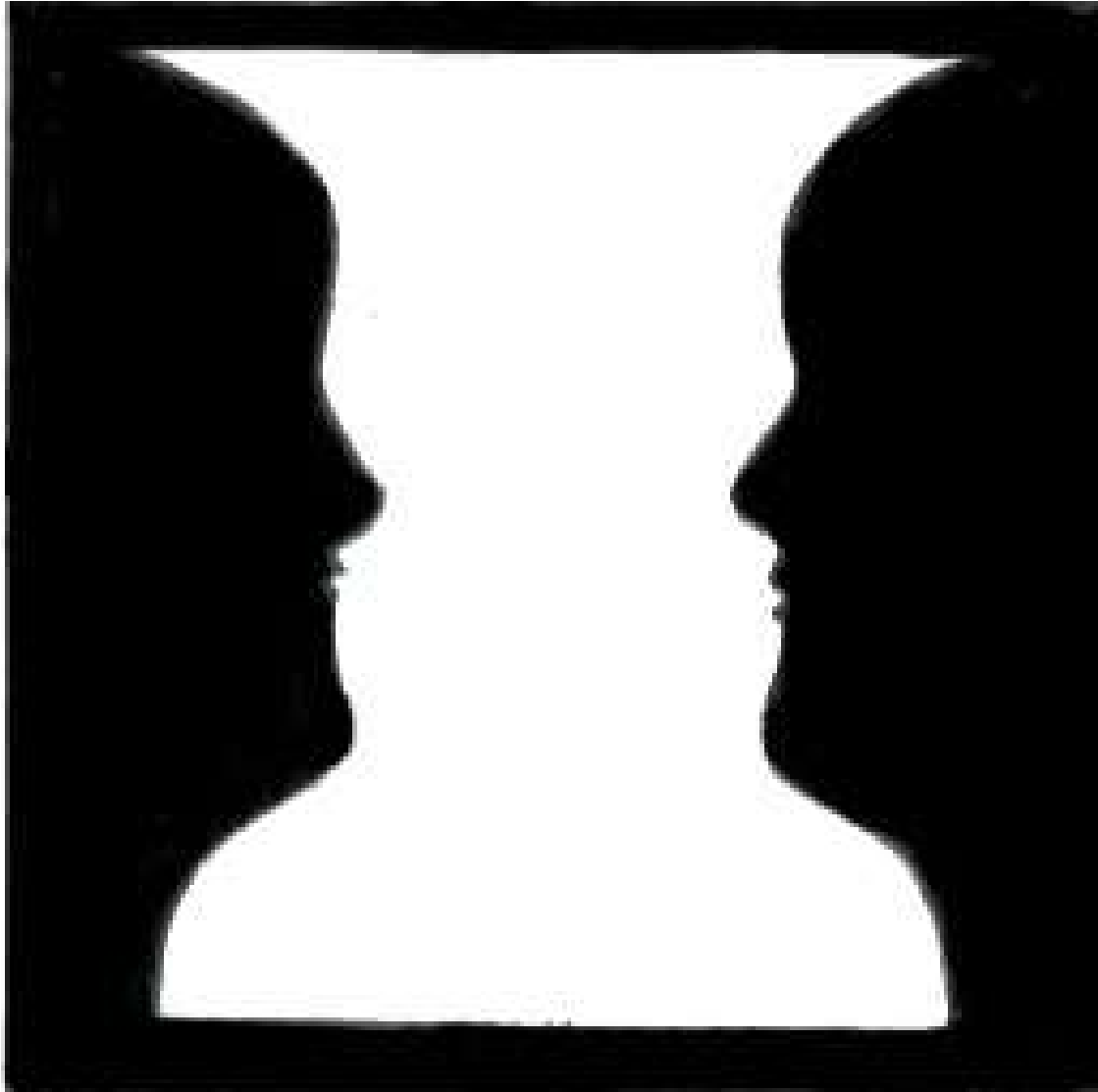


Anatomie 101 de l'oeil



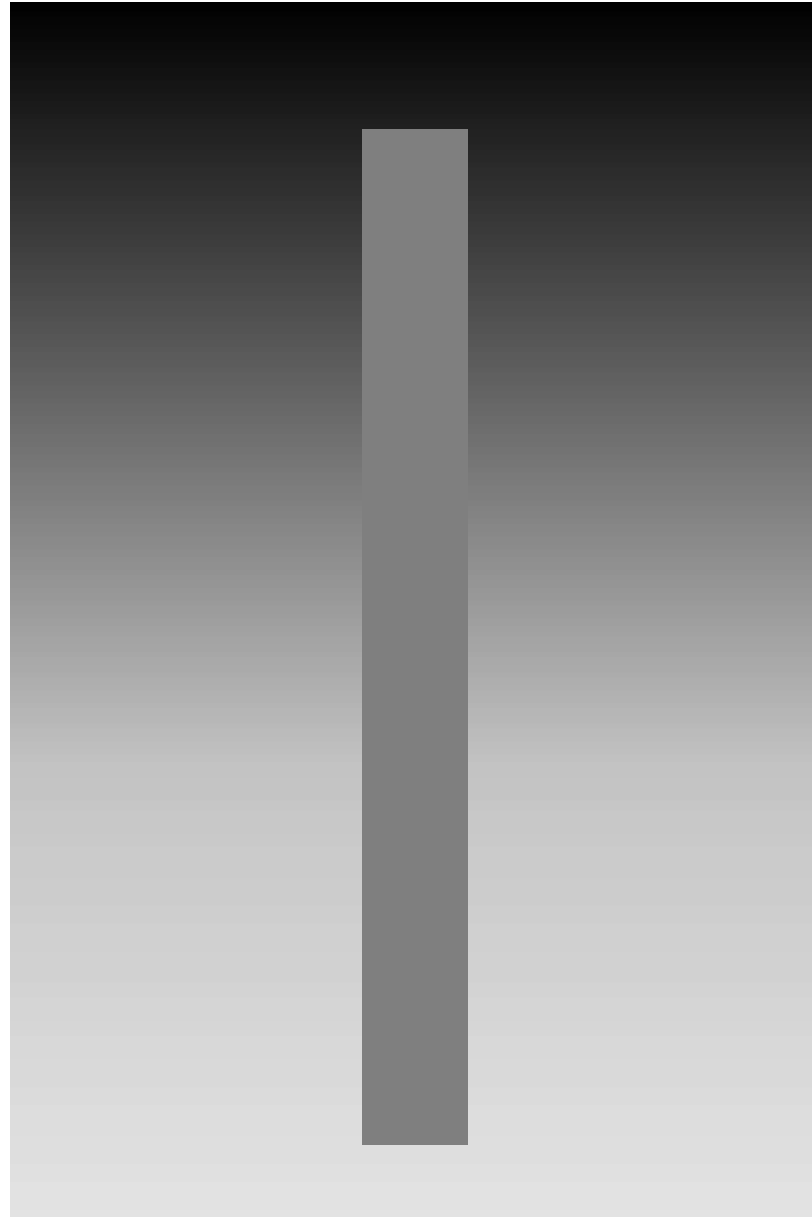
Les yeux sont les organes de la vision. Ils captent la lumière et transfèrent les données reçues à l'aide des nerfs optiques au cerveau qui par la suite décode l'information.

Anatomie 101 de l'oeil



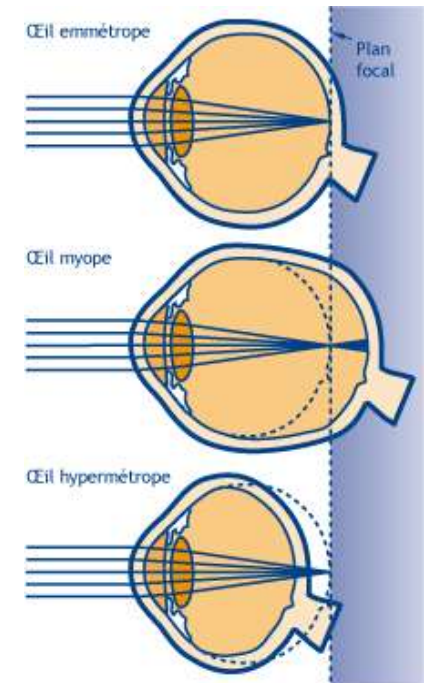
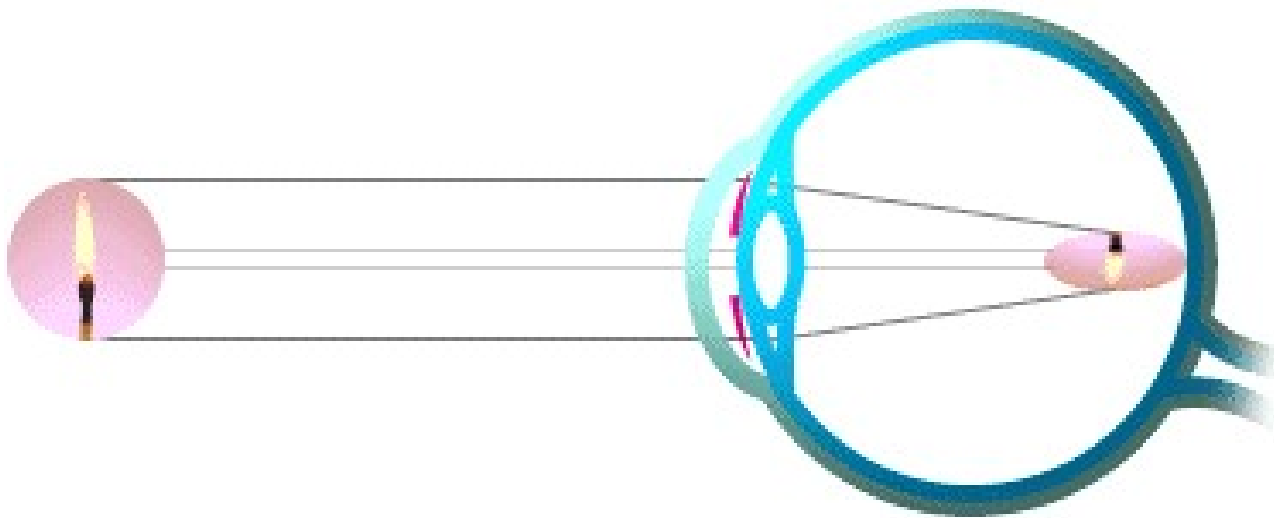


Anatomie 101 de l'oeil



•L'œil agit comme une lentille convergente

Les rayons lumineux doivent d'abord traverser les milieux transparents de l'œil (cornée et cristallin) qui sont l'équivalent d'une lentille convergente permettant la formation de l'image d'un objet sur la rétine. Pour les objets proches, une mise au point est réalisée grâce au cristallin. Selon les principes de l'optique classique, l'image d'un point situé au-dessus de la ligne de visée vient se former en un endroit situé au-dessous du centre de la rétine, et inversement pour un point situé plus bas que la ligne de visée. L'image d'un point situé sur le côté droit d'un œil vient se former dans la partie gauche de la rétine, et inversement pour un point situé à gauche. Les objets donnent donc une image inversée à l'intérieur de l'œil .

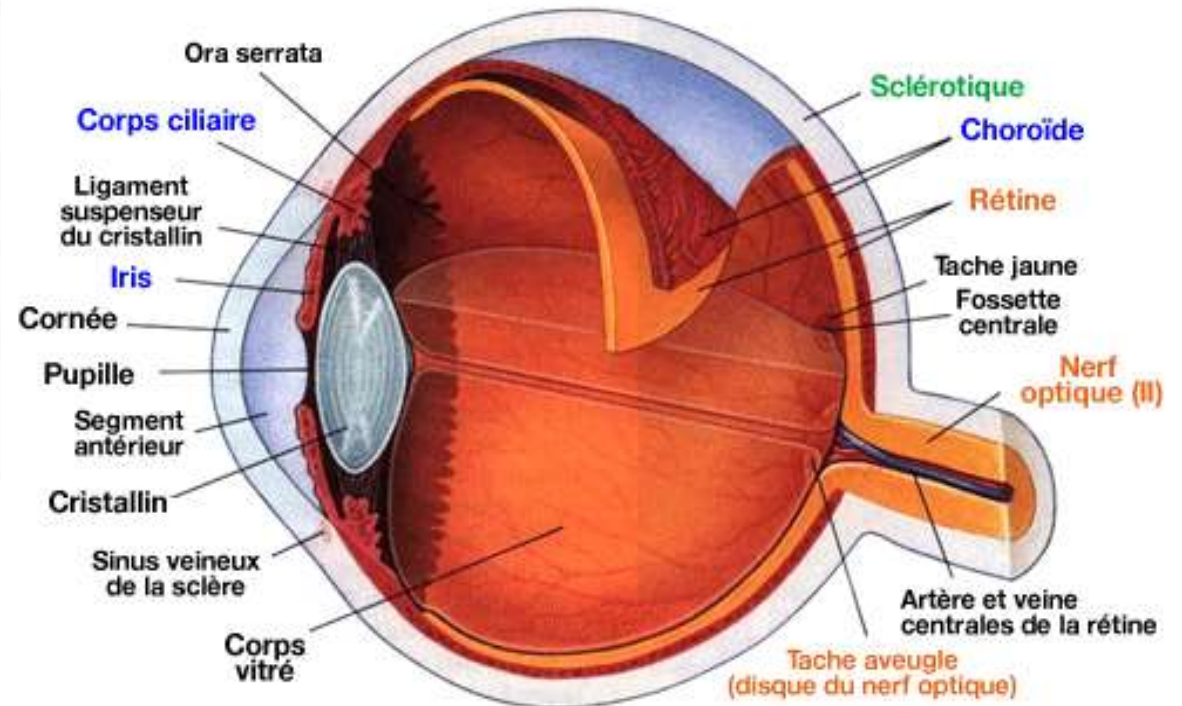


Anatomie 101 de l'oeil

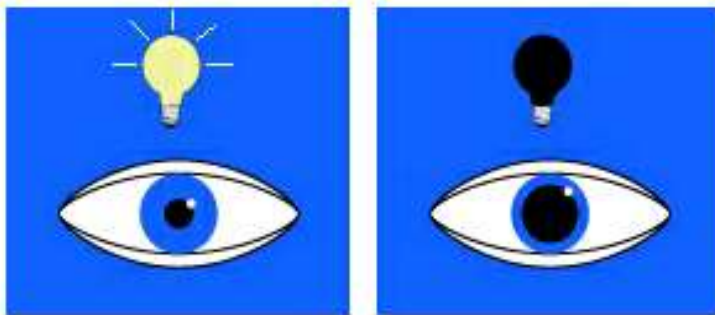
L'œil s'adapte selon l'environnement.

Les lentilles (cornée et cristallin) s'ajuste pour faire la mise au point.

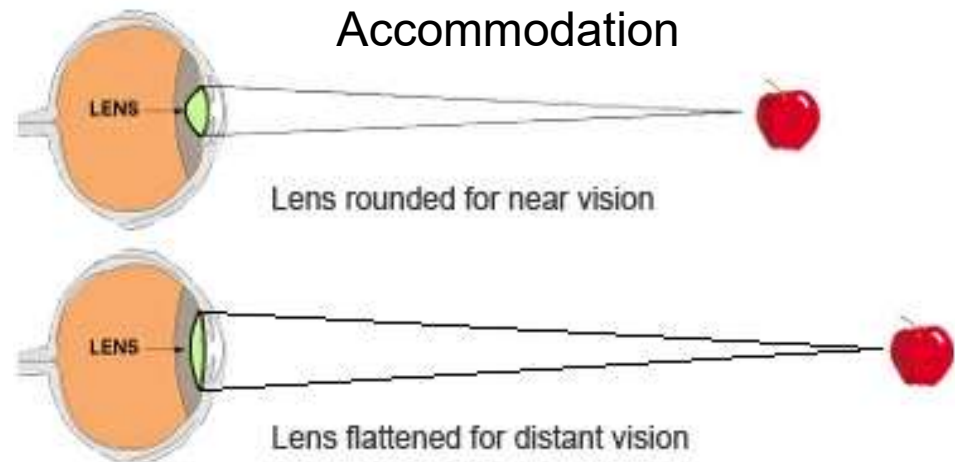
La pupille se dilate pour laisser passer plus de lumière au besoin



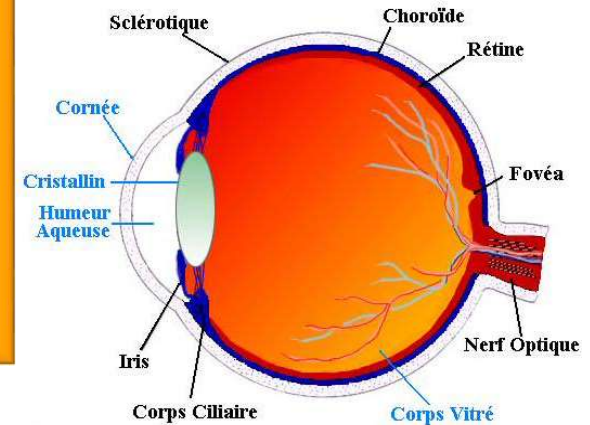
Adaptation



Accommodation



La fonction de l'œil est de recevoir et de transformer les vibrations électromagnétiques de la lumière en influx nerveux qui sont transmis au cerveau. L'œil fonctionne comme un appareil photographique.
(Permet de voir les objets exposé à la lumière)



Le globe oculaire ressemble à une petite balle d'un diamètre de 2,5 cm, d'une masse d'environ 7 grammes et d'un volume de 6,5 cm³.

La couche externe, la sclérotique, est une enveloppe de protection. Elle recouvre environ les cinq sixièmes de la surface de l'œil . Elle donne à l'œil sa couleur blanche et sa rigidité.

La choroïde ou choroïde : c'est une couche vasculaire de couleur noire qui tapisse les trois cinquièmes postérieurs du globe oculaire. Elle est en continuité avec le corps ciliaire et l'iris, qui se situent à l'avant de l'œil . Elle absorbe les rayons lumineux inutiles pour la vision, elle est très riche en vaisseaux sanguins afin de nourrir les photorécepteurs de la rétine.

Anatomie 101 de l'oeil

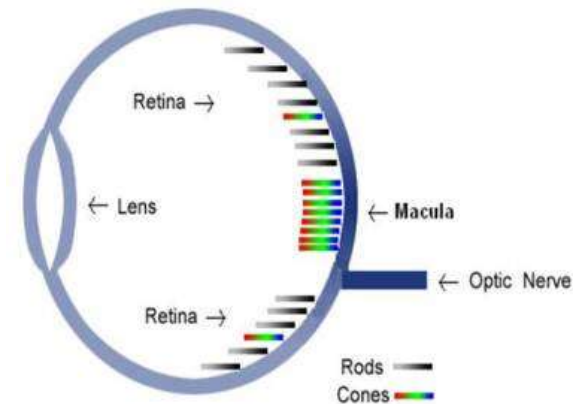
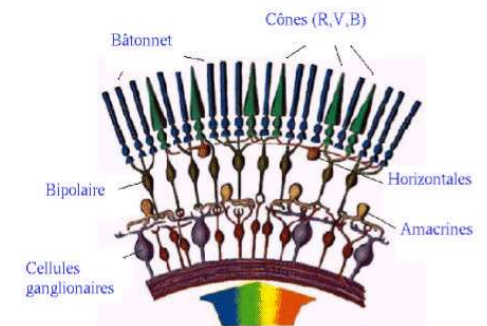
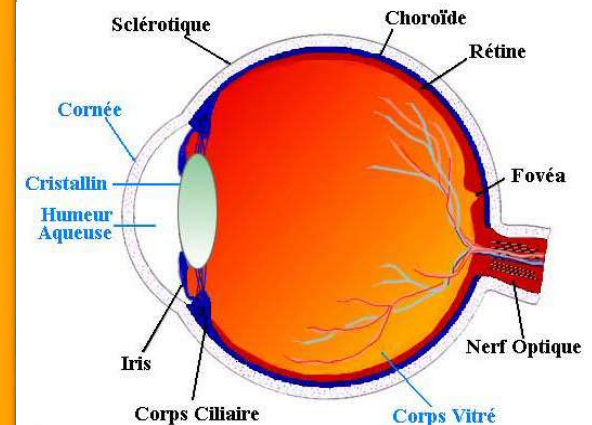
La rétine : c'est la couche sensible à la lumière grâce aux photorécepteurs (les cônes et les bâtonnets).

La rétine possède 2 types de photorécepteurs :

Les bâtonnets : De forme allongée, ils doivent leur nom à leur forme. Ils sont environ **130 millions**. Ils sont absents de la fovéa et se logent à la périphérie. Ils ont une très grande sensibilité à la lumière, d'où leur capacité à percevoir de très faibles lueurs la nuit : vision de nuit. Ainsi ils ont une très faible perception des détails et des couleurs car plusieurs dizaines de bâtonnets ne sont liés qu'à une seule fibre du nerf optique. Ils contiennent une substance chimique appelée rhodopsine ou pourpre rétinien. Quand la lumière frappe une molécule de rhodopsine, celle-ci génère un faible courant électrique. Les signaux ainsi recueillis forment un message qui est transmis aux cellules nerveuses de la rétine.

Les cônes : Ils sont environ **5 à 7 millions** à se loger dans la fovéa. Leur sensibilité à la lumière est très faible mais leur perception des détails est très grande pour deux raisons : il y a une densité très élevée de cônes dans la fovéa et surtout chaque cône de la fovéa transmet son information à plusieurs fibres du nerf optique : la vision est donc de jour. Ainsi ils ont une très bonne sensibilité aux couleurs.

Ils sont de trois types selon le pigment qu'ils contiennent et ont donc une sensibilité à des ondes lumineuses de longueurs différentes : cônes contenant de l'erythropsine (sensibles au rouge), de la chloropsine (vert), de la cyanopsine (bleu).



Anatomie 101 de l'oeil

La cornée est une membrane solide et transparente de 11 mm de diamètre au travers de laquelle la lumière entre à l'intérieur de l'œil. La cornée est privée de vaisseaux sanguins (sinon notre vision serait troublée), elle est donc nourrie par un liquide fluide comme l'eau : l'humeur aqueuse. La cornée contient 78% d'eau et pour maintenir ce degré d'hydrophilie elle est constamment recouverte de larmes alimentées en continu par les glandes lacrymales et réparties par le battement des paupières. La cornée est la principale lentille de l'œil, elle assure environ 80% de la réfraction.

Le cristallin : C'est une lentille auxiliaire molle et composée de fines couches superposées. Il se déforme sous l'action du muscle ciliaire.

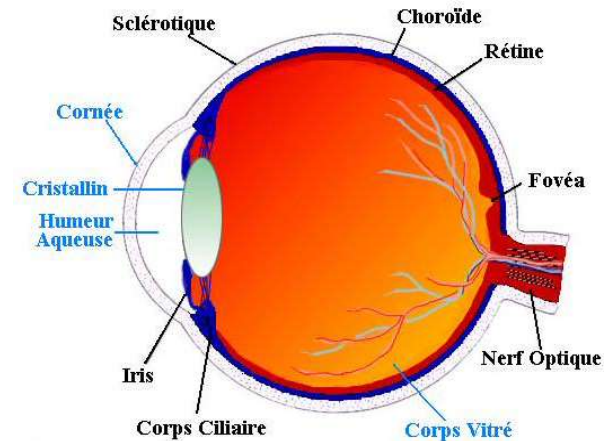
L'humeur vitrée : Elle occupe 80% du volume de l'œil, elle est constituée d'une gelée (acide hyaluronique) qui donne à l'œil sa consistance.

L'iris (arc-en-ciel en grec) : Il s'agit du diaphragme de l'œil percé en son centre par la pupille. C'est un muscle qui fait varier l'ouverture de la pupille (entre 2,5 et 7 mm) afin de modifier la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil pour éviter l'aveuglement en plein soleil ou capter le peu de rayons la nuit.

La couleur de l'iris est déterminée par la présence d'un pigment, la mélanine, le même composé chimique qui donne aussi leur couleur aux cheveux et à la peau. L'iris est bleu si la mélanine est peu concentrée, il est plus foncé quand la concentration augmente. Tous les nouveau-nés ont les yeux bleus parce que la mélanine est enfouie profondément dans le tissu de l'iris. Quelques mois plus tard cependant, ce composé peut se rapprocher de la surface de l'iris et modifier sa teinte.

La pupille : Il s'agit d'un trou au centre de l'iris permettant de faire passer les rayons lumineux vers la rétine

La fovéa, la zone centrale de la macula, est la zone de la rétine où la vision des détails est la plus précise. Elle est située dans le prolongement de l'axe optique de l'œil. La fovéa est peuplée uniquement de cônes, et nous permet la meilleure résolution optique. Les cônes, permettent de voir en couleur. Lorsqu'on en est dépourvu on ne possède pas la vision couleur. Les bâtonnets sont répartis sur la rétine périphérique, qui donne une impression générale du champ de vision avec peu d'acuité visuelle. Son champ de vision est d'un degré.



Anatomie 101 de l'oeil

•La rétine et son fonctionnement

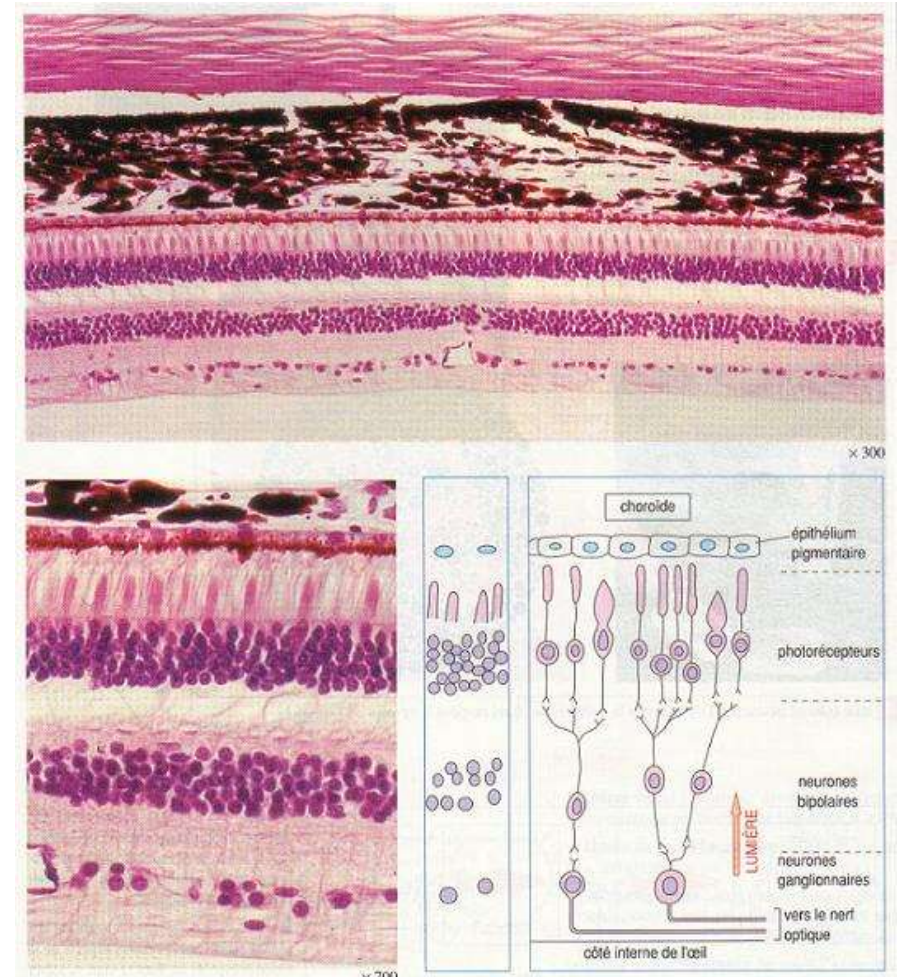
La rétine a une importance primordiale dans le fonctionnement de l'œil et dans le mécanisme de la vision. En effet, elle est la partie de l'œil qui assure la transformation du stimulus lumineux en message nerveux compréhensible par le cerveau. Embryologiquement, la rétine est une expansion du cerveau, et c'est le seul élément du globe oculaire à présenter une origine neurale.

La rétine est une fine enveloppe constituée de plusieurs types de cellules qui s'organisent en couches successives. Vers l'extérieur, des cellules cubiques riches en pigments (la mélanine) forment une frontière entre les neurones de la rétine et la choroïde. La rétine comprend trois couches de neurones différents :

- au contact des cellules pigmentaires, les cônes et les bâtonnets sont les cellules neurosensorielles capables de capter le stimulus, grâce à des pigments : ce sont des photorécepteurs ;

- à côté de l'humeur vitrée, les neurones multipolaires ou ganglionnaires, présentent de nombreuses fibres nerveuses (longues expansions cytoplasmiques) dont l'une se prolonge le long de la rétine (au contact de l'humeur vitrée) ;

- entre ces deux couches, les neurones bipolaires, pourvus de deux fibres nerveuses ramifiées à leur extrémité, établissent des contacts synaptiques avec les photorécepteurs à un pôle, et avec les neurones ganglionnaires au pôle opposé.

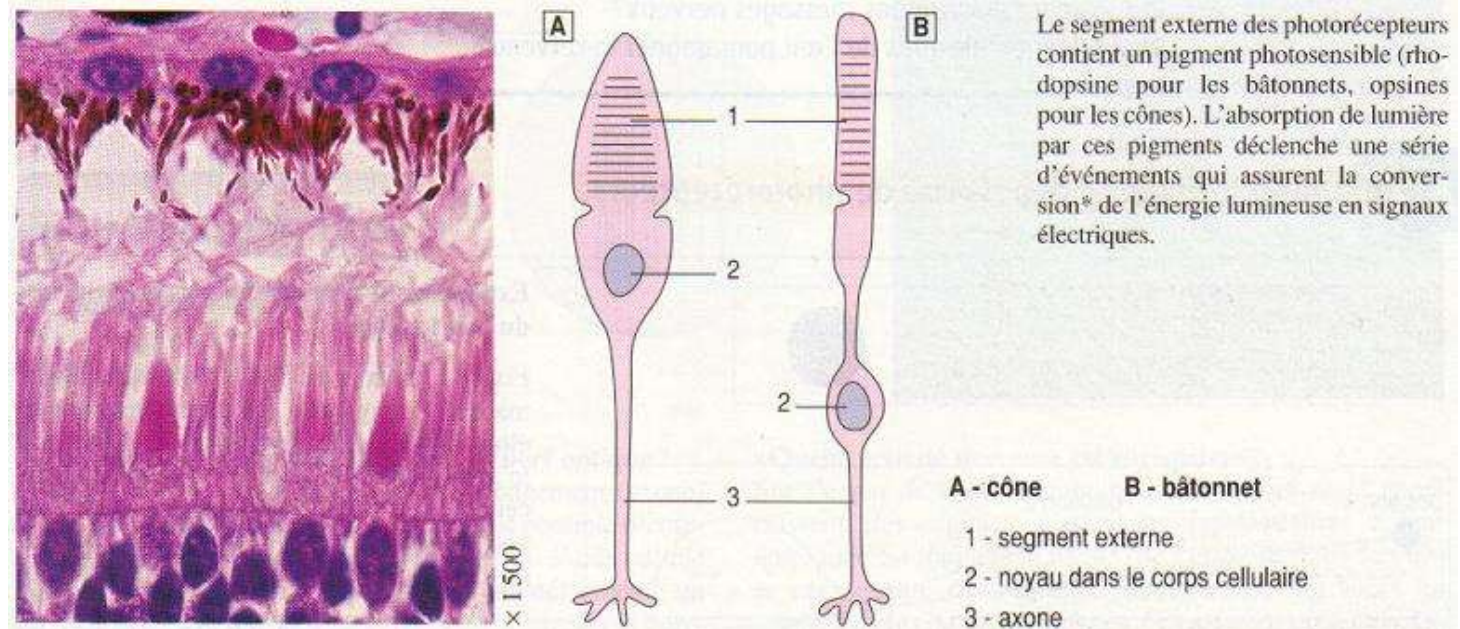
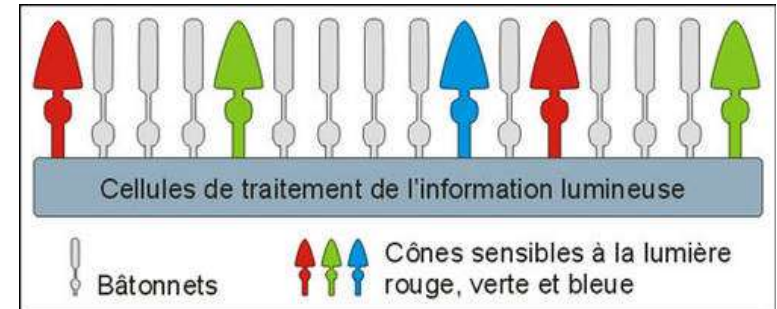


Anatomie 101 de l'oeil

•Les cellules photo réceptrices

La rétine comporte deux types de cellules sensibles à la lumière, les cônes et les bâtonnets, qui sont juxtaposées à la manière d'une mosaïque (130 millions de bâtonnets et 6,5 millions de cônes). Ce sont des neurones très courts qui possèdent un segment externe, de forme cylindrique pour les bâtonnets, conique pour les cônes (voir schéma ci-contre). Ce segment externe renferme de très nombreuses molécules de pigments photosensibles (molécules de rhodopsine pour les bâtonnets, molécules d'opsine pour les cônes).

L'absorption de lumière par ces pigments déclenche une cascade d'événements cellulaires qui, en modifiant les propriétés électriques du cône ou du bâtonnet, aboutissent à la naissance d'un message nerveux.

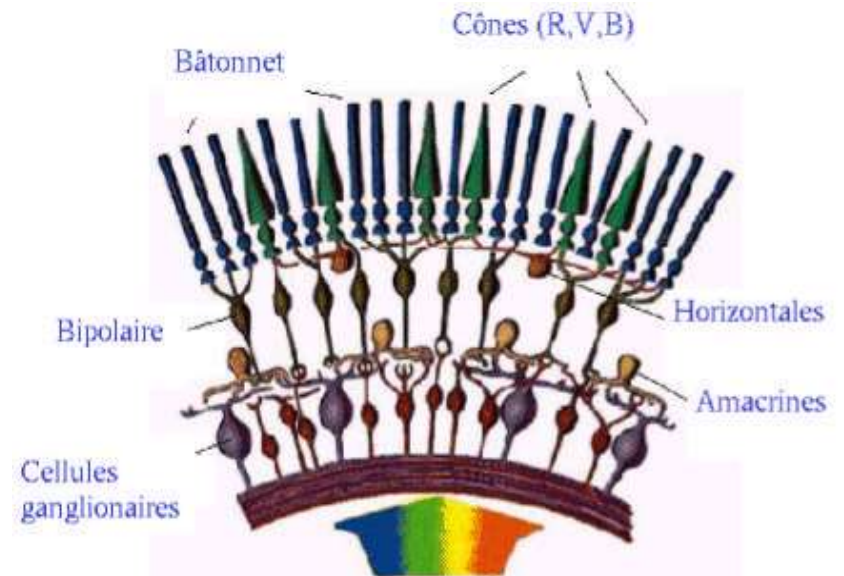


Anatomie 101 de l'oeil

Les cônes

Ils sont moins sensibles à la lumière que les bâtonnets, cependant ils ont une résolution spatiale très élevée c'est-à-dire qu'ils fournissent une image nette des objets et donc une vision précise.

Les cônes sont également les neurones photorécepteurs responsables de la vision des couleurs. Contrairement aux bâtonnets, les molécules pigmentaires (opsines) qu'ils renferment sont de trois types différents et chaque type d'opsine présente un maximum d'absorption pour une longueur d'onde déterminée.



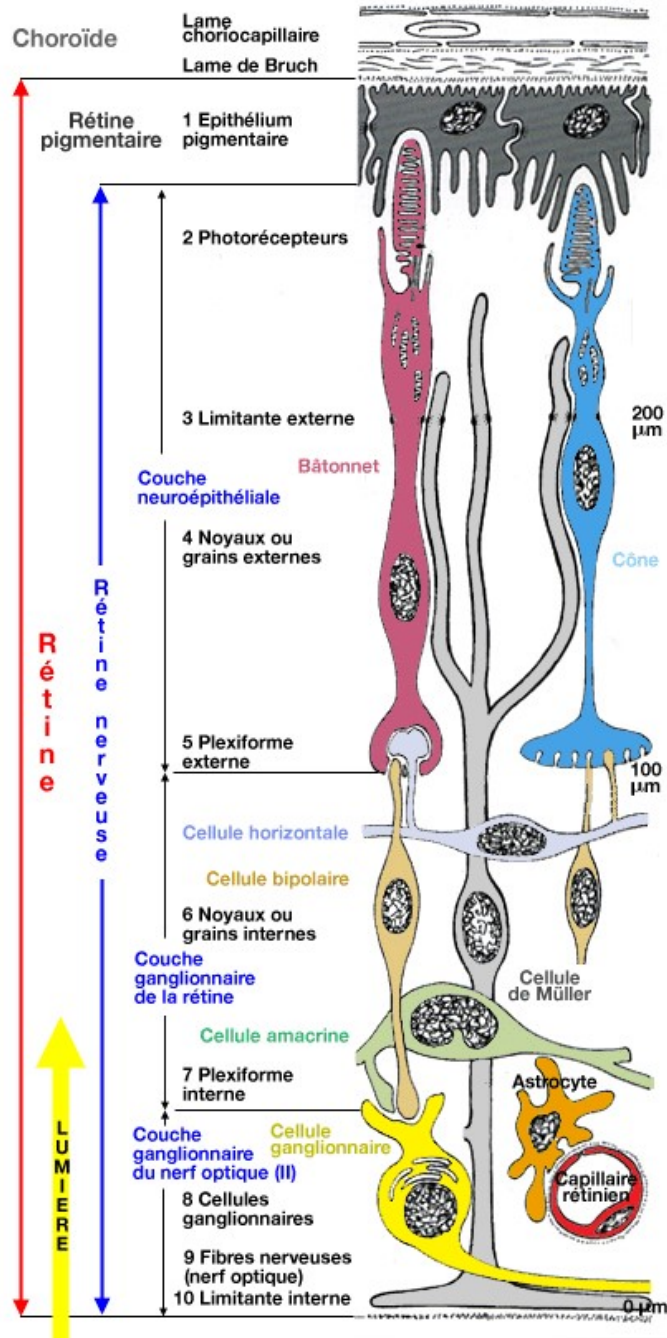
•Les bâtonnets

Ils sont extrêmement sensibles à la lumière, c'est-à-dire capables de réagir à un stimulus nerveux très faible. En effet, un bâtonnet peut être sensible à l'impact d'un seul photon alors qu'il en faut 100 pour activer un cône. Mais en revanche, ils ne fournissent pas une image nette des objets car ils ont un faible pouvoir séparateur.

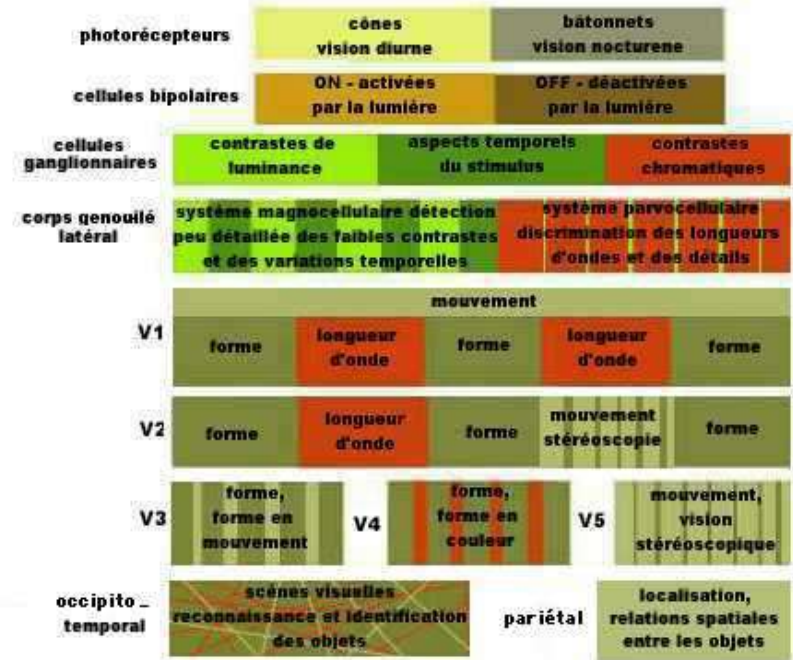
Les bâtonnets contiennent tous le même pigment photorécepteur dont le maximum d'absorption se situe entre le vert et le bleu. Ils permettent une vision en noir et blanc ou plus exactement en nuances de gris.

Les bâtonnets sont les neurones photorécepteurs les plus sollicités pour la vue dans des conditions de très faible éclairage : l'œil peut voir grâce à eux une bougie située à 27 Km. Cette perception due aux seuls bâtonnets est la vision scotopique.

Anatomie 101 de l'oeil



Rétine



On a découvert récemment que certains ganglions ont des photorécepteurs reliés à notre système hormonal.

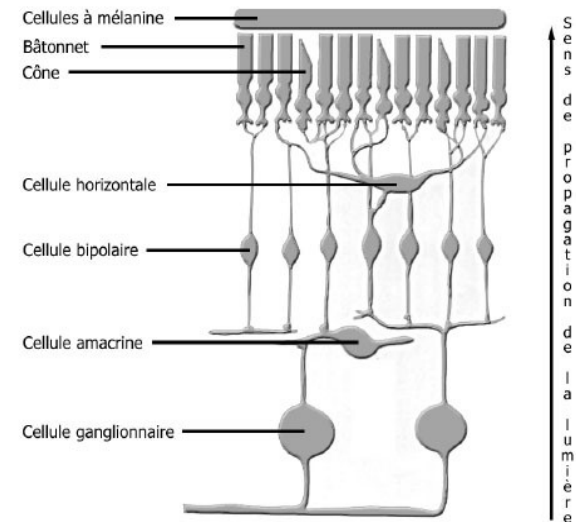
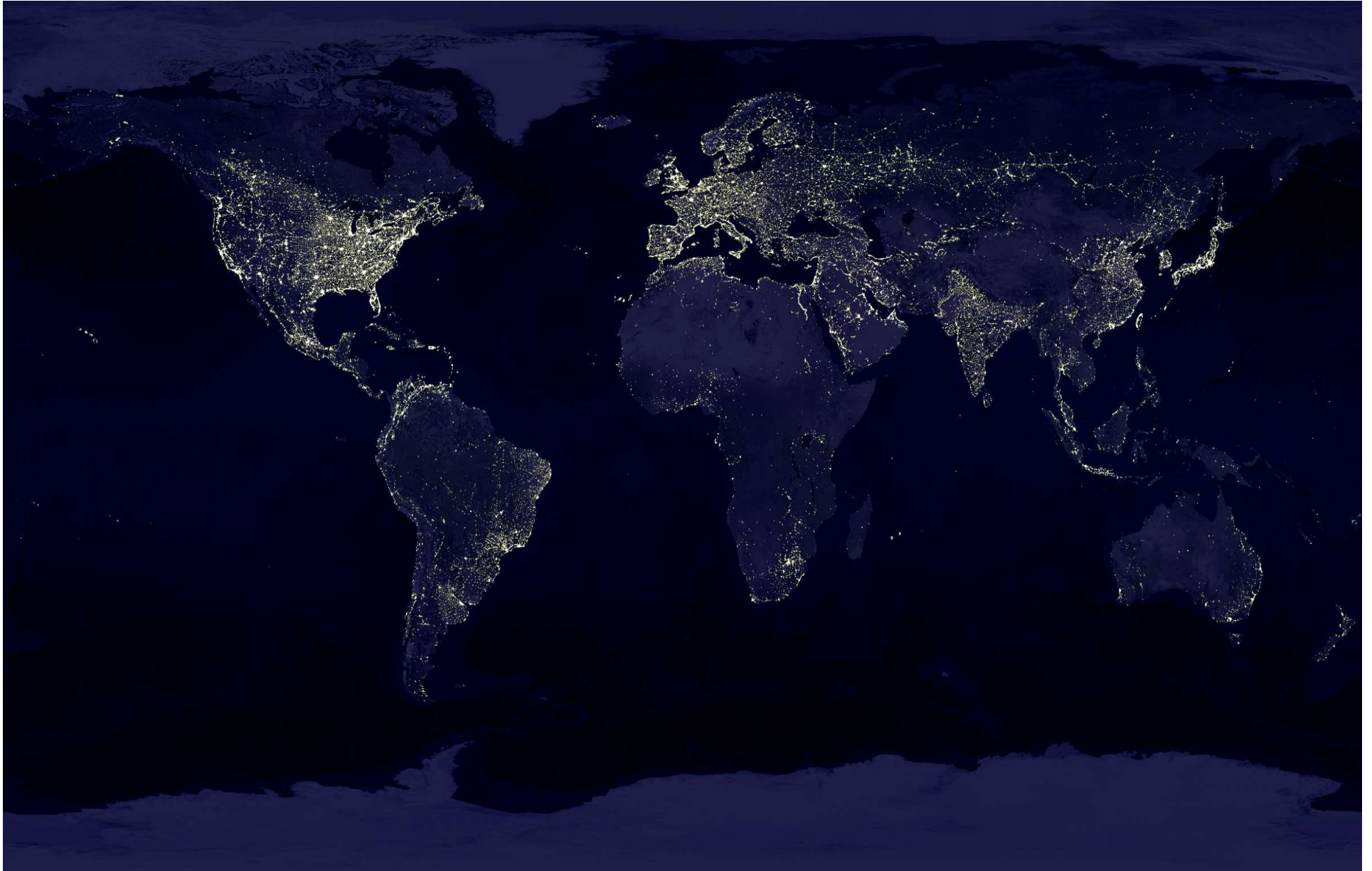


Illustration 4 : Coupe schématique de la rétine.

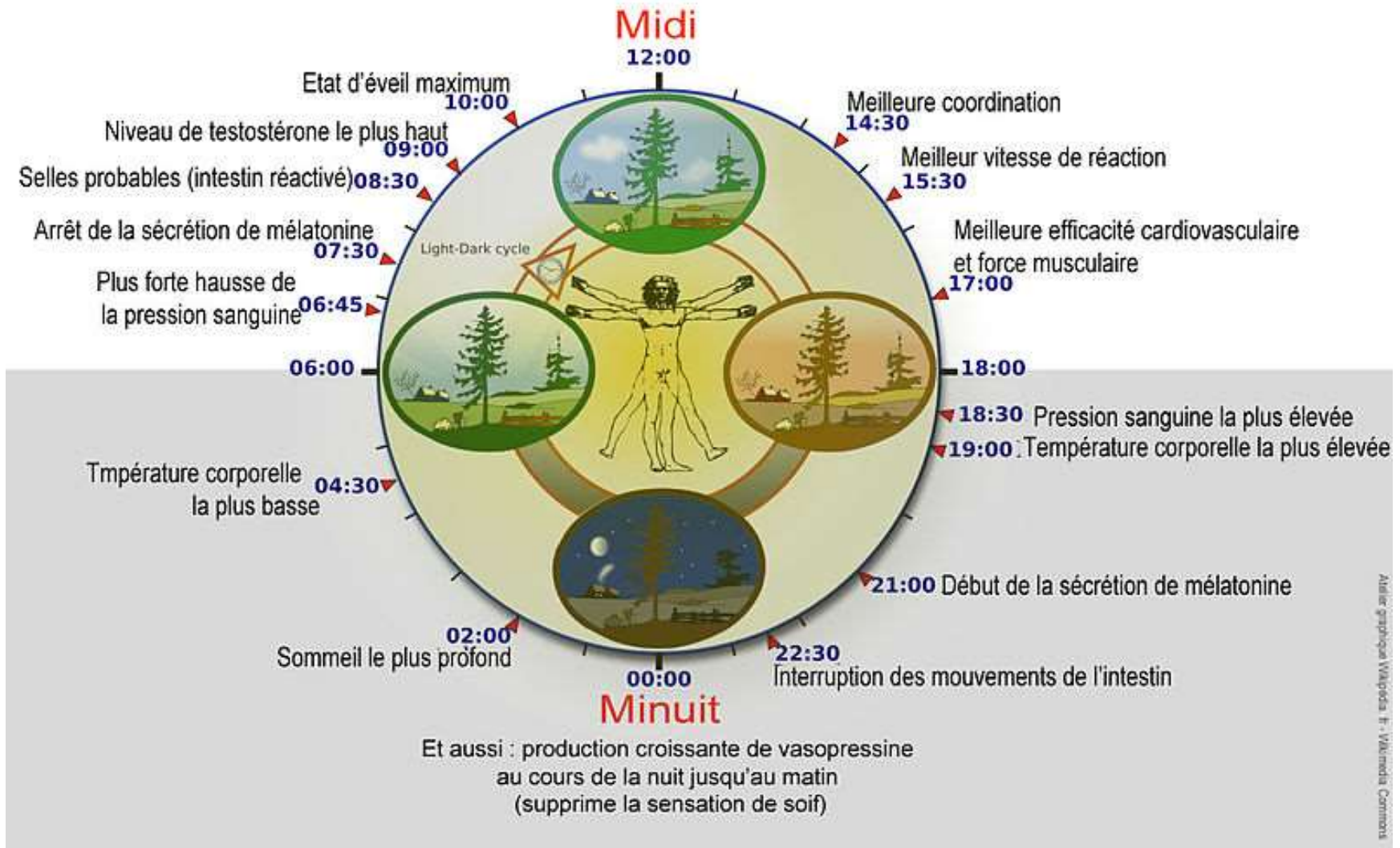
Lumière artificielle



<https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=55167>

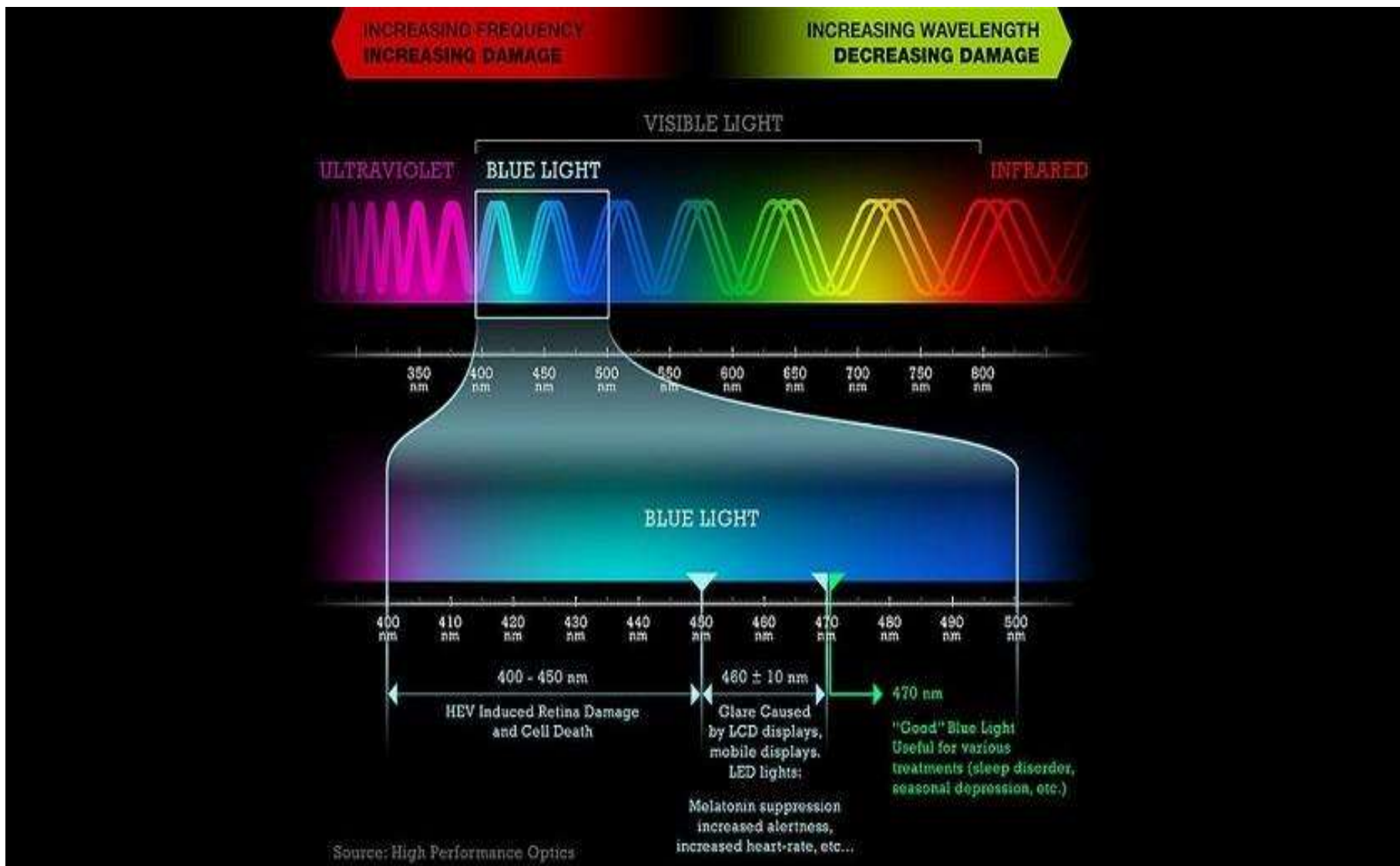
Rythme circadien

Un **rythme circadien** est un rythme biologique d'une durée de 24 heures environ (Horloge Biologique)

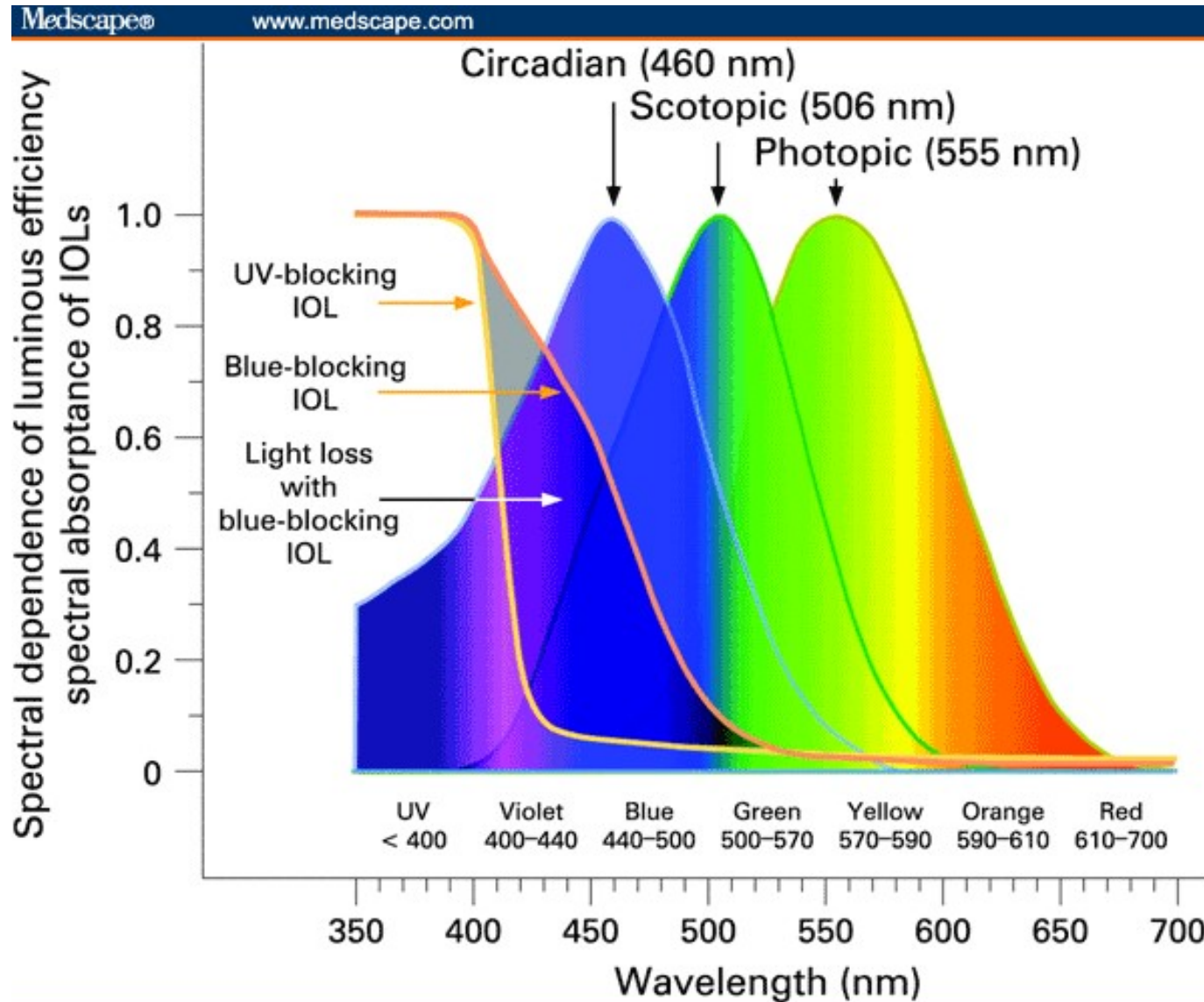


Rythme circadien

Bleu nocif



Bleu nocif



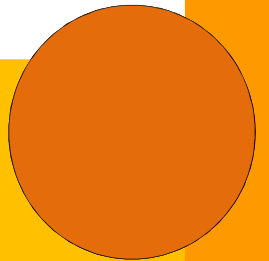
Source: Br J Ophthalmol © 2008 BMJ Publishing Group Ltd

Rythme circadien

Bleu nocif



La vision



L'Homme possède cinq sens,
Les femmes peut être six
mais tenons nous en aux 5 sens



L'ouïe

Le goût



Le toucher



L'odorat



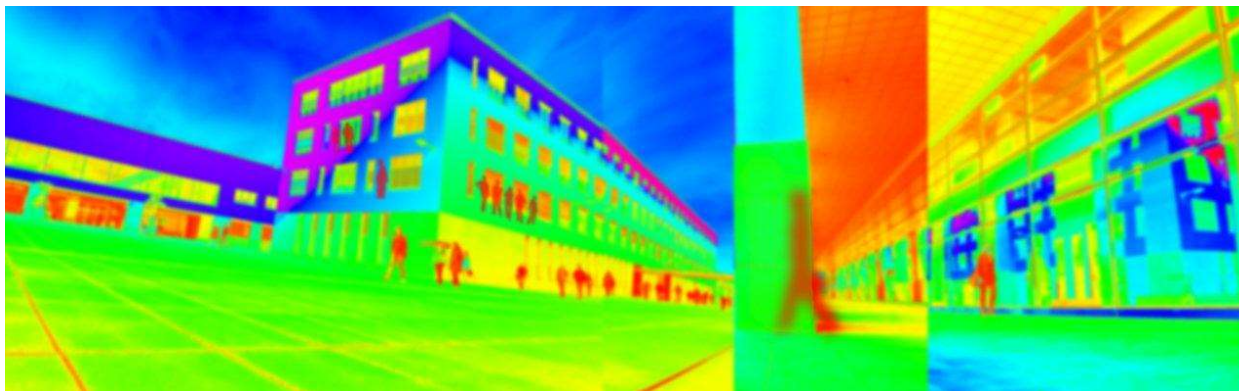
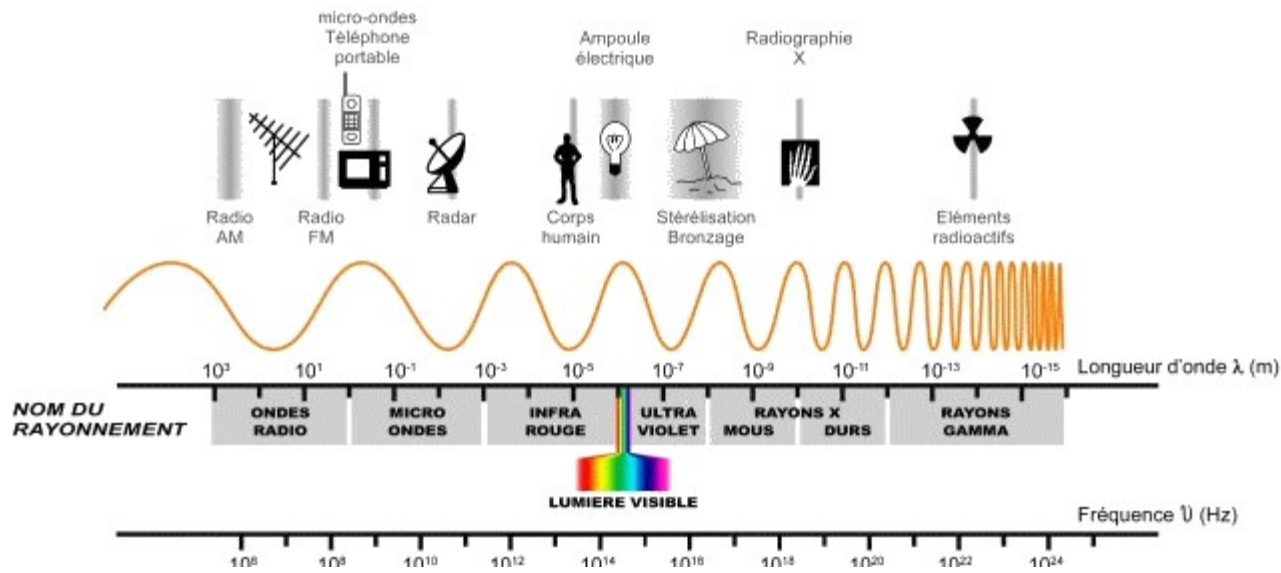
La vue : notre sujet La vision

Définition:

La vision est un processus très complexe qui nécessite la participation de nombreux éléments des yeux et du cerveau. Lorsqu'une personne regarde autour d'elle, les rayons lumineux frappent et se réfléchissent sur les objets qui l'entourent. Ces rayons lumineux, qui cheminent généralement en ligne droite, pénètrent alors dans l'oeil et s'infléchissent lorsqu'ils traversent la courbure de la cornée. Ce processus est appelé réfraction. Après cette réfraction, l'entrée de lumière est régulée grâce à l'iris (partie colorée de l'oeil) et la pupille (tache noire au coeur de l'iris). Les muscles de l'iris s'adaptent constamment pour réguler la quantité de lumière à laquelle la pupille est exposée. La lumière qui est autorisée à passer à travers la pupille poursuit son chemin et traverse le cristallin, qui fonctionne comme une lentille d'appareil-photo. Le cristallin de l'oeil continue d'infléchir les rayons lumineux et les inverse: l'image de l'objet est projetée à l'envers sur la rétine, qui tapisse le globe oculaire et contient les cellules sensorielles de la vision. La rétine est composée de nombreuses cellules photo-sensibles, appelées cônes et bâtonnets. Il y a davantage de bâtonnets, qui ont pour fonction principale la vision en lumière crépusculaire. Les cônes contiennent une substance appelée rhodopsine, responsable de la vision des couleurs et des détails. La rétine transforme l'énergie lumineuse en messages électriques qui sont transmis au cerveau par le nerf optique et le chiasma optique. Le chiasma optique est une structure en forme de X, qui véhicule les messages du côté opposé du cerveau dans les bandelettes optiques. C'est là que les fibres de la moitié nasale de la rétine se croisent pour rejoindre la bandelette optique du côté opposé et se prolonger jusqu'au thalamus. Le thalamus contient des fibres qui servent de relais pour transporter les messages jusqu'au cortex visuel du cerveau, qui se charge de reformer une image tridimensionnelle.

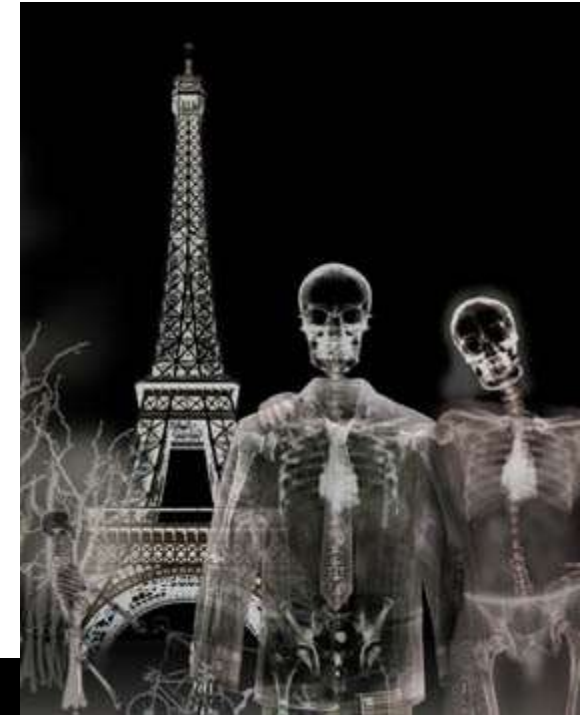
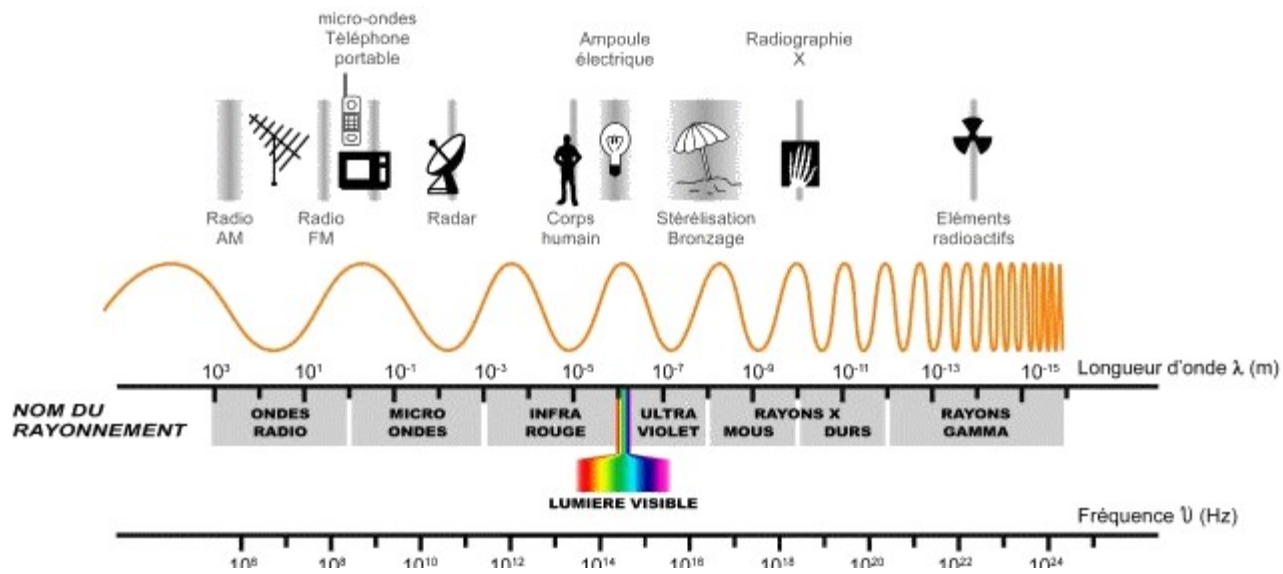
Vision

Imaginez l'œil répondre aux infrarouges.



Vision

Imaginez l'œil répondre rayons X.



Vision

La vision de vingt/vingt est celui d'un individu de 20 ans avec une vision normale qui peut voir à vingt pieds. Les yeux d'un individu de vingt ans s'ajustent rapidement et facilement aux changements de luminosité dans l'environnement. Comme les yeux vieillissent, ils perdent leur élasticité, réduisant leur capacité à s'adapter facilement. L'adaptation d'un niveau de lumière à un autre prend plus de temps et la plage de sensibilité diminue considérablement pour voir à de faibles niveaux de lumière. Une personne de soixante ans doit avoir dix fois plus lumière qu'un individu normal de vingt ans pour effectuer la même tâche avec précision et vitesse égale. Les personnes âgées sont plus affectées par l'éblouissement.



Vision

Vision photopique

C'est la vision de jour. La vision photopique se fait principalement grâce aux cônes se trouvant sur la rétine de l'œil. La sensibilité de l'œil en vision photopique n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde. Le maximum de sensibilité de l'œil est obtenu pour une longueur d'onde de 555 nanomètres.

Vision scotopique

Chez l'Homme, la vision scotopique est essentiellement assurée par les bâtonnets de la rétine, qui possèdent une sensibilité à la lumière importante répondent à toutes les longueurs d'onde visibles sans en avoir la perception des couleurs. (donnant ainsi une perception en noir-et-blanc, ou panchromatique). Le maximum de sensibilité est atteint, chez l'Homme, après environ 45 minutes de séjour dans l'obscurité, ce qui correspond au temps nécessaire pour régénérer toutes les molécules de rhodopsine sous leur forme active. En raison de la répartition des bâtonnets sur la rétine, le maximum de sensibilité ne se situe pas dans l'axe optique (la fovéa étant constituée uniquement de cônes) mais à quelques degrés de celui-ci. La sensibilité de l'œil en vision scotopique n'est pas la même à toutes les longueurs d'onde. Le maximum de sensibilité est obtenu pour une longueur d'onde de 507 nanomètres.

Vision Mésopique

La vision mésopique est la combinaison des deux visions photopique et scotopique. Les cônes et bâtonnets sont en fonction.

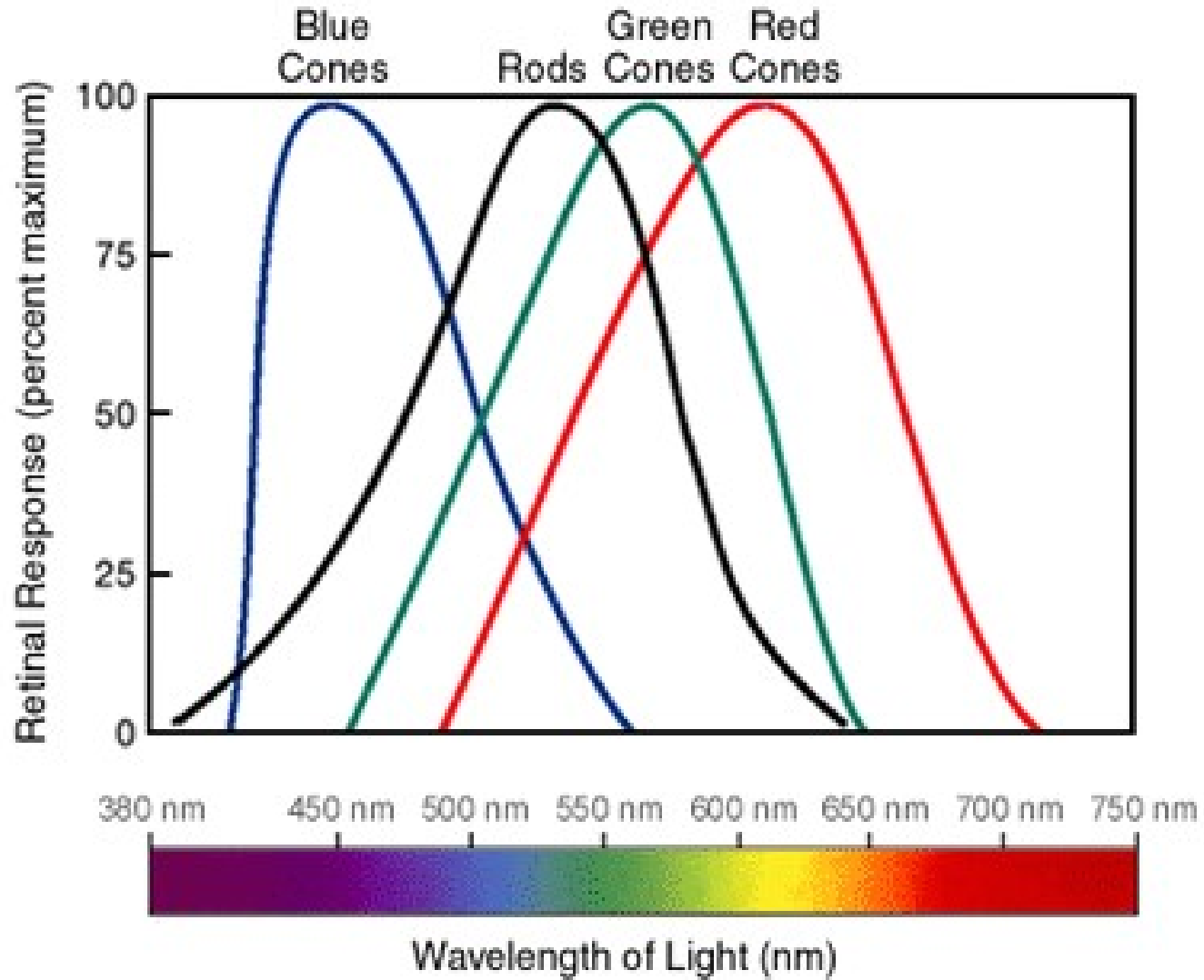
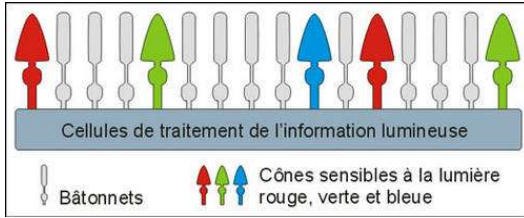
Vision photopique

Cônes, couleurs, finesse des détails, acuité visuel, vision de jours, diurne.

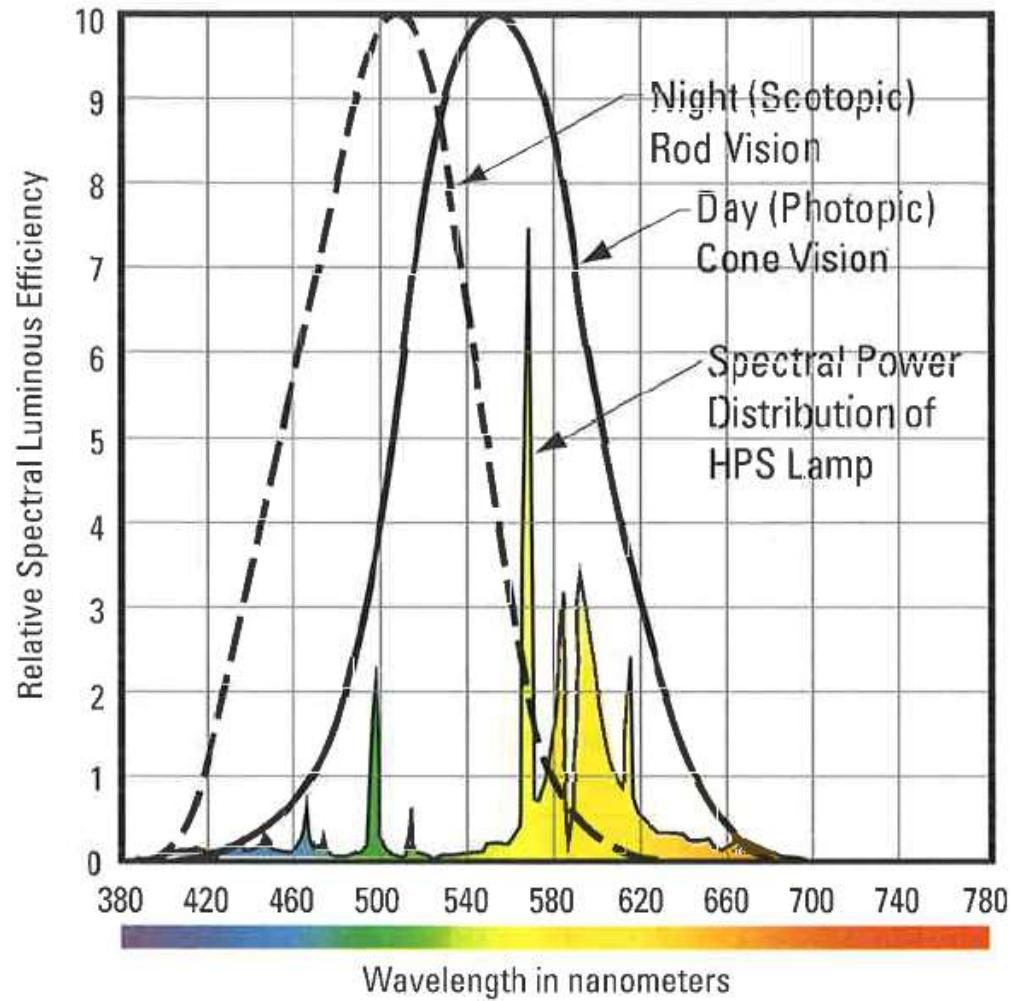
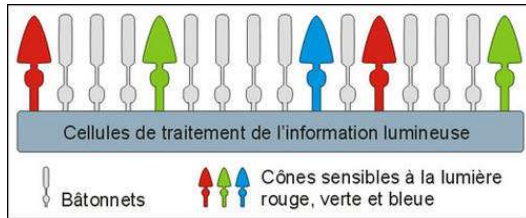
Vision scotopique

Bâtonnets, aucune perceptions des couleurs, vision périphérique, vision de nuit, nocturne.

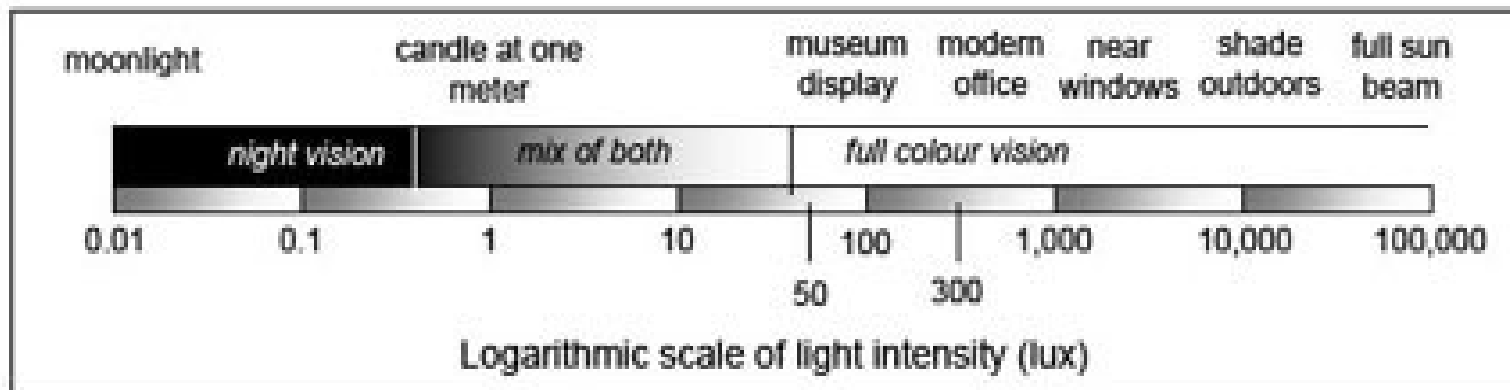
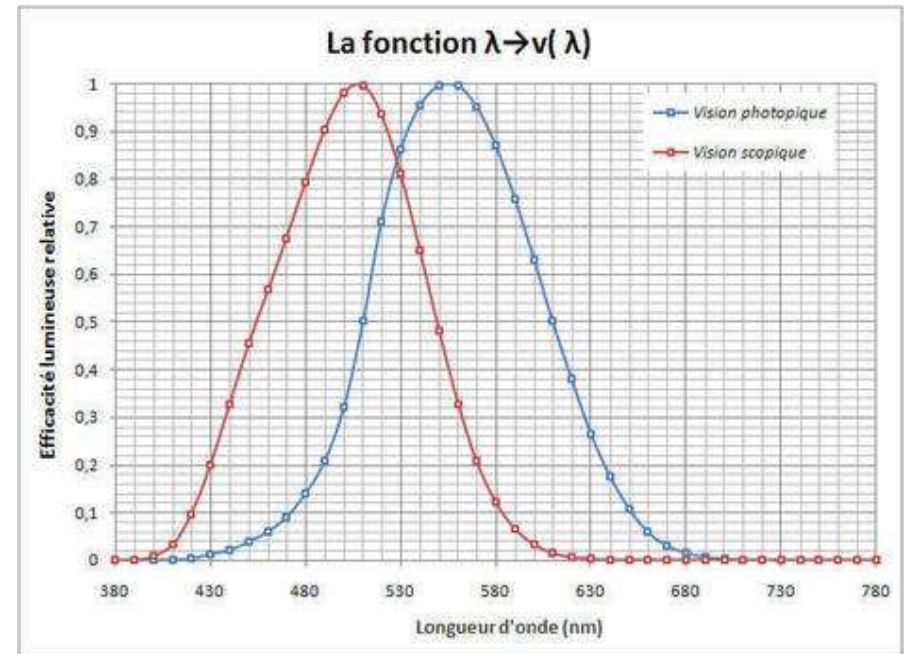
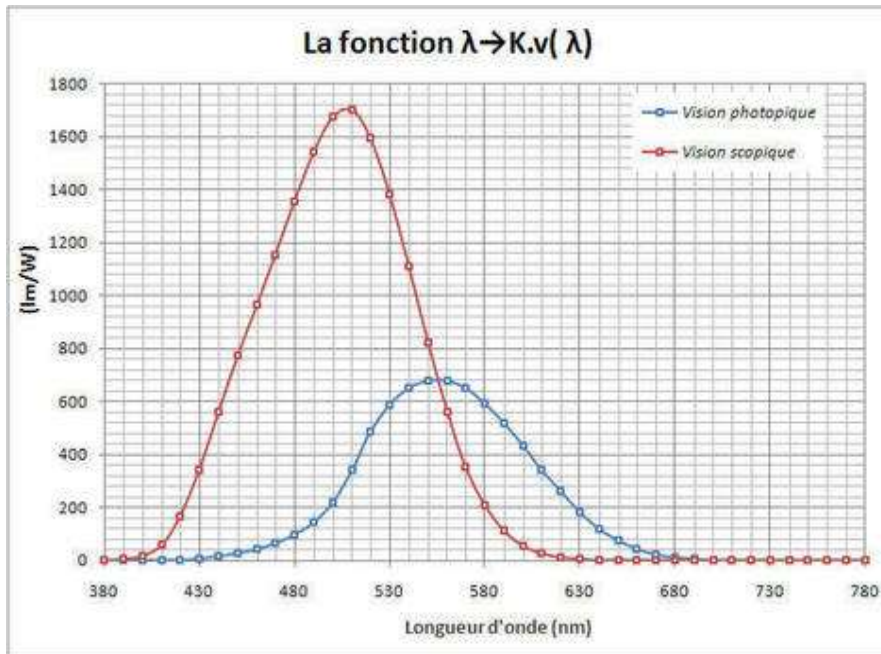
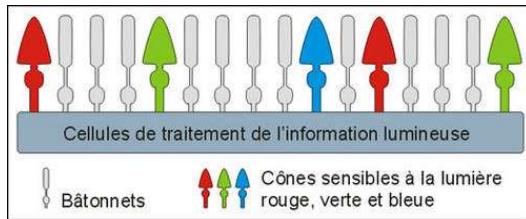
Vision



Vision

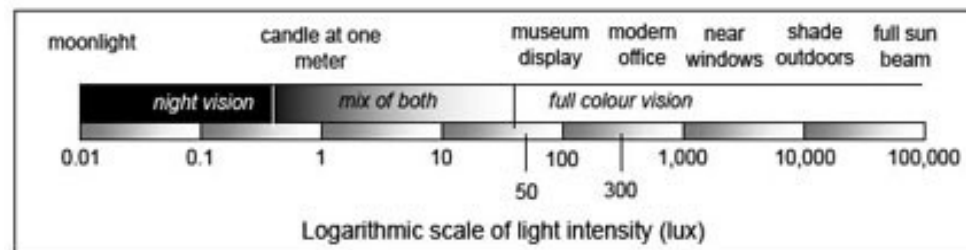
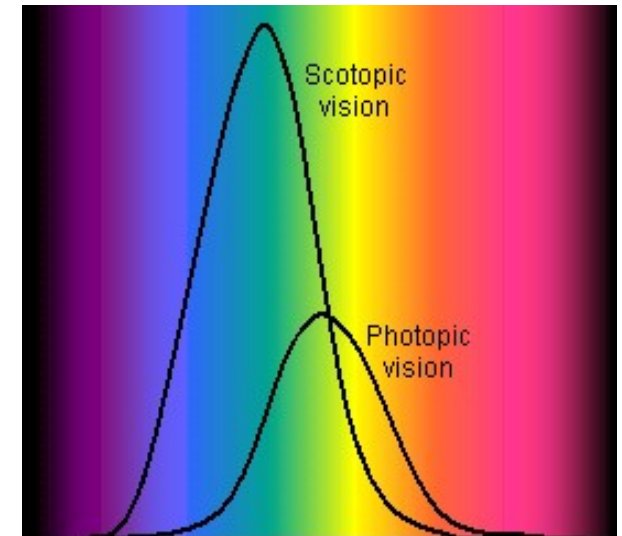
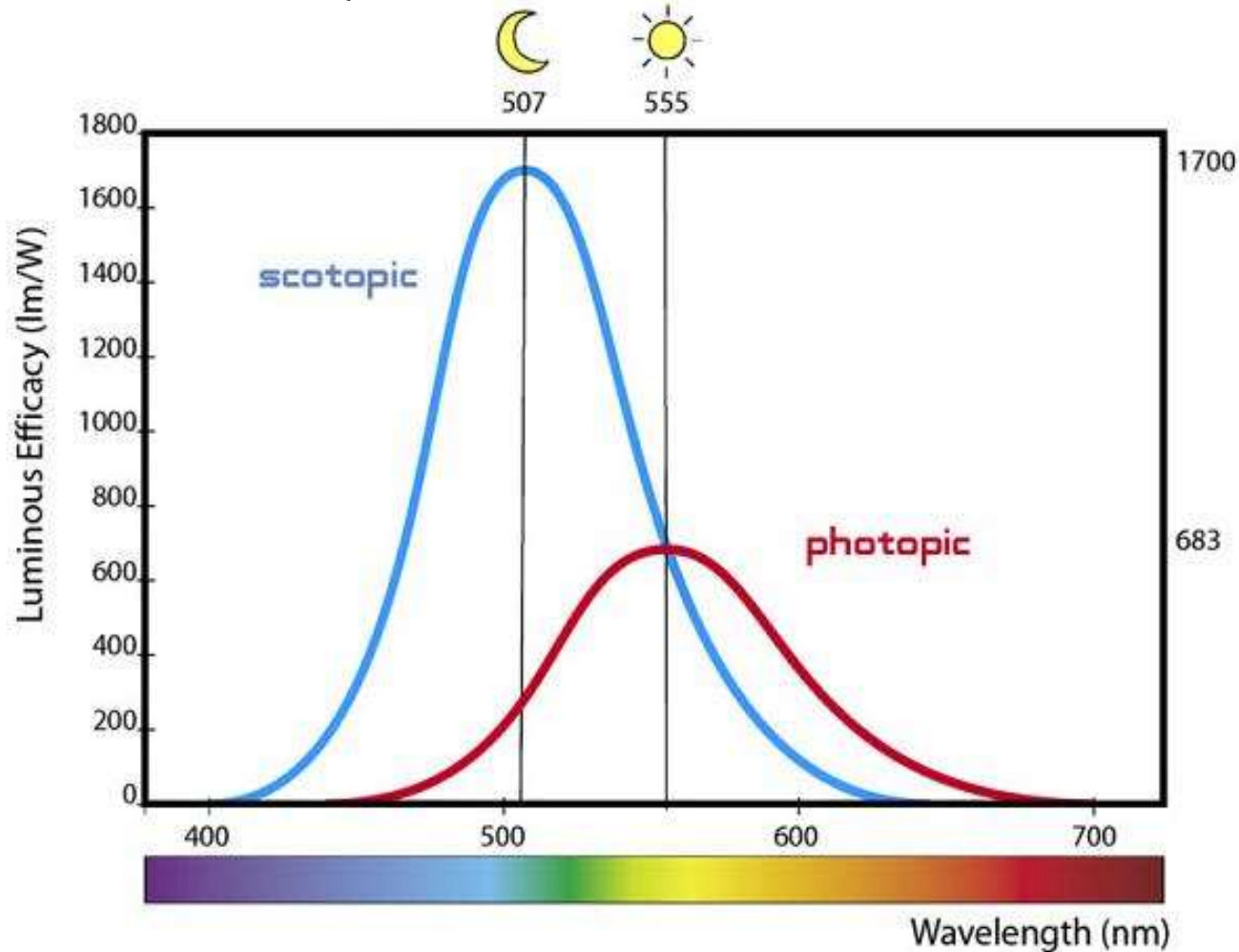


Vision

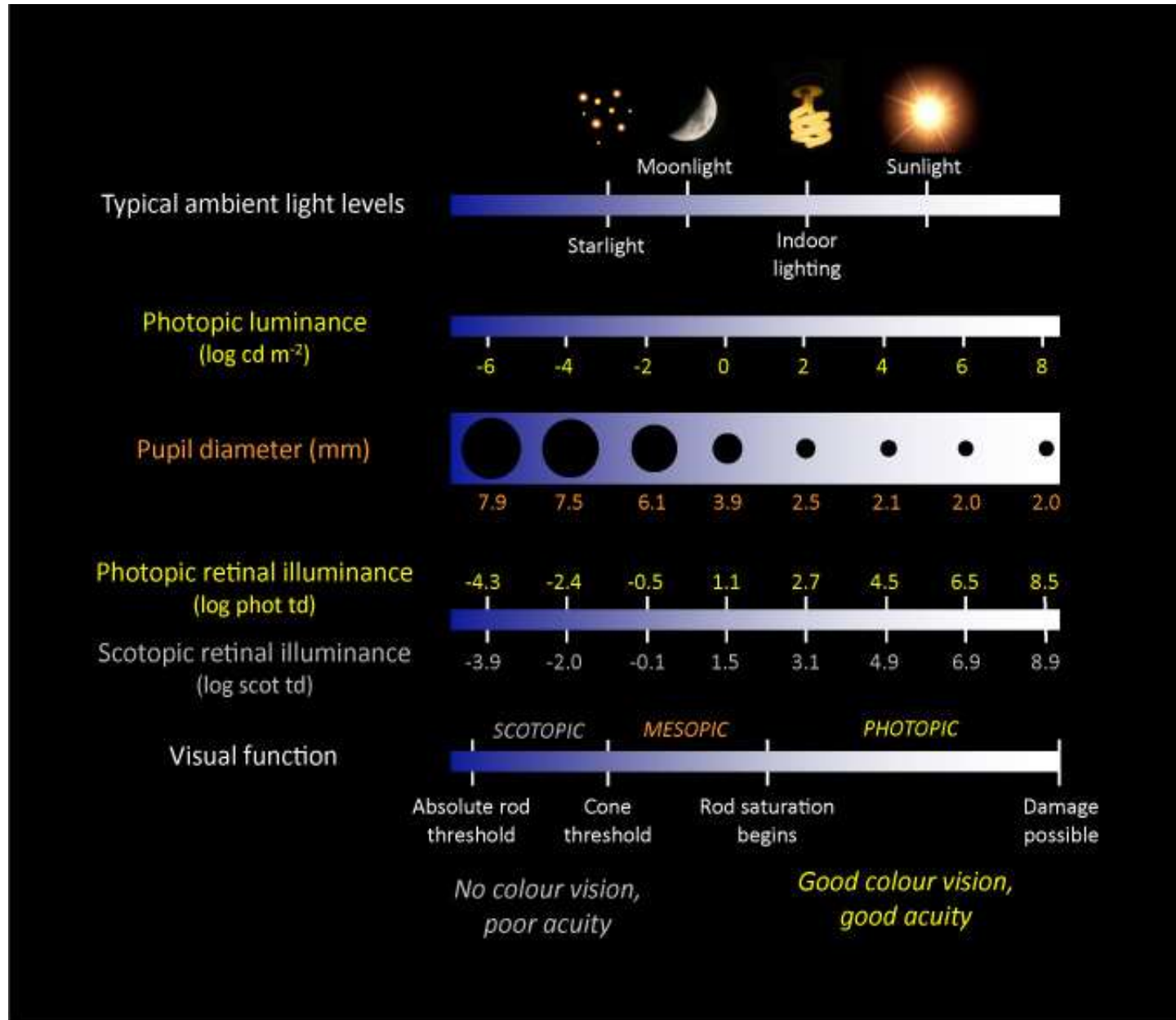


Vision

Quel conclusion devons nous en tirer?

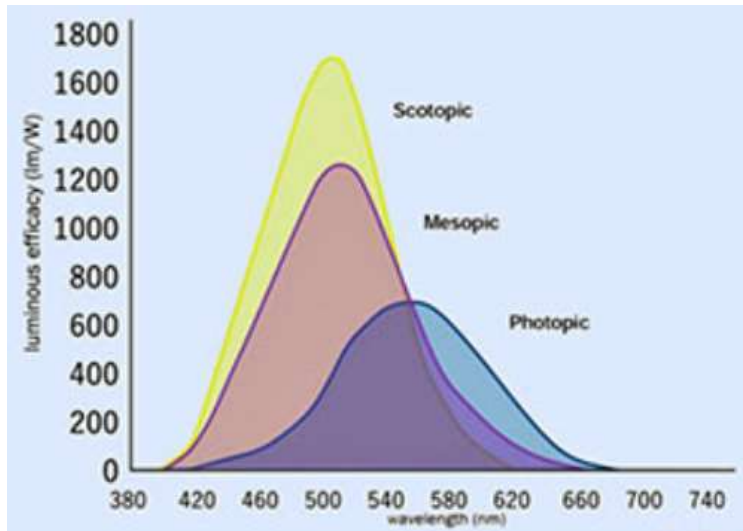


Vision



Le troland (symbole Td), nommé d'après Leonard T. Troland, est une unité de l'éclairement rétinien classiques. Il est conçu comme une méthode pour corriger les mesures photométriques des valeurs de luminance empier sur l'œil humain par rapport à la taille de la pupille efficace. Le troland se réfère généralement à la troland ordinaire ou photopique, qui est définie en termes de luminance photopique: $T = L \cdot p$ où L est la luminance photopique dans cd/m² et p est la zone élève dans mm²

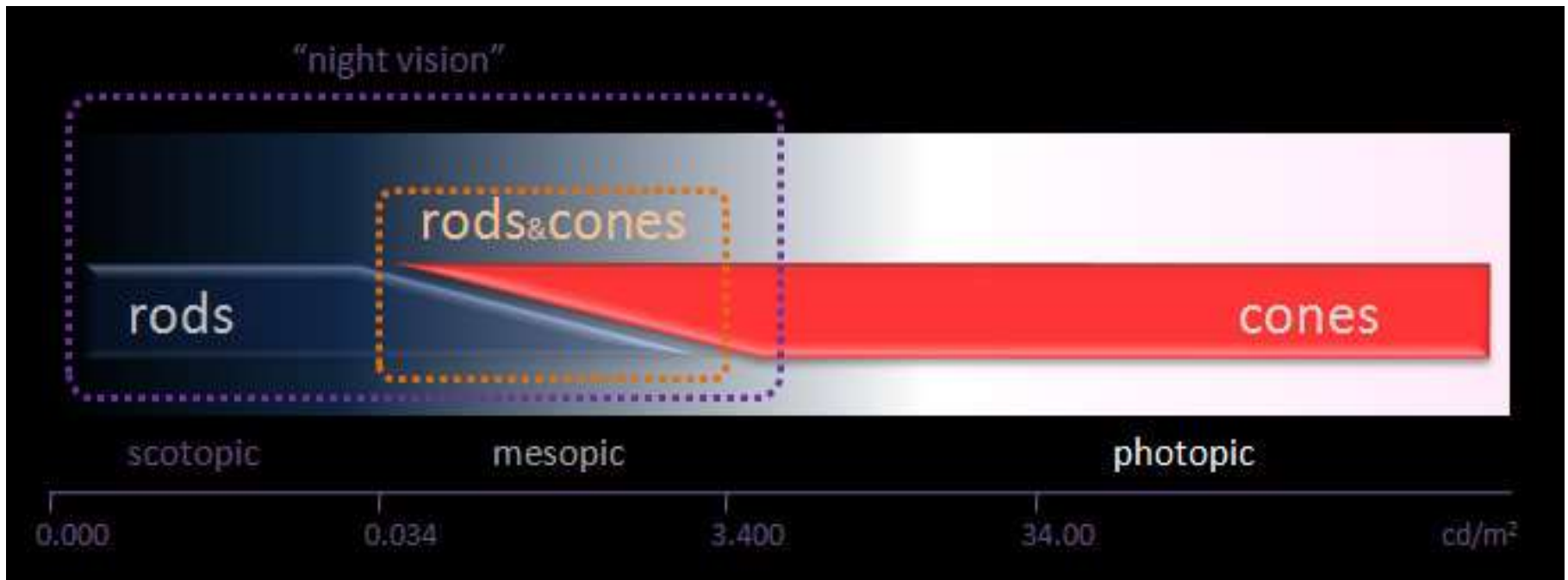
Vision



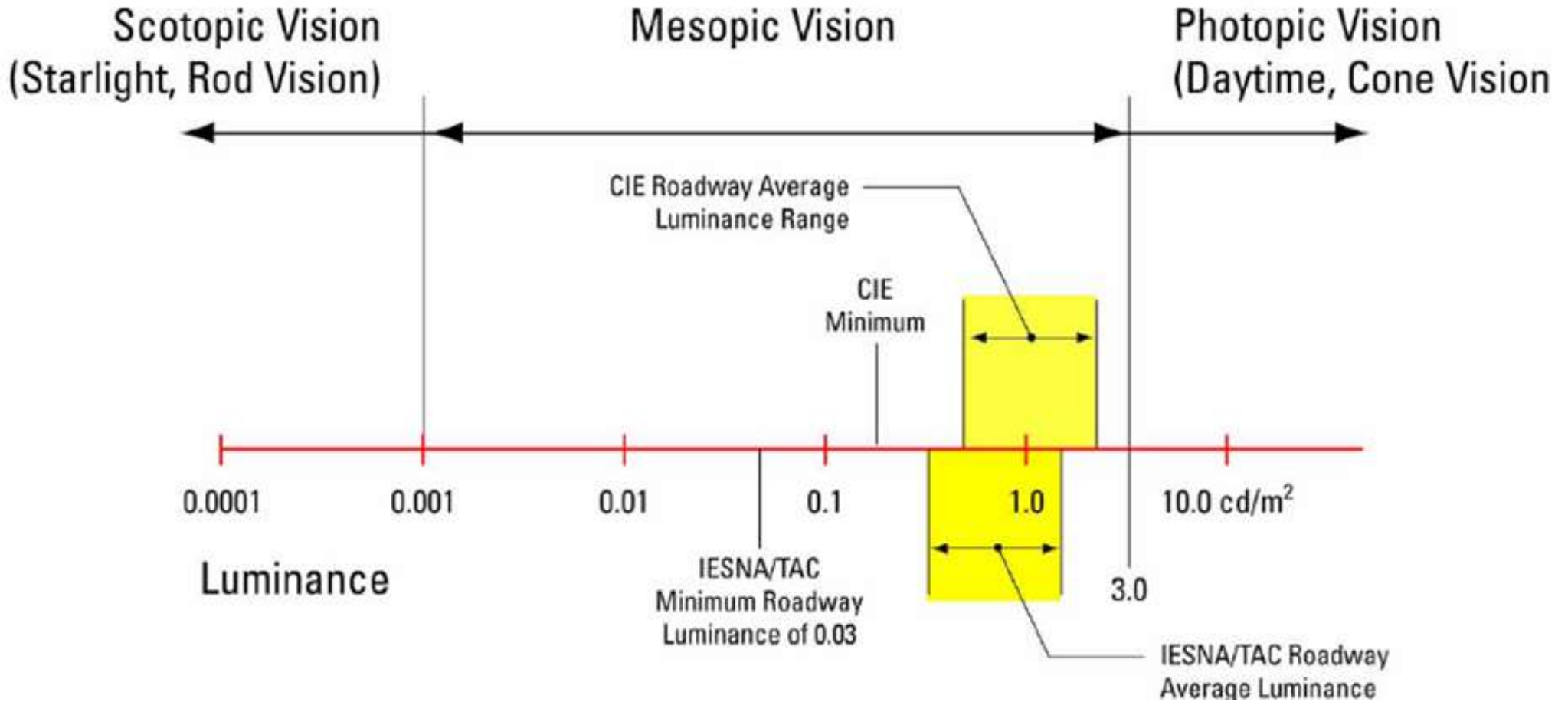
Photopique

Mésopique

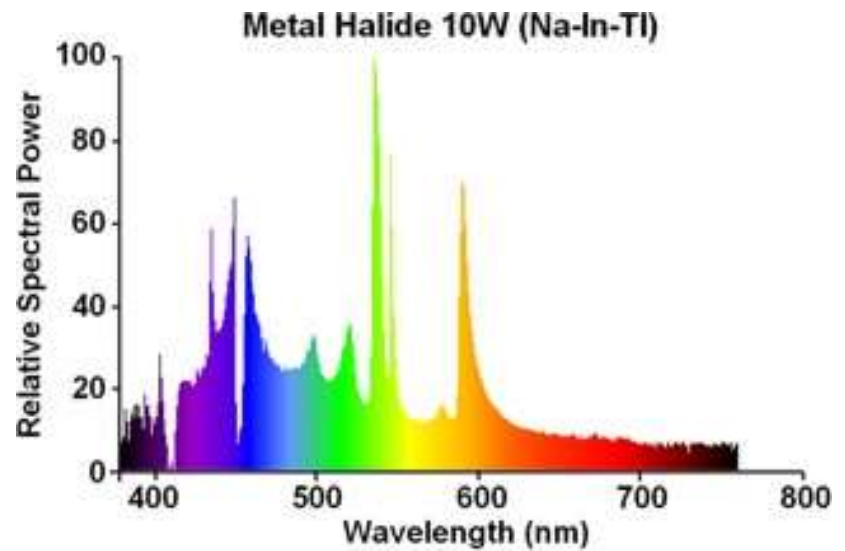
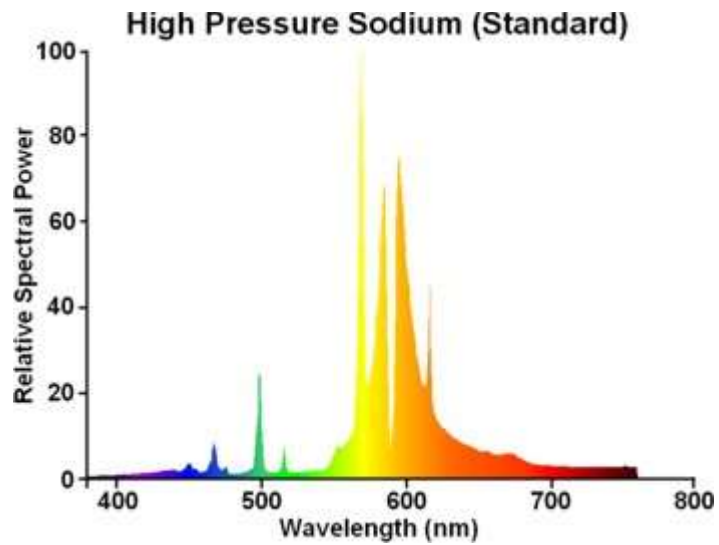
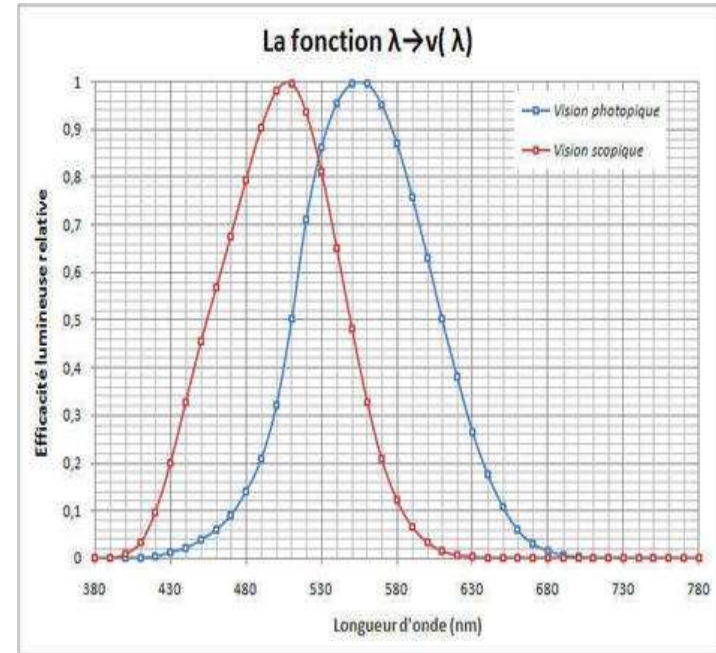
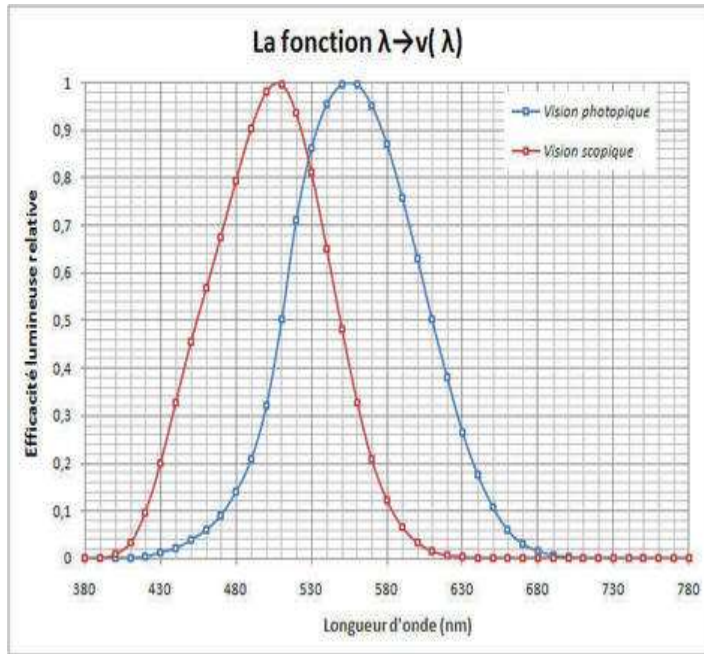
Scotopique



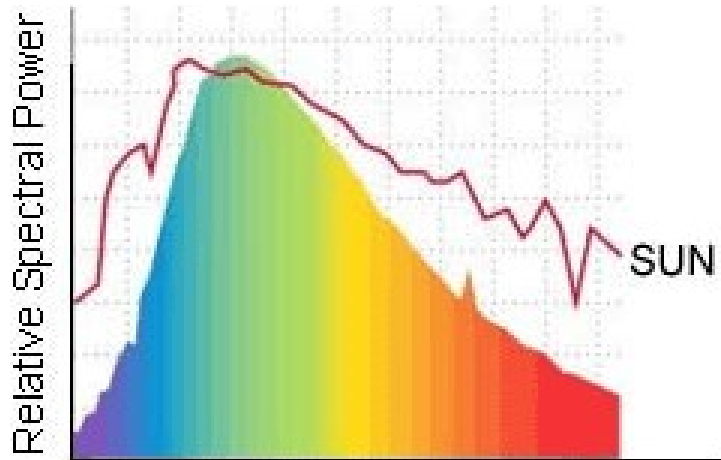
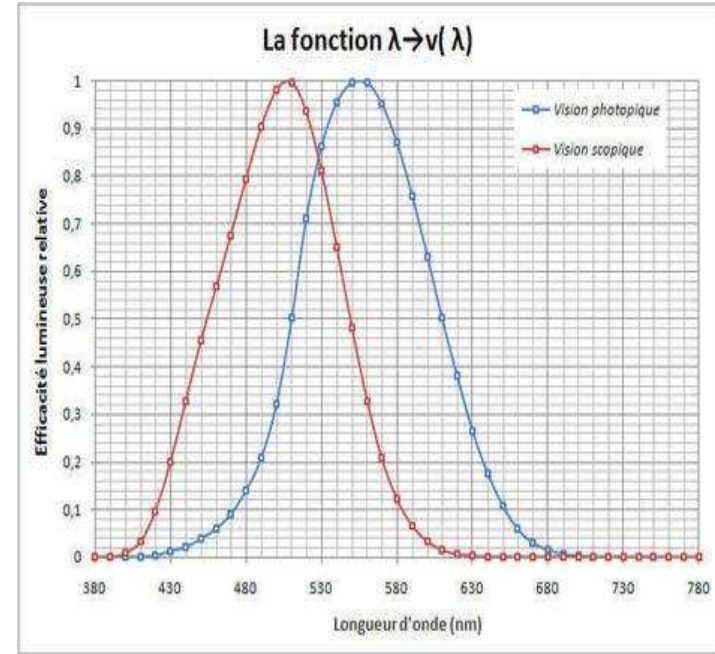
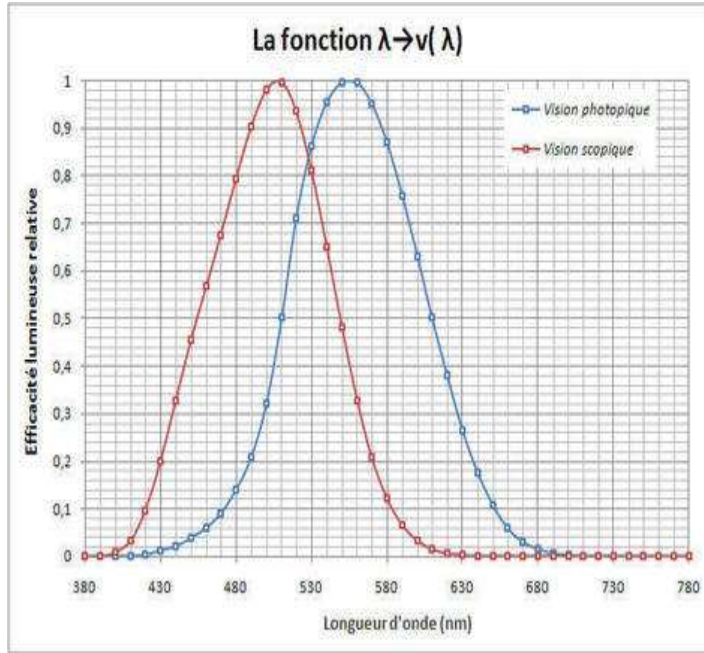
Vision



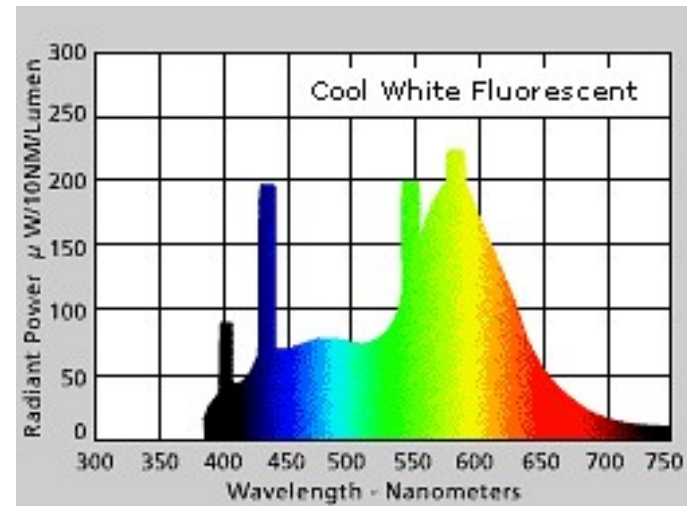
Vision



Vision

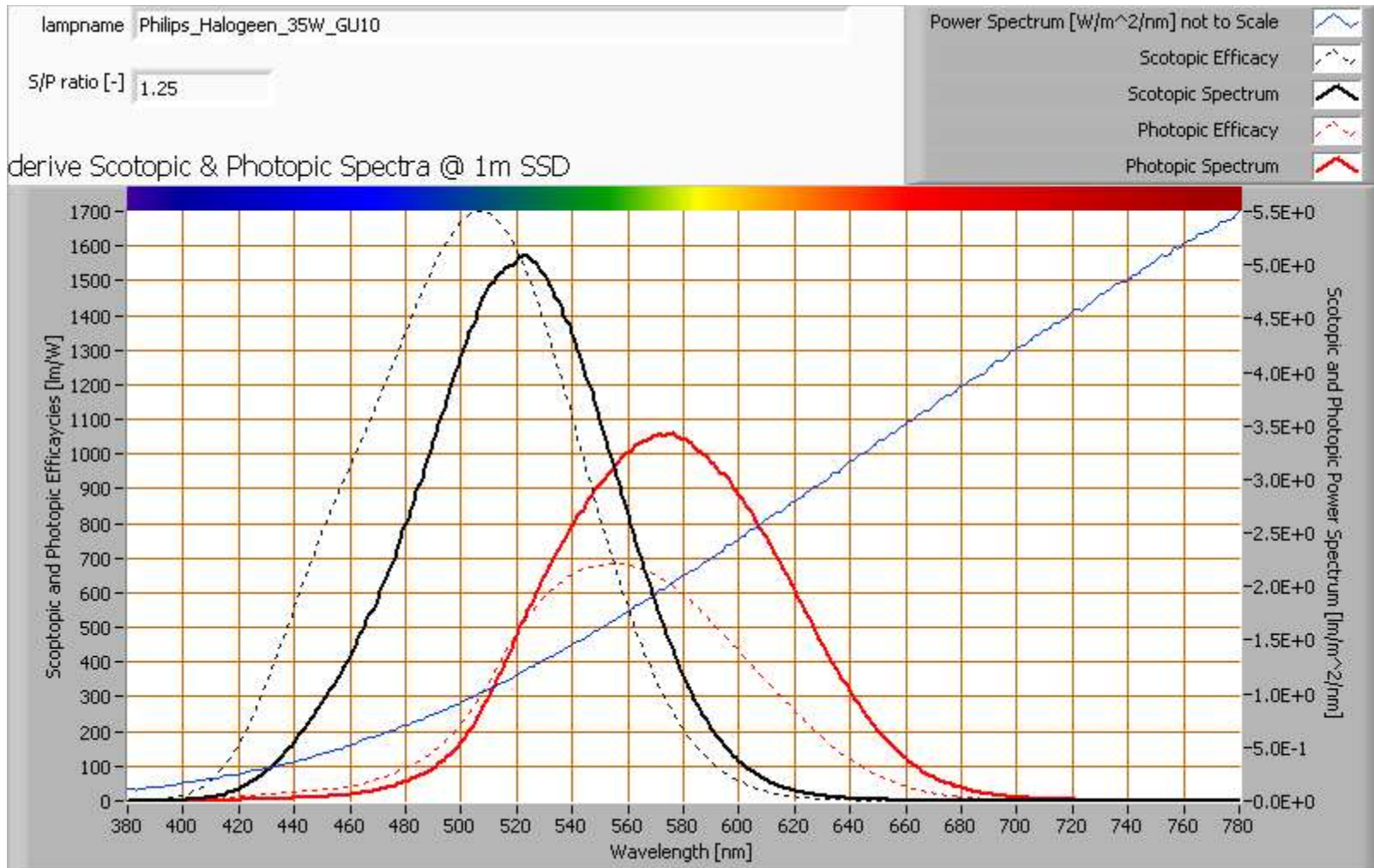


Full & Continuous Spectrum



Vision

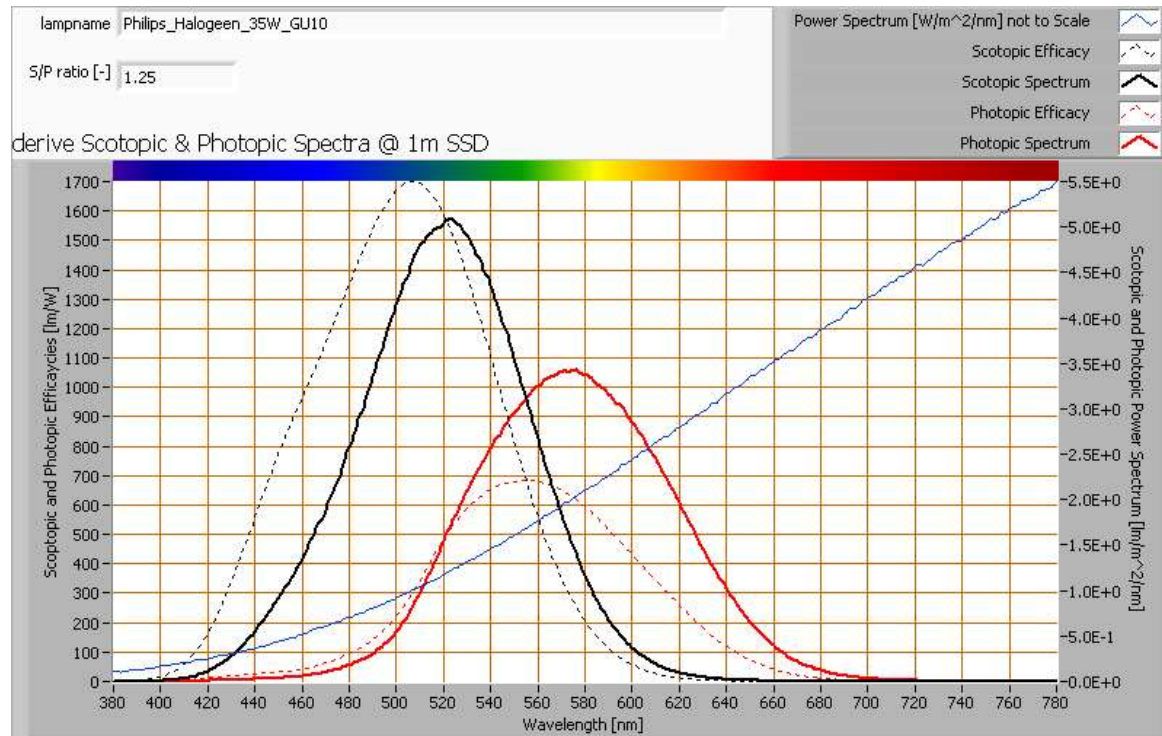
Facteur S/P Scotopique/Photopique



<http://www.olino.org/us/articles/2009/12/14/sp-ratio>

Vision

The S/P ratio and its determination



The power spectrum, scotopic and photopic sensitivity curves and the resulting weighted night and daylight power spectra (last ones at 1 m distance). First in blue the power spectrum of the light of the light bulb concerned. It is a relative measure (assume linear scale) and does not have an y-axis as reference.

A black dashed line shows the scotopic eye sensitivity curve. The dashed red line shows the photopic eye sensitivity curve, which are both connected to the left y-axis.

The black line is the scotopic power spectrum (weighted) what results when the power spectrum is weighted against the scotopic sensitivity curve.

The red line in the photopic power spectrum (weighted) results when the power spectrum is weighted against the photopic sensitivity curve.

The surface below the scotopic power spectrum, divided by the surface below the photopic spectrum, gives as a result the S/P ratio. For this example lamp it is 1.25.

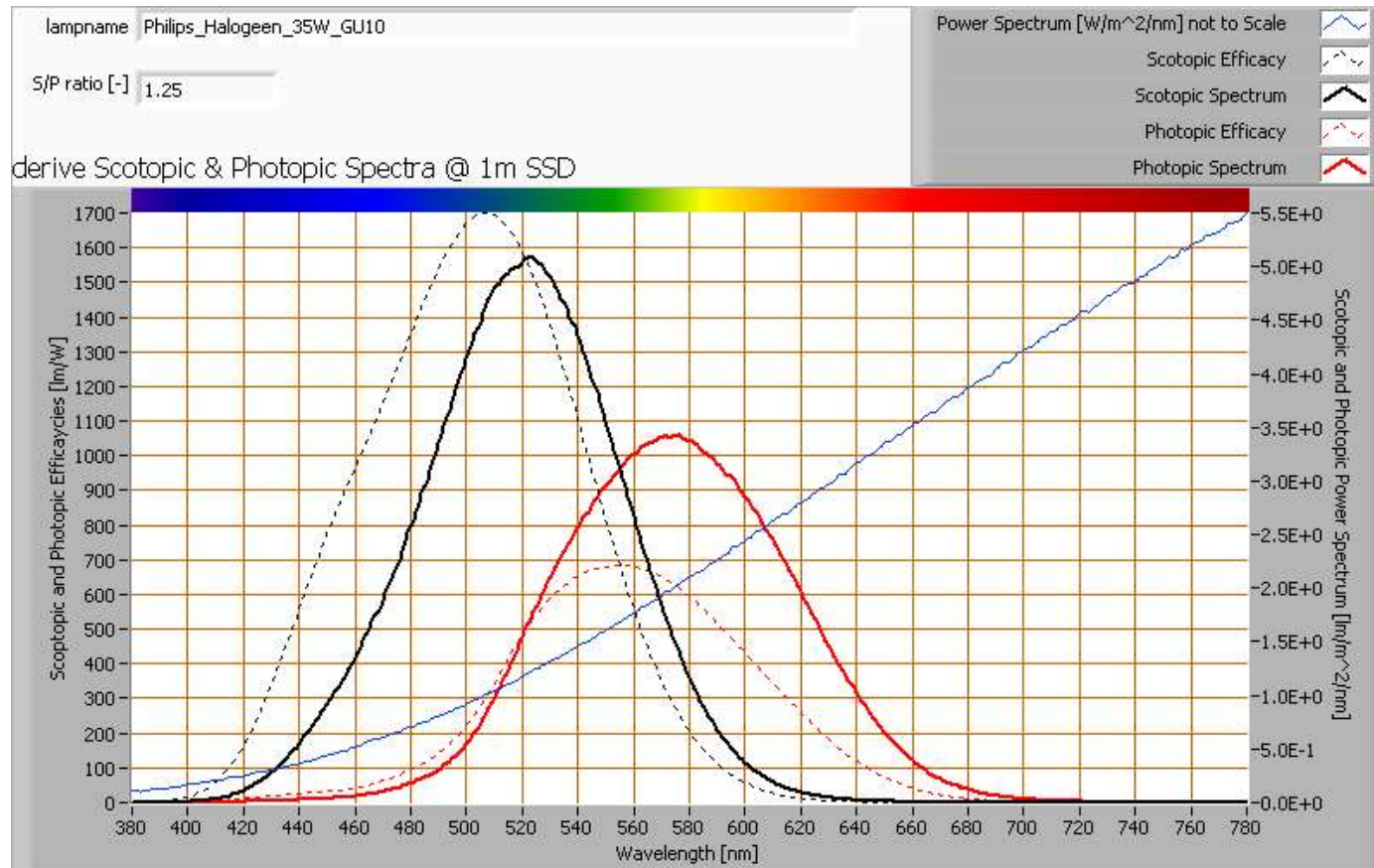
The example lamp taken was a halogen lamp. Its light has a lot of red and very little blue. As the sensitivity of the rods is about 3 times higher than that of the cones, still with little blue and a lot of red the resulting S/P ratio was still more than 1.0, meaning still some more efficiency is expected when rods use this type of light.

It is clear that the more blue is in the illuminance's light, the higher the S/P ratio is and the more benefit can be obtained when these light is used in low ambient light conditions.

Vision

Comment déterminer le facteur S/P scotopique/photopique

Ampoule Halogène



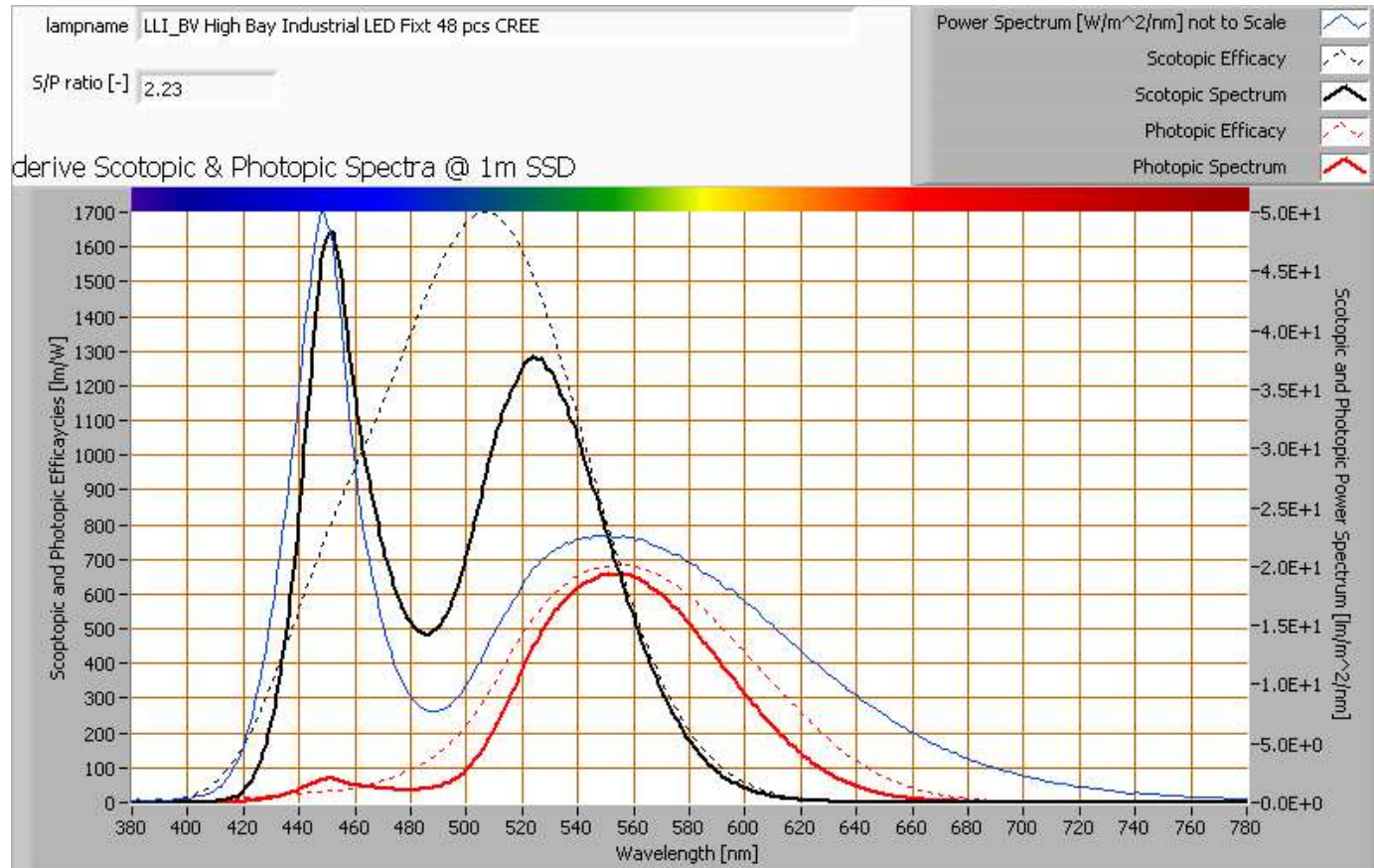
La surface en dessous du spectre de puissance scotopique, divisé par la surface en dessous du spectre photopique, donne comme résultat le rapport S / P. Pour cette lampe exemple, il est de 1,25.

<http://www.olino.org/us/articles/2009/12/14/sp-ratio>

Vision

Comment déterminer le facteur S/P scotopique/photopique

Luminaire LED



La surface en dessous du spectre de puissance scotopique, divisé par la surface en dessous du spectre photopique, donne comme résultat le rapport S / P. Pour cette lampe exemple, il est de 2.23

<http://www.olino.org/us/articles/2009/12/14/sp-ratio>

Vision



Daltonisme

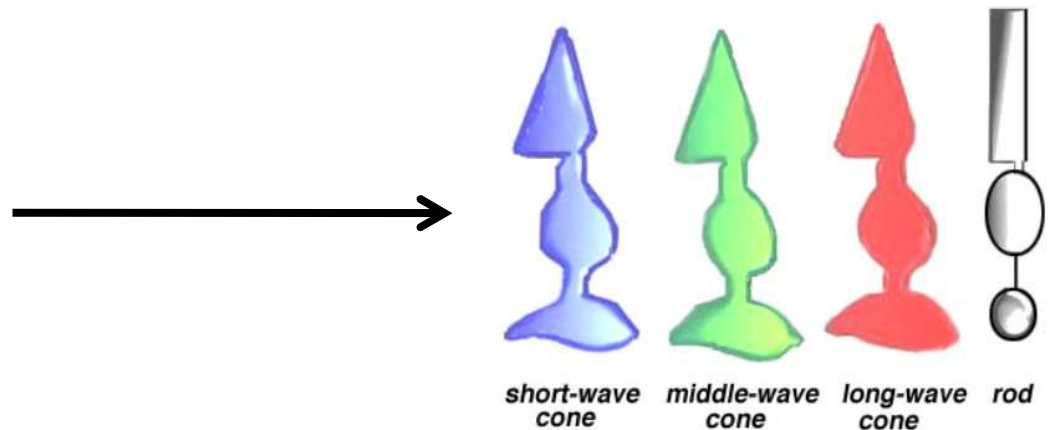
Daltonisme

I. La vision normale des couleurs

L'œil est capable, grâce à **3 types de cellules rétinienne**s spécifiques appelées **cônes**, de percevoir les **couleurs fondamentales rouge, verte et bleue**. Une 2^e sorte de cellules sensorielles existe, les **bâtonnets** : cependant, ils sont utiles pour l'adaptation de l'œil à l'**obscurité**, et n'ont pas trait à la perception des couleurs.

Ces signaux sont ensuite **transmis** par les voies optiques **vers le cerveau** sous forme de messages codés (par couples antagonistes rouge-vert et bleu-jaune : couleurs opposées). Le cerveau élabore alors la **sensation colorée** au niveau du **cortex visuel** puis d'autres centres cérébraux nous font prendre conscience de la perception colorée.

En résumé un daltonien a un type de cônes absent ou déficient

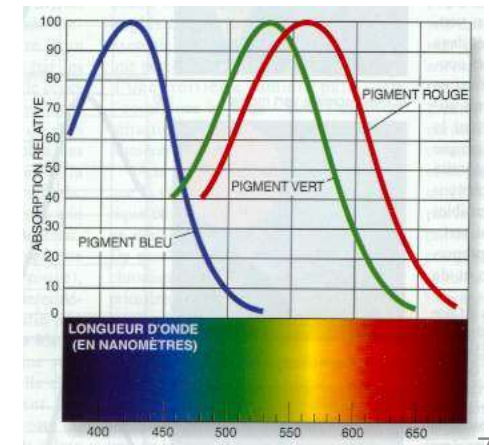
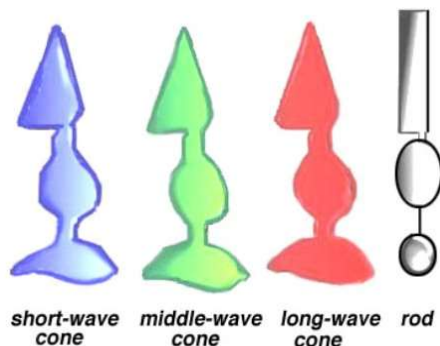


Daltonisme

Les différents types de daltonisme

Le daltonien **ne dispose pas des 3 cônes normaux** pour former les couleurs.

- le daltonien est **achromate** (monochromatisme) : absence totale de perception des couleurs, Les **cônes** de sa rétine sont **dépourvus des 3 pigments** habituels qui permettent de voir les couleurs : il a une **vision en niveaux de gris**. Très rare : 1/40 000.
- le daltonien est **dichromate**, perception de 2 couleurs seulement (1 cône absent) :
 - si le **rouge** manque, le sujet est appelé **protanope**,
 - si le **vert** manque, il est **deutéranope** (le plus fréquent),
 - si le **bleu** manque , il est **tritanope** (extrêmement rare).
- le daltonien est **trichromate anormal**, perception des 3 couleurs d'intensités anormales (1 cône déficient) :
 - si le **rouge** est déficient, il est appelé **protanomal**,
 - si c'est le **vert**, il est **deutéranomal**,
 - si c'est le **bleu**, il est **tritanomal**.



Daltonisme

Vision "normale"



*Vision d'un protanope
(absence du pigment rouge)*



*Vision d'un tritanope
(absence du pigment bleu)*



*Vision d'un deutéranope
(absence du pigment vert)*
Le daltonisme le plus commun



Daltonisme

Types de déficiences	Fréquences dans la population (%)	
	Homme	Femme
1. Monochromatisme	Très rare	Très rare
2. Dichromatisme	2,105	0,06
Protanope	1,0	0,02
Deutéranope	1,1	0,01
Tritanope	0,005	0,003
3. Trichromatisme Anormal	5,9	0,40
Protanomal	1,0	0,02
Deutéranomal	4,9	0,38
Tritanomal	Assez rare	Assez rare
Déficiences de vision des couleurs	8,0 (environ)	0,46 (environ)

Pourquoi les garçons sont plus touchés que les filles ?

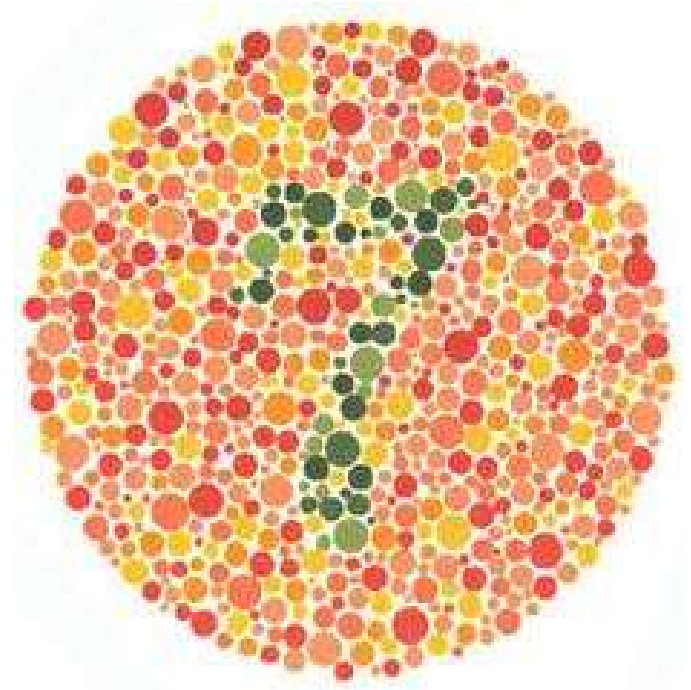
Le daltonisme est dû à une **anomalie génétique sur le chromosome X**.

La **femme** possède **deux chromosomes X**, l'anomalie sur un gène est **souvent compensée par l'autre gène normal**. Elle peut donc **transmettre** le daltonisme **sans en être atteinte** : elle est **porteuse**.

L'homme n'a lui qu'**un seul chromosome X**, et un chromosome Y, le gène anormal **ne peut donc pas être compensé**.

Le daltonisme est par conséquent beaucoup **plus fréquent chez les hommes** (8% de la population française), que chez les femmes. (0.5%) (env. 8% x 8%)

Daltonisme



*Représentation du spectre coloré de la **lumière blanche** par un **individu à vision normale**, et de celui d'un **individu atteint de daltonisme du vert** (deutéranopie).*

Forme la plus rependue.

Le vert et le orange sont perçus comme deux gris, donc confondus.

Vision animal

Vision du cheval



Vue du chien



Vue humaine



700 600 500 400

Longueur d'onde en (nm)

Oiseaux: De nombreux oiseaux peuvent voir différemment. Les pigeons, par exemple, peuvent voir littéralement des millions de teintes différentes, ils ont beaucoup plus de cônes que l'humains



La couleur

La couleur



La couleur est la perception subjective qu'a l'œil d'une ou plusieurs fréquences d'ondes lumineuses, qui reflète d'un objet.

On distingue :

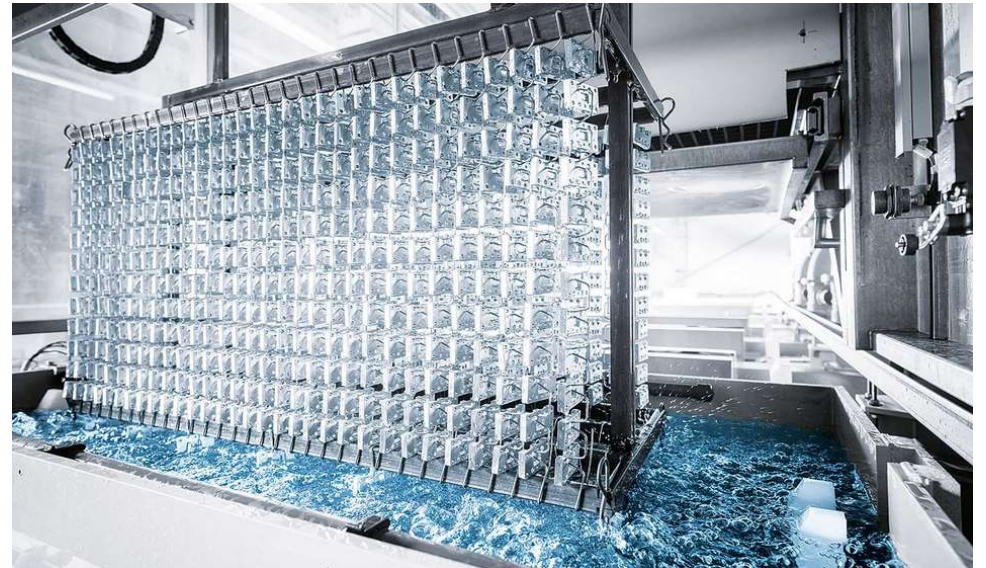
les couleurs pigmentaires, dites chimiques, car produites par la présence dans la matière de colorants ou de pigments (qui absorbent une partie de la lumière blanche et ne réfléchit que certaines longueurs d'ondes)

les couleurs structurelles, dites physiques, provoquées par des phénomènes d'interférence liés à la structure microscopique de l'objet qui diffracte la lumière reçue.

Les couleurs pigmentaires sont généralement stables, tandis que les couleurs structurelles sont pérennes et iridescentes (qui varient selon l'angle de perception).

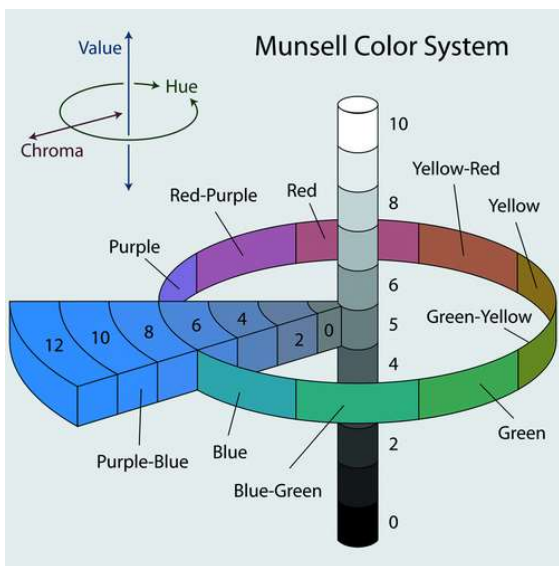
La couleur

On peut changé la couleur d'un objet avec différents procédés selon la nature de l'objet.
Peinture, teinture, plaquage.



La couleur

Il existe une infinité de chartes de couleur, certaines sont standard telles que RAL et Munsell, tandis que d'autres sont propriété d'entreprises privées (ex: Sico, Behr, Glidden) avec des noms de couleurs tous plus poétiques les uns que les autres.



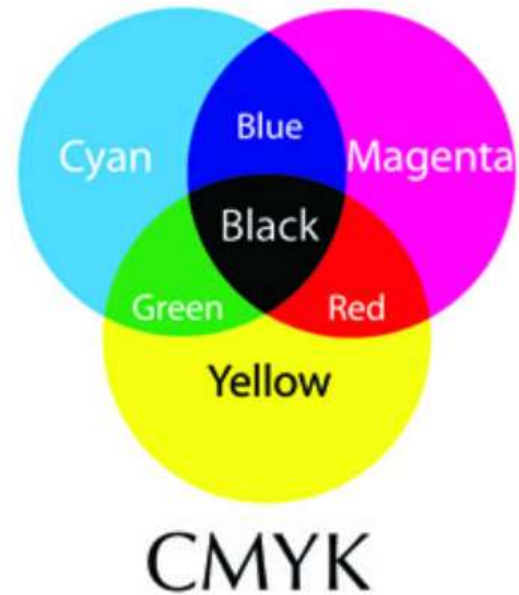
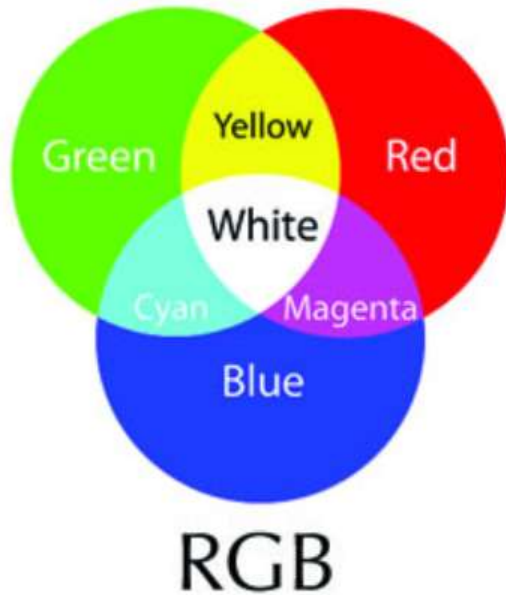
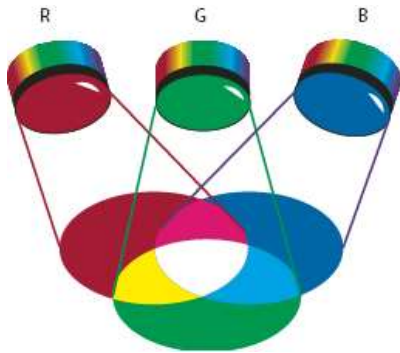
La couleur

L'apparence de la couleur d'un objet sera toujours en relation avec les propriétés de la source lumineuse qui l'illumine.

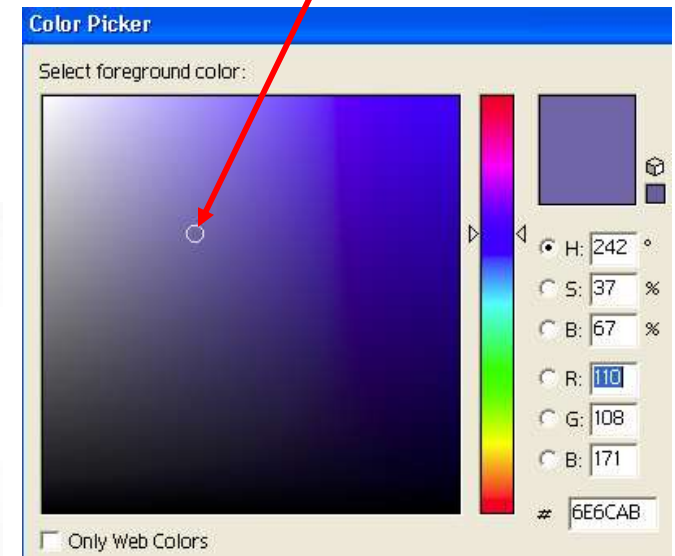
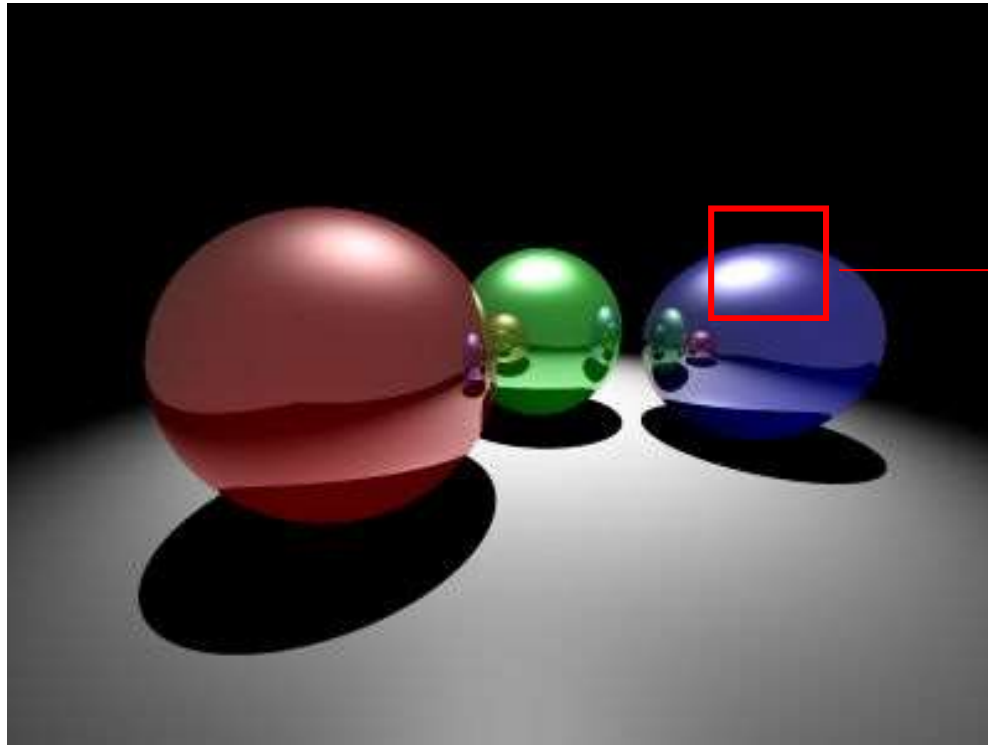


La couleur

Les couleurs sur terminal vidéo ou sur impression



La couleur



L'information de chaque pixel de couleur:
Intensité en rouge bleu et vert de 0 à 255
Hue teinte 0 à 360
Saturation en %
Brightness Brillance en %

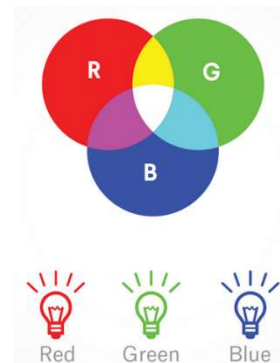
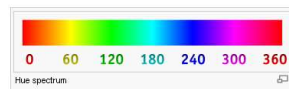
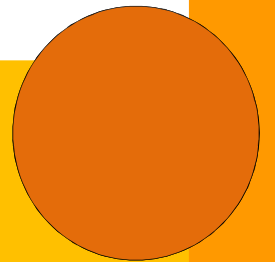


Diagramme de chromaticité



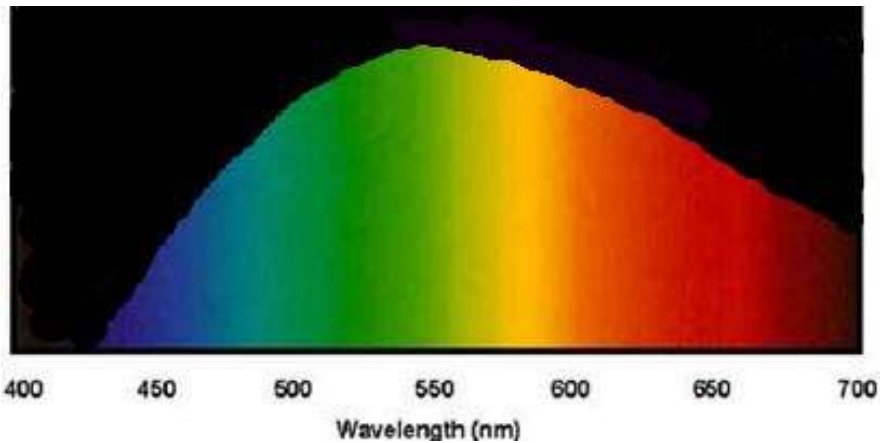
La distribution spectrale

La distribution spectrale

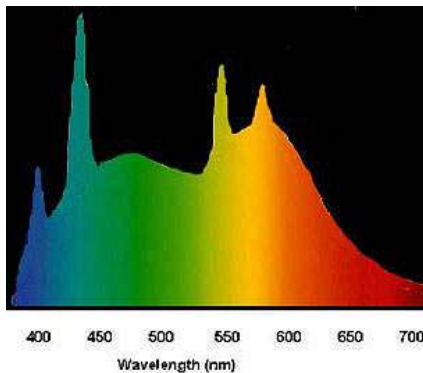
La lumière est le plus souvent composée d'un mélange de longueurs d'onde (ou énergies spectrale). Il est plus rare de rencontrer des sources lumineuses formées d'une longueur d'onde unique comme le cas des rayons lasers par exemple. La lumière blanche du soleil est composée par l'ensemble des énergies spectrales,

On représente cette distribution des énergies spectrales à l'aide d'un diagramme appelé courbe spectrale de la lumière. On peut représenter les courbes spectrales des sources lumineuses, des filtres colorés et même de l'œil humain. Dans ce dernier cas on parle de la courbe de sensibilité spectrale

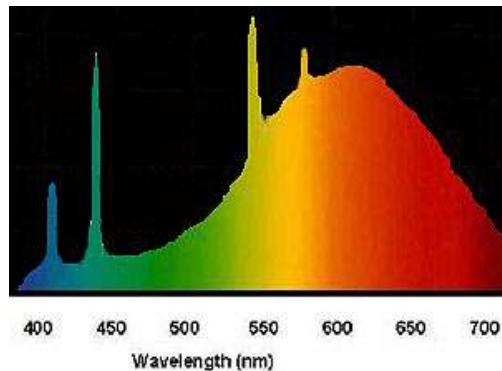
Lumière du soleil



Fluo 6500k



Fluo 4100k



Spectra From Common Sources of Visible Light

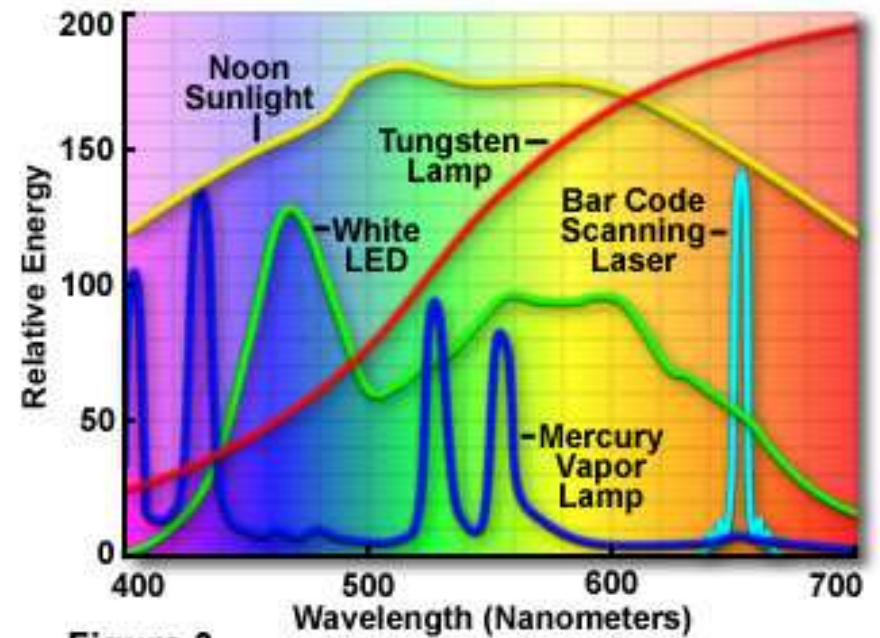


Figure 3

La distribution spectrale

Comment peut-on définir les qualités d'une source à partir sa distribution spectrale.
Soit l'énergie de chaque longueur d'onde qui a sa propre couleur

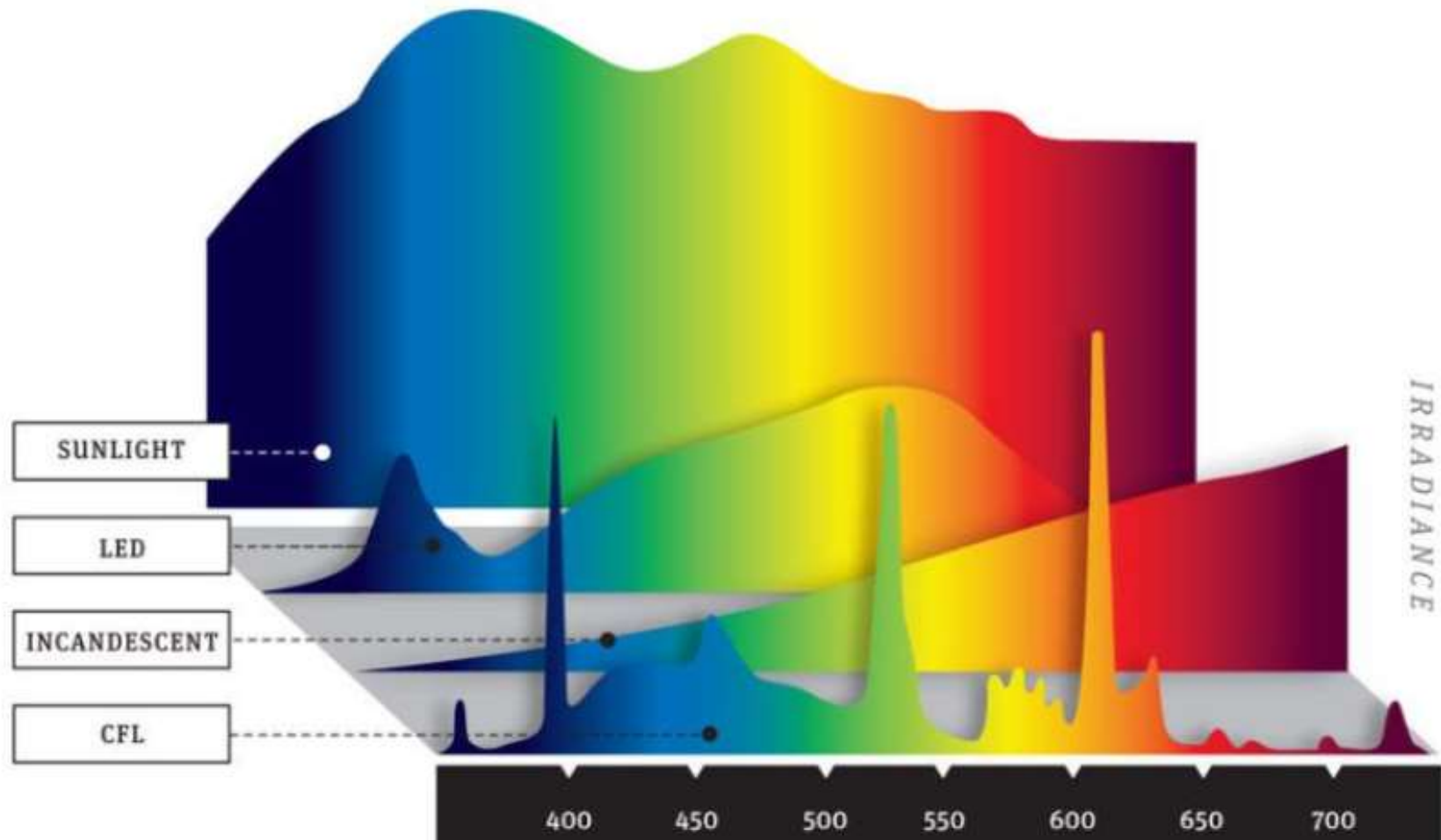


Diagramme de chromaticité

Vous pouvez télécharger et installer Color calculator 7.23. c'est un outil intéressant pour comprendre les propriétés de la lumière selon sa composition spectrale

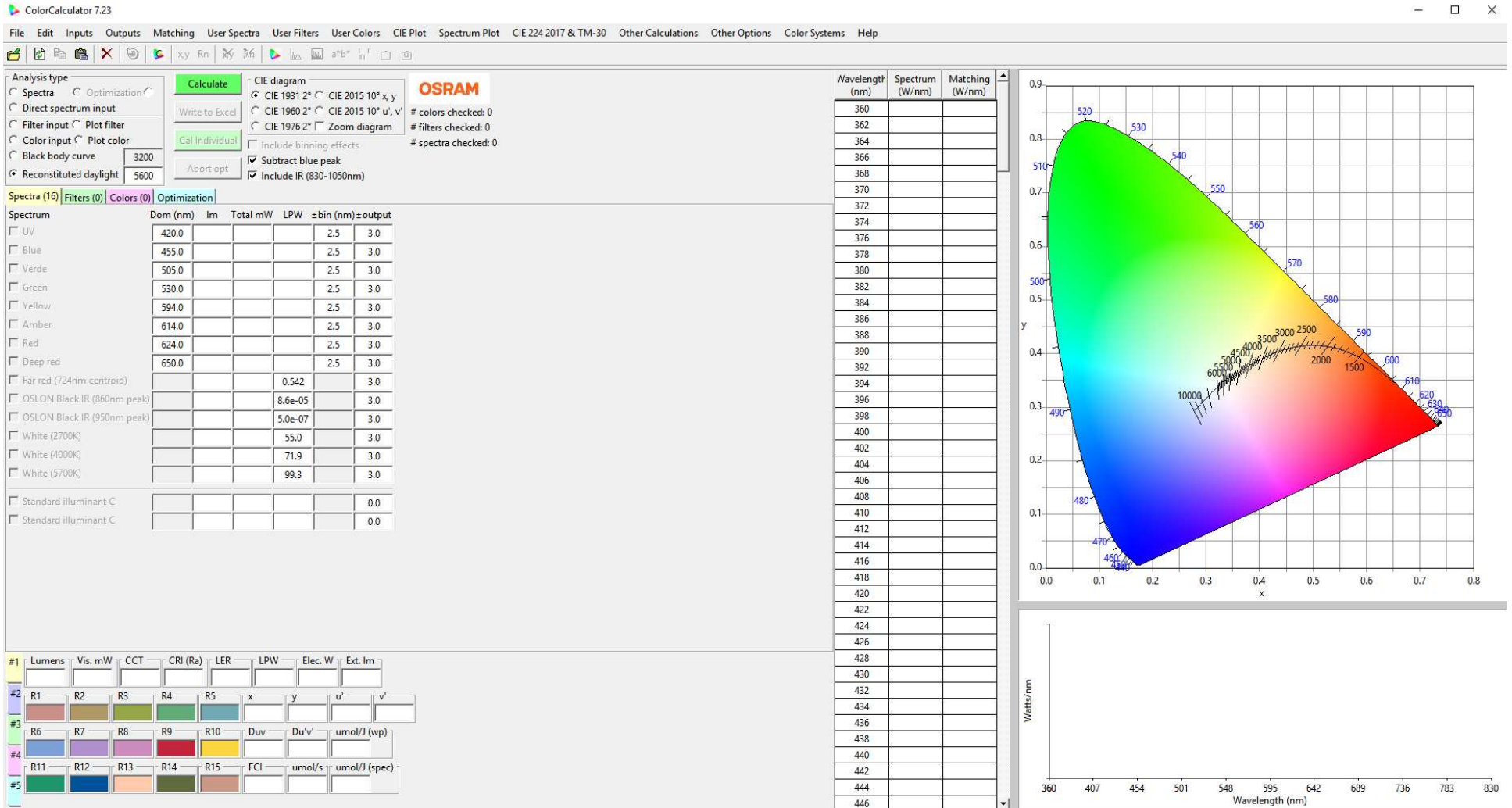


Diagramme de chromaticité

Un diagramme dans le plan (x,y) ou (u,v) représente toutes les couleurs distinguées par nos yeux. Si deux points représentent chacun une couleur, le segment qui les joint représente les mélanges de ces deux couleurs en proportions variables.

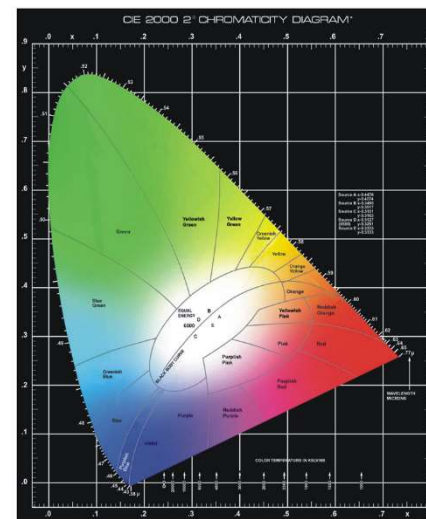
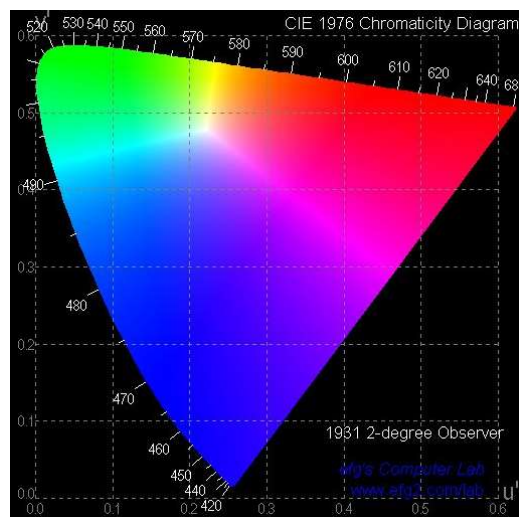
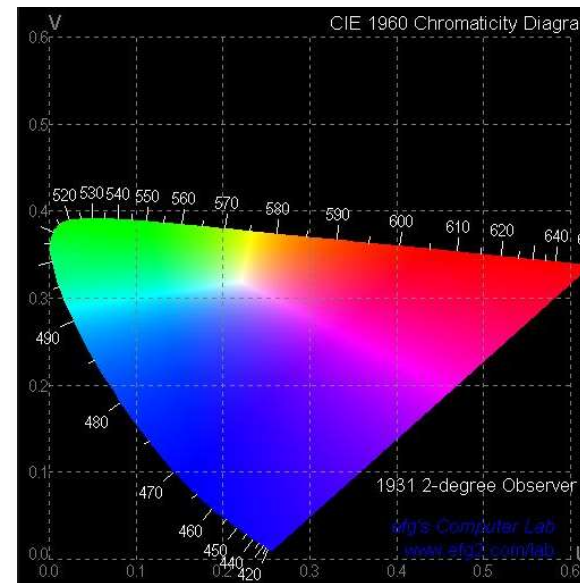
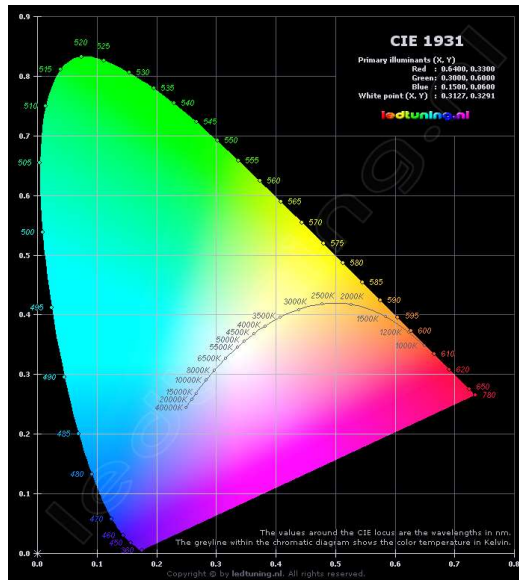
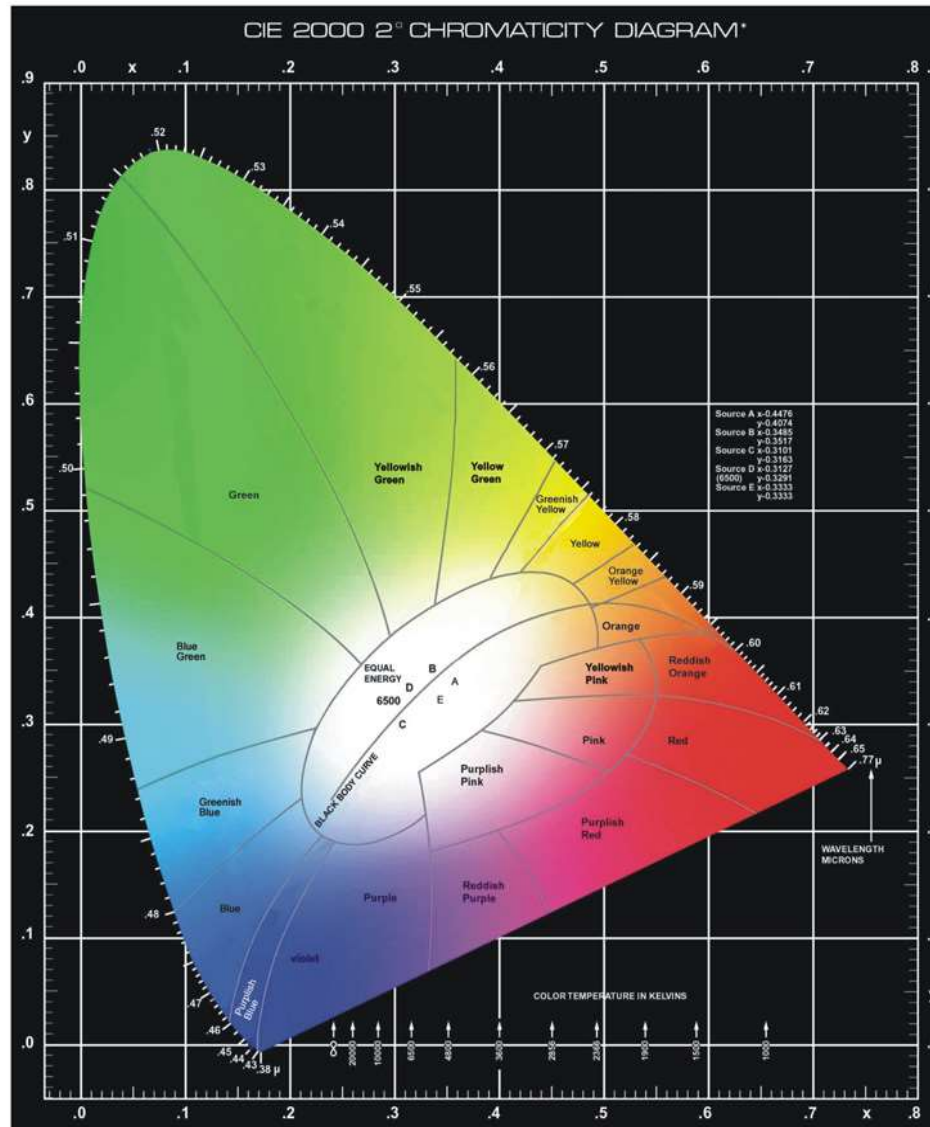


Diagramme de chromaticité

Un diagramme dans le plan (x,y) représente toutes les couleurs distinguées par nos yeux. Si deux points représentent chacun une couleur, le segment qui les joint représente les mélanges de ces deux couleurs en proportions variables.

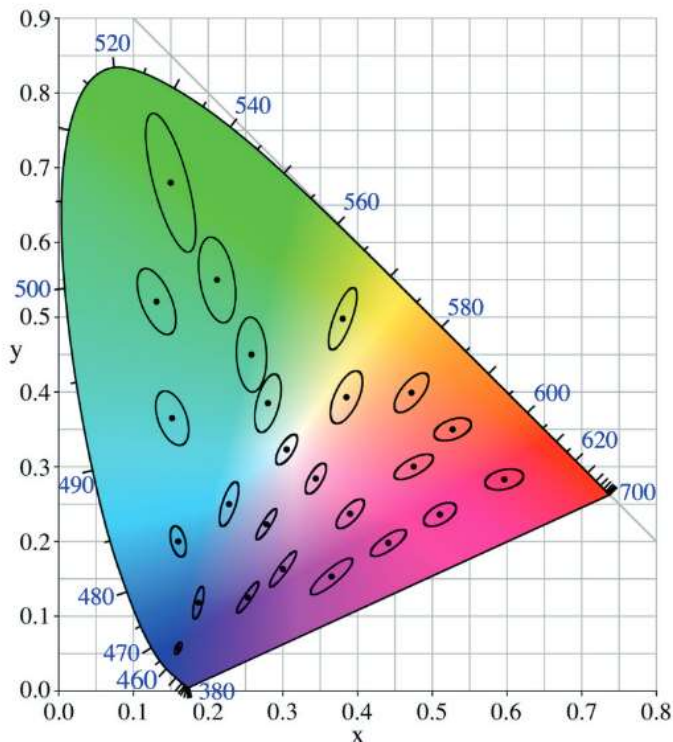


ELLIPSE DE MACADAM

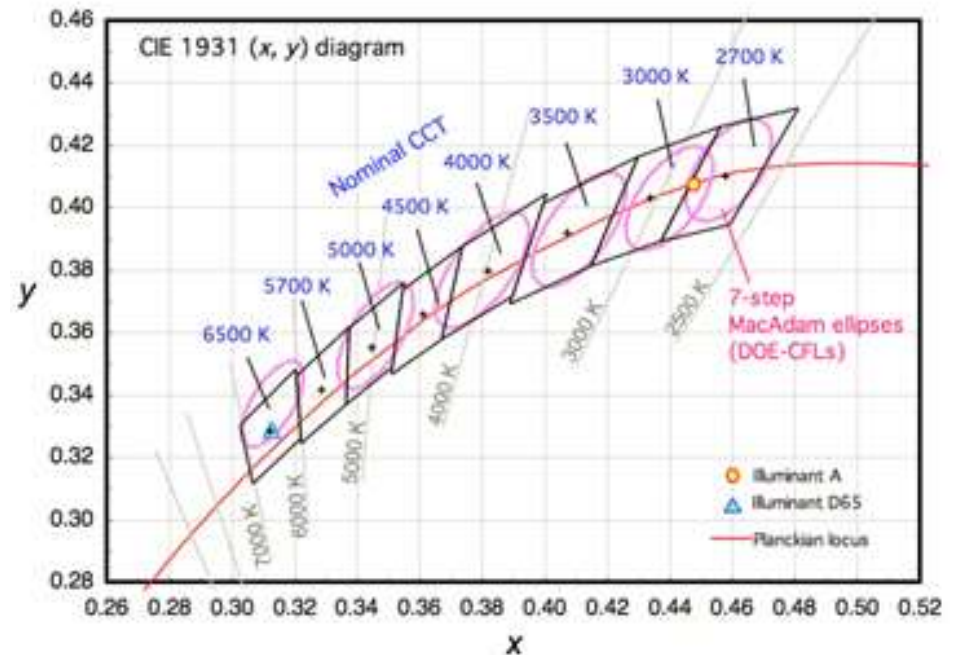
L'Ellipse de Macadam permet de qualifier la variation chromatique possible autour d'une valeur cible et de définir à partir de quelle valeur cette variation sera visible par l'œil humain. Ceci s'applique à tous les éclairages, qu'ils soient blancs ou en couleur. L'œil humain décernant plus rapidement une différence dans les nuances de blanc que dans le vert par exemple, les tailles des Ellipses sont différentes en fonction des couleurs (voir schéma 1). En lumière blanche : Au sein d'une Ellipse de Macadam des différences de 1 échelon ne sont pas visibles, des différences de 2 à 3 échelons sont à peine discernables, des différences de 4 sont visibles mais acceptables

La distance depuis le point cible dans chaque ellipse est mesurée en déviations standards de concordance de couleur (SDCM). Un SDCM de 1 indique qu'il n'y a pas de différence chromatique entre les chips ou puces de la LED, 2 ou 3 SDCM indiquent une différence chromatique difficilement perceptible. Une stabilité chromatique de 7 déviations standards de concordance de couleur (SDCM) est acceptée par le marché et répond aux exigences d'Energy Star. (voir schéma 2).

Schema 1



Schema 2



Contraste

Contraste



La perception n'est pas relié qu'aux niveaux d'éclairément et de luminance, elle est aussi sujet à une question de contraste. Plus le contraste est faible , plus les niveaux d'éclairément devront être élevés

Contraste élevé

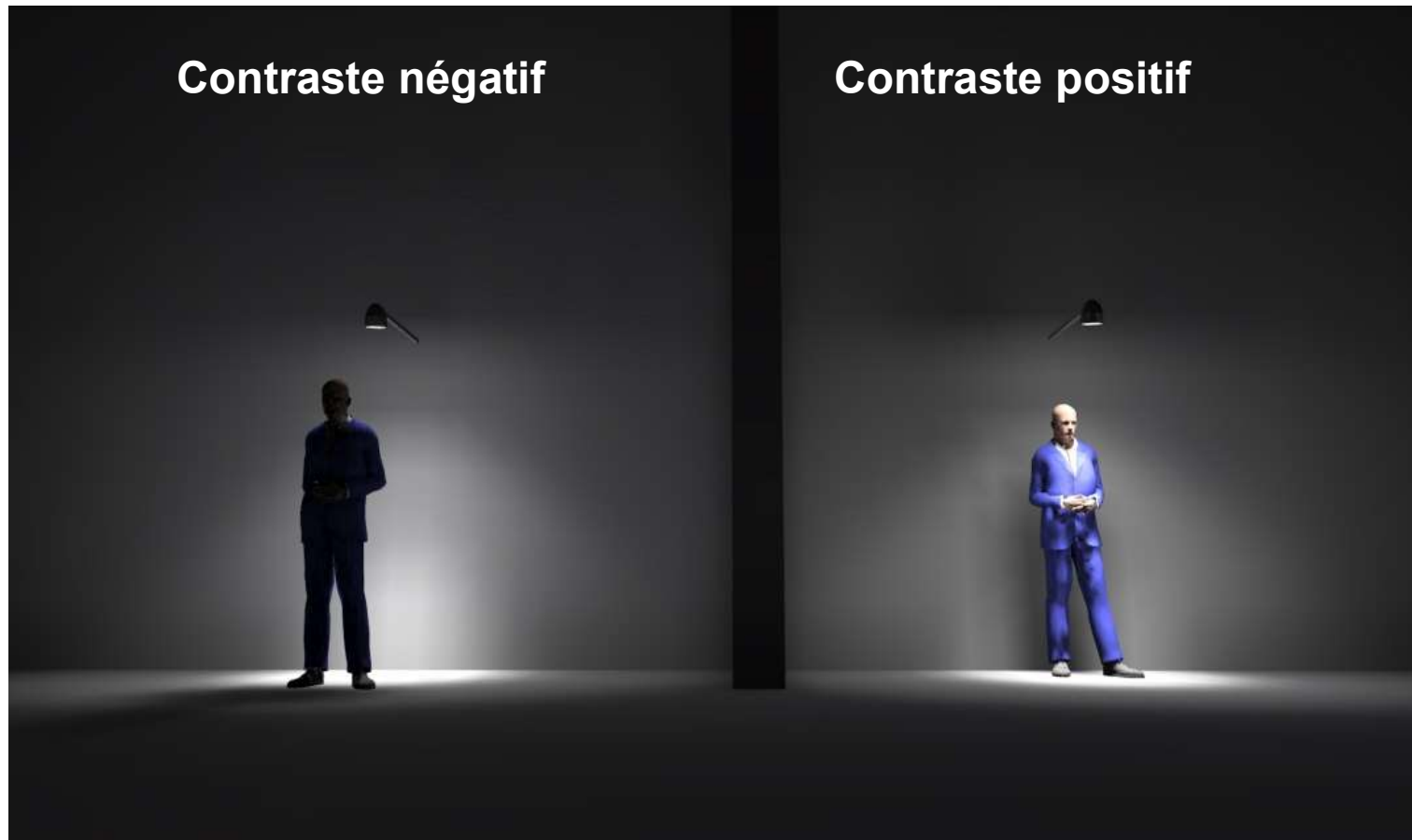
Contraste moyen

Contraste faible

Contraste très faible

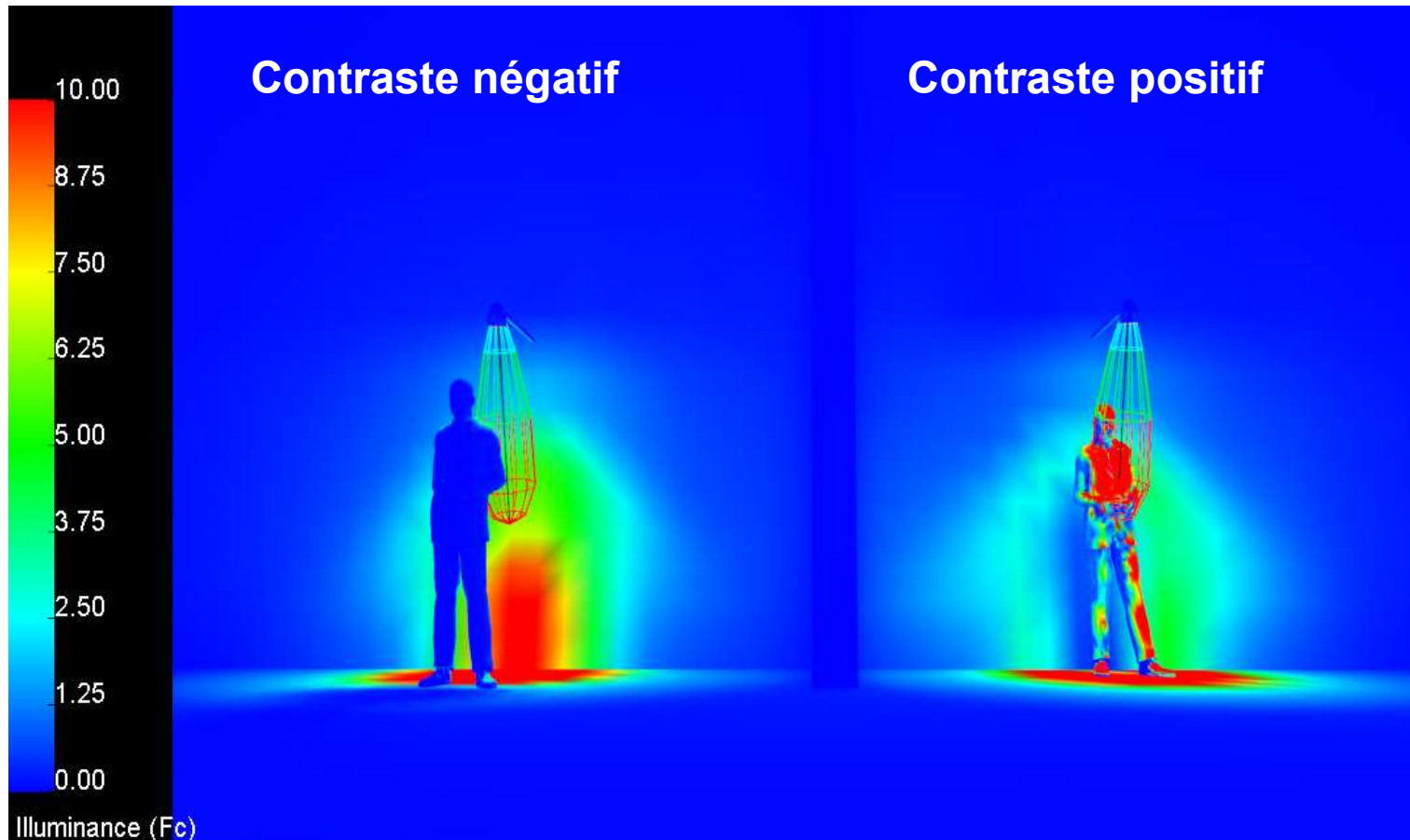
Contraste

La perception n'est pas relié qu'aux niveaux d'éclairement et de luminance, elle est aussi sujet à une question de contraste.



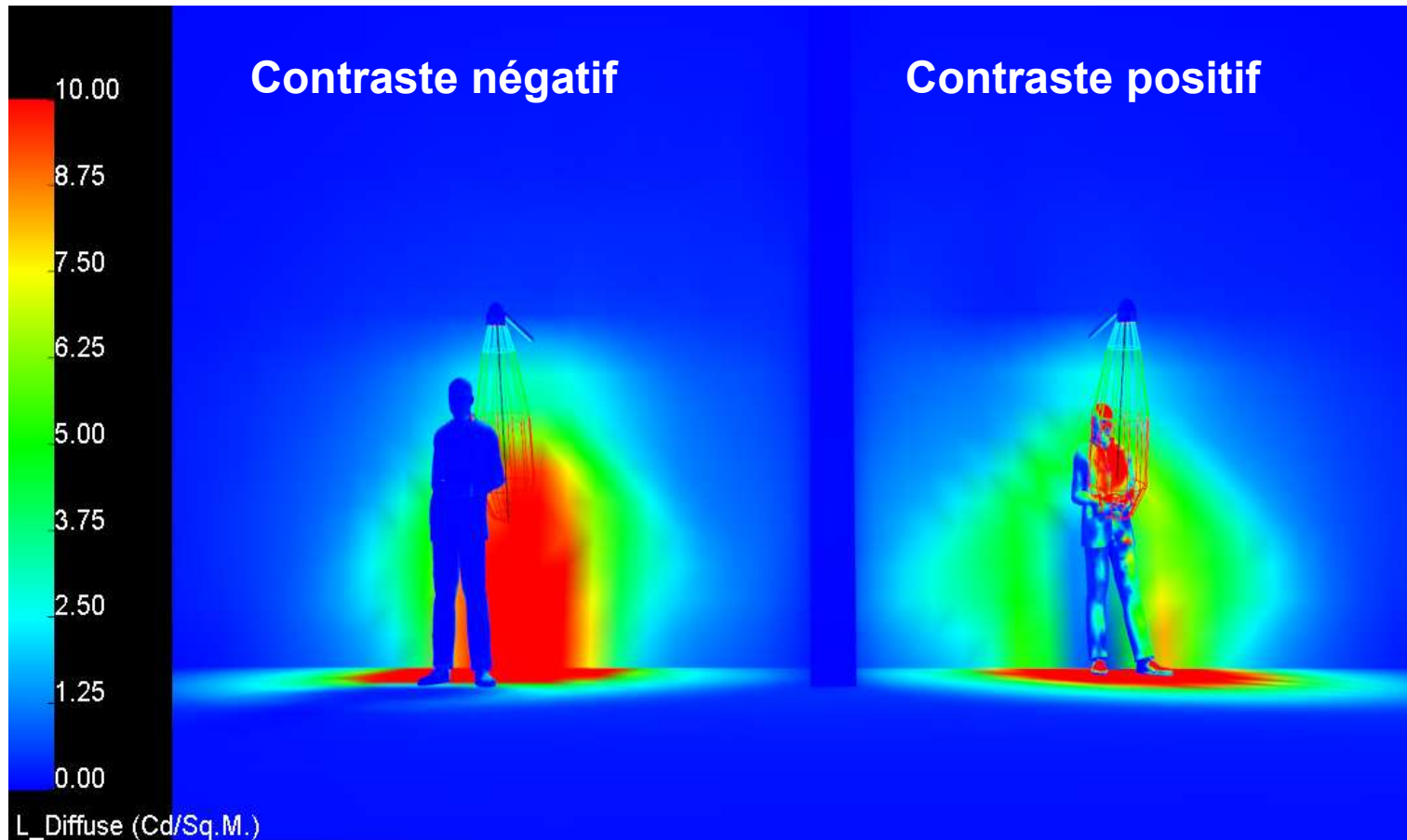
Contraste

La perception n'est pas relié qu'aux niveaux d'éclairement et de luminance, elle est aussi sujet à une question de contraste.



Contraste

La perception n'est pas relié qu'aux niveaux d'éclairage et de luminance, elle est aussi sujet à une question de contraste.



Contraste

Il y a deux expressions pour le contraste:

Première expression du contraste

$$C = \frac{(L_o - L_f)}{L_f}$$

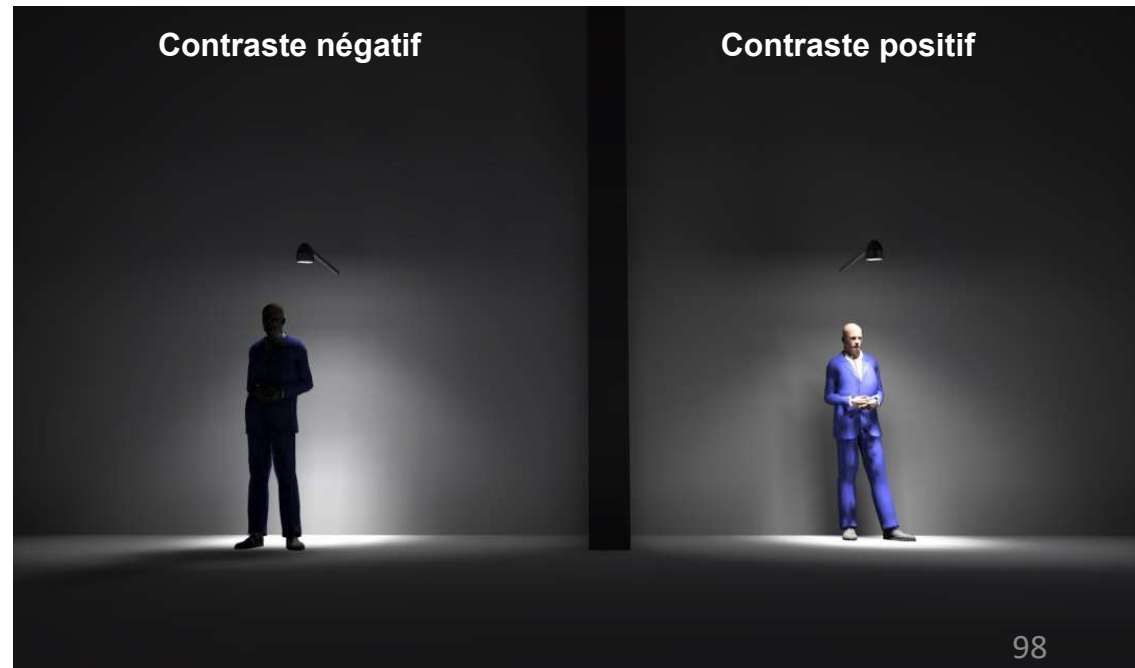
C = contraste

L_o = luminance de l'objet

L_f = luminance de fond sur lequel l'objet est observé

Si **L_o < L_f**, on parle de contraste négatif

Si **L_o > L_f**, on parle de contraste positif



Contraste

Il y a deux expressions pour le contraste:

Deuxième expression du contraste

$$C = \frac{L1}{L2}$$

C = contraste

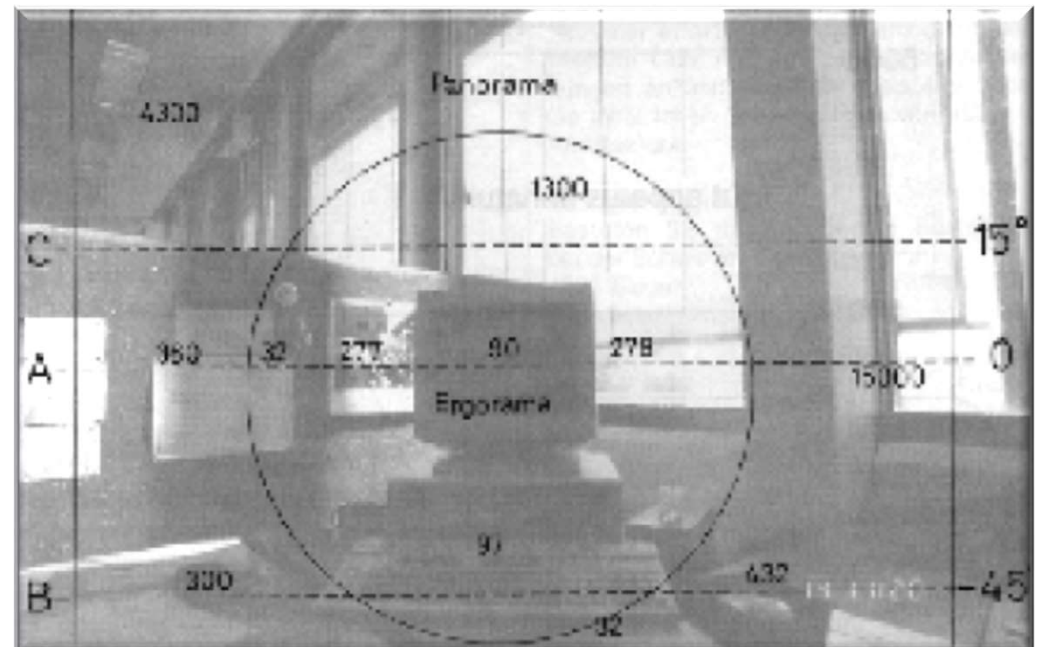
L1 = luminance du point 1

L2 = luminance du point 2

Le résultat est souvent donné sous la forme : 1 / X

Sur cet exemple, quelques valeurs de contrastes :

- écran / document : 1/3 à 1/5
- écran / store : 1/14
- écran / luminaire : 1/48
- écran / ciel : 1/167



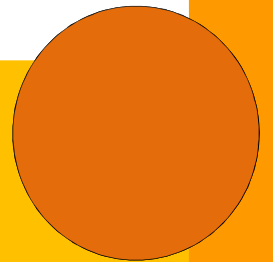
Contraste

La perception n'est pas relié qu'aux niveaux d'éclairage et de luminance, elle est aussi sujet à une question de contraste.

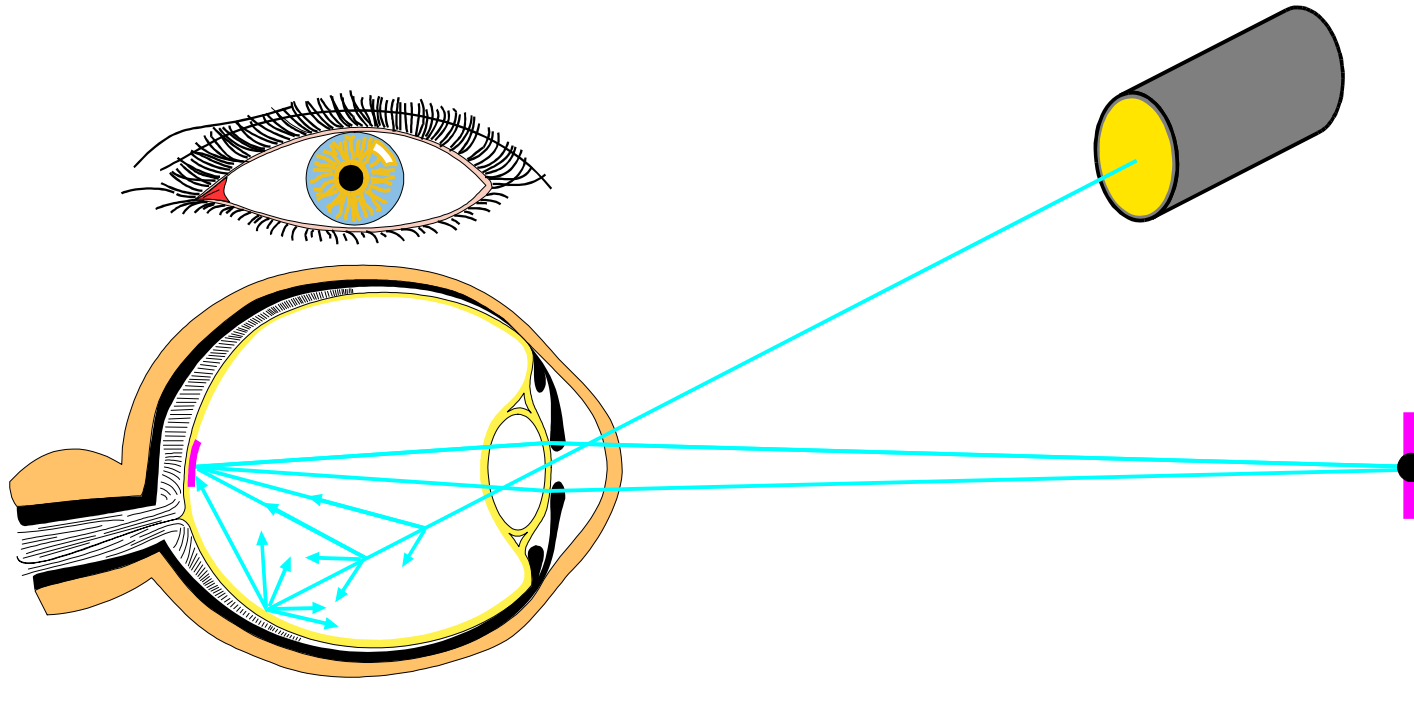


luminance de voile

(Veiling luminance)



luminance de voile (Veiling luminance)



Luminance de voile (LV) est une mesure de l'incapacité de voir du à l'éblouissement. La luminance de voile est une luminance superposées sur l'image rétinienne de l'œil produite par la lumière parasite dans l'œil. Dans la méthode IES, Lv est calculé aux mêmes points que la luminance de la chaussée avec l'observateur situé 83,07 mètres en arrière de chaque points de calcul. La ligne de mire de l'observateur est à 1,45 m dessus de la surface de la route. Le Veiling luminance ratio est égal à LV_{max} / L_{avg}

luminance de voile (Veiling luminance)



Références

Illuminating Engineering Society of North America (IES) Roadway Lighting , RP8-00R-2005 IESNA New York NY

Illuminating Engineering Society of North America (IES) IESNA recommended practice Tunnel Lighting ,RP22-05 New York NY

Illuminating Engineering Society of North America (IES) IESNA Sport and recreational area lighting , RP6, New York NY

Illuminating Engineering Society of North America (IES) IES Lighting Handbook 9th edition,New York NY

Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180 USA <http://www.lrc.rpi.edu/>

Philips Lighting handbook, Philips Electronics Ltd, Lighting Division, 601 Milner Ave, Scarborough, Ontario, M1B 1M8

Wikipédia ,Le projet d'encyclopédie libre, <http://fr.wikipedia.org>

<http://www.darksky.org> IDA International Headquarters 3225 N. First Avenue Tucson, Arizona 85719

Commission internationale de l'éclairage CIE 2000 - 2010 | CIE Central Bureau, Kegelgasse 27, A-1030 Vienna, Austria
<http://www.cie.co.at>

Google Search images <http://www.google.ca>

Formation sur les lampes, IES Montréal, Francois Xavier Morin

Formation sur l'informatique au service de l'éclairage, IES Montréal, Peer Eric Moldvar

Formation sur la récolte de la lumière du jour, IES Montréal, Peer Eric Moldvar

Le Conseil du bâtiment durable du Canada (CBDCa),Les systèmes d'évaluation de LEED Canada nouvelle construction
<http://www.cagbc.org/leed/systemes/index.htm>

Lighting Analysts AGI32 content and Index, 10440 Bradford Road, Unit A , Littleton, Colorado USA 80127

Philips Canlyte 3015 Louis-Amos, Lachine, Québec, Canada H8T 1C4 http://www.canlyte.com/fr_www/glossary.asp

Formation E314 Principe d'éclairagisme, École Polytechnique de Montréal, Prof. Jean-Pierre Riendeau