

# Chapitre 1 : Notions élémentaires d'optique géométrique

## LE COURS

### A Qu'est-ce que la lumière ?

A.1	Onde ou particule? .....	1
A.2	Couleurs et fréquences optiques .....	2
A.3	Vitesse de propagation et indice optique d'un milieu TLHI .....	2
A.4	Longueurs d'onde .....	3

### B Sources lumineuses

B.1	Spectres des sources lumineuses usuelles .....	4
B.2	Notions de source ponctuelle et de source étendue .....	6

### C Qu'est-ce que l'optique géométrique ?

C.1	Notion de rayon lumineux .....	6
C.2	Principes de l'optique géométrique .....	7
C.3	Lois de Snell-Descartes .....	7

## A Qu'est-ce que la lumière?

### A.1 Onde ou particule ?

Qu'est-ce que la lumière? Cette question a longtemps fait l'objet d'une controverse aux XVII<sup>ème</sup> et XVIII<sup>ème</sup> siècles. Selon Newton (1643-1727), la lumière est faite de particules émises par les corps lumineux. Il adoptait donc une vision corpusculaire de la lumière. Pour d'autres tels que Robert Hooke (1635-1703) et Christian Huygens (1629-1695), la lumière est une onde. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, Thomas Young (1773-1829) et Augustin Fresnel (1788-1827) mirent en évidence des phénomènes d'interférences lumineuses, ce qui est caractéristique et général à tout type d'ondes, prouvant ainsi de manière indéniable la **nature ondulatoire de la lumière**. Toutefois, il fallut attendre la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et les équations de Maxwell (James C. Maxwell (1831-1879)) pour connaître la nature physique de la grandeur qui se propage avec l'onde lumineuse. Il y a en réalité deux grandeurs qui se propagent et qui sont couplées : un champ électrique et un champ magnétique. On parle alors d'**onde électromagnétique** (étudiée en 2<sup>ème</sup> année). Néanmoins, paradoxalement, les découvertes faites au XX<sup>ème</sup> siècle conduisent également à affirmer la **nature corpusculaire de la lumière**. Finalement, si les deux approches se valent, on parlera alors de **dualité onde-corpuscule** (ou onde-particule) ...

Dans cette partie du programme, OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE, nous nous intéressons uniquement à l'aspect ondulatoire de la lumière.

## A.2 Couleurs et fréquences optiques

Lorsqu'un expérimentateur s'intéresse à une onde sinusoïdale de **fréquence optique**  $f$  donnée, l'œil humain y associera une perception visuelle sous forme de couleur bien déterminée. Voici quelques correspondances :

$f$ (Hz)	$7,5 \cdot 10^{14}$	$6,8 \cdot 10^{14}$	$5,4 \cdot 10^{14}$	$5,1 \cdot 10^{14}$	$4,8 \cdot 10^{14}$
Couleur	Violet	Bleu	Vert	Jaune orangé	Rouge

On retiendra donc que les fréquences optiques dans le domaine du visible sont voisines de  **$6 \cdot 10^{14}$  Hz**

**(R)** Lorsqu'on parle d'une onde sinusoïdale dans le visible, on parle également d'**onde monochromatique** («une seule couleur»).

## A.3 Vitesse de propagation et indice optique d'un milieu TLHI

### ► Cas d'un milieu vide

Dans le **vide**, la lumière se propage à vitesse constante notée  **$c$** , indépendamment de la mobilité de la source par rapport à l'observateur. Sa valeur est :  $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . **Cette valeur est une constante fondamentale de la physique et elle donc est fixée par convention.** On retiendra la valeur approchée :

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

### ► Cas d'un milieu TLHI

Sauf mention contraire, nous considérerons que les milieux étudiés seront des **milieux TLHI** : **T**ransparents, **L**inéaires, **H**omogènes et **I**sotropes. Qu'est-ce que cela signifie ?

#### Définition

Un milieu est **transparent** si la lumière peut le traverser.

Dans un tel milieu, on peut connaître la vitesse de propagation en connaissant l'**indice optique**  $n$ , correspondant au rapport de la célérité dans le vide  $c$  sur la célérité dans ce milieu  $v$  :

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

Il s'agit d'une grandeur caractéristique du milieu (sans dimension) .

La lumière se propage toujours moins vite dans un milieu que dans le vide donc  $v \leq c$ , d'où :  $n \geq 1$  .

#### Définition

Le milieu transparent sera dit :

- **linéaire** si une onde polychromatique («plusieurs couleurs») peut être étudiée comme la superposition d'ondes monochromatiques indépendantes les unes des autres ;
- **homogène** si en tout point de ce milieu, les propriétés sont les mêmes, notamment la vitesse de propagation ou bien l'indice optique ;
- **isotrope** si toutes les directions de propagation sont équivalentes ; cela implique donc notamment que la vitesse de propagation et l'indice optique sont indépendants de la direction de propagation.

La plupart des milieux usuellement rencontrés sont des milieux TLHI, comme l'air, le verre, l'eau, un sirop de grenadine ...

Chaque milieu ne se comporte pas de la même manière lorsqu'il est traversé par une onde électromagnétique : l'onde lumineuse aura donc a priori une vitesse de propagation différente d'un milieu à l'autre, d'où des valeurs d'indices différentes.

## Exemples

**Air** :  $n \simeq 1,0003$       **Eau** :  $n \simeq 1,33$  (à 20 °C)  
**Verre** :  $n$  peut varier entre 1,3 et 1,8 suivant la composition du verre

## Définition

Dans un milieu TLHI, la vitesse de propagation est souvent dépendante de la fréquence  $f$ , et donc l'indice optique également. On parlera alors de **milieu dispersif**.

**R** Ce terme vient du fait qu'avec un tel milieu, il est possible de « disperser » les couleurs. C'est le cas d'un rideau de pluie observé avec le Soleil dans le dos et permettant ainsi d'admirer un arc-en-ciel. Ou bien un prisme de verre ... Nous y reviendrons ...

## Exemples

Le vide n'est pas dispersif.

L'air est très peu dispersif, on considèrera en bonne approximation qu'il ne l'est pas. Ainsi, puisque, de surcroît, son indice est quasiment égal à 1 (indice du vide), **l'air sera assimilable au vide d'un point de vue optique**.

Par contre, l'indice de l'eau à 20 °C peut varier de 1,329 à 750 nm jusqu'à 1,342 à 400 nm.

Les verres sont aussi des milieux dispersifs.

**R** Néanmoins, sur certaines plages spectrales, un milieu peut éventuellement être considéré comme peu dispersif, de telle sorte à considérer son indice constant. Ce sera le cas de l'air par exemple, ou l'eau dans le domaine du visible éventuellement, en première approximation ... On ne pourra pas en dire autant pour la plupart des verres qui sont nettement plus dispersifs que l'eau.

## A.4 Longueurs d'onde

Lorsqu'on s'intéresse à une onde **sinusoïdale** (ou monochromatique) de **fréquence optique**  $f$  se propageant dans un milieu, on sait que l'on peut définir une **longueur d'onde** telle que :

$$\text{vitesse de propagation} = \text{longueur d'onde} \times \text{fréquence}$$

**R** Ce qui peut s'écrire aussi : vitesse de propagation =  $\frac{\text{longueur d'onde}}{\text{période}}$ . Ainsi, la longueur d'onde représente la distance de propagation de l'onde pendant une période ...

### ► Longueur d'onde dans le vide

Dans le cas où le milieu de propagation est le vide, on associe alors à la fréquence optique  $f$ , la **longueur d'onde dans le vide** notée  $\lambda_{\text{vide}}$  dans ce cours :

$$c = \lambda_{\text{vide}} f \quad \text{soit} \quad \lambda_{\text{vide}} = \frac{c}{f}$$

Ainsi, comme  $c$  est une constante, pour spécifier la fréquence optique d'une onde monochromatique (et donc sa « couleur »), il suffit de préciser la valeur de  $\lambda_{\text{vide}}$ , **longueur d'onde évaluée dans le vide**.

À partir du tableau donné au paragraphe **A.2** associant couleurs perçues et fréquences, on peut en déduire les correspondances ci-dessous à **connaître** :

Couleur	Violet	Bleu	Vert	Jaune orangé	Rouge
$\lambda_{\text{vide}}$ (nm)	400	440	550	590	630



### ACTIVITÉ N°2

### ► Longueur d'onde dans un milieu transparent

Dans le cas d'un milieu de propagation transparent différent du vide où la lumière se propage à la vitesse  $v$  pour une fréquence  $f$  donnée, la longueur d'onde devient :

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

Comme  $v = \frac{c}{n}$ , où  $n$  est l'indice optique du milieu, alors :

$$\lambda = \frac{c/n}{f} = \frac{\lambda_{\text{vide}}}{n}$$

Comme  $n \geq 1$ , pour une fréquence donnée, on a donc :

$$\lambda \leq \lambda_{\text{vide}}$$

- (R) Une onde lumineuse passant d'un milieu transparent à un autre garde la même fréquence (donc la même « couleur ») mais change de longueur d'onde puisque la vitesse change.
- (R) ATTENTION : insistons, ce n'est pas  $\lambda$  qui détermine la couleur d'une onde monochromatique, mais la fréquence optique  $f$  ou bien  $\lambda_{\text{vide}}$ . Voir tableau précédent...

## B Sources lumineuses

### B.1 Spectres des sources lumineuses usuelles

#### ► Qu'est-ce qu'un spectre de lumière ?

Le spectre d'émission d'une source lumineuse indique quelle est l'intensité lumineuse émise par la source en fonction de la longueur d'onde (dans le vide).

- (R) Plus précisément, ce qui est représenté en ordonnée est appelé *éclairage spectral*, noté  $\mathcal{E}_\lambda$ , tel que pour un intervalle  $[\lambda_1, \lambda_2]$ , l'intensité émise dans cette bande spectrale correspond à l'aire sous la courbe, c'est-à-dire  $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathcal{E}_\lambda d\lambda$ .

#### ► Sources thermiques

Le **rayonnement thermique** d'un corps correspond au rayonnement électromagnétique spontané de ce corps du au mouvement incessant d'agitation thermique des particules chargées présentes dans le corps.

Le spectre d'un rayonnement thermique est continu et possède la plupart du temps une allure de type *corps noir* (courbe en cloche et vérifiant la loi de Wien :  $\lambda_{\text{max}} T = \text{constante}$ )

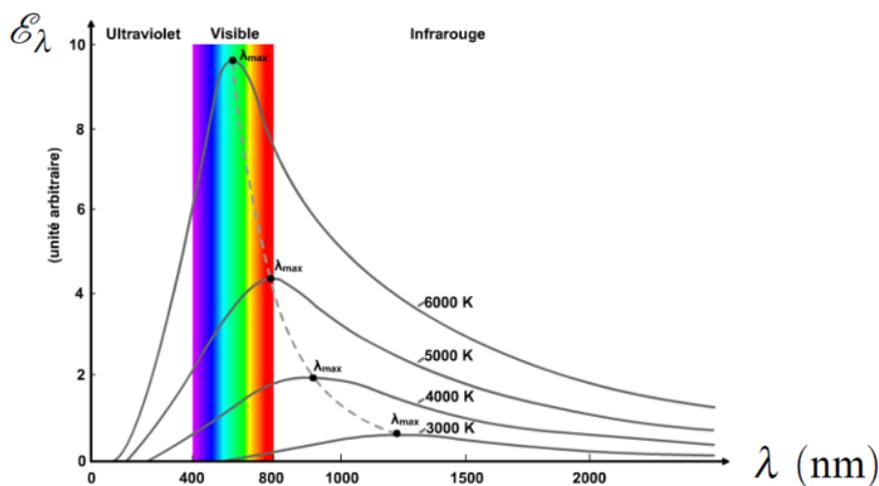
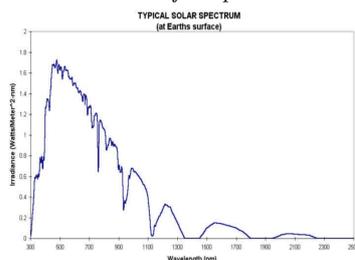


Figure 1 – Allure de l'éclairage spectral pour un rayonnement de type corps noir

- (R) Si le spectre couvre tout le domaine du visible (et au-delà), on parlera de *lumière blanche*.

## Exemples

— Soleil dont la surface produit un rayonnement thermique à 5800 K environ (maximum d'émission dans le jaune) :



L'allure de ce spectre (enregistré depuis la surface terrestre) diffère de celle du corps noir à cause de phénomène d'absorption (par la chromosphère et l'atmosphère notamment) ;

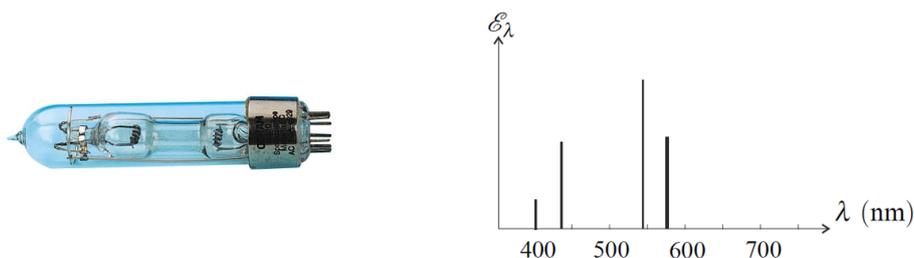
- Lampe à incandescence (filament de tungstène porté à 2700 K, maximum d'émission dans l'infrarouge) ;
- êtres vivants qui émettent dans l'infrarouge du fait de la température corporelle ;
- etc.

### ► Lampes spectrales

**Principe** : une ampoule contient un gaz constitué d'un corps pur simple, traversé par des décharges électriques régulières entre deux électrodes. Les atomes accèdent ainsi à des niveaux d'énergie supérieurs, puis se déséxcitent en revenant à un niveau d'énergie inférieur en émettant des photons dont l'énergie est égale à la différence d'énergie entre deux niveaux énergétiques de l'atome. Puisque les niveaux énergétiques d'un atome sont quantifiés (*c.à.d. que certaines valeurs d'énergie sont possibles, voir chapitre S5 - Introduction à la physique quantique*), et comme la fréquence optique  $f$  du photon émis vérifie :

$$\text{énergie du photon} = hf$$

où  $h$  est la constante de Planck, alors le gaz n'émet que certaines «couleurs». D'où un **spectre discret** (non continu).



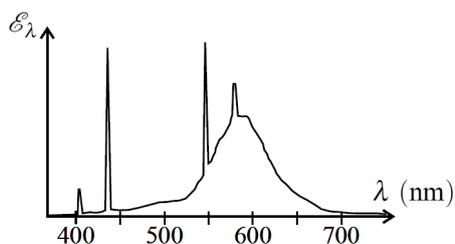
**Figure 2** – Ampoule d'une lampe à mercure et son spectre émettant les longueurs d'onde 404,7 nm (raie violette), 435,8 nm (raie indigo), 546,1 nm (raie verte), 577,0 nm et 579,1 nm (doublet jaune orangé)

Une lampe spectrale est caractérisée par un spectre de raies n'émet que quelques longueurs d'onde caractéristiques de l'élément chimique qu'elle contient.

Le spectre est alors **discontinu** et constitué de raies spectrales (**spectre de raies**).

La largeur des raies est typiquement d'environ 1 nm.

**Cas d'une lampe fluorescente** : le principe est le même que pour une lampe spectrale, mais le tube dans lequel est contenu l'ampoule est recouvert d'une substance fluorescente. Ainsi, les photons émis par l'ampoule spectrale sont en partie absorbés par la substance fluorescente, ce qui permet à celle-ci d'émettre un spectre continu (**spectre de fluorescence**).



**Figure 3** – Allure de l'éclairage spectral pour une lampe au mercure recouverte d'un film fluorescent

Il s'agit du principe de fonctionnement des lampes à économies d'énergie permettant de produire une lumière blanche avec un meilleur rendement énergétique qu'une lampe à filament (à rayonnement thermique).



## ► Le LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

Voir la vidéo suivante : [toutestquantique.fr/laser/](http://toutestquantique.fr/laser/)

**Principe** : succinctement, un photon peut déclencher une avalanche d'**émissions stimulées** de photons **identiques** dans une cavité permettant des réflexions successives (aller-retours) grâce à des miroirs. Cela implique de maintenir un nombre important d'atomes à l'état excité. Ce processus est coûteux en énergie mais permet d'avoir une raie spectrale très fine et un faisceau très peu divergent.

Le spectre d'un laser ne contient qu'une seule raie spectrale et de largeur très fine, de l'ordre de  $10^{-3}$  nm.



### ACTIVITÉ N°1

## B.2 Notions de source ponctuelle et de source étendue

Lorsque la taille caractéristique d'une source lumineuse est négligeable devant la taille caractéristique de l'expérience d'optique envisagée, on pourra considérer que cette source est **ponctuelle**.

**R** De même que si on lâchait une balle volley de 30 cm de diamètre depuis le sommet de la tour Eiffel (324 m de hauteur), la balle pourra être considérée ponctuelle, lors de cette expérience. (Par contre, il semblerait difficile de considérer cette même balle comme ponctuelle lorsqu'elle est utilisée «normalement», c'est-à-dire sur un terrain de volley...)

Ainsi **une source étendue est un ensemble de sources ponctuelles** : ses dimensions ne lui permettant pas d'être ramenée à un unique point.

Par ailleurs, une source (ponctuelle ou étendue) pourra être considérée **monochromatique** si on choisit un laser, ou bien une lampe spectrale associée à un filtre optique suffisamment sélectif afin que l'ensemble {lampe spectrale + filtre} n'émette qu'une seule raie.

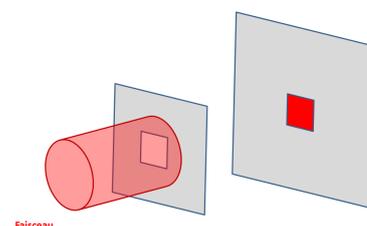
**R** Une lampe au sodium (très souvent employée au laboratoire en TP) émet dans le visible uniquement aux longueurs d'onde 589,0 nm et 589,6 nm. L'écart entre ces deux raies est tellement faible que très souvent, il sera suffisant de considérer que cette source est monochromatique émettant à la longueur d'onde moyenne 589,3 nm. Inutile donc dans ce cas de lui adjoindre un filtre ...

# C

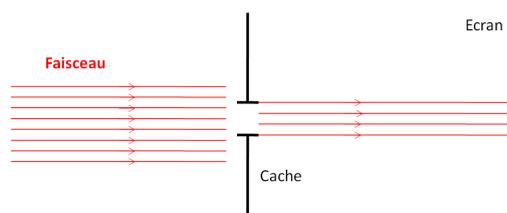
## Qu'est-ce que l'optique géométrique?

### C.1 Notion de rayon lumineux

Imaginons un faisceau laser passant à travers un cache muni d'une ouverture en forme de carré. La lumière est soit arrêtée par le cache, soit passe par l'ouverture :



On observe sur l'écran la formation d'une image, un carré rouge, dont on pourrait **imaginer** qu'elle s'est construite de la manière suivante :

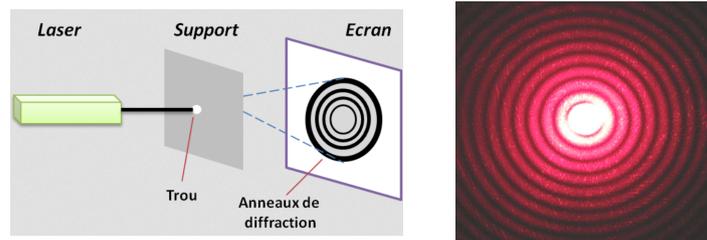


C'est-à-dire que pour décrire la propagation d'un faisceau de lumière, on peut raisonner géométriquement en termes de **rayon lumineux indépendants** : pour matérialiser la propagation d'une onde lumineuse, on représente des trajectoires fléchées indiquant le sens de propagation de la lumière.

Mais, attention, le fait de limiter la largeur d'un faisceau lumineux peut produire un **phénomène de diffraction** :

## Expérience

On dispose d'un laser de longueur d'onde  $\lambda$  et dont le faisceau a un diamètre de l'ordre de quelques millimètres. Limitons l'extension du faisceau à l'aide d'un diaphragme circulaire dont le diamètre est réglable.



Pour un diamètre suffisamment petit, on peut observer sur l'écran une figure de diffraction (au lieu d'un petit rond rouge !), et l'essentiel de l'énergie lumineuse semble se concentrer dans une tâche centrale.

On peut réitérer l'expérience mais cette fois avec une ouverture rectangulaire verticale très fine. Une figure de diffraction avec une tâche centrale très lumineuse (ci-contre) est également observée.

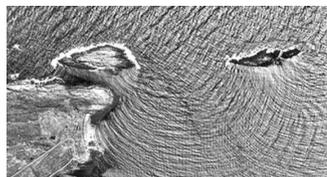


**Pour ces deux expériences, plus la taille caractéristique  $a$  de l'ouverture est petite devant la longueur d'onde  $\lambda$ , plus la tâche centrale est large.**

Ainsi, un rayon lumineux n'a aucune existence physique puisqu'il est impossible d'observer un rayon unique (en cherchant à l'isoler par une ouverture de plus en plus petite).

La notion de rayon lumineux correspond à un **modèle** qui permet de décrire correctement la formation des images observées, à condition que les phénomènes de diffraction soient négligeables, c'est-à-dire, à condition que la taille  $a$  de l'ouverture à travers laquelle passe la lumière soit très grande devant la longueur d'onde  $\lambda$  :  $a \gg \lambda$ .

**R** Le phénomène de diffraction peut être observé pour tout type d'onde (et pas seulement les ondes lumineuses). Dans tous les cas, la diffraction est d'autant moins perceptible que la taille de l'ouverture diffractante est grande devant la longueur d'onde. Et inversement. Par exemple :



— diffraction des vagues :

— ondes radio (ondes électromagnétique) pouvant être reçues malgré la présence d'obstacles (immeubles, collines, ...)

— ondes sonores : l'onde d'une voix d'homme correspond à une fréquence moyenne  $f = 125$  Hz, pour laquelle la longueur d'onde vaut :

$$\lambda = \frac{c_{\text{son}}}{f} = \frac{340}{125} = 2,7 \text{ m}$$

Ainsi, une porte de largeur  $a = 0,8$  m diffracte le son de la voix parlée car la condition  $a \gg \lambda$  n'est pas satisfaite. On peut donc entendre une personne parler dans une pièce voisine si la porte est ouverte.

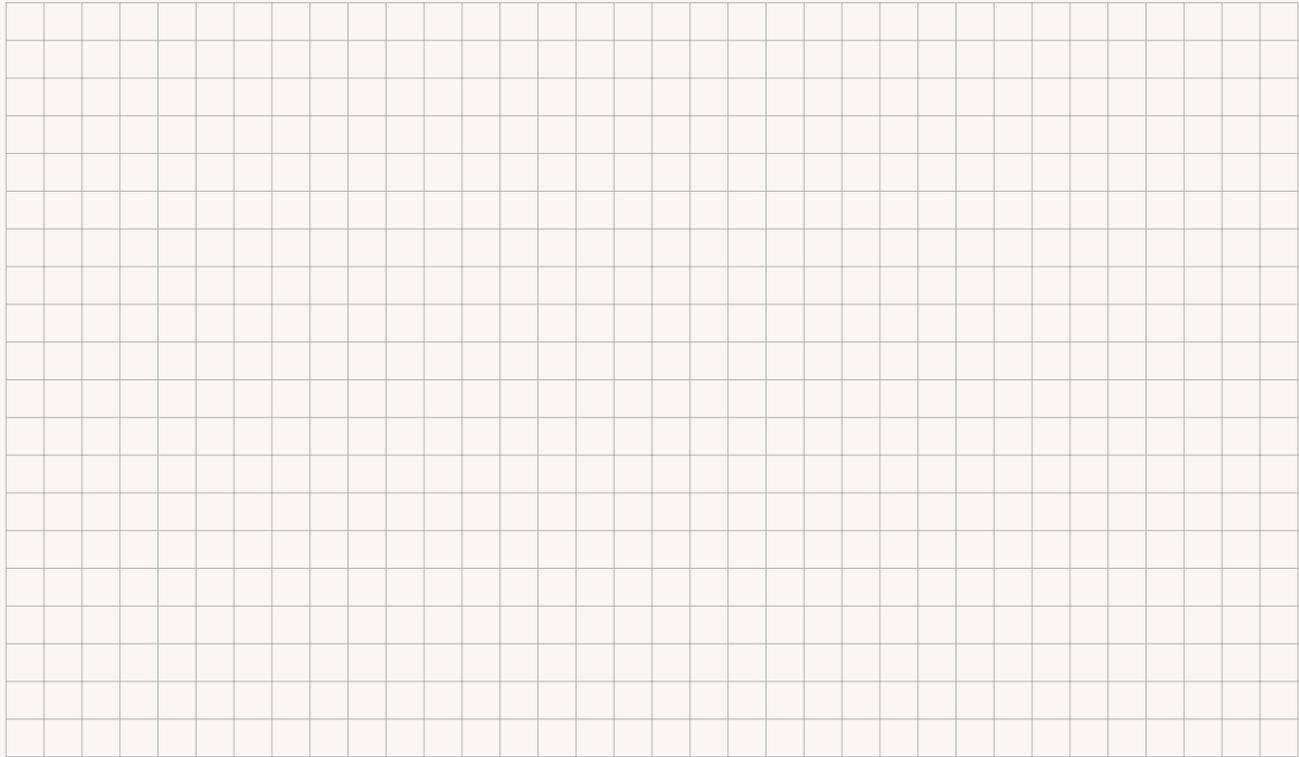
## C.2 Principes de l'optique géométrique

L'optique géométrique, applicable pour des milieux TLHI, repose sur les principes suivants :

- Pour décrire la marche d'un rayon lumineux, les phénomènes de diffraction doivent pouvoir être négligés.
- Dans un milieu TLHI, un rayon lumineux est un segment de droite (càd la lumière se propage en ligne droite).
- Le trajet d'un rayon lumineux est indépendant du trajet des autres rayons lumineux. Ainsi, si deux rayons lumineux se croisent, cela ne modifie pas leurs directions respectives.
- Le **principe du retour inverse** de la lumière est vérifié : si on inverse le sens de propagation de la lumière le long d'un rayon lumineux d'un point  $A$  vers un point  $B$ , la lumière suivra exactement le même chemin en sens opposé de  $B$  vers  $A$ .
- Les **lois de Snell-Descartes** sont applicables (voir paragraphe suivant).

## C.3 Lois de Snell-Descartes

### Définitions



#### ► Dioptré

Surface séparant deux milieux 1 et 2 d'indices optiques différents  $n_1$  et  $n_2$ .

#### ► Rayon incident

Rayon se propageant dans le milieu 1 et se dirigeant vers le dioptré.

#### ► Point d'incidence et normale au dioptré

Le rayon incident «frappe» le dioptré au niveau du *point d'incidence*  $I$ . La *normale au dioptré* est alors la droite orthogonale au dioptré et passant par  $I$ .

(R) Si le dioptré est courbe, la normale est la droite orthogonale au plan tangent en  $I$ .

#### ► Plan d'incidence

Le plan formé par le rayon incident et la normale au dioptré au point d'incidence est appelé le *plan d'incidence*.

(R) Dans le schéma ci-dessus, il s'agit du plan de la feuille.

#### ► Rayon réfléchi

Le rayon peut être partiellement ou totalement réfléchi. Le *rayon réfléchi* est issu de  $I$ , se propage dans le milieu 1 et s'éloigne du dioptré.

#### ► Rayon réfracté

Le rayon peut être partiellement transmis. Le rayon transmis, ou *rayon réfracté* est issu de  $I$  et se propage dans le milieu 2.

#### ► Angles d'incidence, de réflexion et de réfraction

**Angle d'incidence** : angle orienté de la normale vers le rayon incident, noté  $i_1$  ci-dessus.

**Angle de réflexion** : angle orienté de la normale vers le rayon réfléchi, noté  $r$  ci-dessus.

**Angle de réfraction** : angle orienté de la normale vers le rayon réfracté, noté  $i_2$  ci-dessus.

(R) Puisque ces angles sont orientés, ils possèdent chacun un signe qui pourra être déterminé par la convention choisie devant figurer sur le schéma.

(R) **NE PAS DIRE** «angle réfléchi» ou «angle réfracté» !!



