

Modèle scalaire des ondes lumineuses

Le mot optique vient du grec optikos : qui est relatif à la vue.

On distingue :

- L'optique physique : étude des phénomènes dont l'explication est nécessairement liée à la nature ondulatoire de la lumière et à son mécanisme de propagation (diffraction, interférences).
- L'optique géométrique : lorsque les dimensions des obstacles interposés sur le trajet de la lumière sont grandes devant la longueur d'onde de celle-ci, les phénomènes de diffraction ne se manifestent plus de manière sensible et la propagation de la lumière se fait selon des lois très simples, l'approximation étant basée sur la notion de rayon lumineux.

I Modèle ondulatoire de la lumière

I.1 Nature de l'onde lumineuse

La lumière naturelle (par ex. la lumière solaire) est une superposition d'ondes électromagnétiques de longueurs d'ondes λ différentes.

La lumière appartient au domaine des ondes électromagnétiques. Une onde électromagnétique correspond à la propagation d'un couple champ électrique $\vec{E}$ et champ magnétique $\vec{B}$ variant en fonction du temps à une fréquence qui est celle de la lumière monochromatique observée.

Le domaine du visible correspond aux longueurs d'onde dans le vide comprises entre 400 nm et 800 nm.

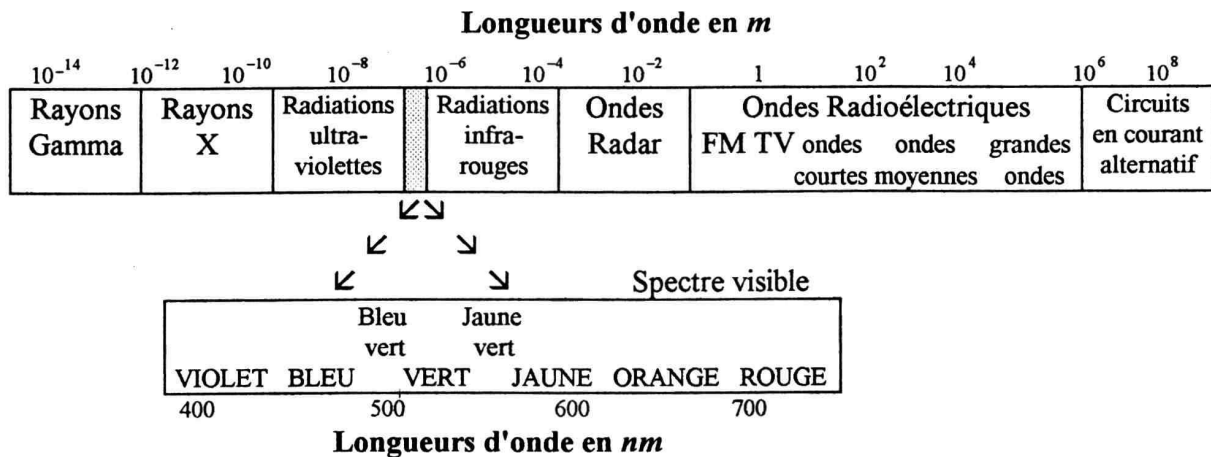


FIGURE 1 – Domaines des ondes électromagnétiques

I.2 Rayon lumineux

Un rayon lumineux est une ligne de champ du vecteur de Poynting.

Dans un milieu transparent homogène isotrope (MHTI) d'indice n les rayons lumineux sont des droites.

I.3 Approximation scalaire

a La lumière naturelle

b Vibration lumineuse

Le modèle scalaire consiste à décrire l'onde lumineuse par un champ scalaire $s(M, t)$ appelé onde scalaire ou vibration lumineuse.

Propriétés :

- La vibration lumineuse se propage à la vitesse de phase $v = \frac{c}{n}$ le long des rayons lumineux.
- Théorème de superposition : si plusieurs vibrations lumineuses se propagent, la vibration lumineuse résultante est la somme des vibrations lumineuses (pour des rayons lumineux faisant un angle très faible entre eux).

L'approximation scalaire permet d'étudier l'optique d'un point de vue ondulatoire en utilisant la notion de rayon lumineux.

I.4 Éclairement ou intensité vibratoire

a Les récepteurs

Le temps de réponse d'un capteur est la durée caractéristique des variations les plus rapides qu'il puisse transcrire

Temps de réponse des capteurs optique (ordre de grandeur) :

Capteur	Oeil	Photorésistance	CCD	Photodiode
τ_r (s)	0,1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-8}

b Éclairement

On appelle éclairement ou intensité lumineuse, noté $I(M)$ la moyenne temporelle de la puissance lumineuse surfacique reçue au point M à une constante multiplicative K près :

$$I(M) = k \langle s^2(M, t) \rangle_{\tau_R} \quad \text{en W.m}^{-2}$$

II Chemin optique - Théorème de Malus

II.1 Chemin optique

Soit une onde lumineuse et un rayon lumineux associé à cette onde allant de A vers B . Le chemin optique parcouru par la lumière entre A et B est :

$$(AB) = \int_A^B n(M) d\ell$$

On a aussi

$$(AB) = c \cdot \tau_{AB}$$

avec τ_{AB} est le temps mis par la lumière pour aller de A à B le long du rayon lumineux dans le milieu.

Principe de Fermat — Entre deux points A et B donnés, atteints par la lumière, le chemin optique est extrémal le long d'un rayon lumineux.

II.2 Calcul pratique de chemins optiques

II.3 Surfaces d'onde

Soit un faisceau lumineux **isogène**, c'est-à-dire un ensemble de rayons lumineux issus d'un même point A . On appelle surface d'onde un ensemble de points M tels que le chemin optique (AM) est une constante. La dénomination de surface d'onde prend bien sûr toute sa signification dans le cadre d'une interprétation ondulatoire de l'optique.

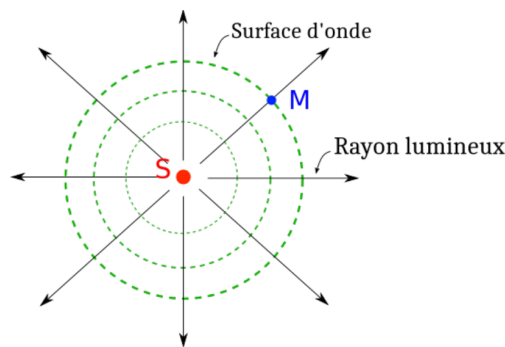
II.4 Théorème de Malus

Enoncé — Les rayons lumineux issus d'un même point A sont orthogonaux aux surfaces d'onde.

II.5 Ondes planes et ondes sphériques

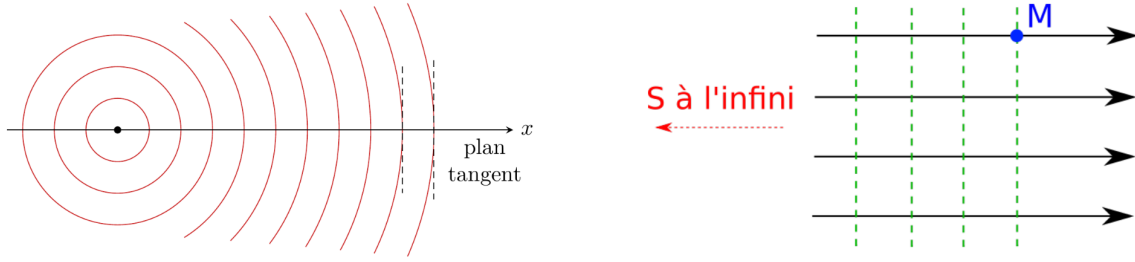
a Source ponctuelle

Dans un milieu homogène les surfaces d'ondes d'un point source sont des sphères concentriques. On parle d'onde sphérique.



b Source ponctuelle à l'infini

Loin de la source les surface d'ondes peuvent être approximées par leurs tangentes, les surfaces d'ondes sont alors des plans, on parle d'onde plane.



III L'onde lumineuse monochromatique

III.1 Généralités

a Définition

Une vibration lumineuse monochromatique a pour expression :

$$s(M, t) = A(M) \cos(\omega t - \varphi(M))$$

avec $A(M)$ amplitude de la vibration lumineuse en M , ω pulsation et $\varphi(M)$ retard de phase en M .

b Notation complexe

En notation complexe, on peut écrire :

$$\underline{s}(M, t) = A(M) \exp(j(\omega t - \varphi(M))) = \underline{a}(M) \exp(j\omega t)$$

c Intensité

On a vu que l'intensité lumineuse, noté $I(M)$ est la moyenne temporelle de la puissance lumineuse surfacique reçue au point M à une constante multiplicative K près :

$$I(M) = k \langle s^2(M, t) \rangle_{\tau_R} \quad \text{en W.m}^{-2}$$

Pour une vibration lumineuse monochromatique :

$$I(M) = \frac{1}{2} k A^2(M) = \frac{1}{2} k |\underline{a}(M)|^2 = \frac{1}{2} k \underline{a}(M) \underline{a}^*(M)$$

III.2 Retard de phase et chemin optique

On considère une vibration lumineuse se propageant de S à M le long d'un rayon lumineux. On a :

$$\varphi(M) = \varphi(S) + \frac{2\pi}{\lambda}(SM)$$

Il y a un déphasage supplémentaire de π dans les situations suivantes :

- réflexion sur une surface métallique,
- réflexion sur un dioptré avec un milieu deux plus réfringent,
- passage par un point de convergence.

III.3 Ondes sphériques et ondes planes

IV Les sources de lumière

IV.1 Exemples

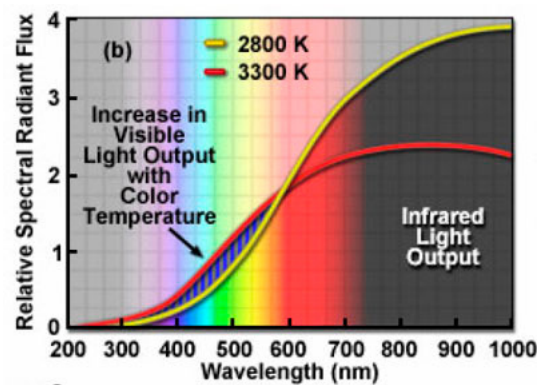
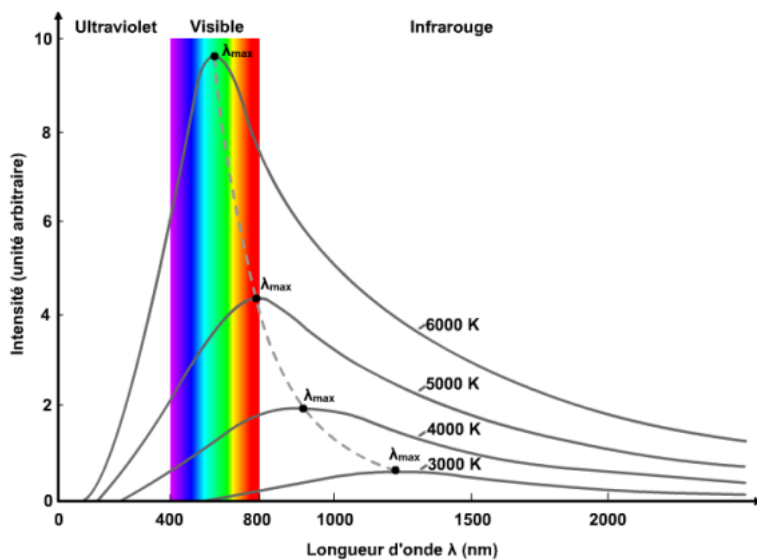
a Sources de lumière blanche

On parle de source lumière blanche lorsque le spectre contient toutes les composantes visibles du spectre de façon continue. Ces sources sont soit issues du rayonnements d'un corps noir, soit de la fluorescence.

Lampes à incandescence

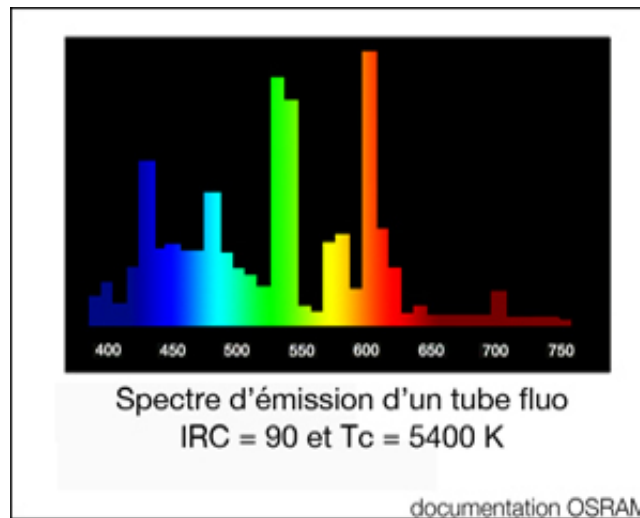
Dans le Soleil ou les lampes à filament, la lumière est émise par un corps chaud, ce qui produit un spectre intrinsèquement continu.

Spectre rayonné par un corps noir :



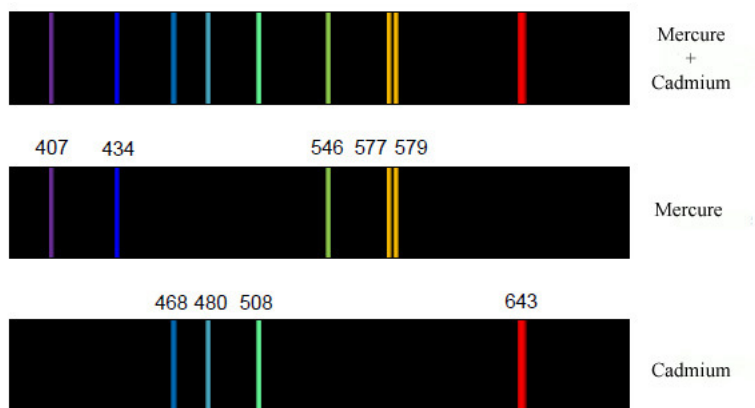
Tubes fluorescents et LEDS

Une lumière avec un spectre discret est produite par un dispositif (DEL = semi-conducteur, fluocompacte = gaz excité) puis cette lumière est absorbée par une substance fluorescente qui réémet dans le visible un spectre continu



b Lampes spectrales

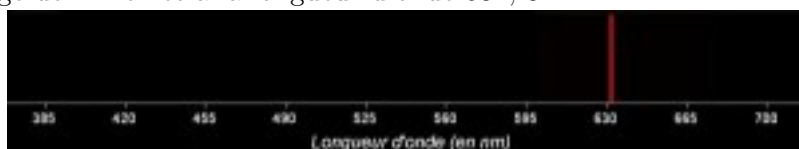
Ces lampes contiennent un gaz excité à l'aide d'une décharge électrique, la désexcitation du gaz crée un rayonnement. Les gaz présentent des niveaux d'énergie discrets donc seules certaines fréquences sont émises, on parle de spectre de raies.



c LASER

Le laser émet un spectre composé d'une unique raie, beaucoup plus fine que celle émise par une lampe spectrale. La laser a une très grande longueur de cohérence.

Exemple : Le laser rouge de TP émet à la longueur d'onde 632,8 nm.



IV.2 Le modèle du train d'onde

Dans une approche semi-classique, l'onde lumineuse est émise sous forme d'une succession de trains d'ondes.

En première approximation, les trains d'ondes sont des sinusoïdes tronquées de durée moyenne τ_c , nommé **temps de cohérence**.

On a verra, que pour un signal sinusoïdal de durée τ_c , ce dernier a une spectre en fréquence de largeur $\Delta\nu$ telle que :

$$\Delta\nu \times \tau_c \simeq 1$$

On a $\Delta\nu \ll \nu_0$, avec ν_0 la fréquence de la sinusoïde. Cela correspond à un intervalle de longueur d'onde dans le vide $\Delta\lambda$, avec $\Delta\lambda \ll \lambda_0$. On montre que :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta\nu}{\nu_0}$$

La phase à l'origine des trains d'ondes est aléatoire.

Le longueur de cohérence est la longueur parcourue par l'onde pendant τ_c . Il s'agit donc de la longueur du train d'onde.

Pour une onde lumineuse quasi-monochromatique :

$$\ell_c = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$$

Plus la raie est large, plus la longueur de cohérence est petite.

Les ordres de grandeur :

Pour un lampe à vapeur de sodium, on trouve typiquement $\ell_c \simeq \text{mm}$.

Comme $\ell_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$, on peut augmenter la longueur de cohérence en diminuant $\Delta\lambda$. Les phénomènes principaux responsables de l'élargissement du spectre sont :

- les collisions entre atomes ;
- l'effet Doppler.

Pour le laser hélium-néon du laboratoire, $\ell_c \sim 30 \text{ cm}$.

Source	λ_m (nm)	f (10^{14} Hz)	Δf (Hz)	τ_c (s)	ℓ_c
Lumière blanche	575	5,2	$3 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-15}$	$0,9 \mu\text{m}$
Lampe Hg haute pression	546,1	5,5	10^{12}	10^{-12}	0,3 mm
Laser He-Ne	632,8	4,74	10^9	10^{-9}	30 cm
Laser He-Ne stabilisé	632,8	4,74	10^4	10^{-4}	30 km