

LFSM1105 – Physique

Les ondes électromagnétiques et leurs applications

ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025

PROF. LAURENT A. FRANCIS

LAURENT.FRANCIS@UCLouvain.be

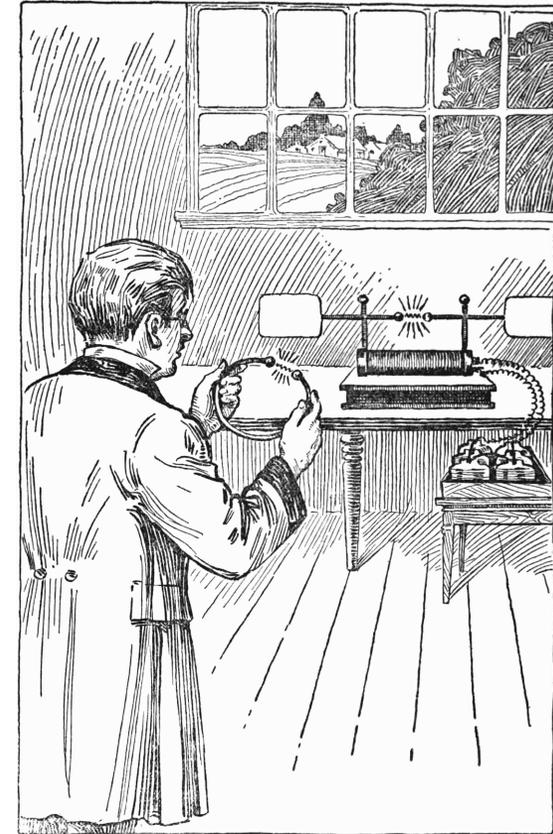
Note historique



James Clerck Maxwell
1831 - 1879



Heinrich Rudolf Hertz
1857 - 1894



Expérience de Hertz
1886



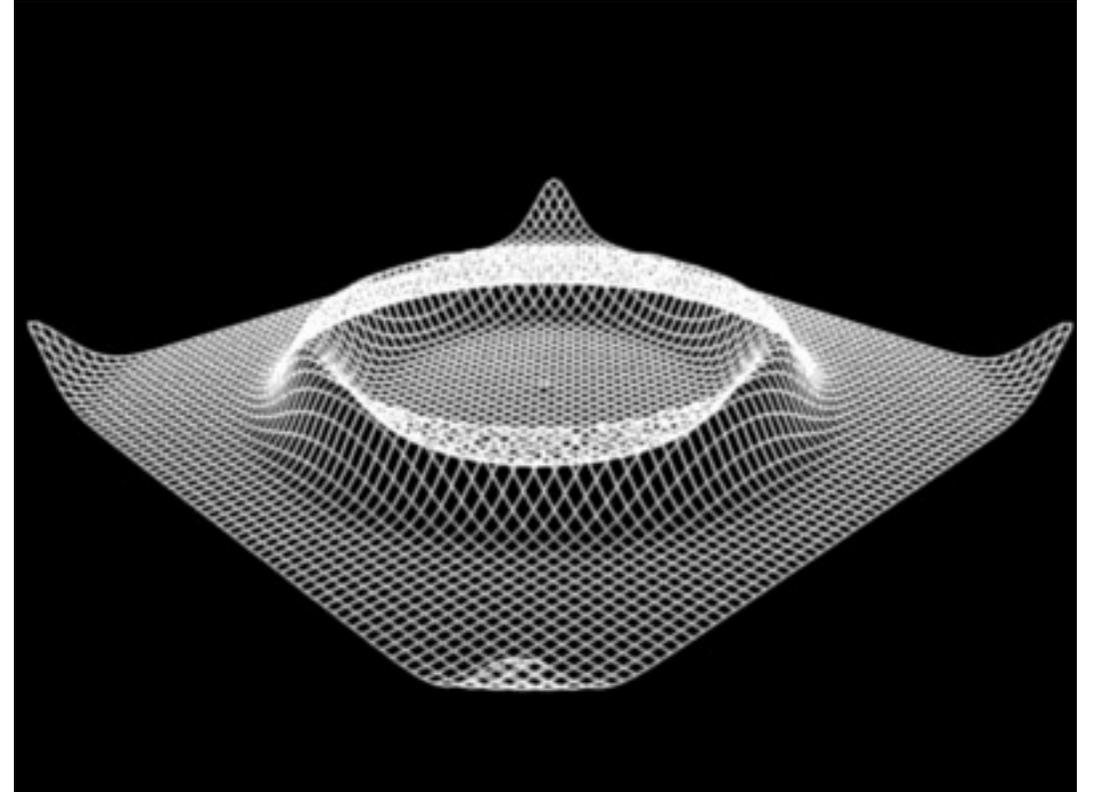
Description d'une onde

Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu (*déf. Wikipédia*)

Pour une onde se propageant selon l'axe des x à la vitesse v on peut écrire une équation d'onde sous la forme générale :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

où $u=u(x,t)$ est une grandeur caractéristique de l'onde.



SoylentGreen, CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

Description d'une onde

Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu (*déf. Wikipédia*)

Une solution possible de l'équation d'onde :

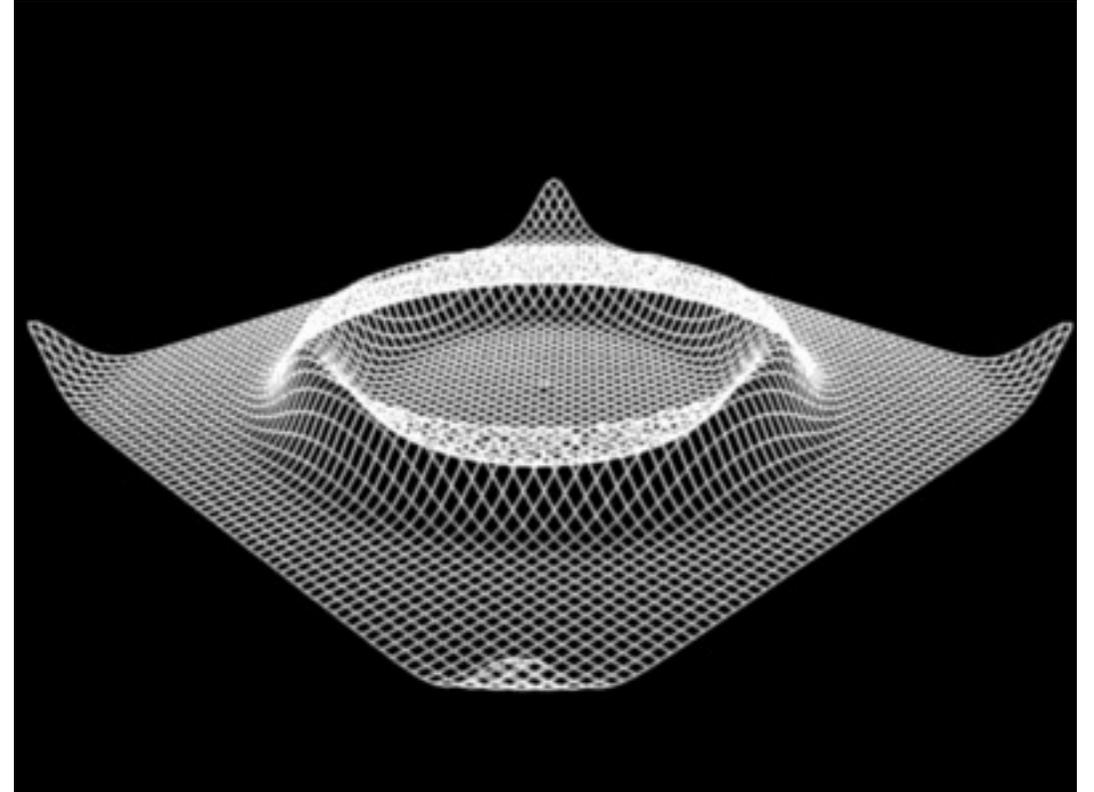
$$u(x, t) = u_0 \sin(\omega t - kx)$$

où

u_0 est l'amplitude (maximale) de l'onde

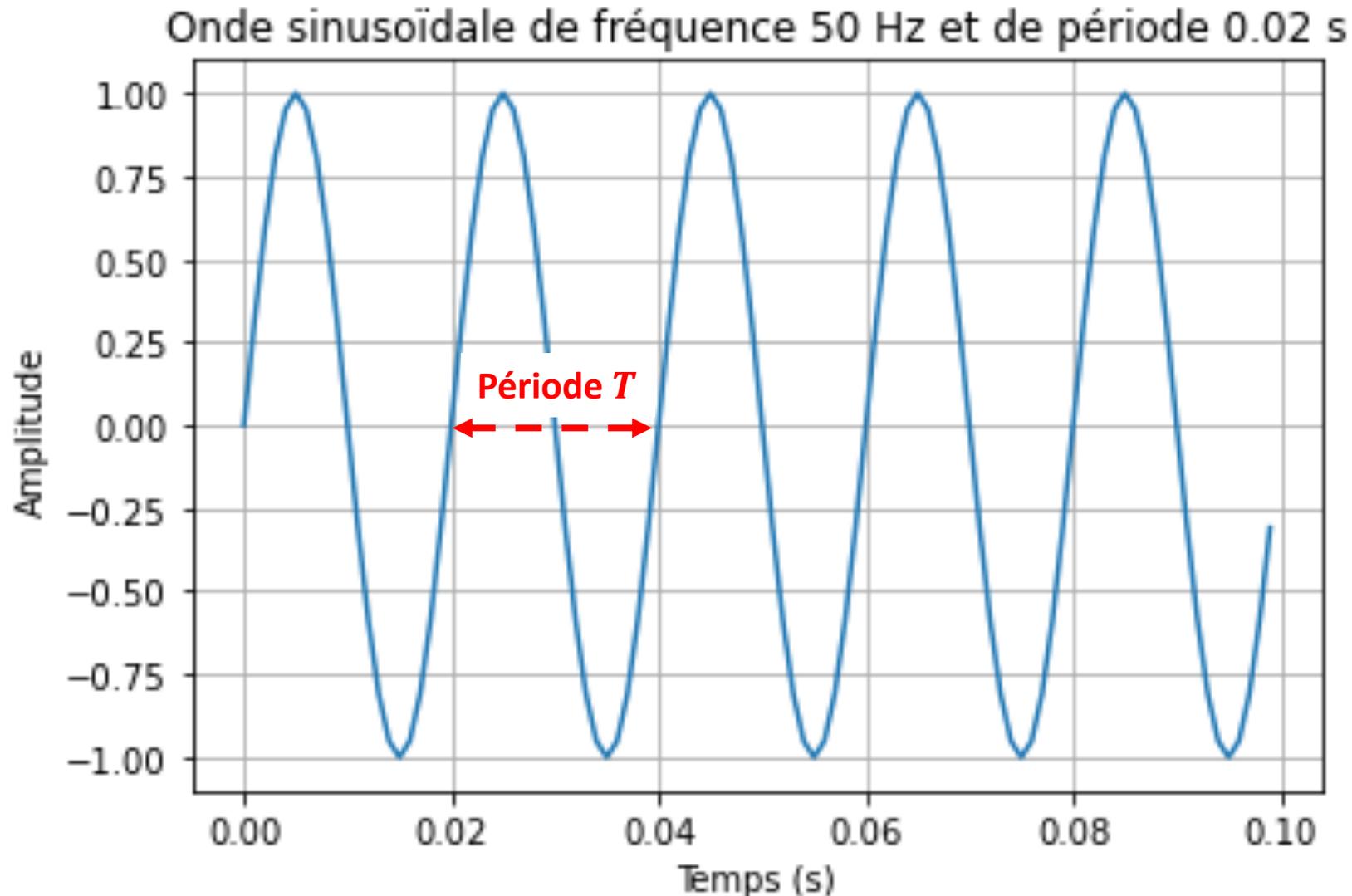
ω est la **fréquence angulaire** ou **pulsation** [rad/s]

k est le **nombre d'onde** [1/m]



SoylentGreen, CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

Période T et fréquence f d'une onde



Dans ce graphe, on observe une onde en un point donné (fixe) de l'espace selon le temps

La période T est le temps nécessaire pour que l'onde se répète à elle-même

La **fréquence** f est l'inverse de la période et s'exprime en Hertz (Hz) :

$$f = \frac{1}{T}$$

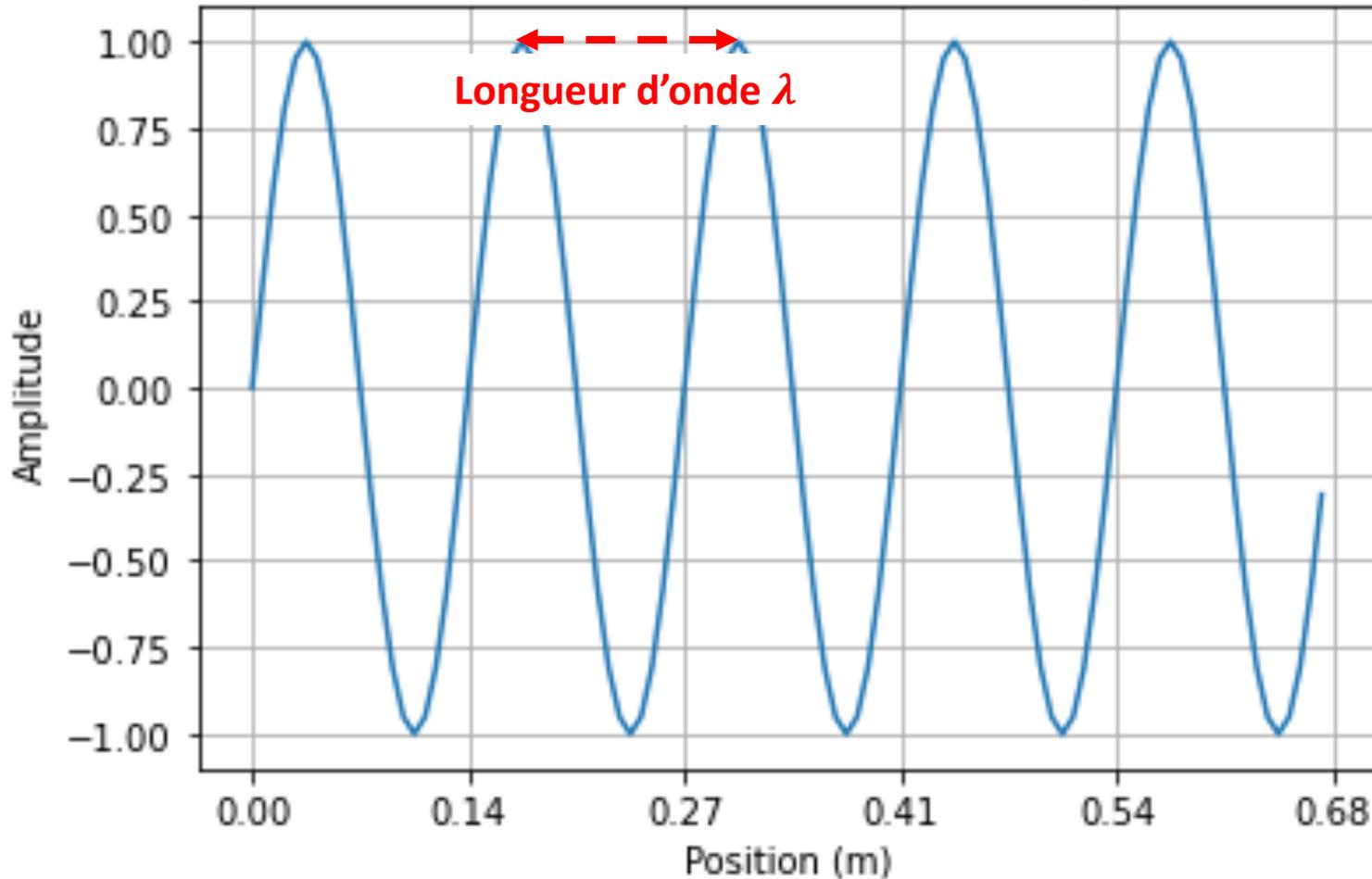
La fréquence angulaire (ou pulsation) est la fréquence multipliée par 2π :

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

dont les unités sont rad/s.

Nombre d'onde k et longueur d'onde λ

Onde sinusoïdale de fréquence 50 Hz et de longueur d'onde 6.8 m



Dans ce graphe, on observe une onde sonore (vitesse 340 m/s) de 50 Hz à un temps donné (fixe) selon la position

La **longueur d'onde** λ est la distance nécessaire pour que l'onde se répète à elle-même

Le nombre d'onde k est l'inverse de la longueur d'onde et s'exprime en 1/m :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Fréquence, vitesse et longueur d'onde sont reliés entre eux :

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

Ondes électromagnétiques

Loi de Faraday : une variation du champ magnétique \vec{B} provoque l'apparition d'un champ électrique \vec{E}

Théorème d'Ampère-Maxwell : une variation du champ électrique \vec{E} fait apparaître un champ magnétique \vec{B}

Le couplage des deux champs variables est à l'origine des ondes électromagnétiques décrites par les **équations d'onde de Maxwell** :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

Vitesse de la lumière

En comparant les équations d'onde de Maxwell avec l'équation générale des ondes, la vitesse de cette onde est donnée par :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

avec les valeurs numériques :

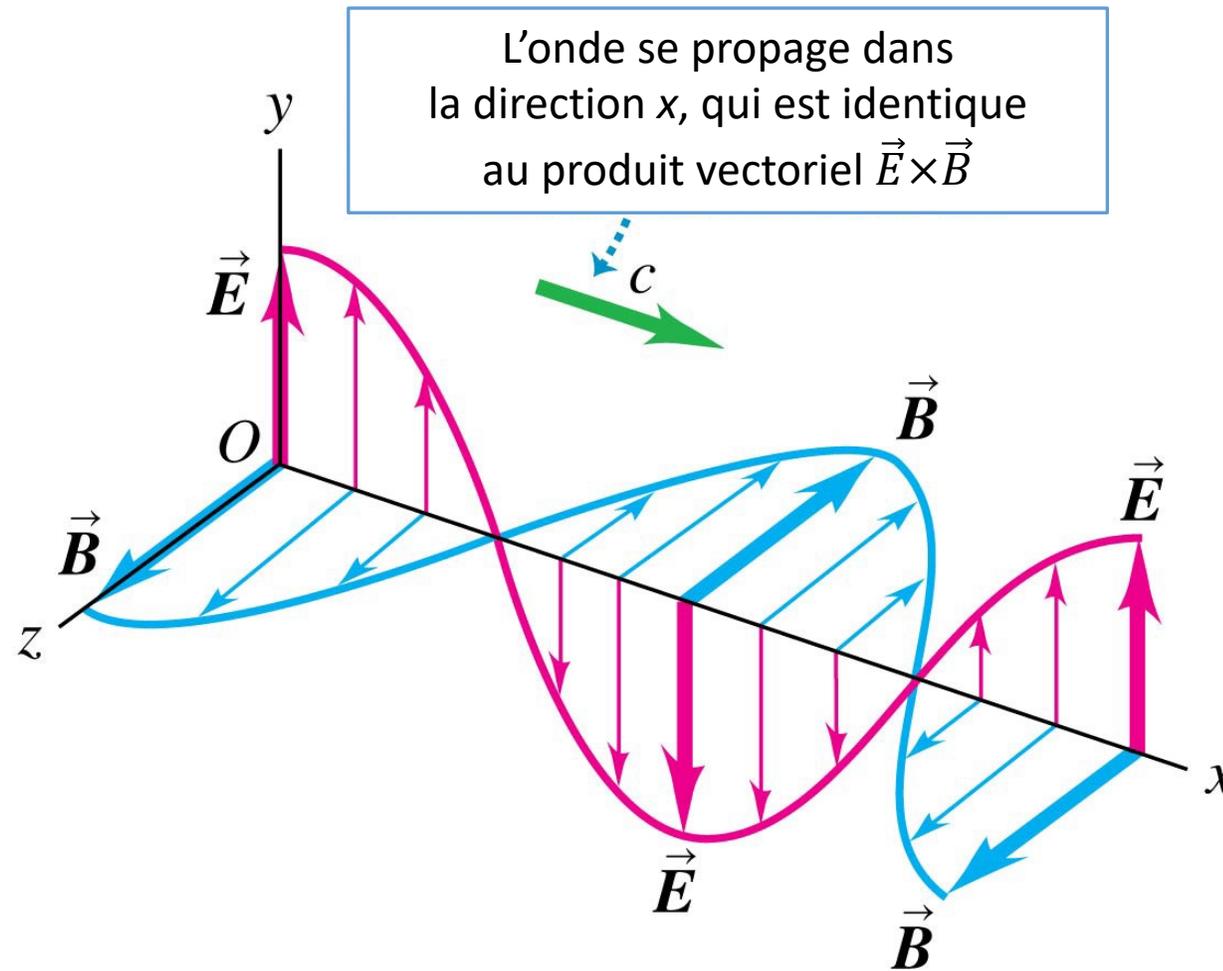
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A (ou H/m)}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\rightarrow v = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La vitesse de la lumière, aussi appelée **célérité de la lumière**, est plus habituellement représentée par c .

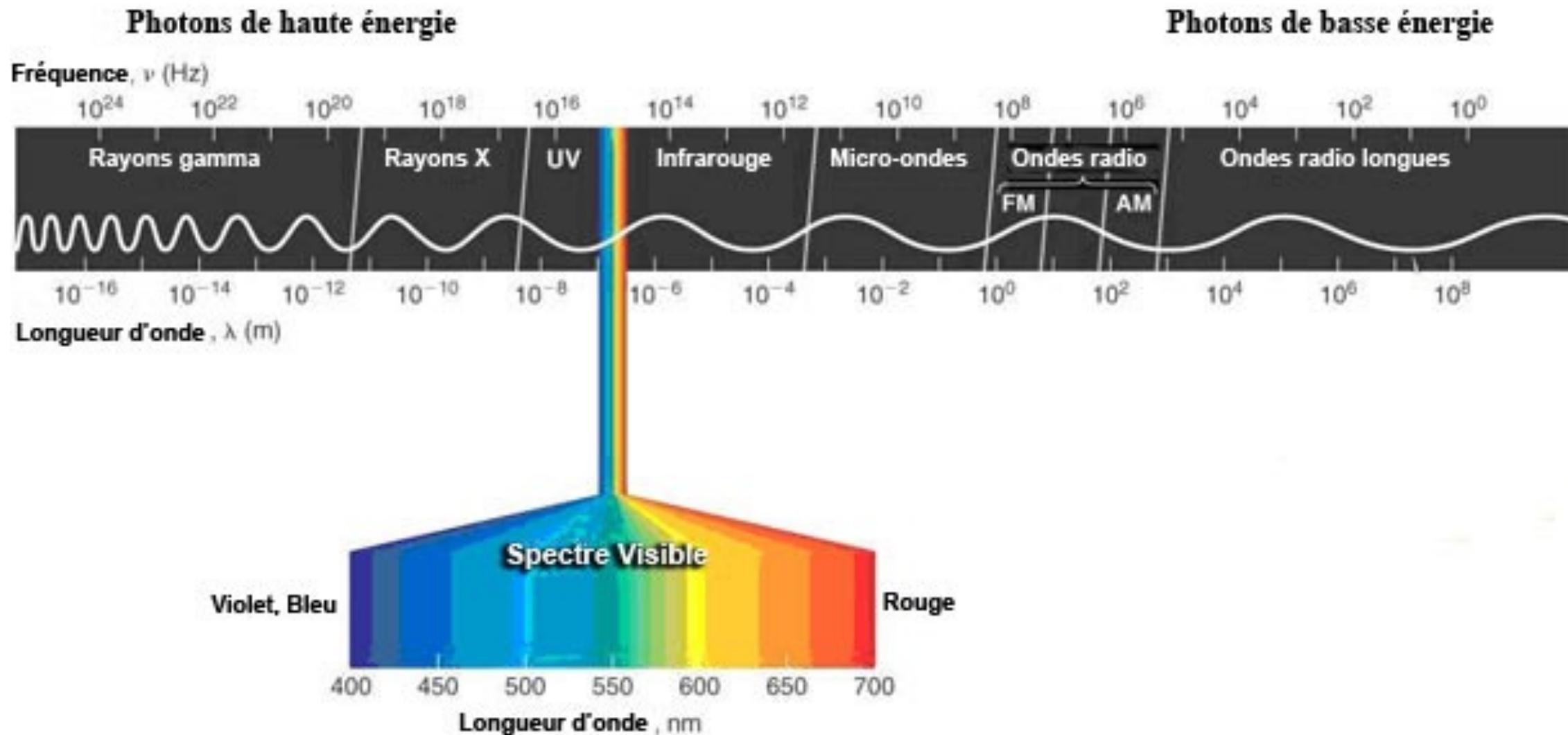
Ondes électromagnétiques



\vec{E} : y-component only
 \vec{B} : z-component only

/!\ ne pas oublier que l'onde varie aussi dans le temps

Le spectre électromagnétique



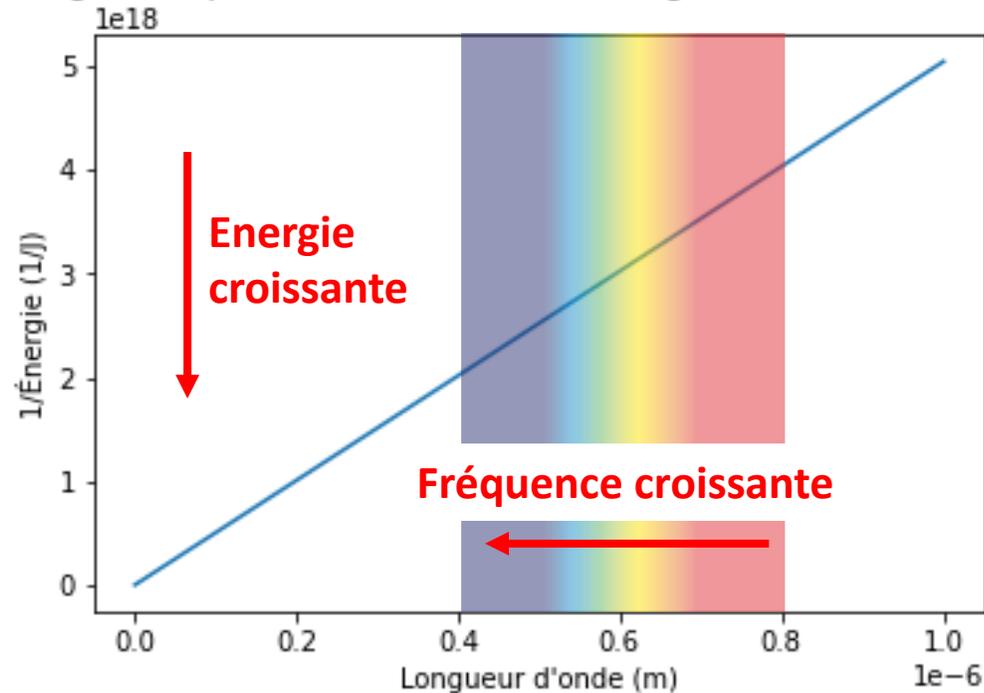
Energie des photons

La lumière se comporte à la fois comme un phénomène ondulatoire et comme un flux de particules, c'est le principe de dualité onde-corpuscule.

L'énergie de la lumière est quantifiée, la plus petite quantité étant portée par le **photon**.

L'énergie des photons dépend de leur longueur d'onde :

Énergie d'un photon en fonction de sa longueur d'onde dans le vide



/!\ axe réciproque →



Radiomètre de Crookes

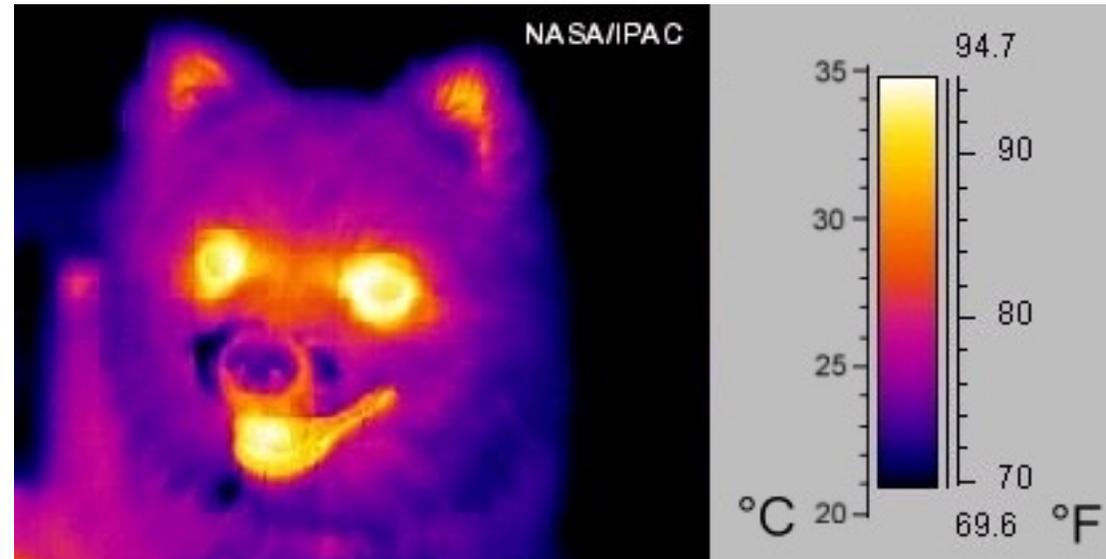
Par Haade., CC BY-SA 3.0

Sources lumineuses

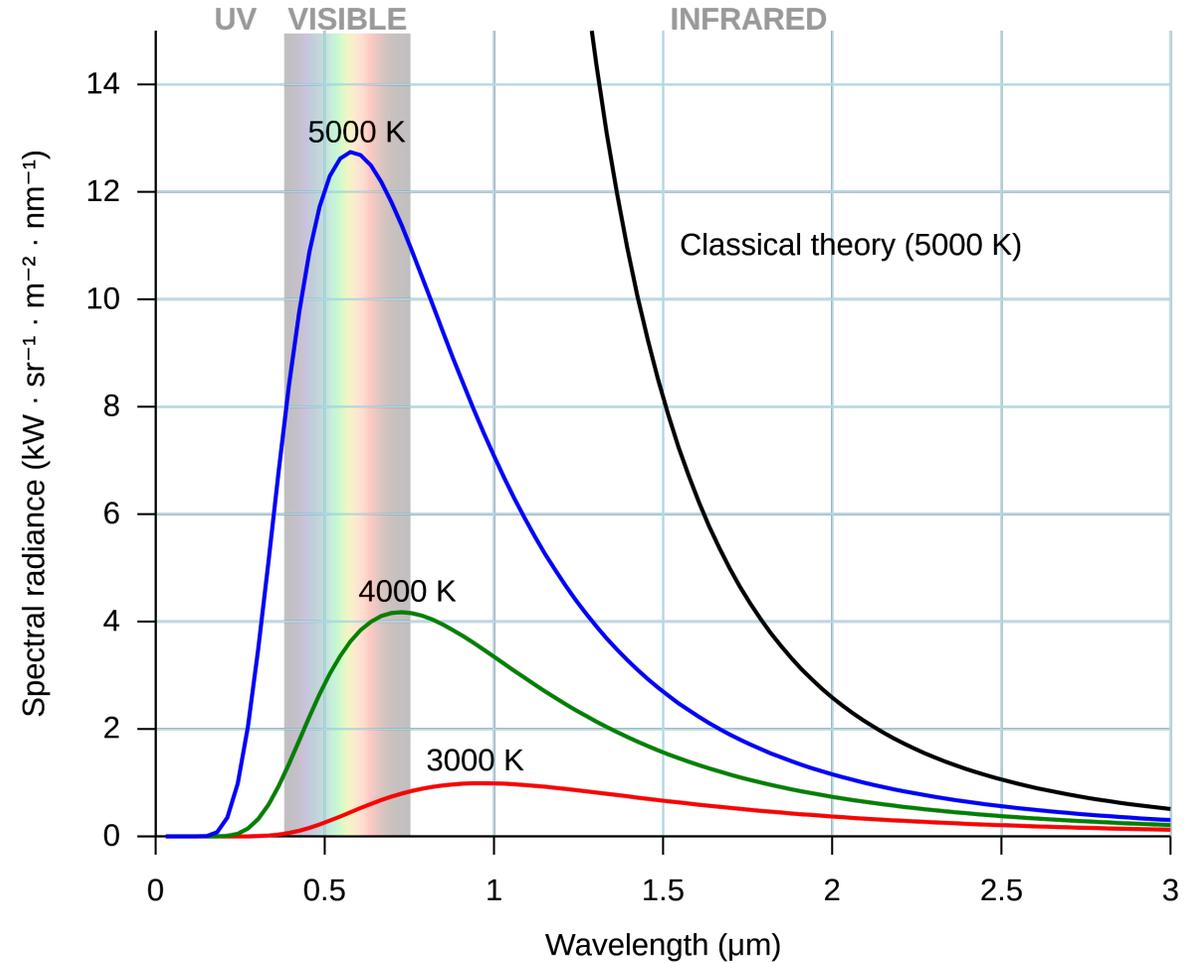
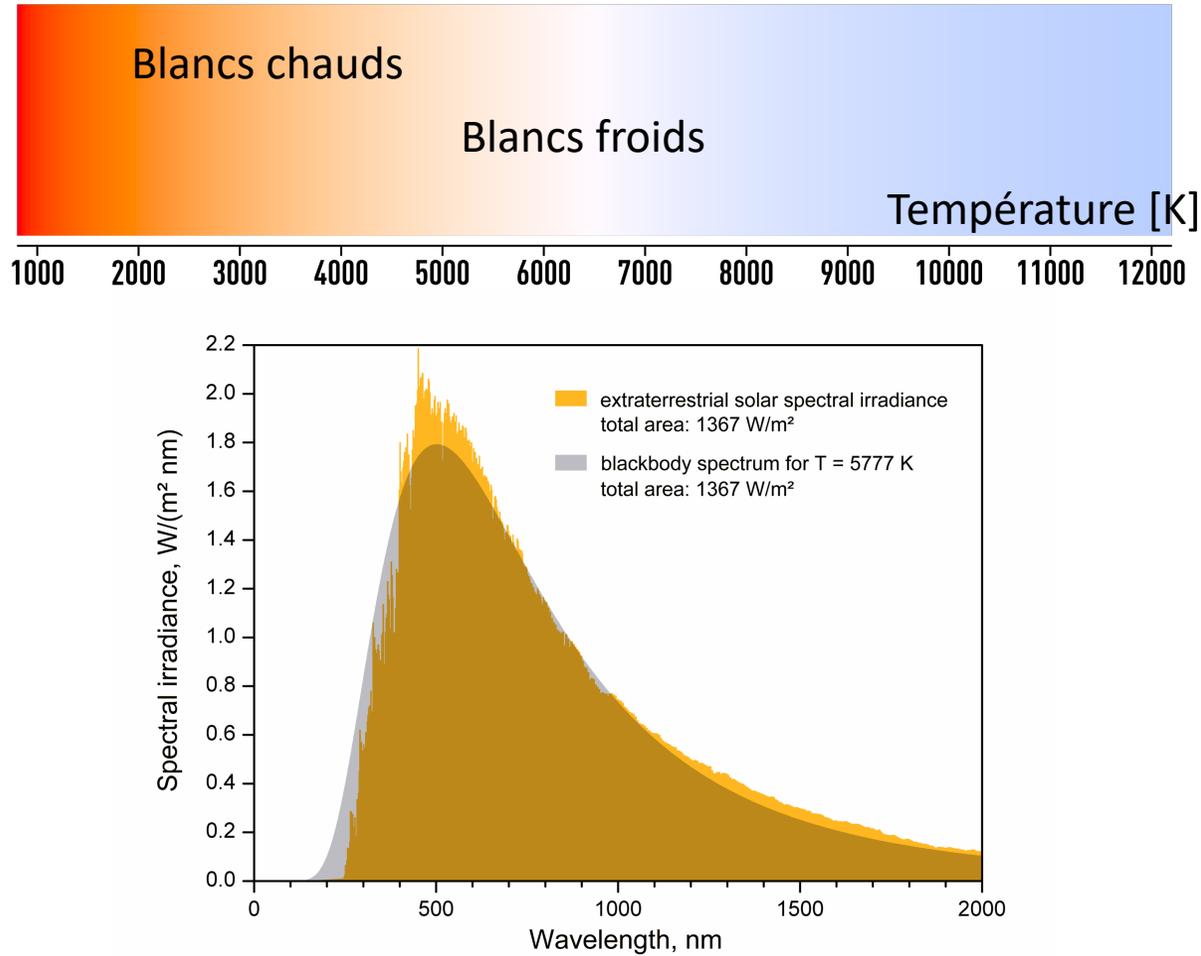
Corps chauffé : émission de lumière en fonction de sa température, principe de la lampe à incandescence où un courant chauffe par effet Joule un matériau conducteur (typiquement du tungstène placé dans une ampoule sous vide).



La lumière émise par la température du corps peut être visualisée par caméra thermique



Emission de lumière des corps chauffés



[Haut gauche] De Bhutajata - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=44144928>

[Bas gauche] De Sch - Drawn by myself. CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=758192>

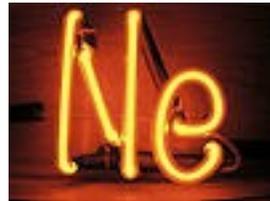
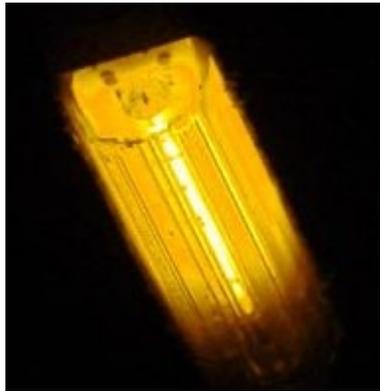
[Droite] De Darth Kule - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10555337>

Plus de détails sur https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation

Sources lumineuses

Les **lampes à décharge** : un courant intense est utilisé pour exciter les atomes d'un gaz formant alors un plasma, qui se désexcite en émettant de la lumière.

Nombreux exemples : néons avec des gaz nobles, lampe au mercure pour générer des ultraviolets, lampe à arc au xénon, lampe à vapeur de sodium pour l'éclairage public, ... le phénomène à la base est le même que celui de la foudre d'un orage.



Les **tubes luminescents** : comme pour les néons mais avec de la vapeur de mercure qui ré-émet une lumière ultraviolette, laquelle est utilisée pour exciter un matériau fluorescent.

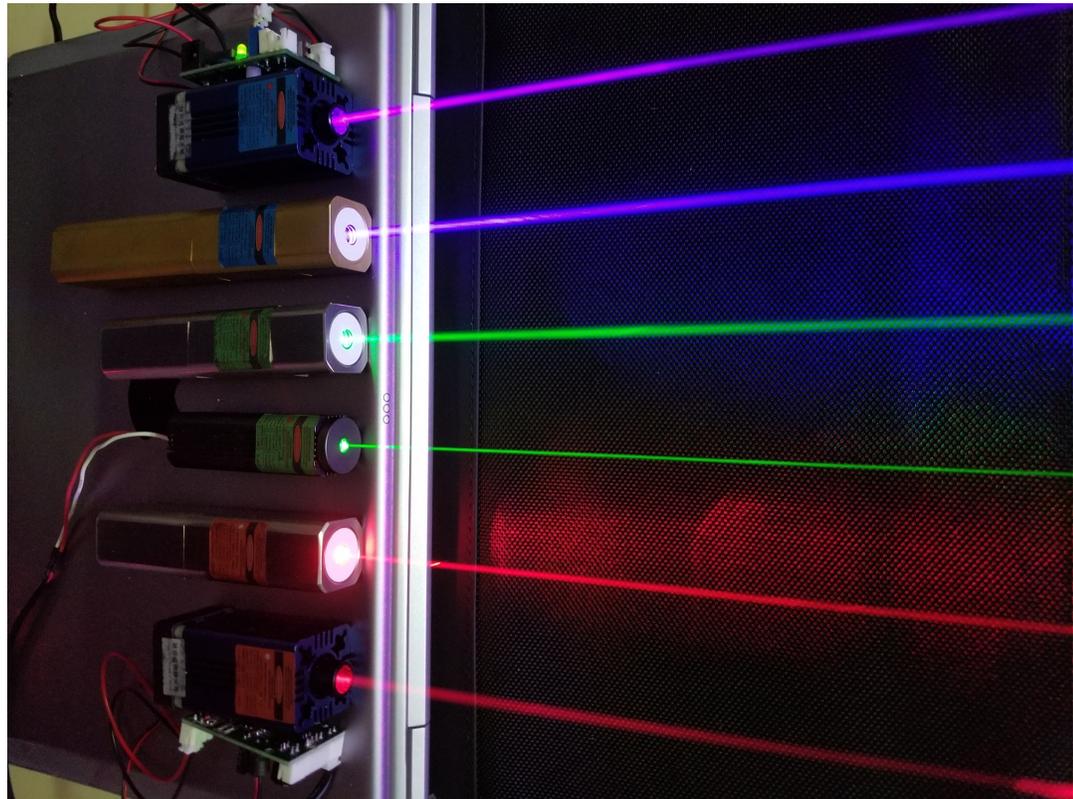


Par Christian Taube, CC BY-SA 2.0

Sources lumineuses

Les **LED** (en français DEL) : *light emitting diode*, un dispositif semiconducteur émettant de la lumière en étant traversé par un courant électrique. C'est un dispositif efficace, peu consommateur d'énergie.

Les **LASERS** : *light amplification by stimulated emission of radiation*, nécessitent un système photonique (cavité optique) pour produire une lumière cohérente.



Sources lumineuses

La **bioluminescence** : lumière d'intensité faible provoquée par des réactions chimiques par certains organismes vivants (lucioles, crustacés, méduses, étoiles de mer, calamars, poissons-lanterne, champignons...), le phénomène est répandu en milieu maritime mais moins sur la terre ferme.

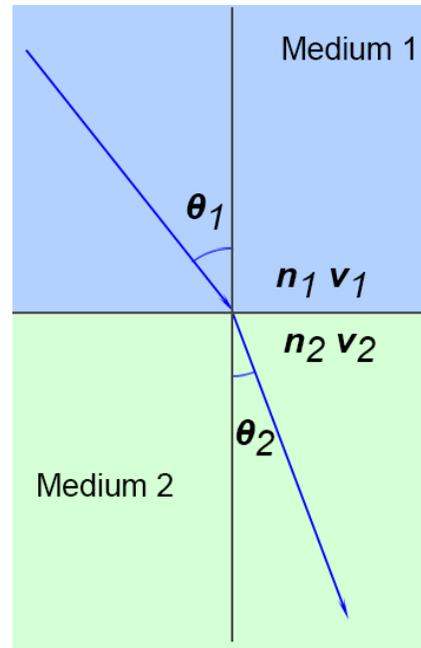
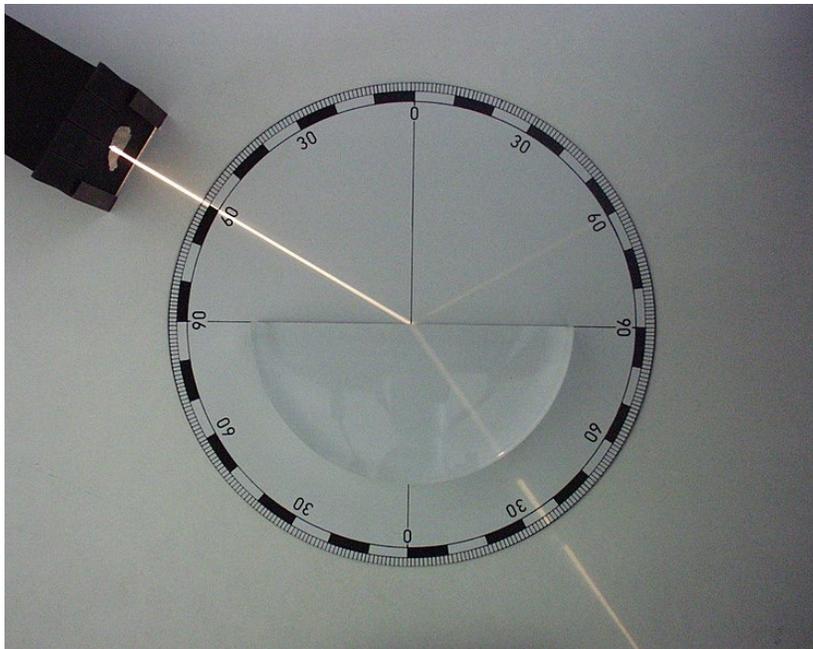


Basile Morin, CC BY 4.0 via Wikimedia Commons

Larve d'Elateroidea

Optique géométrique

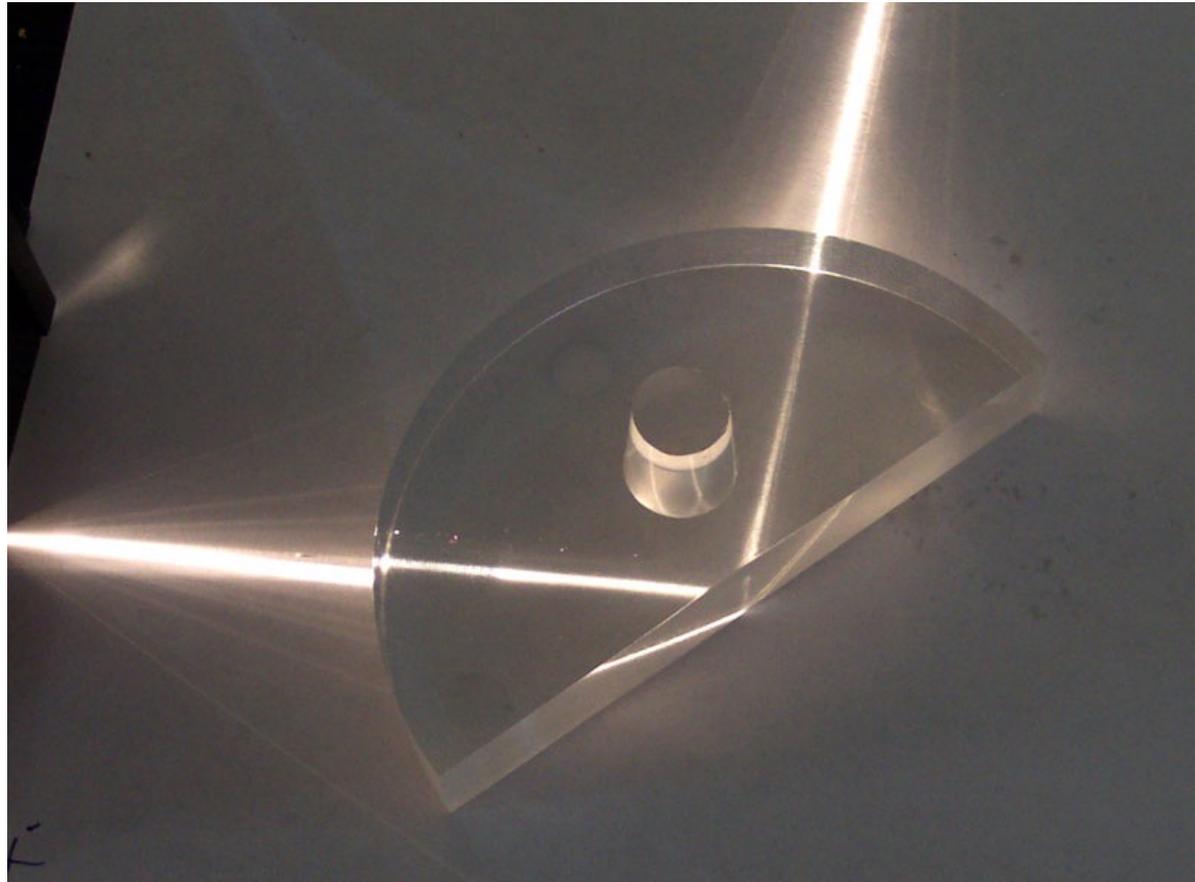
- La lumière voyage en ligne droite
- La vitesse de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage
- Chaque matériau est caractérisé par un **indice optique n** (ou **indice de réfraction**) Ex. Air 1 ; Eau 1,33
- A l'interface entre deux matériaux ayant des indices différents et où la lumière peut se propager, un faisceau lumineux est **réfléchi** et **réfracté** → la partie transmise au travers change de direction



Loi de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Réflexion totale : $n_1 > n_2$



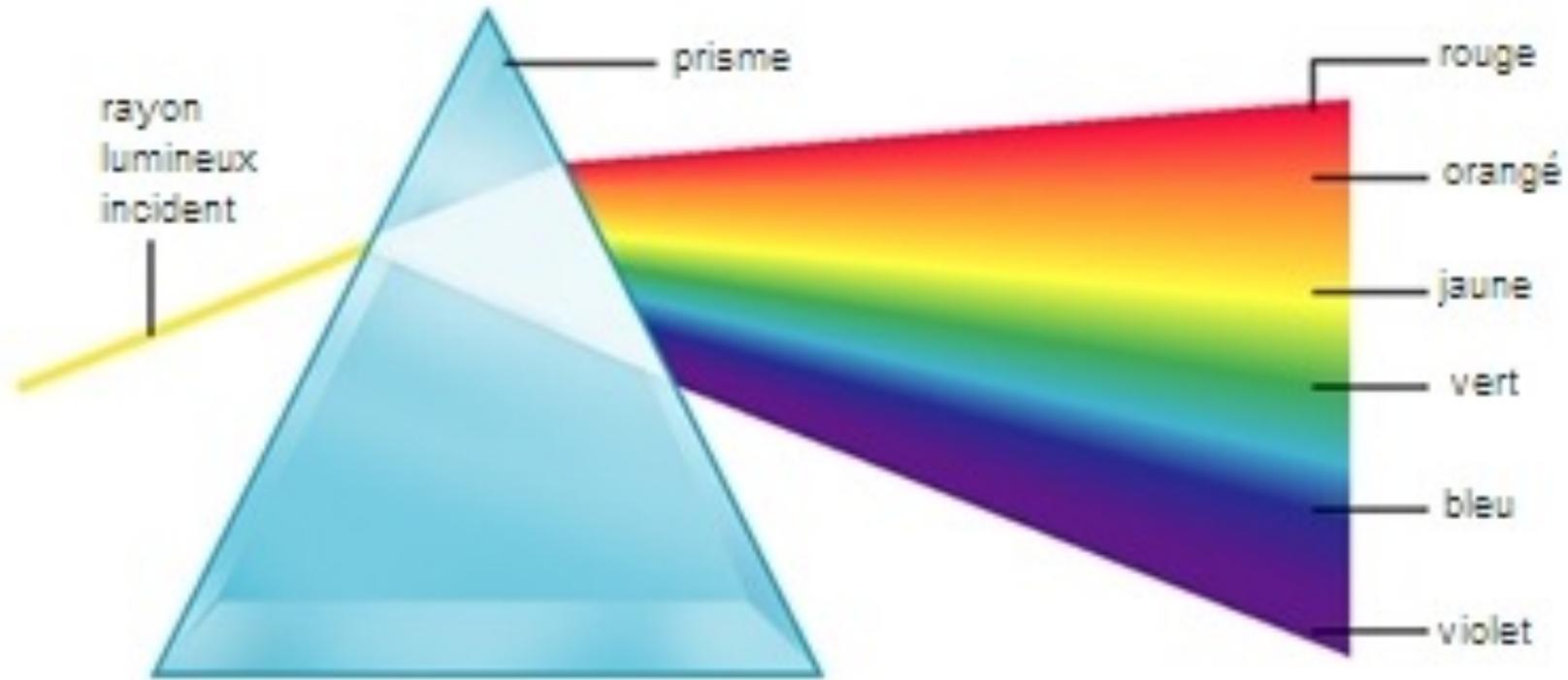
Par Fir0002, CC BY-SA 3.0



Par No-w-ay — Travail personnel, CC BY-SA 4.0

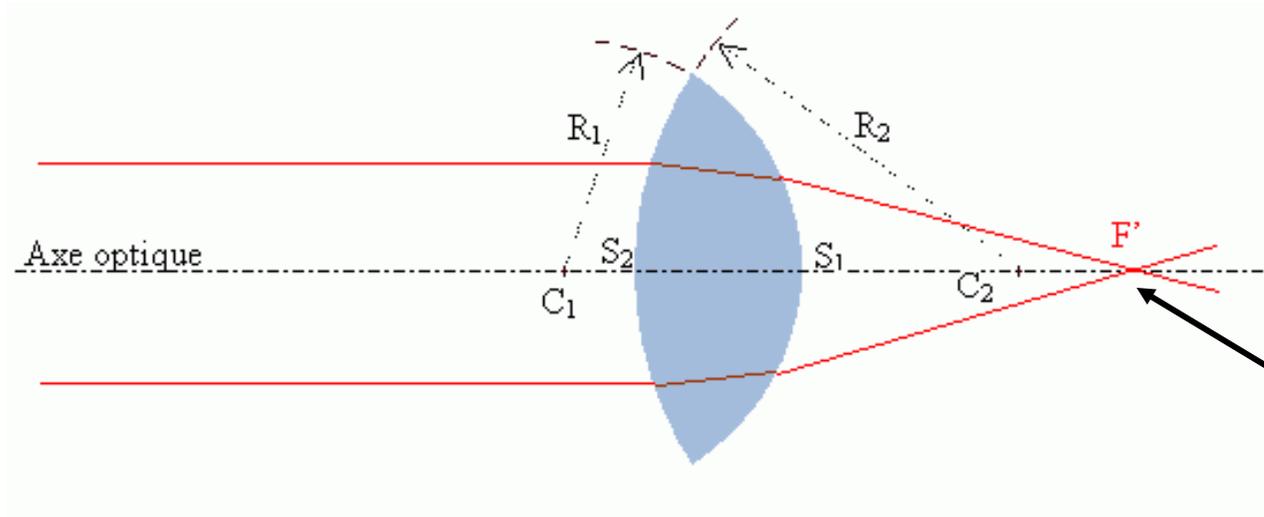
Séparation des couleurs par un prisme

Phénomène de **dispersion** de la lumière liée aux différentes vitesses selon la longueur d'onde



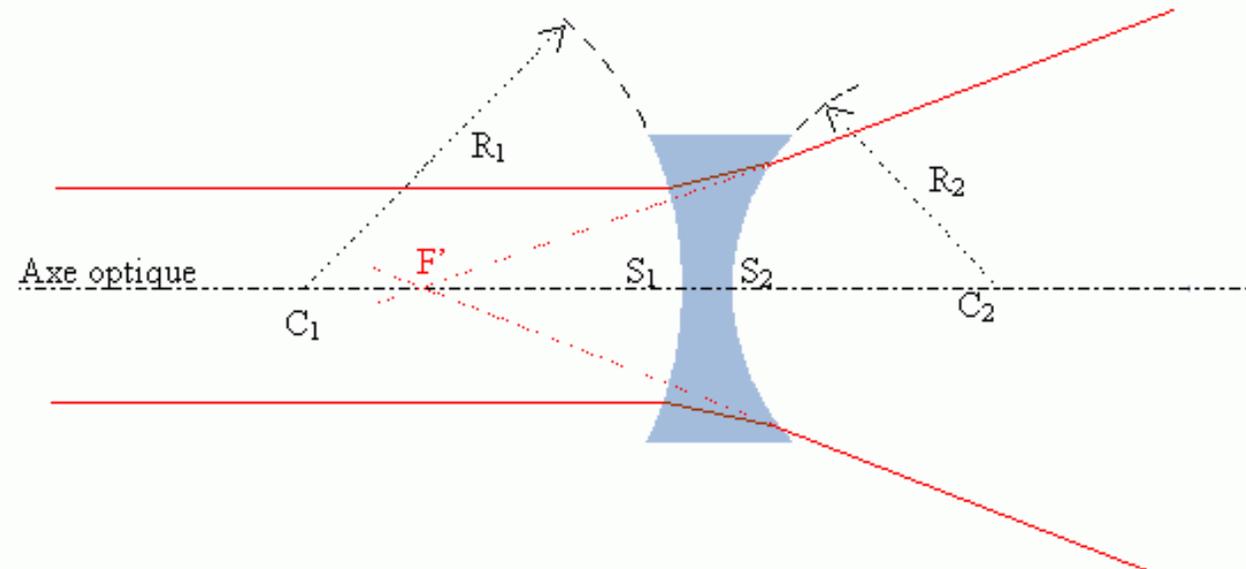
Lentilles

Convergente

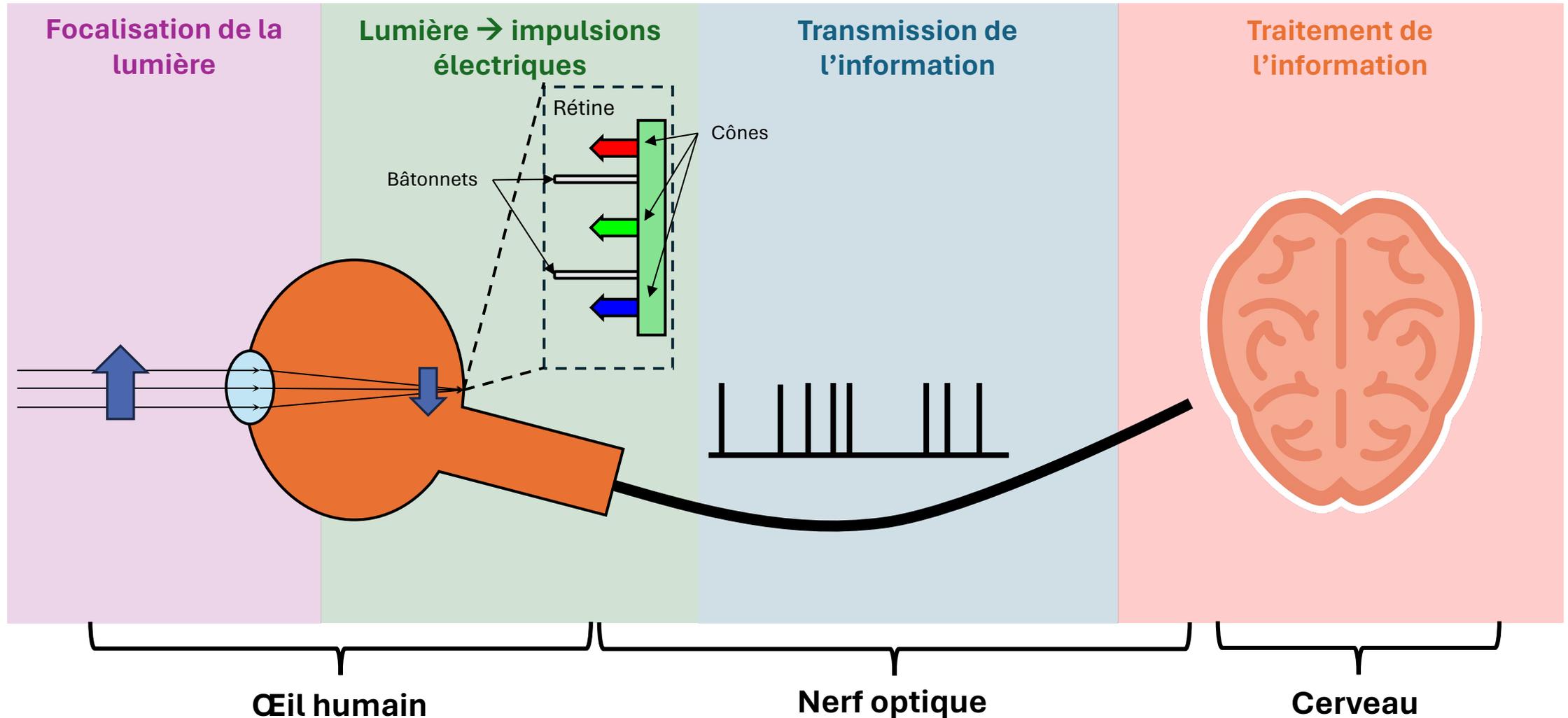


Foyer
ou
point focal

Divergente



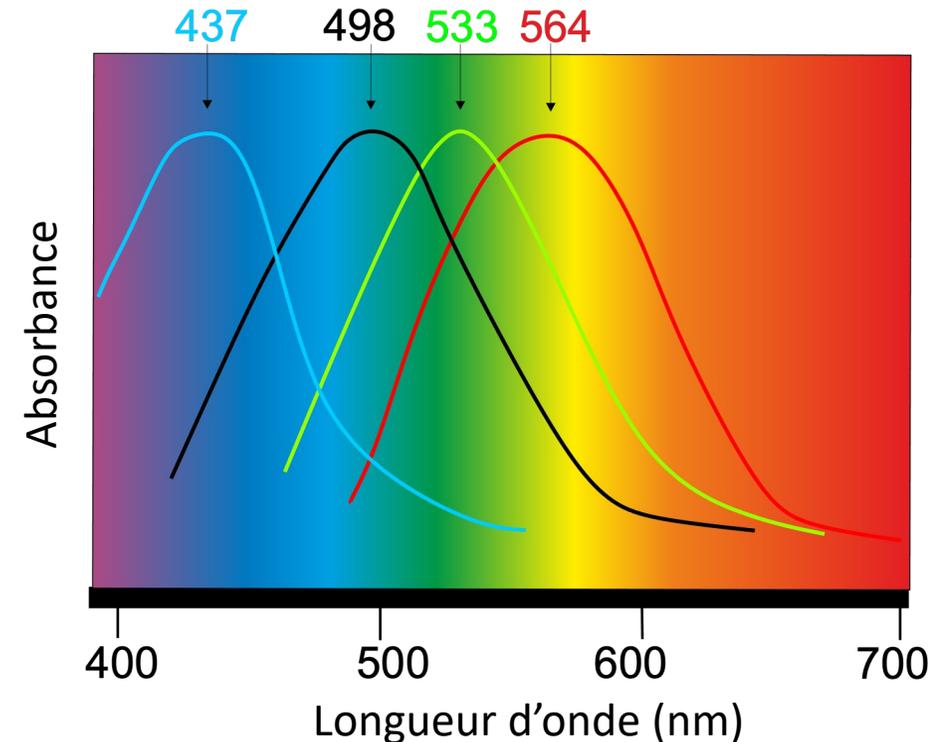
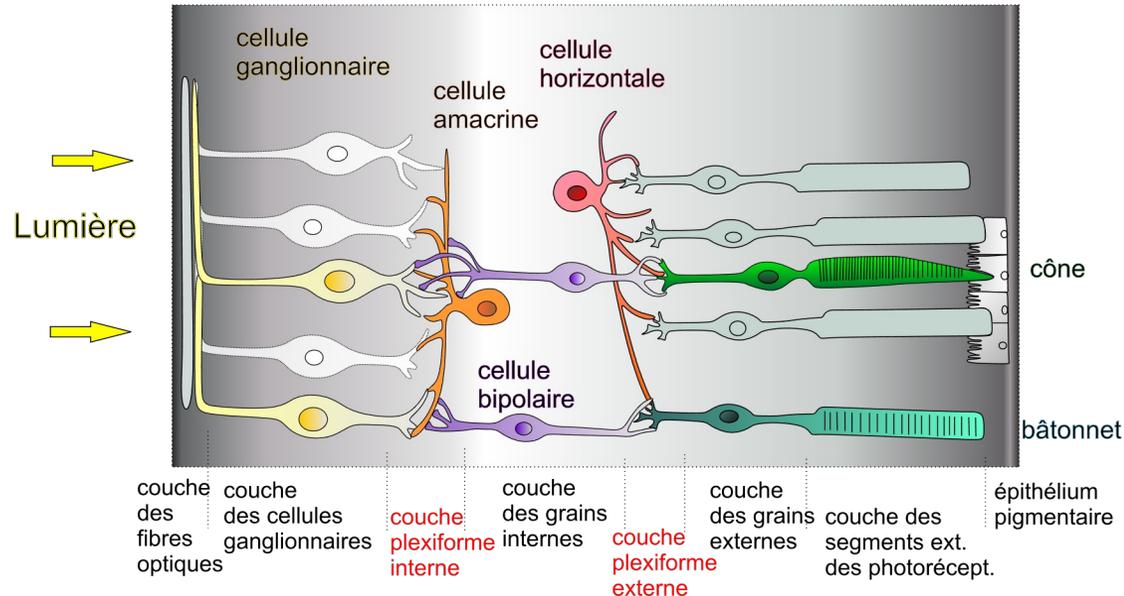
Photoréception humaine (vision)



Photoréception humaine (vision)

La vision est assurée par des cellules nerveuses spécialisées **photoréceptrices** tapissant la rétine de l'œil :

- **cônes** : trois types, assez réactifs et responsables de la netteté visuelle, impliqués dans la vision diurne et des couleurs, 5 millions tapissent la rétine (soit <10% des cellules photoréceptrices de la rétine)
- **bâtonnets** : un seul type, peu réactifs et responsable de la vision nocturne (pas de vision des couleurs), 100 millions tapissent la rétine (soit >90% des cellules photoréceptrices de la rétine)



Effet de peau

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans un milieu conducteur avec une **fréquence élevée**, elle a tendance à ne circuler qu'à la surface de ce milieu.

L'onde est rapidement atténuée selon la profondeur à partir de cette surface.

Ce phénomène est connu comme étant l'effet de peau (ou effet pelliculaire).

La profondeur atteinte par l'onde est dénommée **épaisseur de peau** :

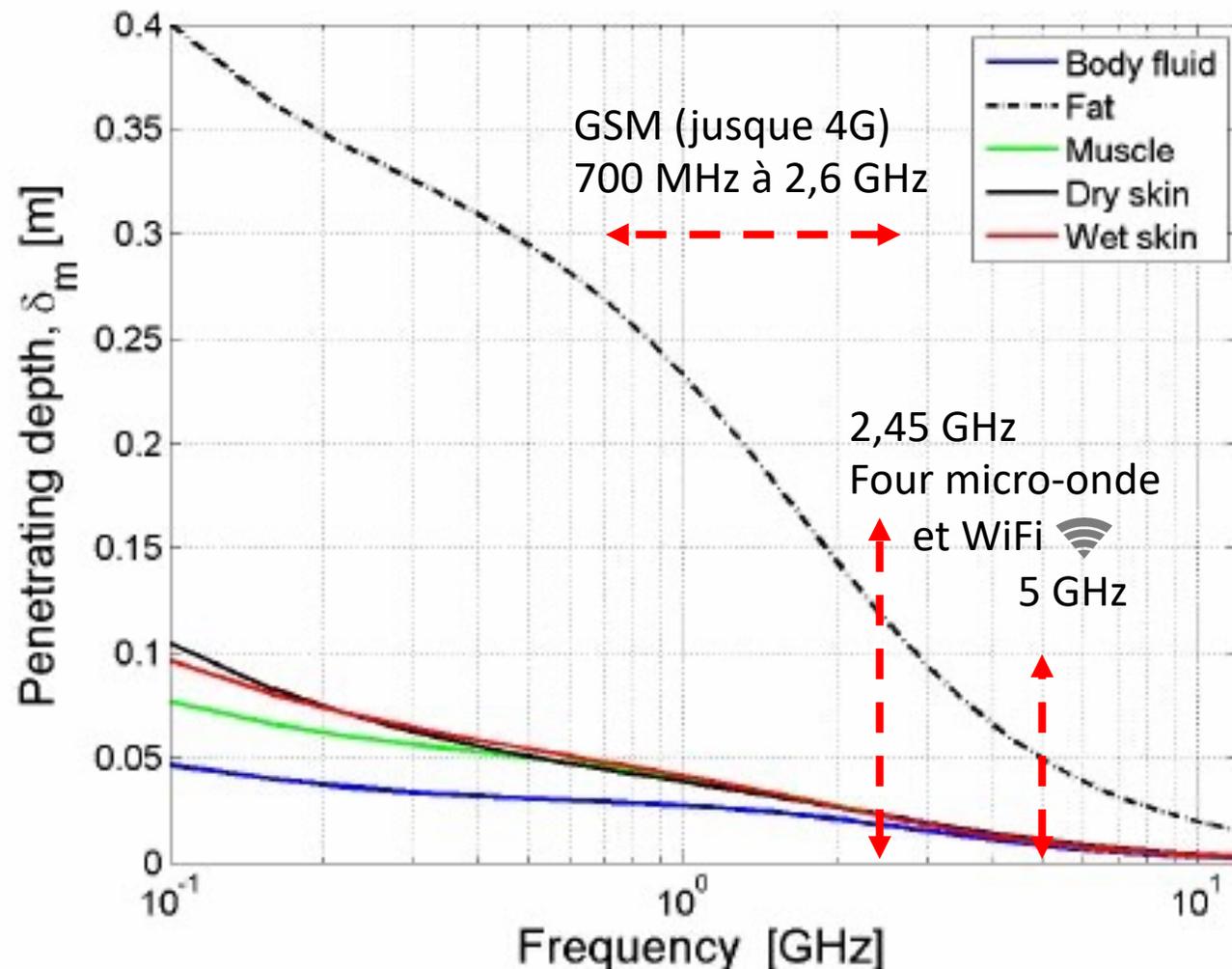
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma \mu \pi f}}$$

avec $\sigma = \frac{1}{\rho}$ la conductivité du conducteur

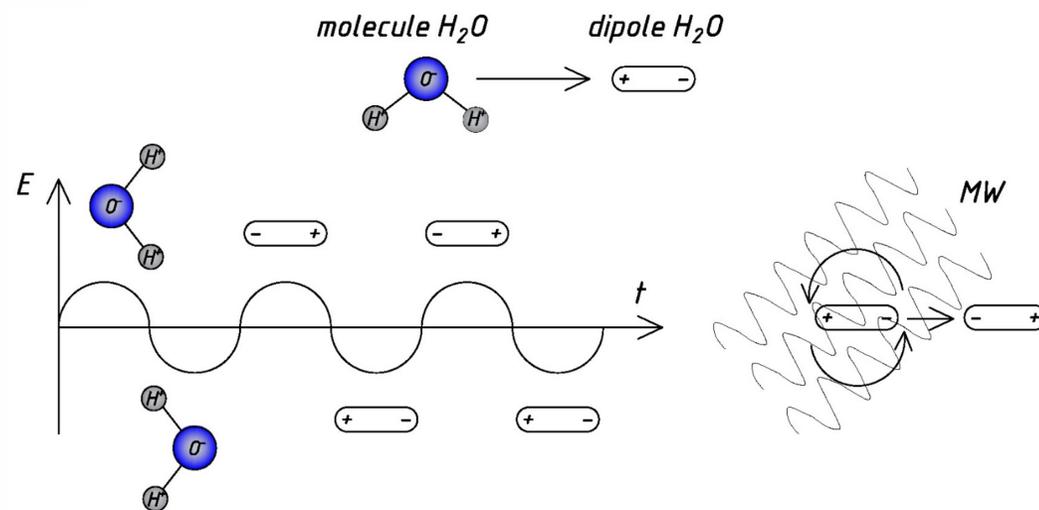
μ la perméabilité magnétique du milieu

f la fréquence de l'onde électromagnétique

Epaisseur de peau et interactions aux micro-ondes



Echauffement des molécules d'eau par micro-ondes :



Thermothérapie micro-onde de tumeurs cancéreuses

Lumière infra-rouge (IR)

- Les IR sont répartis en **trois catégories** selon leur longueur d'onde :
 - IR proche de 700 nm à 3 μm , contient une composante visible
 - IR moyen de 3 μm à 50 μm
 - IR lointain de 50 μm à 5 mm
- En kinésithérapie l'application la plus courante est la **thermothérapie**
 - en préparation ou en appui de massages
 - provoque une libération d'histamine (vasodilatateur chimique)
 - apparition d'un érythème dont la vitesse et l'intensité sont liées à la vitesse et au degré de réchauffement
 - dilatation réflexe des autres vaisseaux cutanés pour l'équilibre thermique
 - échauffement prolongé avec transpiration et refroidissement
- Effets dangereux : brûlures, irritation de la peau, risque de déshydratation, ...



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Philips_Infraphil_-_1950s.jpg

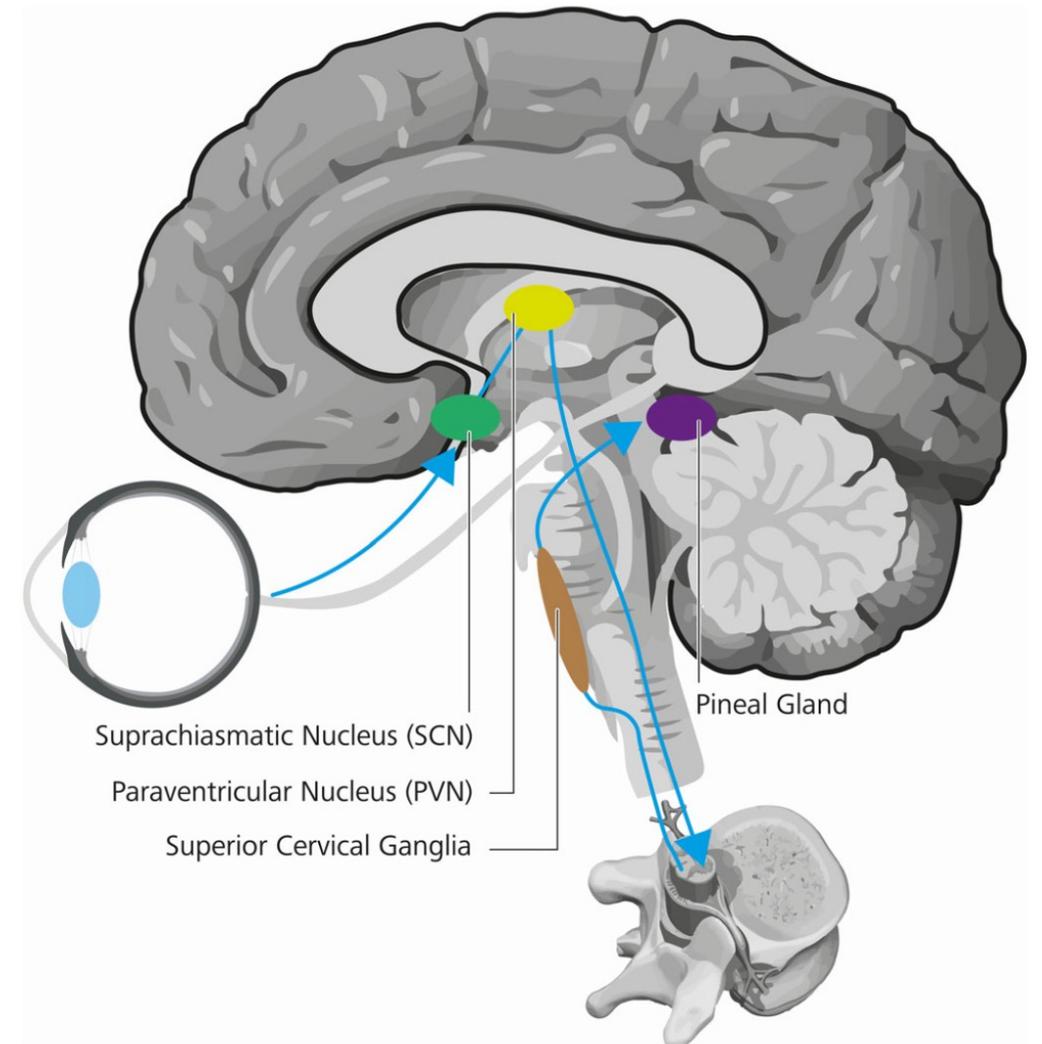
Lumière infra-rouge (IR)

- **Stimulation neuronale** par activation directe du tissu neuronal par les IR
- **Photovieillissement** (ou *héliodermie*)
- **Action antitumorale** : les IR peuvent inhiber la prolifération des cellules cancéreuses et potentialiser l'efficacité thérapeutique de la chimiothérapie
- **Neuroprotection** du cerveau : nouveaux traitements neuroprotecteurs pour les accidents vasculaires cérébraux, les traumatismes crâniens et les troubles neurodégénératifs (radiothérapie IR pour les maladies d'Alzheimer et de Parkinson)
- Preuves cliniques de l'induction sélective de la **mort cellulaire** par apoptose, nécrose et anoïkis. Parallèlement, elles induisent la différenciation cellulaire en tant que réponse physiologique opposée à la prolifération.

La lumière bleue et le rythme circadien

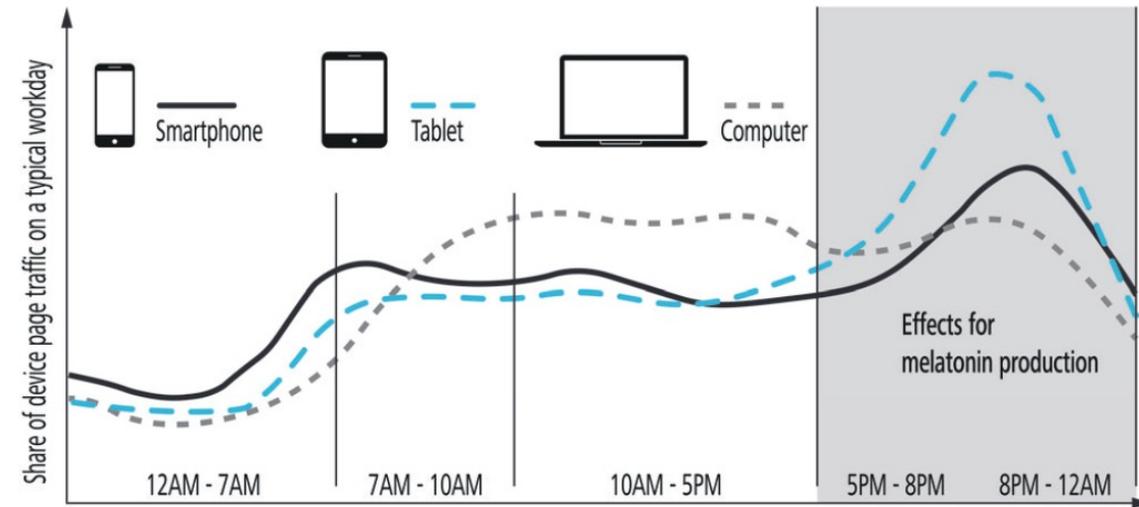
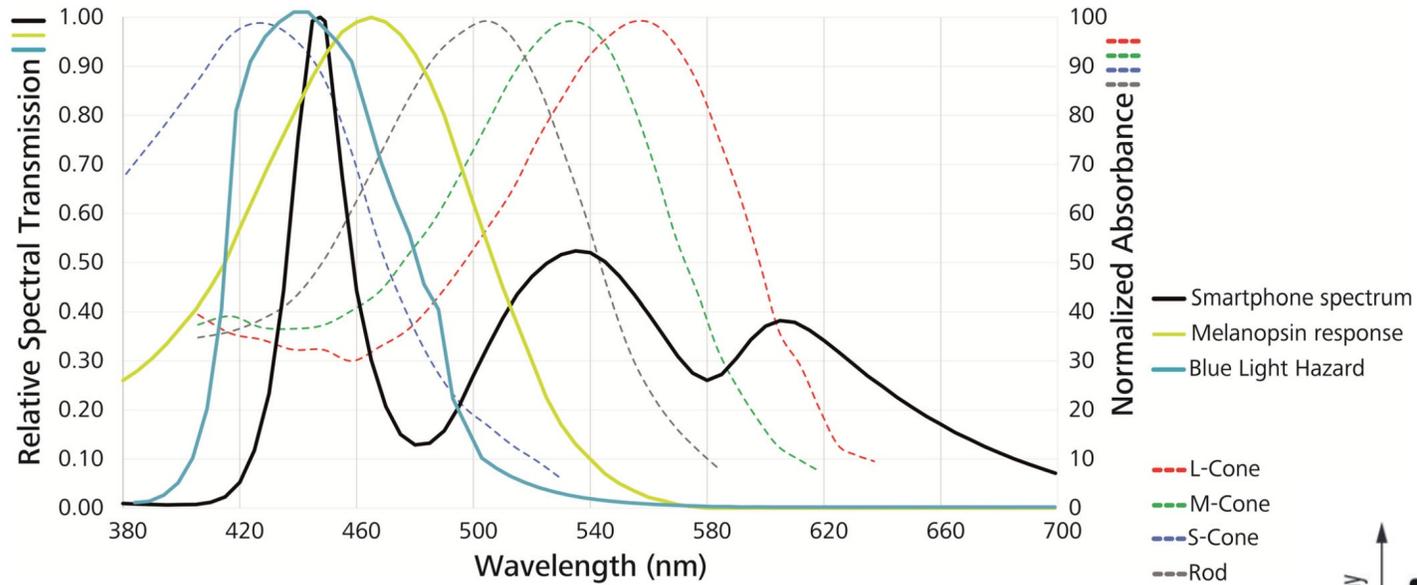
Le signal induit par la **mélanopsine** provenant des neurones ganglionnaires rétiniens est transmis via la voie rétino-hypothalamique (bleu) aux neurones rythmiques hypothalamiques du noyau suprachiasmatique de l'hypothalamus (vert), l'"horloge maîtresse" humaine.

L'information circadienne est transmise en aval par le noyau paraventriculaire (jaune), la colonne cellulaire intermédiaire latérale dans la matière grise vertébrale, le ganglion cervical supérieur (brun) jusqu'à la glande épinière (violet), qui est responsable de la sécrétion de **mélatonine**.



Tiré de S. Wahl *et al.* (2019). The inner clock - blue light sets the human rhythm. *Journal of Biophotonics*. 12. 10.1002/jbio.201900102.

La lumière bleue et le rythme circadien



Tiré de S. Wahl *et al.* (2019). The inner clock - blue light sets the human rhythm. *Journal of Biophotonics*. 12. 10.1002/jbio.201900102.

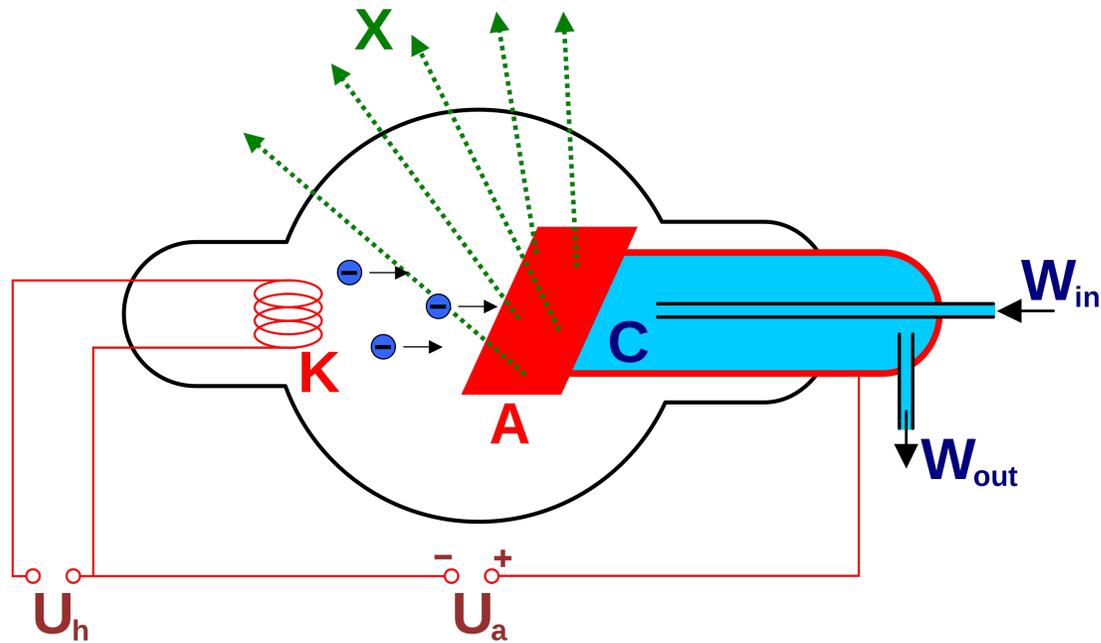
Modified Graphic; Original Source: comScore Device Essentials, Monday, 21st January 2013, UK

Lumière ultraviolette (UV)

- Trois catégories de lumières UV – compte tenu de leurs hautes fréquences la pénétration est superficielle
 - UV-A de 400 à 315 nm : facilite la cicatrisation
 - UV-B de 315 à 280 nm : peau érythémateuse
 - UV-C de 280 à 100 nm : germinicide et mutagénique
- Le dosage des UV joue un rôle important sur leurs impacts, à dose contrôlée ils sont indiqués pour le traitement de plusieurs maladies de peau (psoriasis, vitiligo, acné, prurit, eczéma, ...)
- Cause un érythème par la dilatation des capillaires et des artérioles
- Induit la synthèse de mélanine (bronzage), mais aussi des desquamations et un vieillissement prématuré de la peau, en particulier pour les peaux claires
- Les UV-B peuvent convertir les stérols de la peau en vitamine D ☺
- Les UV-B et C à forte dose dans les yeux peuvent créer de la conjonctivite ou de la photokératite (irritation oculaire, photophobie), tandis que les UV-A peuvent causer de la cataracte
- Carcinomes/cancers de la peau par interaction (mutations) avec l'ADN cellulaire

Radiographie aux rayons X

Tube de Röntgen



Une des premières radiographies, celle de la main gauche d'Albert von Koelliker - réalisée par Conrad Röntgen le 23 janvier 1896