

Optique
Lois et théorie *Fiche de cours*

1 La lumière:

...Au septième jour, Dieu déclara "Que la lumière soit". Et la lumière fut...

A en croire la Genèse, le premier acte du créateur après avoir créé le ciel et la terre, fut de séparer la lumière des ténèbres.

Historique:

La curiosité humaine s'est portée très tôt sur l'étude de la lumière. Les grecs, déjà, avaient pressentis les notions corpusculaire et ondulatoire de la lumière.

Notion corpusculaire :

Cette théorie posée par Empédocle fut reprise et soutenue par Newton. Elle suppose qu'un corps lumineux émet des particules.

Notion ondulatoire:

Cette théorie énoncée par Aristote a supplanté la précédente lorsque Fresnel a mis en évidence les phénomènes de réflexion, de réfraction, d'interférences, de diffraction et de polarisation de la lumière. C'est Maxwell qui a prouvé qu'il s'agit d'ondes électromagnétiques

Mais depuis un siècle, il est apparu que la théorie ondulatoire n'est pas suffisante pour expliquer tous les phénomènes liés à la lumière. Et voici que réapparait la nécessité d'une définition corpusculaire pour supporter la théorie de la physique quantique et l'existence des photons, particules de lumière.

Propriétés de la lumière

Célérité

Un grand nombre de travaux ont été réalisés pour déterminer la vitesse ou célérité de la lumière. Celle-ci est donnée pour une onde lumineuse se déplaçant dans le vide :

$$C = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

(on évalue fréquemment la vitesse de la lumière à 300 000 km/s)

Cette vitesse est la vitesse limite maximale pouvant être atteinte dans le vide.

Longueur d'onde

On appelle longueur d'onde la longueur d'ondulation d'une onde rapportée à la vitesse de la lumière soit :

$$c = \lambda f$$

$$\text{ou } \lambda = c / f$$

Avec :

c : célérité absolue de la lumière dans le vide

λ : longueur d'onde

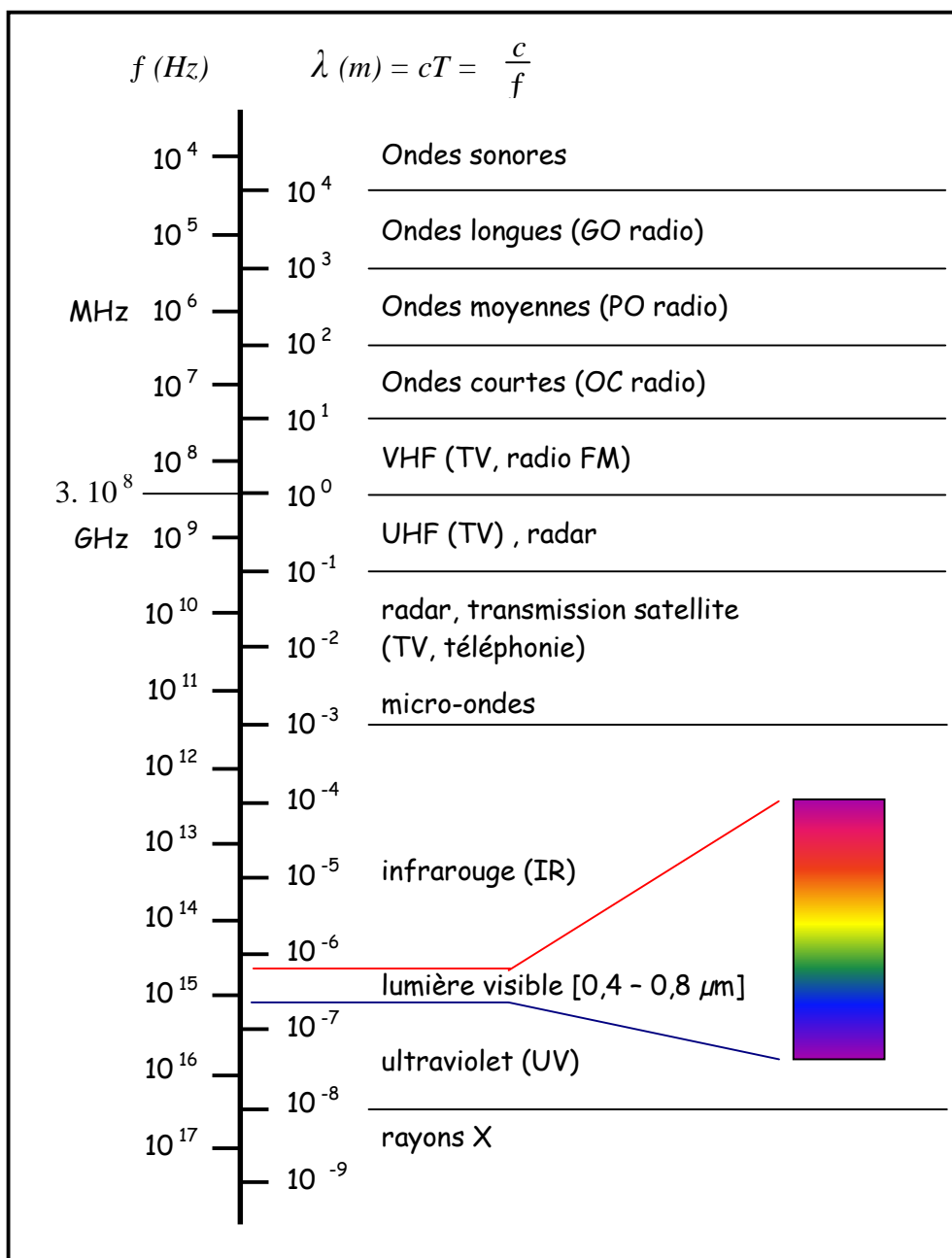
f : fréquence de l'ondulation

On peut en déduire que

$$\lambda = c T$$

T : période de l'ondulation considérée

Le tableau ci-dessous montre la répartition spectrale des ondes électromagnétiques en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde:



Ce tableau nous montre:

- que la lumière est une onde électromagnétique telle que $10^{-8} < \lambda < 10^{-3}$
ou $3 \cdot 10^{11} < f < 3 \cdot 10^{16}$
- que la lumière visible n'est qu'une petite partie du spectre lumineux.

Milieu de propagation

Comme toute onde électromagnétique, la lumière se propage de manière différente suivant le milieu dans lequel elle évolue.

Dans le vide, nous avons vu que sa vitesse de propagation est de l'ordre de 300 000 km/s. Dans tous les autres milieux, la vitesse est plus lente. On associe alors au milieu un **indice de réfraction** noté n et caractéristique de celui-ci tel que:

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

Avec :

c : célérité absolue de la lumière dans le vide

v : célérité caractéristique de la lumière dans le milieu

On notera que

$$v \leq c \quad \text{et} \quad n \geq 1$$

Enfin, dans le vide $n = 1$ (Dans l'atmosphère terrestre, on assimile également souvent n à 1)

Notion de chemin optique

Considérons le déplacement de la lumière dans un milieu de propagation

Nous savons que $c = n \cdot v$ (d'après ce qui précède)

On obtient donc

$$dL = n dl$$

$$\text{ou } dL = \frac{c}{v} dl = c dt$$

Si l'on note L_{AB} le trajet entre deux points A et B.

$$L_{AB} = \int_A^B dL = \int_A^B n dl$$

Si le milieu dans lequel se propage la lumière possède un indice de réfraction constant, il apparaît que : $dL = 0$, donc que le trajet est rectiligne

Cette loi est connue sous le nom de Principe de Fermat, et il s'agit là d'un des points de départ de l'optique géométrique (voir ci-dessous)

2 *Transmissions optiques:*

La possibilité d'utiliser la lumière comme moyen de transmission est reconnue depuis très longtemps: les égyptiens érigeaient des phares pour diriger les bateaux. Cependant, les caractéristiques électromagnétiques connues permettent d'envisager d'autres applications en particulier depuis la création et le développement des fibres optiques.

Intérêt des transmissions optiques:

La lumière se propageant à très grande vitesse, présente des caractéristiques intéressantes dans le cadre des transmissions:

- très grande bande passante (théoriquement 10^{14} à 10^{15} Hz) autorisant un débit d'informations très élevé.
- immunité aux perturbations électromagnétiques usuelles (10^2 à 10^{11} Hz)
- isolation galvanique (pas de connexion électrique)
- utilisable en milieu explosif

Les émetteurs de lumière

Il existe beaucoup de types d'émetteurs de lumière

- les étoiles (soleil,...) émettent un spectre très large d'ondes électromagnétiques.
- les lampes à incandescence émettent en général une partie du spectre de la lumière visible.
- les DELs émettent une onde de longueur fixe et bien définie dans le spectre visible ou l'infra rouge
- les lasers émettent une onde de longueur fixe et bien définie dans le spectre visible ou l'infra rouge

Les Dels proposent un faisceau d'émission plus ou moins étroit.

Tableau des DELs en fonction des matériaux les constituant:

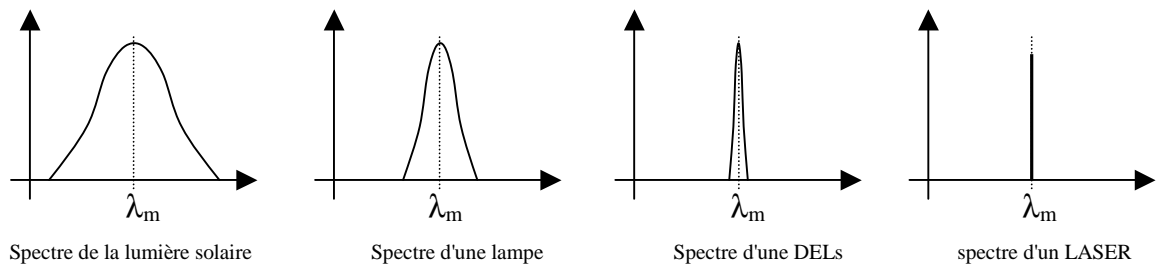
matériau		VD(V)	couleur
Arséniure de gallium	GaAs	2	IR
Phosphore d'ars. de gal.	GaAsP	2	rouge-jaune
Phosphure de gallium	GaP	2	vert
Nitride de gallium	GaN	4	bleu
3 DEL (rouge+jaune+bleu)		5	blanc

VD : tension directe

Par contre les lasers disposent de faisceau très fin composé d'une onde lumineuse monochromatique cohérente.

Dans certains cas, on parle de Diodes lasers. Celles-ci possèdent les caractéristiques des DELs avec un faisceau très étroit donc très puissant sur un spectre très réduit comme les lasers d'où leur nom.

Comparatif des différents spectres d'émission des émetteurs de lumière:



Sécurité :

Les diodes laser:

- diode laser émettant des radiations visibles (rayonnement rouge le plus souvent) ne pas regarder directement le flux lumineux sortant de la diode (risque de lésion de la rétine).

Port de lunettes de protection vivement conseillé.

- diode laser IR : ne pas regarder dans la direction du composant.

Port de lunettes de protection obligatoire.

Les lasers sont étiquetés en 5 classes selon le niveau de risque qu'ils représentent :

- classe 1 : sans danger
- classe 2 (1 mW) : émet uniquement dans le visible, puissance suffisamment faible pour que le réflexe palpébral (fermeture des paupières) protège l'œil. Exemple : pointeur laser.

Port de lunettes de protection conseillé.

- classe 3A : lasers à rayonnement visible de puissance n'excédant pas 5 fois la puissance d'un laser de classe 2 (5 mW), de sorte que l'œil soit encore protégé par le réflexe palpébral. Exemple : mini-laser de spectacle. ou lasers à rayonnement non visible de puissance n'excédant pas 5 fois la puissance d'un laser de classe 1.

Port de lunettes de protection vivement conseillé.

- classe 3B (15 mW) : lasers dangereux pour la vue en rayonnement direct, mais non pour la peau et inoffensif en rayonnement indirect. Exemple : laser de spectacle.

Port de lunettes de protection obligatoire si risque de rayonnement direct.

- classe 4 : laser dangereux pour l'œil et pour la peau.

Port de lunettes et de vêtements de protection obligatoire.

Les récepteurs de lumière

Il existe essentiellement deux types de récepteurs électroniques:

- Photodiodes : composé d'une simple jonction de type diode dont la conductivité est fonction de son éclairement
- Phototransistor : composé d'une double jonction de type transistor (NPN ou PNP) dont l'effet transistor est fonction de son éclairement

Dans les deux cas, il réagissent à certaines ondes (spectre large ou étroit suivant les cas.

Les caractéristiques sont les suivantes pour les photodiodes:

- Matériau :
 - Si, Ge ou InGaAs (Arséniure de gallium et d'indium)
- Spectre de sensibilité :
 - Si : visible + proche IR (400 à 1200 nm). Maximum vers 850 nm
 - Ge et InGaAs : 800 à 1800 nm
 - (il existe également des photodiodes UV)
- Sensibilité : \approx mA/W à 100 mA/W pour une puissance lumineuse incidente mesurée à la longueur d'onde de sensibilité maximale
- Courant d'obscurité : \approx nA
- Vitesse de commutation (rapidité) : \approx ns \Rightarrow bande passante jusqu'au GHz
- Tension inverse maxi : \approx 10 V \Rightarrow protection nécessaire par une diode connectée en inverse en parallèle avec la photodiode
- Directivité (ou angle de détection ou réponse angulaire) : \approx 10° à plus de 120°

Pour les phototransistors, on remarque en plus une sensibilité très élevée, courant de sortie plusieurs centaines de fois supérieur à celui d'une photodiode, mais rapidité moindre.

Les milieux de transmission

Le premier milieu de transmission qui vient à l'esprit est l'air (ou l'espace intersidéral dans certains cas). Ce milieu est utilisable mais en réalité assez peu car la lumière ne se propage que dans les milieux transparents. Les objets opaques sont donc des obstacles à la transmission. Ainsi, un arbre, un mur, mais aussi la neige sont des obstacles. De plus comme nous le verrons plus loin, les modification d'indice de réfraction conduisent à une modification de la trajectoire lumineuse. Ainsi, la pluie, le brouillard et même la masse d'air atmosphérique (pollution, chaud/froid, ...) conduit à des problèmes de transmission.

C'est pourquoi, la recherche s'est orienté vers l'utilisation de support de transmission optique formant guide tel que la fibre optique.

L'étude des fibres optiques est réalisée dans un cours séparé de celui-ci.

3 Optique géométrique

Nous avons vu d'après le principe de Fermat que la lumière se déplace en ligne droite dans un milieu d'indice de réfraction constant. Nous pouvons assimiler le déplacement de la lumière à un rayon lumineux et en établir les équations mathématiques. Ces travaux relèvent de la géométrie spatiale.

Nous allons donc chercher à définir ces équations.

Définitions:

On appelle **source de lumière** le foyer source des ondes lumineuses. Cet émetteur sera représenté par un point

On appelle **rayon lumineux** dans un milieu homogène la demi droite issue du centre d'une source de lumière

On appelle **milieu homogène**, un milieu de transmission dans lequel l'indice de réfraction est constant.

On appelle **dioptre** la surface de séparation entre deux milieux de transmission homogènes d'indices de réfraction différents

On appelle **rayon incident** le segment représentatif du rayon lumineux partant de la source de lumière jusqu'au dioptre.

Principe de Fermat

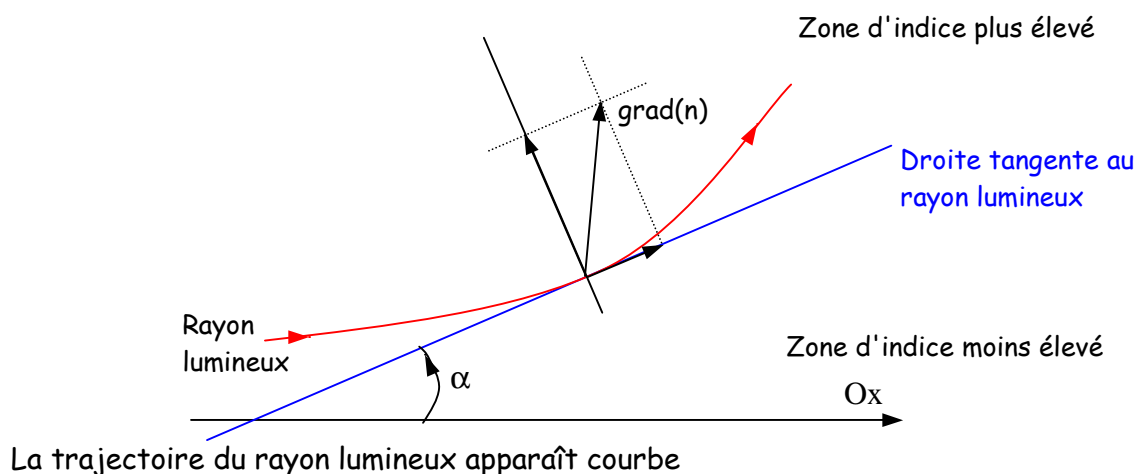
Nous avons déjà énoncé une partie de ce principe, mais que se passe-t-il dans le cas où l'indice n'est pas constant (milieu non homogène)

Cas d'un milieu à gradient d'indice

On appelle milieu à gradient d'indice, un milieu de transmission au sein duquel la valeur de l'indice de réfraction varie graduellement suivant le lieu.

Dans ce cas, Fermat a montré que:

Dans un milieu d'indice variable, le rayon lumineux est incurvé dans la direction du gradient d'indice, c'est à dire qu'il tourne sa concavité vers les zones d'indice de réfraction croissant.



Cas d'un milieu à saut d'indice (présence d'un dioptre)

Dans ce cas, on observe une modification de la trajectoire. En fait, Fermat a démontré que

La lumière en ralentissant modifie sa trajectoire.

Mais c'est le mathématicien Descartes qui en a défini les lois qui suivent.

Trajet retour de la lumière

Fermat a également établi la notion de trajet retour de la lumière. A savoir:

Le trajet suivi par la lumière ne dépend pas du sens de parcours.

Les lois de Descartes

Première loi de Descartes :

A l'interface de deux milieux optiques d'indices différents (dioptre), un rayon lumineux donne généralement naissance à un rayon réfléchi et à un rayon réfracté, ou transmis, situés dans le plan d'incidence (normal à la surface de séparation).

Deuxième loi de Descartes : Réflexion

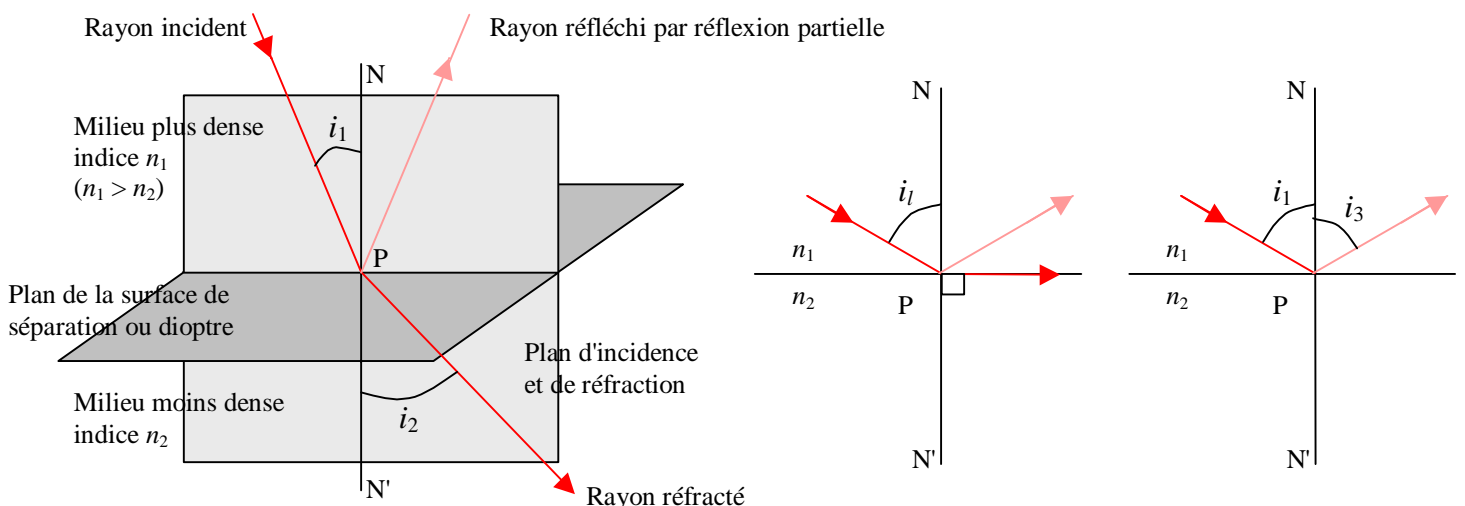
Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale à l'interface.

Cette relation s'écrit sous la forme : $i_3 = -i_1$

Troisième loi de Descartes : Réfraction

Il existe un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction.

Cette relation s'écrit sous la forme : $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$



Loi de la réfraction :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

Réfraction limite:

$$\sin i_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

Réflexion totale :

$$i_1 > i_1 \text{ et } i_3 = -i_1$$

Remarques: tous les angles sont définis dans le plan d'incidence et par rapport à la normale à la droite représentant la surface du dioptre.