

# Vers l'optique ondulatoire

## I – Rappels d'optique géométrique

LOI La lumière est composée de photons.

Un *photon* est une particule caractérisée par sa fréquence  $\nu$  et :

- LOI
- de masse rigoureusement nulle
  - d'énergie  $E = h\nu$  avec  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s la constante de PLANCK
  - de quantité de mouvement  $E = \frac{h\nu}{c}$  dans le vide

LOI La lumière est une onde électromagnétique.

LOI La plupart du temps  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont transverses et le trièdre  $(\vec{k}, \vec{E}, \vec{B})$  avec  $\vec{k}$  le vecteur d'onde est direct.

LOI Le domaine du visible s'étend de 400 à 800 nm.

LOI Les fréquences du visibles sont de l'ordre de 1 PHz.

DÉF L'*indice optique* d'un milieu est défini par  $n = \frac{c}{v_\varphi}$  où

- $c$  est célérité des ondes dans le vide
- $v_\varphi$  est la célérité des ondes dans le milieu

DÉF L'indice optique caractérise la *réfringence* d'un milieu.

LOI  $n_{\text{vide}} = 1$     $n_{\text{air}} = 1 + 3 \cdot 10^{-4}$     $n_{\text{eau}} = 1,33$     $n_{\text{verre}} = 1,5$

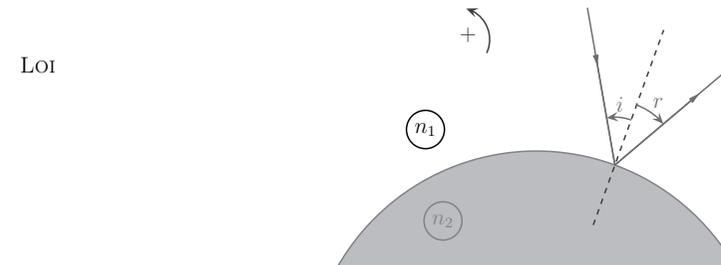
LOI Dans un milieu usuel l'indice d'un milieu obéit à la loi de CAUCHY

$$n = A + \frac{B}{\lambda} \quad \text{avec} \quad A, B > 0$$

LOI Un milieu *biréfringent* est un milieu où l'indice dépend de la direction du champ  $\vec{E}$ .

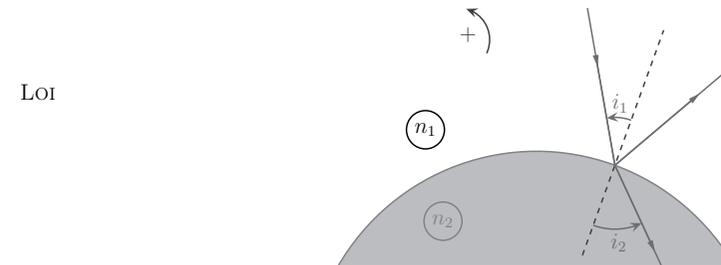
Au niveau de l'interface entre deux milieux d'indice différent, interface appelée *dioptr*e nous avons :

- le rayon réfléchi dans le plan d'incidence défini par la normale au point d'impact et par le rayon incident
- $i = r$  (version non algébrique) ou  $r = -i$  (version algébrique)



LOI Il y a **toujours** réflexion en optique géométrique.

- Au niveau de l'interface entre deux milieux d'indice différent nous avons :
- le rayon réfracté dans le plan d'incidence
  - $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$  (cf. schéma)



DÉF Lorsqu'en optique géométrique un rayon incident ne peut pas engendrer de rayon réfracté, la réflexion est dite *totale*.

Un *système optique* est un dispositif qui modifie le trajet de la lumière. Il possède une face d'entrée et une face de sortie.

DÉF

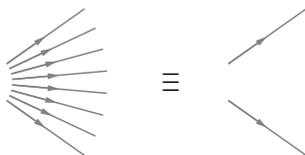


DÉF

Un système optique *centré* est un système optique dont les propriétés sont symétriques par rapport à un axe de révolution appelé *axe optique*.

Un *faisceau lumineux* est un ensemble de rayons lumineux issu d'une même source physique. Le faisceau est généralement représenté par ses rayons extrêmes.

DÉF



DÉF

Un *point objet* pour un système optique est le sommet d'un faisceau lumineux entrant dans un système optique.

DÉF

Un *objet* pour un système optique est un ensemble de points objets pour ce système.

DÉF

Un *point image* pour un système optique est le sommet d'un faisceau lumineux sortant d'un système optique.

LOI

Un faisceau parallèle correspond à un **point** objet ou image.

Un point objet est dit :

DÉF

- *réel* s'il est situé avant la face d'entrée dans le sens de la lumière, il est associé à un faisceau divergent
- *virtuel* s'il est situé après la face d'entrée dans le sens de la lumière, il est associé à un faisceau convergent

Un point image est dit :

DÉF

- *réel* s'il est situé après la face de sortie dans le sens de la lumière, il est associé à un faisceau convergent
- *virtuel* s'il est situé avant la face de sortie dans le sens de la lumière, il est associé à un faisceau divergent

DÉF

Un système optique est dit *stigmatique* lorsqu'un point objet donne un point image.

DÉF

Le stigmatisme est dit *approché* lorsque le faisceau constituant un point image ne converge pas en un point géométrique mais dans une zone restreinte de l'espace.

DÉF

Un système optique est dit *aplanétique* lorsque tout objet situé dans un plan orthogonal à l'axe optique donne une image qui est, elle aussi, située dans un plan orthogonal à l'axe optique.

DÉF

Une *relation de conjugaison* est une loi qui relie les positions :

- du système optique
- d'un point objet
- d'un point image associé au point objet

DÉF

Deux points, un point objet et un point image, associés par un système optique sont dits *conjugués*.

DÉF

Le *foyer principal objet* noté  $F$  d'un système optique est le point sur l'axe optique dont l'image est à l'infini.

DÉF

Le *foyer principal image* noté  $F'$  d'un système optique est le point sur l'axe optique dont l'objet est à l'infini.

DÉF

Un point qui n'appartient pas à l'axe est dit *foyer (objet ou image) secondaire* lorsqu'il est conjugué avec l'infini.

LOI

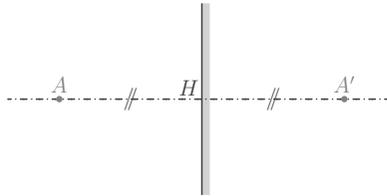
Pour les systèmes aplanétique, les foyers secondaires sont situés dans le *plan de front* (le plan orthogonal à l'axe optique) passant par le foyer associé.

Un système optique est dit :

- DÉF
- *convergent* si  $F'$  est réel
  - *divergent* si  $F'$  est virtuel
  - *afocal* si l'infini est conjugué avec l'infini

Soient  $A$  un point objet et  $H$  son projeté orthogonal sur le miroir, alors  $A'$  est tel que

$$\overline{HA} - \overline{HA'} = 0$$



LOI

LOI

Quel que soit l'objet, le grandissement pour un miroir plan vaut 1.

Pour qu'un rayon respecte les conditions de GAUSS il faut :

- DÉF
- qu'il soit peu incliné par rapport à l'axe optique
  - qu'à l'endroit où il rentre dans le système optique il soit proche de l'axe optique

DÉF

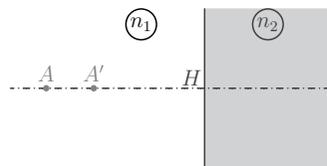
Un rayon lumineux qui respecte les conditions de GAUSS est dit *paraxial*.

LOI

Un système optique qui respecte les conditions de GAUSES pour tous les rayons lumineux est aplanétique et stigmatique.

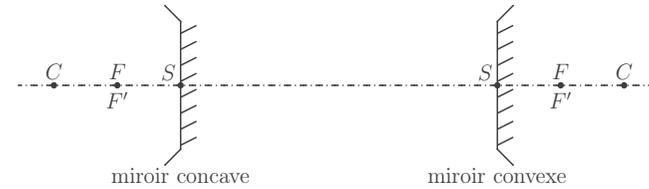
Pour un dioptre plan pour lequel la lumière va du milieu d'indice  $n_1$  au milieu d'indice  $n_2$ , avec  $A$  un point image et  $H$  son projeté orthogonal sur le dioptre, alors  $A'$  est tel que

$$\frac{n_1}{\overline{HA}} + \frac{n_2}{\overline{HA'}} = 0$$



LOI

Un miroir sphérique mince est schématisé de la manière suivante



LOI

- $C$  est le *centre* du miroir
- $S$  est le *sommet* du miroir
- $F$  et  $F'$  sont confondus
- $SF = \frac{SC}{2}$

LOI

Un miroir concave est convergent ( $f' < 0$ ) et un miroir convexe est divergent ( $f' > 0$ ).

LOI

Pour un miroir sphérique mince de foyers  $F$  et  $F'$ , les points  $A$  et  $A'$  sont reliés par

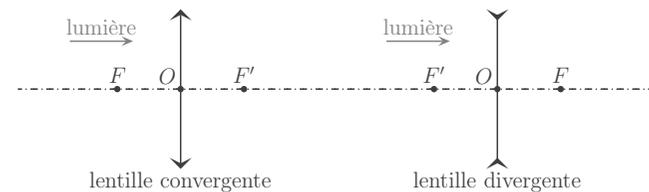
$$\overline{FA} \times \overline{F'A'} = +f'^2$$

LOI

Pour un miroir sphérique mince de foyer principal image  $F'$ , de sommet  $S$  et de centre  $C$  les points  $A$  et  $A'$  sont reliés par

$$\frac{1}{\overline{SA}} + \frac{1}{\overline{SA'}} = \frac{1}{\overline{SF'}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\overline{CA}} + \frac{1}{\overline{CA'}} = \frac{1}{\overline{CF'}}$$

Une lentille sphérique mince est schématisée de la manière suivante



LOI

- $O$  est le *centre* (optique) de la lentille
- $F$  et  $F'$  sont de part et d'autre de la lentille
- $O$  est le milieu de  $F$  et  $F'$

LOI

Utilisées dans l'air, les lentilles à bords minces (resp. à bords épais) sont convergentes (resp. divergentes).

LOI

Pour une lentille sphérique mince de foyers  $F$  et  $F'$ , les points  $A$  et  $A'$  sont reliés par

$$\overline{FA} \times \overline{F'A'} = -f'^2$$

LOI

Pour une lentille sphérique mince de foyer principal image  $F'$ , de centre  $O$  les points  $A$  et  $A'$  sont reliés par

$$-\frac{1}{OA} + \frac{1}{OA'} = \frac{1}{OF'}$$

## II – Modèle scalaire de la lumière

DÉF

Un *chemin de lumière* est le chemin qu'emprunte de la lumière pour se propager. Il est souvent dessiné sous la forme d'un rayon lumineux mais il est préférable de le représenter en pointillés.



DÉF

Il y a de la lumière (donc de l'énergie) en tout point d'un *rayon lumineux*.

DÉF

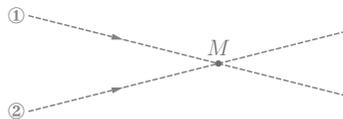
En tout point d'un chemin de lumière, l'onde lumineuse a une *amplitude scalaire*  $s(M,t)$  qui se propage.



LOI

Au croisement de deux chemins de lumière, les amplitudes scalaires s'ajoutent.

$$s(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t)$$



LOI

Pour une OPPM, la phase s'écrit

$$s(M,t) = A(M) \times \cos(\omega t - \varphi(M)) \quad \text{où :}$$

- $A(M)$  est l'amplitude de l'onde qui décroît avec la propagation
- $\varphi(M)$  est la phase due à la propagation



LOI

Dans un milieu d'indice  $n$ , nous avons

$$k = n k_0 \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad \text{où}$$

$k_0$  et  $\lambda_0$  sont le vecteur d'onde et la longueur d'onde dans le vide.

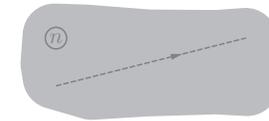
LOI

Pour une onde monochromatique (pas forcément plane) :

- $s(M,t) = A(M) \cos(\omega t - \varphi(M))$
- $\underline{s}(M,t) = A(M) e^{j(\varphi(M) - \omega t)}$
- $\underline{s}(M,t) = \underline{A}(M) e^{-j\omega t}$

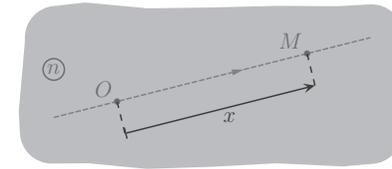
LOI

Dans un milieu homogène, les chemins de lumière sont rectilignes.



LOI

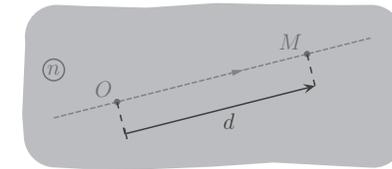
Pour une onde monochromatique dans un milieu usuel, l'amplitude scalaire s'écrit  $s(M,t) = A(M) \cos(\omega t - kx - \varphi(O))$  ou  $s(M,t) = A(M) \cos(\omega t - k_0 n x - \varphi(O))$



LOI

Pour  $M$  situé  $d$  plus loin que  $O$  et sur le même chemin de lumière rectiligne, nous pouvons écrire

$$\varphi(M) = \varphi(O) + n k_0 d$$

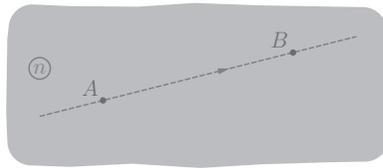


LOI

La phase, sur un chemin de lumière, est continue à la traversée d'un dioptre.

Dans un milieu homogène, le *chemin optique* parcouru par la lumière entre deux points  $A$  et  $B$  sur un même chemin optique vaut  
 $(AB) = n AB$

LOI



LOI

Le chemin optique  $(AB)$  entre deux points  $A$  et  $B$  représente la distance qu'aurait parcouru la lumière dans le vide pendant la même durée que pour aller effectivement de  $A$  à  $B$ .

LOI

Le chemin optique permet de transposer en terme géométrique des problèmes temporels.

DÉF

La *différence de marche* notée  $\delta$  est la différence entre deux chemins optiques.

LOI

$\delta = \lambda_0$	$\Delta t = T$ et $\Delta\varphi = 2\pi$
$\delta = \frac{\lambda_0}{2}$	$\Delta t = \frac{T}{2}$ et $\Delta\varphi = \pi$
$\delta = \frac{\lambda_0}{4}$	$\Delta t = \frac{T}{4}$ et $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$

LOI

Il y a un déphasage supplémentaire de  $\pi$  (ou une différence de marche supplémentaire de  $\lambda/2$ ) lorsque :

- il y a réflexion sur un miroir
- il y a une réflexion « vitreuse » (*ie.* une réflexion sur un milieu plus réfringent)
- il y a passage par un point de convergence

DÉF

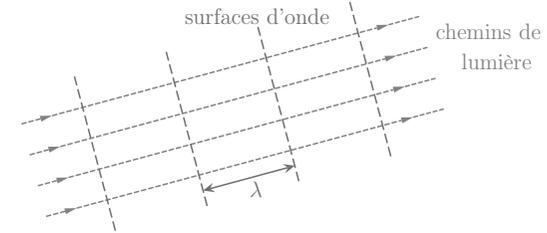
Une *surface d'onde* est une surface sur laquelle tous les points sont en phase à un instant fixé.

LOI

Les rayons lumineux sont orthogonaux aux surfaces d'onde.

Une onde est *plane* lorsque toutes ses surfaces d'onde sont planes.

DÉF



LOI

Une onde plane est engendrée par une source **ponctuelle** à l'infini.

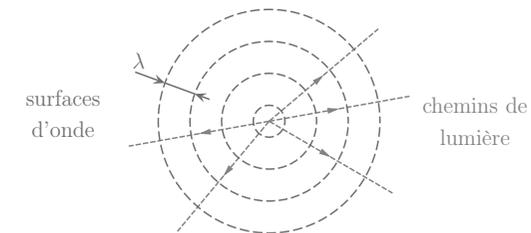
LOI

La phase d'une onde plane peut s'écrire sous la forme

$$\varphi(M) = \varphi(O) + \vec{k} \cdot \vec{OM}$$

DÉF

Une onde est *sphérique* lorsque toutes ses surfaces d'onde sont sphériques centrées sur le même point.



LOI

Une onde sphérique correspond à onde émise par une source **ponctuelle** à distance finie située au centre des sphères des surfaces d'onde.

LOI

Pour une onde sphérique :

- l'amplitude diminue en  $\frac{1}{SM}$  où  $SM$  est la distance source / point considéré
- la phase s'écrit  $\varphi(M) = \varphi(S) + k_0(SM)$

LOI

Entre deux points conjugués  $A$  et  $B$  par un système optique, le chemin optique entre  $A$  et  $B$  est le même *quel que soit* le chemin de lumière emprunté.

DÉF

L'*éclairement* est la puissance surfacique transportée par l'onde lumineuse et s'écrit

$$\mathcal{E}(M,t) = \kappa s^2(M,t)$$

LOI L'éclairement instantané est inaccessible expérimentalement.

DÉF L'éclairement en optique sera toujours compris comme la valeur moyenne de l'éclairement instantané.

$$\mathcal{E}(M) = \kappa \langle s^2(M,t) \rangle \quad \text{ou} \quad \mathcal{E}(M) = \kappa |\underline{s}^2(M)|$$

DÉF L'intensité d'une onde lumineuse est la puissance surfacique émise par une source.

LOI L'intensité est proportionnelle à l'éclairement.

LOI La longueur d'onde du LASER rouge Hélium – Néon utilisé en TP vaut  $\lambda_0 = 632,8$  nm.

LOI Le doublet jaune orange de la lampe à vapeur de sodium correspond à  $\lambda = 589,0$  nm et  $\lambda = 589,6$  nm.

LOI Le doublet jaune de la lampe à vapeur de mercure correspond à  $\lambda = 577$  nm et  $\lambda = 579$  nm.

DÉF Dans le cadre de l'optique ondulatoire, un paquet d'onde s'appelle un *train d'onde*.

DÉF L'extension spatiale d'un train d'onde s'appelle la *longueur de cohérence* et se note  $\ell_c$ .

DÉF L'extension temporelle d'un train d'onde s'appelle la *durée de cohérence* et se note  $\tau_c$ .

LOI Llongueur de cohérence et durée de cohérence sont reliés par  

$$\ell_c = c \tau_c$$

LOI Pour un train d'onde de durée de cohérence  $\ell_c$  et dont le spectre a pour largeur caractéristique  $\Delta\nu$  nous avons  

$$\tau_c \times \Delta\nu \sim 1$$

LOI Les trains d'onde successifs émis sont déphasés de manière aléatoire.