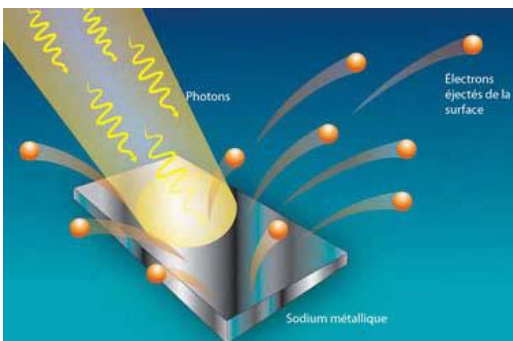


# OPTIQUE ET OPTOELECTRONIQUE



Par A. Mahroug



|  |           |
|--|-----------|
| <b>Chapitre I : Généralités.....</b>   | <b>2</b>  |
| <b>Chapitre II : Nature de la lumière : Explication physique du phénomène<br/>lumière.....</b> | <b>7</b>  |
| <b>Chapitre III : Propagation rectiligne de la lumière.....</b>                                | <b>15</b> |
| <b>Chapitre IV : Optique Géométrique.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>Chapitre V: Les Capteurs Photoélectriques.....</b>  | <b>34</b> |
| <b>Séries d'exercices ; Examen.....</b>  | <b>39</b> |

لا شيء يمكن أن يؤكد أهمية العلم في الإسلام مثل الحقيقة التالية" انه في مقابل 250 آية تشريعية في القرآن نجد 750 آية أي حوالي ثمن الكتاب تحت المؤمنين على دراسة الطبيعة و التدبير و توظيف العقل بأحسن طريقة ..... محمد عبد السلام – جائزة نوبل في الفيزياء-

يلوم الناس ظروفهم على ما هم فيه من حال.. ولكني لا أؤمن بالظروف فالناجحون في هذه الدنيا أناس بحثوا عن الظروف التي يريدونها فإذا لم يجدوها وضعوها بأنفسهم. كذلك الناجحون اناس يبحثون عن فرص مواتييه لتحقيق أهدافهم و إن لم يجدوها صنعوها.....برنارد شو

# Chapitre I : Généralités

## I.1. Analyse dimensionnelle

### I.1.1. Grandeur physique

Toute propriété de la matière qui peut être quantifiée par la mesure ou le calcul, s'exprime à l'aide d'un nombre et unité de mesure.

### I.1.2. Notion de dimension

La connaissance de la dimension d'une grandeur G renseigne sur sa nature physique

Une grandeur physique est caractérisée par une dimension. La dimension d'une grandeur correspond à sa nature physique, par exemple une longueur, un temps, une masse. C'est l'approche qualitative, qui répond à la question : « *qu'est ce que c'est ?* »

Si on demande « quelle est la dimension de L ? » il faut répondre « L a la dimension d'une longueur » et non « L est en mètres ».

### I.1.3. Unité

Grandeur de référence (valeur unitaire), constante, mesure les grandeurs physiques ayant la même propriété.

### Dimension $\neq$ unité

La dimension de la grandeur G est notée [G].

Ex : G est une masse ; alors [G]= M : M a la dimension d'une masse.

[G]= 1 : sans dimension (cas d'un angle)

### I.1.4. Système international (SI) ; MKSA :

Abréviation de mètre, kilogramme seconde et ampère

**I.1.5. Grandeurs fondamentales du système international d'unité :** il ya 7 grandeurs fondamentales

| <b>Grandeur physique</b>               | <b>Dimension</b>           | <b>Unité (symbole)</b> |
|--|----------------------------|------------------------|
| <b>Longueur</b>                        | <b>L</b>                   | <b>Mètre (m)</b>       |
| <b>Masse</b>                           | <b>M</b>                   | <b>Kilogramme (Kg)</b> |
| <b>Temps</b>                           | <b>T</b>                   | <b>Seconde (S)</b>     |
| <b>Intensité de courant électrique</b> | <b>I</b>                   | <b>Ampère (A)</b>      |
| <b>Intensité lumineuse</b>             | <b>J</b>                   | <b>Candela (Cd)</b>    |
| <b>Température</b>                     | <b><math>\theta</math></b> | <b>Kelvin (K)</b>      |
| <b>Quantité de matière</b>             | <b>N</b>                   | <b>Mole (mol)</b>      |

### **I.1.6. Unité dérivées**

Les sept unités de base du système international sont les « unités fondamentales » à partir desquelles sont obtenues par combinaison toutes les autres unités, dites unités dérivées.

**Exemple :** Vitesse  $[V]= L/T$ , unité m/s

Energie  $E_C= \frac{1}{2} mv^2$  :  $[E]= [m]. [v]^2= M.L^2.T^{-2}$  ; unité  $Kg.m^2.S^{-2}=Joule$ .

Fréquence  $[v]= 1/T$  ; unité  $1/S= hertz$

### **I.1.7. Unité usuelles (hors système) ; Exemples**

Masse ; 1tonne=  $10^3Kg$ , Surface : 1hectar =  $10^4m^2$ , Volume : Litre :  $1L= 10^{-3}m^3$  Temps : 1heure = 3600s, Energie : eV =  $1.6.10^{-19}J$ , Energie : Calorie 1Ca = 4.18J Longueur : Angstrom  $1\text{Å}= 10^{-10}m$ , Longueur : Pouce : 1P= 2.54cm

### I.1.8. Equations aux dimensions

Dans une relation entre grandeurs, on remplace chaque terme par sa dimension, L pour une longueur, M pour une masse, T pour un temps, ... On obtient ainsi l'équation aux dimensions.

### I.1.9. Règles sur l'équation aux dimensions

On ne peut additionner que des termes ayant la même dimension

- $[A.B] = [A] \cdot [B]$
- $[A^n] = [A]^n$
- La dimension d'une grandeur s'exprime en fonction des sept dimensions fondamentales

$$[G] = L^a \cdot M^b \cdot T^c \cdot I^d \cdot J^e \cdot \theta^f \cdot N^g \quad (\text{voir ci-dessous ; Grandeurs fondamentales})$$

### I.1.10. Analyse dimensionnelle : utilisation des dimensions

L'équation aux dimensions permet:

- ✓ De vérification de l'homogénéité d'une formule (les membres d'une égalité doivent avoir la même dimension).
- ✓ De déterminer l'unité composée d'une grandeur en fonction des grandeurs fondamentales.
- ✓ De rechercher de la forme d'une expression  $A = f(B,C) = B^a C^b$ , ou trouve la solution de certains problème sans avoir à résoudre l'équation.
- ✓ De faire des conversions d'unités (L'équation aux dimensions étant indépendante du système d'unités)

### Exemple

Exemple d'unité composée :

De la formule :  $y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$ , on tire la dimension de g :  $[g] = LT^{-2}$  ; accélération en  $m \cdot s^{-2}$ .

Homogénéité :

Des formules :  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h$ , on tire  $M \cdot (L \cdot T^{-1})^2 = M \cdot L \cdot T^{-2} \cdot L$

La dimension d'une énergie est donc :  $M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$

Conversion d'unités

Dans le Système International, la force s'exprime en newton

$[F] = MLT^{-2}$  doit être vérifiée dans tout système d'unités

1 newton =  $1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  et 1 dyne =  $1 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$  donc 1 newton =  $10^5$  dynes.

Forme d'une expression

Dans la loi :  $F = \alpha m v + \beta v^2$  où  $F$  est une force qui s'exprime en (N),  $m$  en (kg),  $v$  en (m/s). Donc  $\alpha$  en (1/s) et  $\beta$  en ( $\text{Kg.m}^{-1}$ ).

## I.2. QUELQUES DONNEES UTILES

### I.2.1. Quelques Constantes Physiques

| <i>Designation</i>                      | <i>Symbole</i>   | <i>Valeur</i>  |
|---|------------------|--|
| Charge élémentaire                      | e                | $1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$                      |
| Masse de l'électron<br>au repos         | $m_0$            | $9,1083 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$                     |
| Masse de proton                         | $m_p$            | $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1839 m_e$           |
| Masse de neutron                        | $m_n$            | $1,6747 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1842 m_e$          |
| Unité de masse atomique                 | UMA              | $1 \text{ UMA} = 1,6598 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$     |
| Electron- volt                          | eV               | $1\text{eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$         |
| Vitesse de la lumière                   | c                | $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$                |
| Vitesse du son dans l'air               | $v_{\text{son}}$ | $v_{\text{son}} = 331,36 \text{ m/s}$                  |
| Longueur d'onde X associée à 1 eV       | $\lambda_0$      | $\lambda_0 = 12,398 \text{ \AA}$                       |
| Equivalent masse-énergie                | $E = mc^2$       | $1\text{kg} = 5,6100 \cdot 10^{29} \text{ MeV}$        |
| Nombre d'Avogadro                       | N                | $N = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mole}^{-1}$            |
| Constante des gaz parfaits              | R                | $R = 8,31 \text{ J/ mol.K}^\circ$                      |
| Constante de gravitation<br>universelle | G                | $G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ |
| Constante de Planck                     | h                | $h = 6,626075 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$              |
| Constante de Boltzmann                  | $k = R/N$        | $1,3804 \text{ J/mole.K}^\circ$                        |
| Constante de Rydberg                    | R                | $R = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ kg.m}^{-1}$            |

### I.2.2. Lettres courantes de l'Alphabet Grec

| <i>lettres</i>        | <i>nom</i> | <i>lettres</i>      | <i>nom</i> |
|-----------------------|------------|---------------------|------------|
| A , $\alpha$          | alpha      | M , $\mu$           | mu         |
| B , $\beta$           | bêta       | N , $\nu$           | nu         |
| $\Gamma$ , $\gamma$   | gamma      | $\Pi$ , $\pi$       | pi         |
| $\Delta$ , $\delta$   | delta      | P , $\rho$          | rhô        |
| E , $\epsilon$        | epsilon    | $\Sigma$ , $\sigma$ | sigma      |
| H , $\eta$            | êta        | $\Phi$ , $\phi$     | phi        |
| $\Theta$ , $\theta$   | thêta      | $\Psi$ , $\psi$     | psi        |
| $\Lambda$ , $\lambda$ | lambda     | $\Omega$ , $\omega$ | oméga      |

### I.2.3. Multiples et sous-multiples de l'unité

| <i>multiples de l'unité</i> |         |           |                  | <i>sous-multiples de l'unité</i> |         |            |                      |
|-----------------------------|---------|-----------|------------------|----------------------------------|---------|------------|----------------------|
| préfixe                     | symbole | valeur    | Exemples         | préfixe                          | symbole | valeur     | Exemples             |
| déca                        | Da      | $10^1$    | Rarement utilisé | déci                             | d       | $10^{-1}$  | décibel. dB          |
| hecto                       | H       | $10^2$    | Rarement utilisé | centi                            | c       | $10^{-2}$  | centimètre. cm       |
| kilo                        | K       | $10^3$    | Kilogramme. Kg   | milli                            | m       | $10^{-3}$  | millimètre. mm       |
| méga                        | M       | $10^6$    | Mégawatt. MW     | micro                            | $\mu$   | $10^{-6}$  | microgramme. $\mu$ g |
| giga                        | G       | $10^9$    | Gigavolt. GV     | nano                             | n       | $10^{-9}$  | nanomètre. nm        |
| téra                        | T       | $10^{12}$ | Térahertz. THz   | pico                             | p       | $10^{-12}$ | picofarad. pF        |
| péta                        | P       | $10^{15}$ | Pétasecond. Ps   | femto                            | f       | $10^{-15}$ | femtomètre. fm       |
| exa                         | E       | $10^{18}$ | Exajoule. EJ     | atto                             | a       | $10^{-18}$ | Attocoulomb. aC      |

## **Chapitre II : Nature de la lumière**

### **Explication physique du phénomène lumière**

#### **II.1. Optique**

L'optique est l'étude des phénomènes lumineux, donc de tous les phénomènes qui se rapportent aux ondes électromagnétiques visibles.

#### **II.2. Lumière**

La lumière est l'ensemble des radiations visibles émises par les corps portés à haute température (incandescence) ou par des corps excités par divers formes d'énergie luminescence.

#### **II.3. Explication physique du phénomène lumière**

La lumière à été expliqué par diverses théories, les principales sont : la théorie ondulatoire, la théorie de l'émission (corpusculaire) et la théorie des ondes électromagnétiques.

##### **II.3.1. Théorie ondulatoire de la lumière**

###### **II.3.1.1. Notion d'onde**

Une onde est une perturbation qui se propage sans transfert de matière et il ya transfert d'énergie.

###### **Exemple**

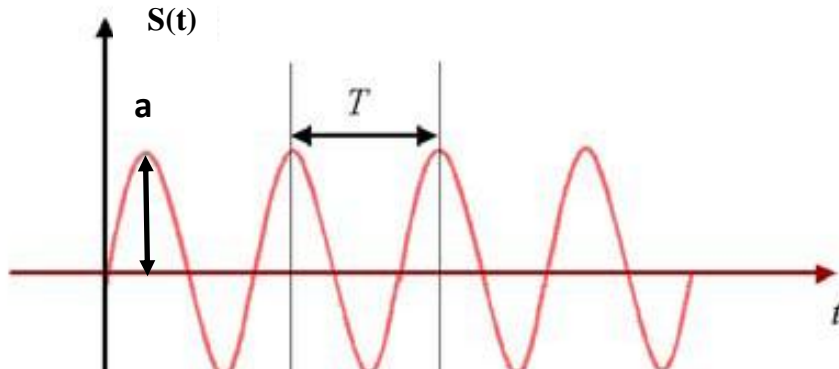
- Rides à la surface de l'eau
- Cordes vibrants
- Ondes lumineuses

L'onde se propage d'un endroit à un autre avec une vitesse de propagation  $V =$  constante.

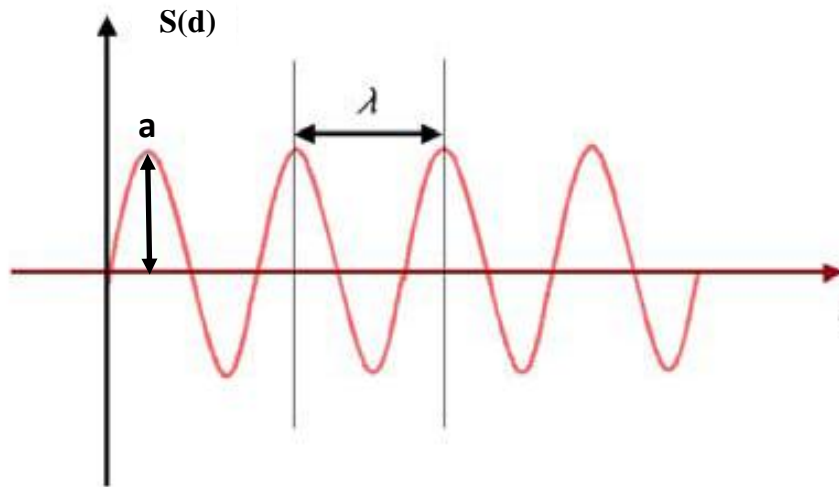


### II.3.1.2. Représentation d'une onde

L'onde la plus simple est l'onde sinusoïdale



Onde sinusoïdale en fonction du temps  $t$  à un point de distance  $d$ .



Onde sinusoïdale en fonction de la distance  $d$  du point à un instant  $t$ .

$a$ : amplitude.

$w$  : pulsation de la vibration.

$d$ : la distance parcourue par cette vibration du point d'émission au point considéré.

### II.3.1.3. caractérisation des ondes périodiques

- **Période T** : le temps au bout duquel le phénomène vibratoire se reproduit, est appelé période, son inverse  $\nu$  appelé **Fréquence** de la vibration (le nombre d'oscillations de l'onde par seconde).

$$T = 2\pi/\omega = 1/\nu$$

- **Longueur d'onde  $\lambda$**  : la distance au bout de laquelle le phénomène se reproduit est appelé longueur d'onde de la vibration (la distance parcourue pendant une période).

$$\lambda = V.T \quad : \nu \text{ est la vitesse de propagation}$$

### II.3.1.4. théorie ondulatoire de la lumière

Explique les phénomènes d'interférence et de diffraction de la lumière. Elle se pose que la lumière est un phénomène vibratoire périodique qui se propage dans le milieu considéré.

$$s(t) = a.\sin(\omega t + \varphi)$$

$$\lambda = v.T = v/\nu$$

### L'intensité lumineuse

Suite aux expériences sur les interférences lumineuses, il a été convenu de lier l'intensité lumineuse  $I$  d'une vibration au carré de son amplitude

$$I = \alpha.a^2$$

$\alpha$  étant une constante physique de proportionnalité.

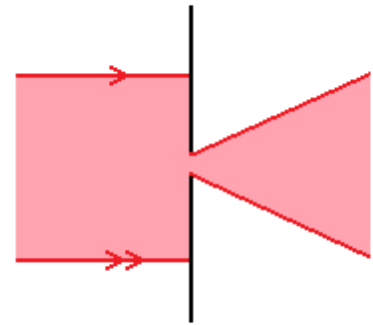
## a) Le phénomène de diffraction de la lumière

La lumière subit la diffraction quand elle rencontre une ouverture ou un obstacle de petite dimension. C'est à dire que la direction de propagation est modifiée par l'obstacle.

Le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué qu'il est plus faible.

La diffraction est caractéristique des ondes.

Donc **la lumière est une onde qui se propage.**



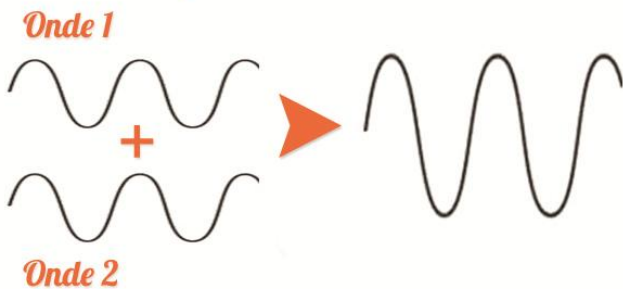
## b) Interférences lumineuses

Les phénomènes d'interférences résultent de la superposition de 2 ondes lumineuses. Ils ne peuvent se produire que lorsque les conditions suivantes sont réalisées :

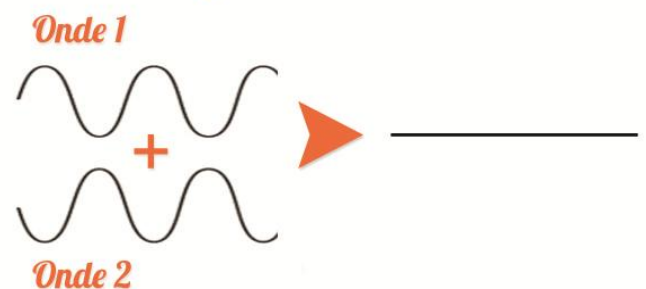
- Les ondes sont cohérentes,
- Elles ont même fréquence, et donc même longueur d'onde,
- Elles sont parallèles,
- Elles ont même amplitude, ou presque.

Selon les différences de marche entre les deux ondes, la lumière s'annule (interférence destructive) ou s'additionne (interférence constructive)

### *Interférence constructive*



### *Interférence destructive*



## II.3.2. Théorie de l'émission : Aspect corpusculaire de la lumière

Expérience de l'effet photoélectrique

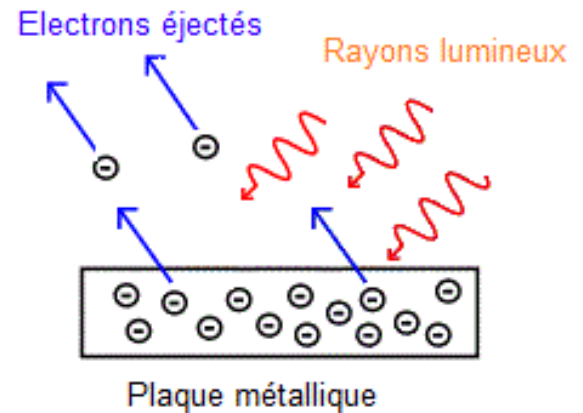
L'éclairage d'un corps (plaque métallique) par la lumière donne un courant électrique due aux électrons arrachés.

L'intensité du courant électrique dépend de la fréquence  $\nu$  de la lumière.

Les électrons arrachés absorbent une énergie transportée par des particules élémentaires, sans masse appelées

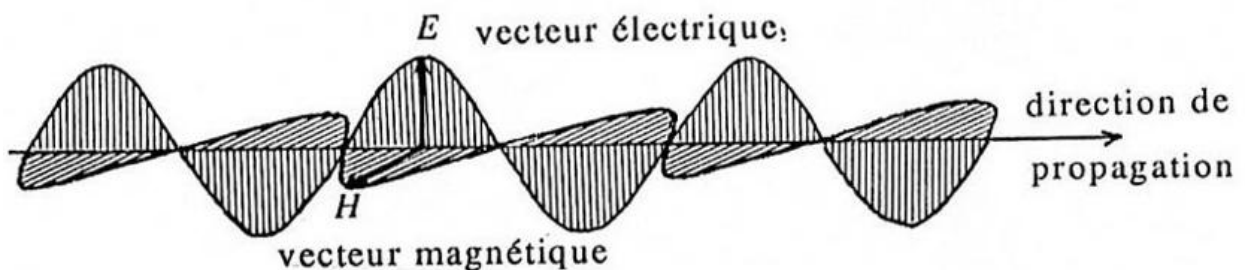
**photons** d'énergie :  $E = h\nu$

$h$  est appelée constante de Planck et vaut  $6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$



## II.3.3. Théorie des ondes électromagnétiques

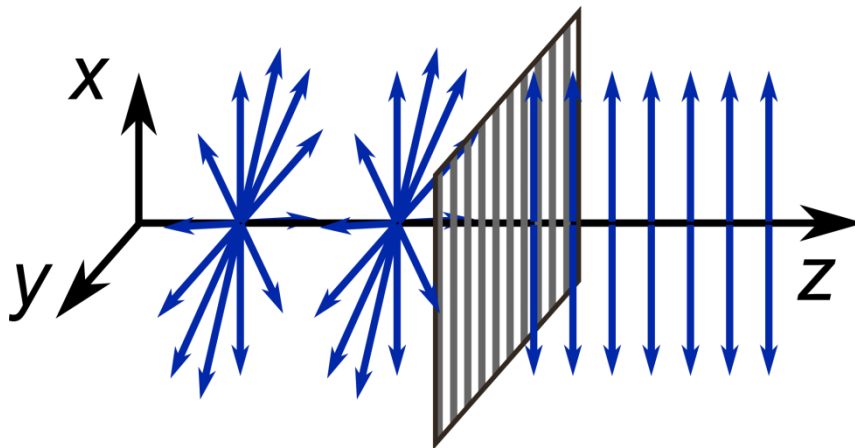
Onde électromagnétique OEM est constituée d'un champ électrique  $E$  et d'un champ magnétique  $B$  perpendiculaires à la direction de propagation qui varient périodiquement et se propagent.



## Polarisation de la lumière

Pour la lumière ordinaire, même monochromatique, les différentes ondes lumineuses ne sont pas émises en même temps. Elles oscillent de façon désordonnée, indépendamment les unes des autres. Les plans de polarisation des ondes sont distribués autour de l'axe de propagation avec une égale probabilité. Quand la lumière traverse un polariseur, le champ électrique ne peut plus vibrer que dans un plan orthogonal à la direction de propagation de l'onde.

### Application de la Polarisation de la lumière : cinéma et télévision 3D



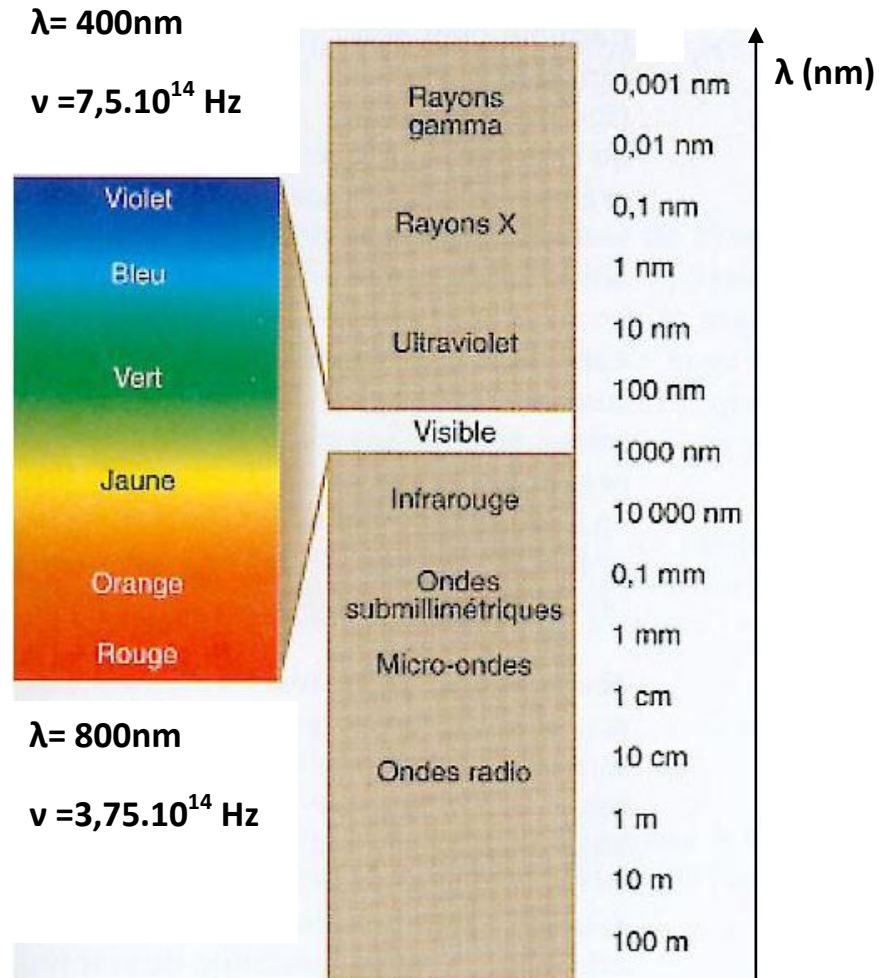
## II.4. Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie

La gamme des fréquences des ondes électromagnétique s'étale d'environ de  $10^{23}$  Hz à  $10^3$  Hz. L'œil humain n'est sensible qu'aux ondes électromagnétiques dont la fréquence est comprise entre  $3.75 \cdot 10^{14}$  Hz et  $7.5 \cdot 10^{14}$  Hz environ, appelé **Spectre visible**

## Spectre électromagnétique

Le spectre de la lumière visible n'occupe qu'une très petite partie du spectre électromagnétique.



## Phénomène des couleurs

Chaque fréquence de radiation du spectre visible caractérise une couleur et la combinaison de toutes les radiations donne une lumière blanche.

### Exemple :

**Rouge** :  $430 \times 10^{12}\text{ Hz}$  soit  $\lambda$  dans l'air =  $700 \times 10^{-6}\text{ mm}$

**Vert** :  $580 \times 10^{12}\text{ Hz}$  soit  $\lambda$  dans l'air =  $515 \times 10^{-6}\text{ mm}$

**Bleu** :  $640 \times 10^{12}\text{ Hz}$  soit  $\lambda$  dans l'air =  $470 \times 10^{-6}\text{ mm}$

## **Lumière monochromatique**

Onde électromagnétique de fréquence donnée (bien définie), par exemple lumière émise par laser.

## **Lumière polychromatique**

Lumière composée de plusieurs ondes monochromatiques de fréquences différentes (lumière blanche).

## **II.4. Sources et récepteurs de lumière**

La lumière est émise par la matière (source) et se manifeste par son action sur divers récepteurs

### **Sources**

On appelle source lumineuse tout corps qui émet de la lumière. On distingue les corps qui **produisent eux-mêmes la lumière** qu'ils émettent (soleil, lampes électrique, comme des sources primaires), et ceux qui **diffusent la lumière** qui les éclaire (lune, comme source secondaire).

### **Récepteurs**

- \* L'œil est évidemment un récepteur de lumière : il nous permet de voir.
- \* Capteur CCD de l'appareil photographique numérique : il permet d'enregistrer les informations transportées par la lumière.
- \* Papier photographique : une émulsion composée de gélatine, de chlorure et bromure d'argent réagit chimiquement lorsqu'elle est éclairée, et permet donc de fixer une image.
- \* Cellule photoélectrique : récepteur électrique dont les caractéristiques dépendent de la lumière reçue.
  - Cellule photovoltaïque : apparition d'une tension à l'éclairage
  - Photorésistor : modification de la résistance par l'éclairage

## Chapitre III

### Propagation rectiligne de la lumière

Depuis la plus haute antiquité l'on a considéré que la lumière issue d'une source ponctuelle et se propageant dans un milieu homogène et isotrope empruntait un trajet rectiligne passant par la source.

#### III.1. Expérience de la propagation rectiligne :

Le fait que la lumière se propage en ligne droite est facile à mettre en évidence au moyen d'expérience assez simple à réaliser.

#### Ombre et lumière

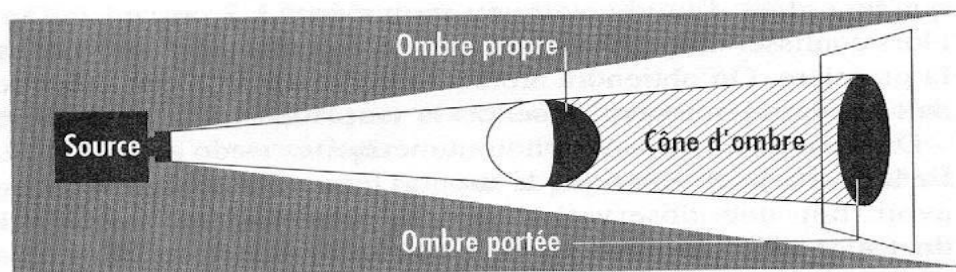
Eclairons un écran blanc à l'aide d'une source lumineuse très petite (source ponctuelle) et plaçons un objet entre la source et l'écran.

Une partie de l'objet est dans l'ombre : on parlera **d'ombre propre**.

Une partie de l'écran ne reçoit pas la lumière : on parlera **d'ombre portée**.

Une partie de l'espace entre l'objet et l'écran n'est traversée par aucun rayon lumineux venant de la source : on parlera de **cône d'ombre**.

Replaçons la source ponctuelle par une source plus grande (source étendue). Les bords de l'ombre portée deviennent flous. On passe progressivement de l'ombre totale à l'éclairage total. Cette zone de transition, dans laquelle seule une partie de la source envoie des rayons lumineux, s'appelle la zone de pénombre.



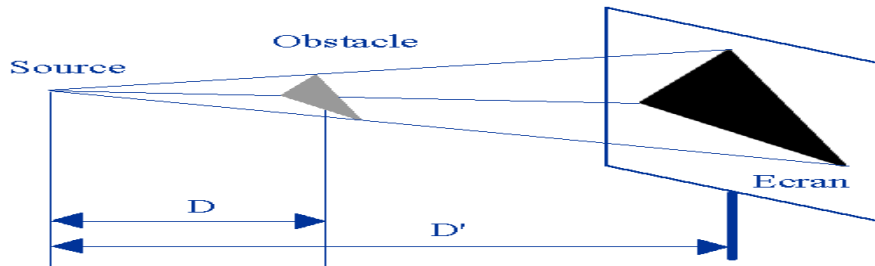
#### Expérience : ombre portée

Lorsque la source de lumière est de très petite dimension et que l'on interpose un obstacle entre elle et l'écran, on voit apparaître sur l'écran une ombre qui reproduit fidèlement la forme



de l'obstacle. La dimension de l'ombre portée varie lorsque l'on déplace soit l'obstacle soit l'écran.

Si  $D$  est la distance du trou 'source' à l'écran, les dimensions de l'ombre portée sont homothétiques à celles de l'obstacle dans l'homothétie dont le pôle est les trous source et dont le rapport vaut  $D'/D$ .



### III.2. Définitions

**Milieu transparent** : est un milieu se laisse traverser par la lumière. (le contraire de transparent est opaque.)

**Milieu homogène** : est un milieu dont la composition (propriétés optiques) est la même en tous points de celui-ci.

**Milieu isotrope** : est un milieu dont les propriétés sont les mêmes dans toutes les directions. L'homogénéité du milieu n'entraîne pas automatiquement son isotrope.

### III.3. Principe de propagation rectiligne de la lumière

« Dans un milieu homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite »

La trajectoire de la lumière constitue **un rayon lumineux**.

Un ensemble **peu** étendu de rayons lumineux constitue un **pinceau lumineux**.

Un ensemble **plus** étendu de rayons lumineux constitue un **faisceau lumineux**.

Le pinceau (ou le faisceau) est dit **convergent** si tous les rayons se dirigent vers un point, **divergent** si tous les rayons sont issus du même point, **parallèle** si tous les rayons sont parallèles entre eux.

Principe d'indépendance des rayons lumineux : deux rayons lumineux se rencontrant, n'interagissent pas (un rayon lumineux ne peut être pas dévié par un autre rayon lumineux).

### **Application de la propagation rectiligne : alignements**

#### **III.4. limites de validité de la propagation rectiligne :**

Lorsqu'un faisceau lumineux rencontre un obstacle ou passe par un ouverture (fente, trou), il est diffracté (déviation du trajet de la lumière) L'expérience montre que la diffraction s'observe lorsque la dimension de la fente ou l'obstacle **D** est de l'ordre de la longueur d'onde du faisceau lumineux.

#### **III.5. Milieux de propagation**

Entre la source lumineuse et le récepteur, la lumière se propage dans le vide et dans les milieux matériels transparents.

##### **III.5.1. la célérité (vitesse) et la longueur d'onde de la lumière dans le vide**

Dans le vide, la lumière se propage avec une vitesse constante

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$c$  est la célérité des ondes électromagnétiques (EM) dans le vide.

##### **Longueur d'onde dans le vide**

Pour une lumière monochromatique se propageant dans le vide, la longueur d'onde  $\lambda_0$  correspondante est appelée **longueur d'onde dans le vide**. Elle est liée à la période  $T$  et à la fréquence  $\nu$  par les relations :  $\lambda_0 = c \cdot T = c/\nu$

##### **III.5.2. la célérité (vitesse) et la longueur d'onde de la lumière dans un milieu matériel transparent :**

La célérité  $v$  des ondes lumineuse dans un milieu matériel transparent, homogène et isotrope est toujours inférieure à leur célérité  $C$  dans le vide.

## Indice de réfraction

On définit l'indice de réfraction noté  $n$  d'un milieu transparent est le rapport entre la célérité  $c$  de la lumière dans le vide et la célérité  $v$  de la lumière dans le milieu considéré :

$$n = c / v \quad \text{grandeur sans unité } (n > 1).$$

$$v = c / n$$

## Longueur d'onde

La longueur d'onde s'écrit  $\lambda = v \cdot T = v / \nu = c \cdot T / n = \lambda_0 / n$

Une onde lumineuse monochromatique est caractérisée par sa fréquence  $\nu$  (ou sa période  $T$ ). La période (ou la fréquence et donc la couleur) d'une onde lumineuse monochromatique ne dépend pas du milieu de propagation: elle ne dépend que de la source de l'onde lumineuse.

Par contre la longueur d'onde  $\lambda$  d'une onde lumineuse donnée, dépend du milieu de propagation (car  $\lambda = v \cdot T = v / \nu$ ) avec  $v$  dépendant du milieu).

**Remarque** : deux milieux  $n_1$  et  $n_2$  :  $n_1/n_2 = v_2/v_1 = \lambda_2/\lambda_1$ .

| Indices de réfraction de quelques milieux transparents |                    |                       |         |         |         |
|--|--------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| milieu   | vide               | air                   | eau     | verre   | diamant |
| indice   | 1                  | 1,0003<br>$\approx 1$ | 1,33    | 1.5     | 2.42    |
| $V$ (Km. s <sup>-1</sup> )                             | $c = 3 \cdot 10^5$ | $\approx c$           | 225 000 | 200 000 | 125 000 |

| Longueur d'onde dans différents milieux transparents |                              |                                  |                            |                            |  |
|--|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| milieu   | vide                         | air                              | eau                        | verre                      |  |
| Radiation rouge                                      | $\lambda_0 = 656 \text{ nm}$ | $\lambda \approx 656 \text{ nm}$ | $\lambda = 493 \text{ nm}$ | $\lambda = 437 \text{ nm}$ |  |
| Radiation verte                                      | $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ | $\lambda \approx 550 \text{ nm}$ | $\lambda = 413 \text{ nm}$ | $\lambda = 367 \text{ nm}$ |  |
| Radiation bleue                                      | $\lambda_0 = 480 \text{ nm}$ | $\lambda \approx 480 \text{ nm}$ | $\lambda = 361 \text{ nm}$ | $\lambda = 320 \text{ nm}$ |  |

# Chapitre IV

## Optique Géométrique

### IV .1. Définition

L'optique géométrique est l'étude des propriétés de la lumière en faisant abstraction de sa nature (ondulatoire ou corpusculaire). Elle est fondée uniquement sur les principes de géométrie.

En optique géométrique, on est placé dans des conditions telles que les dimensions des diaphragmes et des lentilles utilisés dans les appareils optiques, sont grands devant la longueur d'onde :  $D \gg \lambda$ . La diffraction est alors négligeable et la loi de propagation rectiligne de la lumière s'applique. Après avoir introduit la notion de rayon lumineux, nous avons rencontré les deux premières lois de l'optique géométrique : la propagation rectiligne de la lumière et la loi du retour inverse.

### IV .2. Principe de Fermat

Principe : Proposition jamais démontrée mais toujours vérifiée par l'expérience.

#### Principe de Fermat :

Si un trajet AB reliant deux points A et B est effectivement suivi par la lumière pour aller du point A au point B, alors le chemin optique  $L(AB)$  sur ce trajet est extrémal, en pratique minimal, par rapport à tout autre trajet, même infiniment voisin.



Pour aller du point A au point B, la lumière emprunte donc le trajet prenant le moins de temps.

**Conséquence :** dans un milieu homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite.

### IV .3. Loi du retour inverse de la lumière

#### 1. Enoncé

Lorsqu'un rayon lumineux peut cheminer d'un point A à un point B, alors un rayon lumineux peut aussi cheminer du point B au point A en suivant le même trajet en sens inverse.

**2. Remarque** La loi de propagation rectiligne de la lumière est, de façon manifeste, compatible avec la loi du retour inverse.

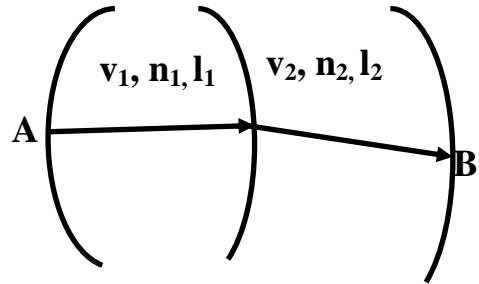
#### IV .4.Chemin optique

On considère 2 milieux homogènes et isotropes d'indice de réfraction  $n_1, n_2$  de longueurs  $l_1, l_2$  entre deux points A et B.

Pour aller de A vers B le temps mis par la lumière :

$$t = t_1 + t_2 = l_1/v_1 + l_2/v_2$$

$$L = ct = c.l_1/v_1 + c.l_2/v_2 = n_1.l_1 + n_2.l_2$$



$L$  : chemin optique, c'est la distance équivalente parcourue par la lumière dans le vide pendant le même temps  $t = t_1 + t_2$

La longueur parcourue dans le vide est  $L(AB) = n_1 l_1 + n_2 l_2$  alors que dans le milieu la longueur réellement parcourue est  $l_1 + l_2$ .

#### Chemin Optique - cas général

Pour une succession de  $N-1$  dioptres séparant  $N$  milieux homogènes et isotropes d'indice optique  $n_i$ , selon les longueurs géométriques  $l_i$ , le chemin optique total pour aller de A à B s'écrit

$$L = c.t_{AB} = \sum_{i=1}^N n_i l_i$$

Pour une infinité de milieux homogènes et isotropes, on passe à l'intégrale

$$\text{continue : } L = c.t_{AB} = \int_A^B n(l) dl$$

où  $n(l)$  est l'indice optique du milieu correspondant à la longueur géométrique  $l$ . Cette relation est applicable au cas des milieux inhomogènes.

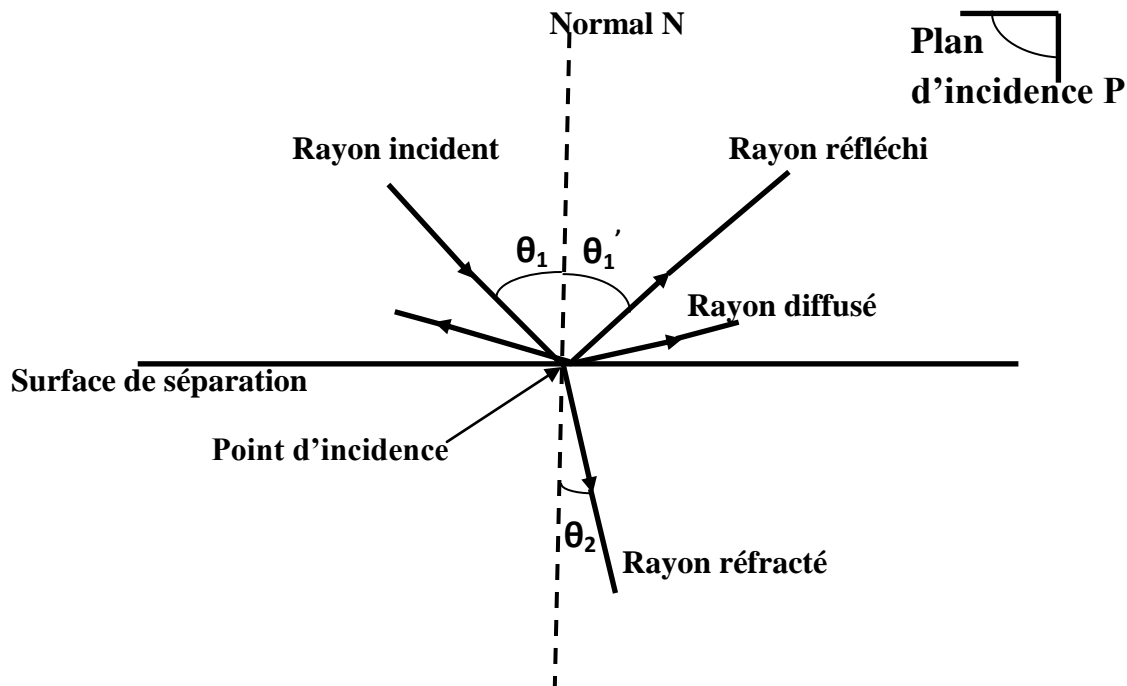
#### IV .5. Réflexion de la lumière

##### IV .5.1. Définition

**Dioptre** : on appelle dioptre toute surface séparant deux milieux transparents, caractérisés par des indices de réfraction constants et différents.

Lorsqu'un faisceau lumineux parallèle arrive à la surface de séparation de deux milieux :  
on observe :

- La lumière est renvoyée dans toutes les directions (diffusion), la surface n'est pas polie « réflexion irrégulière »
- La lumière est renvoyée dans une seule direction (réflexion) ; la surface est bien polie (réflexion régulière)
- La lumière pénètre dans le deuxième milieu ; réfraction (milieu transparent).



#### IV .5.2. Lois de la réflexion : lois de Snell- Descartes

- Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale à la surface de séparation (miroir) au point d'incidence sont contenus dans un même plan.
- L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence :  $\theta_1 = \theta_1'$

#### IV .5.3. Miroir plan :

Est une surface plane polie, réfléchissante.

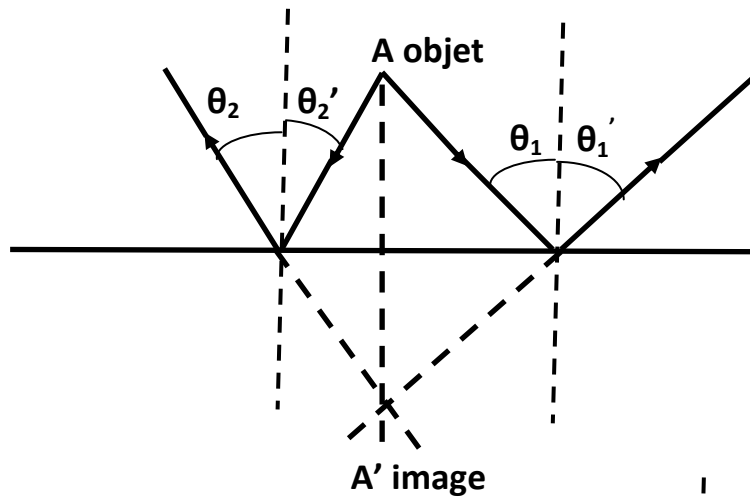
**Objet :** Intersection des rayons incidents ; objet réel (ou de leur prolongement ; objet virtuel).

**Image :** Intersection des rayons émergents (ou de leur prolongement ; image virtuelle).

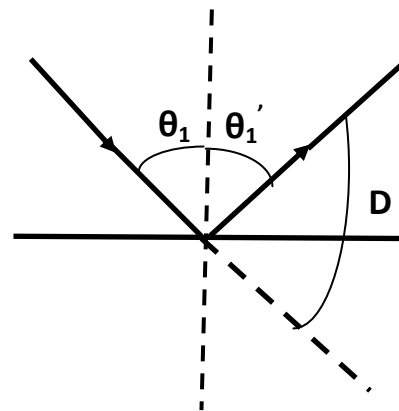
## Image donnée par un miroir plan

C'est une image virtuelle, symétrique par rapport au miroir. Rayons réfléchis semble venir de  $A'$  :  $OA = OA'$

à travers le miroir  $A'$  : image virtuelle



## Déviati on par un miroir

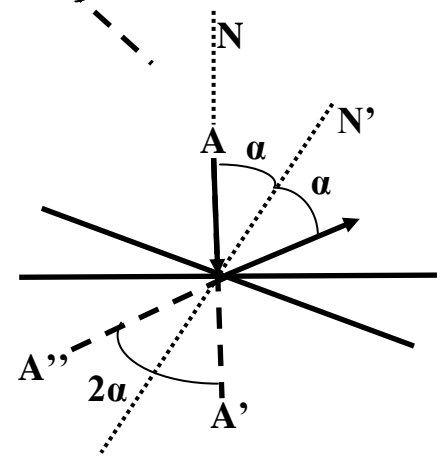


$$D = \pi - 2\theta$$

## Rotation d'un miroir

Lorsqu'un miroir tourne d'un angle  $\alpha$  autour de l'un de ses points, les images des objets, à travers ce miroir, subissent une rotation, par rapport

à ce point, d'un angle égale  $2\alpha$  (utilisé pour mesure les faibles angles ; multiple)



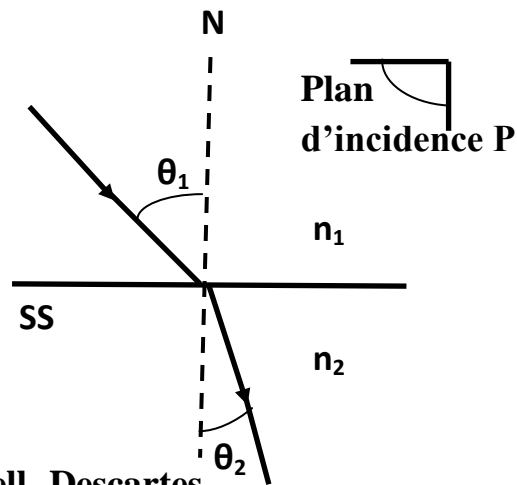
## IV .6. Réfraction de la lumière

### IV .6.1. Définition

Il y a réfraction de la lumière quand la lumière rencontre la surface de séparation entre deux milieux transparents différents (dioptre).

Réfraction c'est-à-dire changement de la direction de rayon lumineux.

Déviation :  $\theta_1 - \theta_2$



### IV .6.2. Lois de la réfraction : lois de Snell- Descartes

- Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence
- $n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$

#### Indice de réfraction relatif de deux milieux

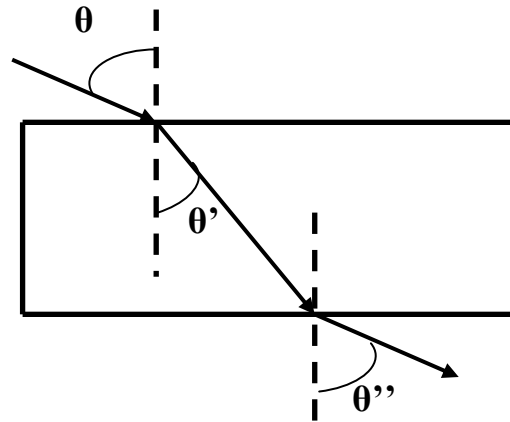
$$n_r = n_2/n_1 = v_1/v_2 = \lambda_1/\lambda_2$$

#### On distingue :

- $n_1 < n_2$  :  $\sin \theta_2 < \sin \theta_1$ ;  $\theta_2 < \theta_1$  : le rayon se rapproché de la normale.
- $n_1 > n_2$  :  $\sin \theta_2 > \sin \theta_1$ ;  $\theta_2 > \theta_1$  : le rayon s'éloigne de la normale.
- $n_1 = n_2$  :  $\sin \theta_2 = \sin \theta_1$ ;  $\theta_2 = \theta_1$  : le rayon ne dévie pas.



### IV .6.3 lame à faces parallèles

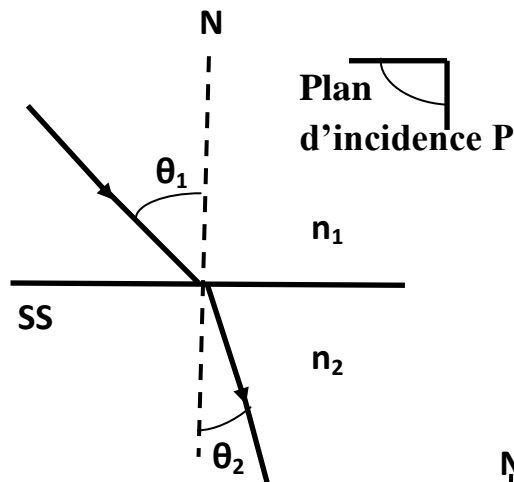


$$1.\sin \theta = n.\sin \theta'$$

$$n.\sin \theta' = 1.\sin \theta''$$

$$\theta = \theta''$$

### IV .6.4. Angles limite



a)  $n_2 > n_1 : \theta_2 < \theta_1$

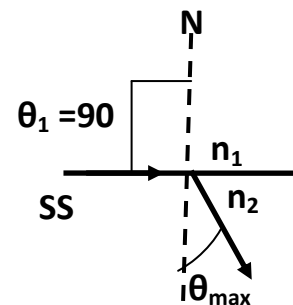
Quand  $\theta_1$  varie entre 0 et  $90^\circ$

$\theta_2$  varie entre 0 et un angle  $\theta_{\max} < 90^\circ$

$$n_1 \sin 90 = n_2 \sin \theta_{\max} \text{ donc } \theta_{\max} = \text{Arcsin}(n_1/n_2)$$

il y a toujours réfraction.

b)  $n_2 < n_1 : \theta_2 > \theta_1$

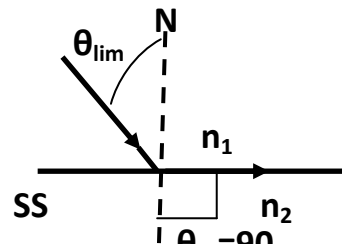


or la valeur limite de  $\theta_2$  est de  $90^\circ$  obtenue pour une certaine valeur de  $\theta_1$  noté  $\theta_{\text{lim}}$ .

Si on dépasse cette valeur, le rayon réfracté n'est plus apparent, il n'y a plus de réfraction (il est réfléchi), c'est la **réflexion totale**.

### Angle limite de réfraction :

C'est la valeur de l'angle d'incidence  $\theta_{\text{lim}}$  qui correspond à une émergence (réfraction) rasante c'est-à-dire  $\theta_2 = 90^\circ$ . Au delà de l'angle limite, la lumière ne peut changer de milieu, mais réflexion totale.



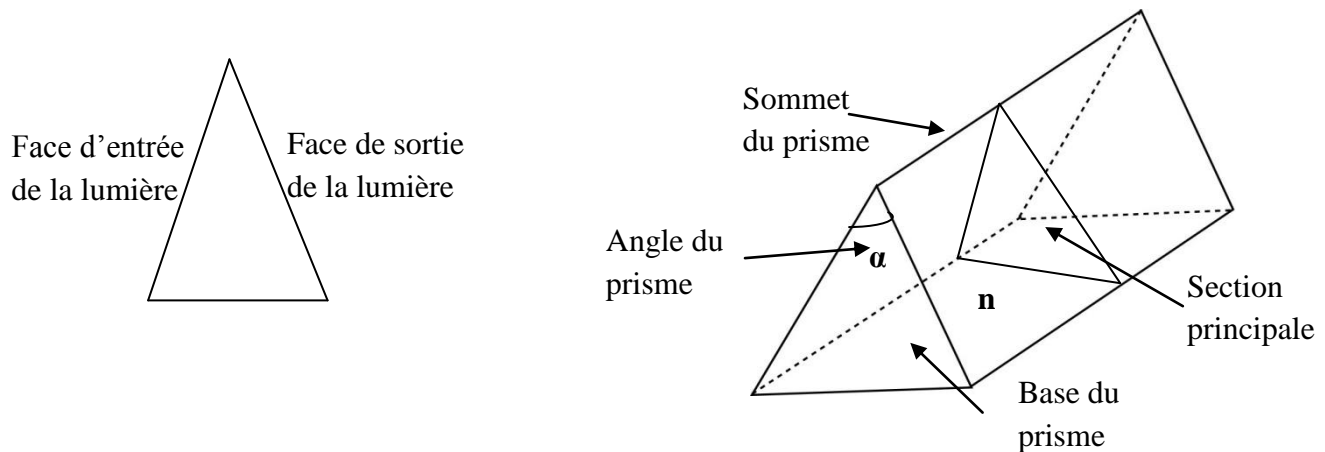
$$n_1 \sin \theta_{\text{lim}} = n_2 \sin 90 \text{ donc : } \theta_{\text{lim}} = \text{Arcsin} (n_2/n_1)$$

## IV .7. Dispersion de la lumière

### IV .7.1. Mécanisme de déviation

Lorsque la lumière travers un prisme, rencontre deux surfaces de séparation (dioptré, il ya donc deux réfractiions

**Prisme :** un prisme est un milieu homogène, transparent ( $n$ ) limité par trois dioptrés plans non parallèles.



### IV .7.2. Mécanisme de dispersion

Si on envoie un faisceau sur la surface (d'entrée) d'un prisme on observe :

- la lumière est déviée par le prisme.
- Présente les différentes couleurs (de rouge vers violette), c'est le spectre de la lumière blanche (polychromatique).
- La lumière rouge est moins déviée que la lumière violette.

**C'est le phénomène de dispersion de la lumière.**

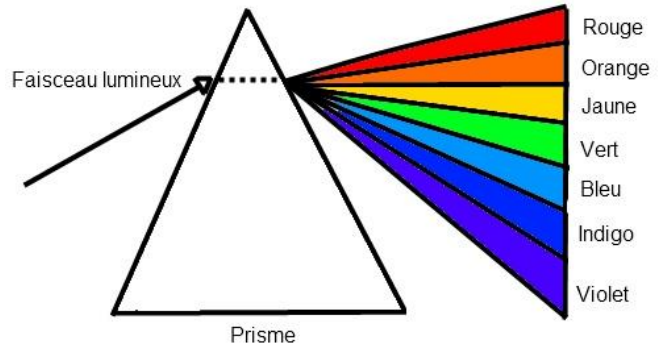
### Interprétation Physique : indice de réfraction

Indice de réfraction  $n$  d'un milieu transparent dépend de la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière dans le vide (ou la fréquence) «  $n$  augmente lorsque  $\lambda$  diminue ».

$n_{\text{rouge}} < n_{\text{violet}} : \theta_{\text{rouge}} < \theta_{\text{violet}}$ , donc le violet est plus dévié que le rouge

## Exemple

|       |                            |                           |
|-------|----------------------------|---------------------------|
| Verre | $n_{\text{rouge}} = 1.510$ | $n_{\text{bleu}} = 1.520$ |
| Eau   | $n_{\text{rouge}} = 1.330$ | $n_{\text{bleu}} = 1.336$ |



En général l'indice de réfraction est donné par une loi empirique

$$n = a + b/\lambda^2 + d/\lambda^4$$

a, b et d, sont des constantes dépendent du milieu.

A travers d'un prisme, l'angle d'incidence sur la surface d'entrée est le même pour toutes les radiations, mais les angles de réfraction sont différents.

La deuxième réfraction (surface de sortie) sépare encore plus les radiations.

A chaque couleur correspond une longueur d'onde  $\lambda$  dans le vide (ou fréquence).

La lumière blanche est décomposée par le prisme (rouge----violet)

Le prisme est milieu dispersif

Lumière monochromatique (laser rouge par exemple) ne contient qu'une seule longueur d'onde  $\lambda$ , ne peut être décomposée par le prisme, mais elle est déviée (réfraction 1 et 2).

### IV .7.3. Marche d'un rayon lumineux à travers un prisme

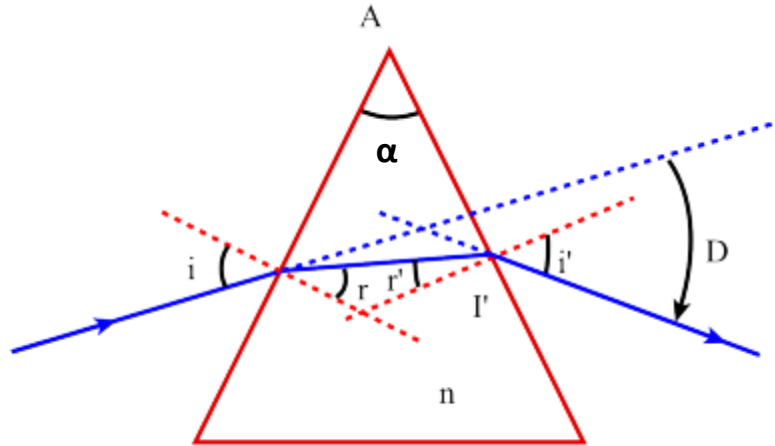
Soit un rayon incident sur la surface d'entrée d'un prisme dans l'air.

#### Lois de réfraction

$$\sin(i) = n \cdot \sin(r)$$

$$n \cdot \sin(r') = \sin(i')$$

$$i' = \text{Arcsin}(\sqrt{(n^2 - \sin^2 i)} \cdot \sin \alpha - \cos \alpha \cdot \sin(i)) \quad (\text{calcul triangulaire})$$



#### Deviation totale

$$D = (i - r) + (i' - r') = i + i' - (r + r') = i + i' - \alpha \quad : (r + r' = \alpha)$$

#### Condition d'émergence :

$$r' \leq r'_{\text{lim}} \text{ donc } : \alpha - r \leq r'_{\text{lim}}$$

$$\sin(i) \geq n \sin(\alpha - r'_{\text{lim}})$$

$$i_{\text{lim}} = \text{Arcsin}(n \cdot \sin(\alpha - r'_{\text{lim}})) \dots \dots \dots (1)$$

C'est la valeur minimale de i (incident), pour il ya un rayon émergent.

$$D' \text{ autre part } : \sin(i) \leq 1 \text{ donc } : \sin(\alpha - r'_{\text{lim}}) \leq 1/n \text{ avec } (1/n = \sin r'_{\text{lim}}) ;$$

$$\alpha \leq 2 r'_{\text{lim}} \dots \dots \dots (2)$$

(1) et (2) sont les conditions d'émergence.

**Conclusion**

$\alpha \geq 2 r'_{\text{lim}}$  : réflexion totale sur la surface de sortie (2)

$\alpha \leq 2 r'_{\text{lim}}$  : il ya emergence que :  $i \geq i_{\text{lim}}$

**IV .7.4. Cas particulier : prisme fin**

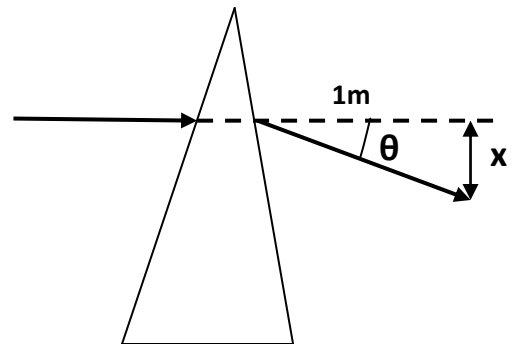
Les angles  $\alpha$ ,  $i$ ,  $r$ ,  $r'$ ,  $i'$  et la déviation totale  $D$  sont faibles

$$i = n.r, i' = n.r', D = n(r+r')-\alpha = (n-1)\alpha \quad : (r+r' = \alpha)$$

**IV .7.5. Puissance prismatique:**

La puissance prismatique s'exprime en dioptrie prismatique (notée  $\Delta$  ou cm/m).

Un prisme de **1.00D** (1.00 cm/m) est un prisme qui déplace les images d'une distance  $x = 1$  cm, pour des objets placés à une distance  $D = 1$  mètre.



$$P = 100 \text{tg}\theta = 100. x/1$$

**IV .7.6. Déviation minimale :**

$$D = i + i' - \alpha$$

$$D_{\text{min}} \text{ c'est à dire } dD/di = 0 : i_1 = i_2' = i_{\text{min}}$$

$$D_{\text{min}} = 2i_{\text{min}} - \alpha ; i_{\text{min}} = (D_{\text{min}} + \alpha)/2$$

$$\text{Aussi : } r_{\text{min}} = r'_{\text{min}} = \alpha/2.$$

**Indice de réfraction**

$$\text{On a } \sin (D_{\text{min}} + \alpha)/2) = n. \sin (\alpha/2)$$

Donc  $n = \sin(D_{\min} + \alpha)/2 / \sin(\alpha/2)$ .

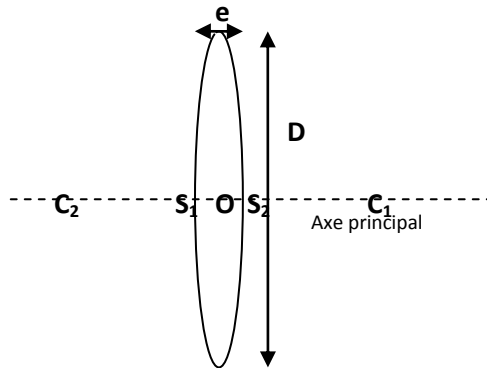
## IV .7. Lentilles minces

### IV .7.1. Définition

Une lentille est un milieu transparent limité par deux surfaces sphériques. L'une de ces surfaces peut être plane.

Une lentille sphérique est dite mince, lorsque son épaisseur  $e$  est faible devant son diamètre  $D$ .

#### Caractéristiques d'une lentille



$D$  : diamètre,  $e = S_1S_2$  : épaisseur

$O$  : centre optique,  $C_1$  : centre de courbure 1,  $C_2$  : centre de courbure 2

$R_1 = S_1C_1$  : rayon de courbure 1

$R_2 = S_2C_2$  : rayon de courbure 2

### IV .7.2. Différents types de lentilles

#### a) lentilles à bords minces



biconvexe



plan convexe

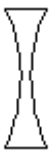


ménisque convergent



symbole

#### b) lentilles à bords épais



biconcave



plan concave

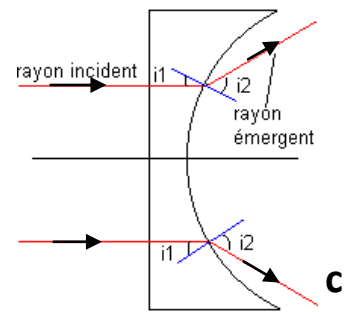
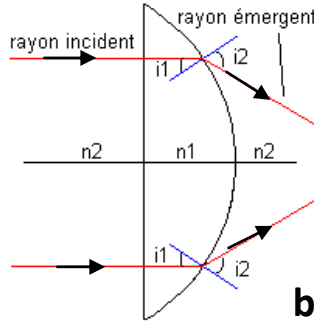
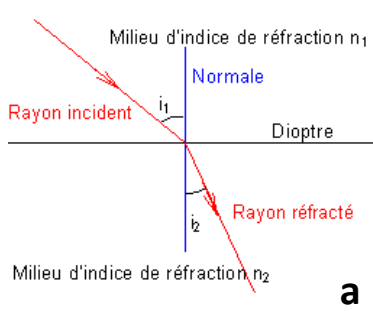


ménisque divergent



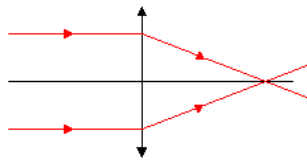
symbole

### IV .7.3. Déviation d'un faisceau lumineux : loi de réfraction

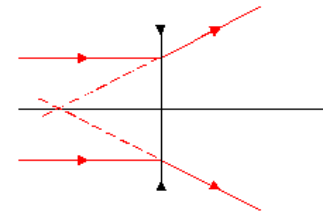


Lentilles à bords minces :  
lentilles convergentes.

Lentilles à bords épais: lentilles  
divergentes



Lentille convergente



Lentille divergente

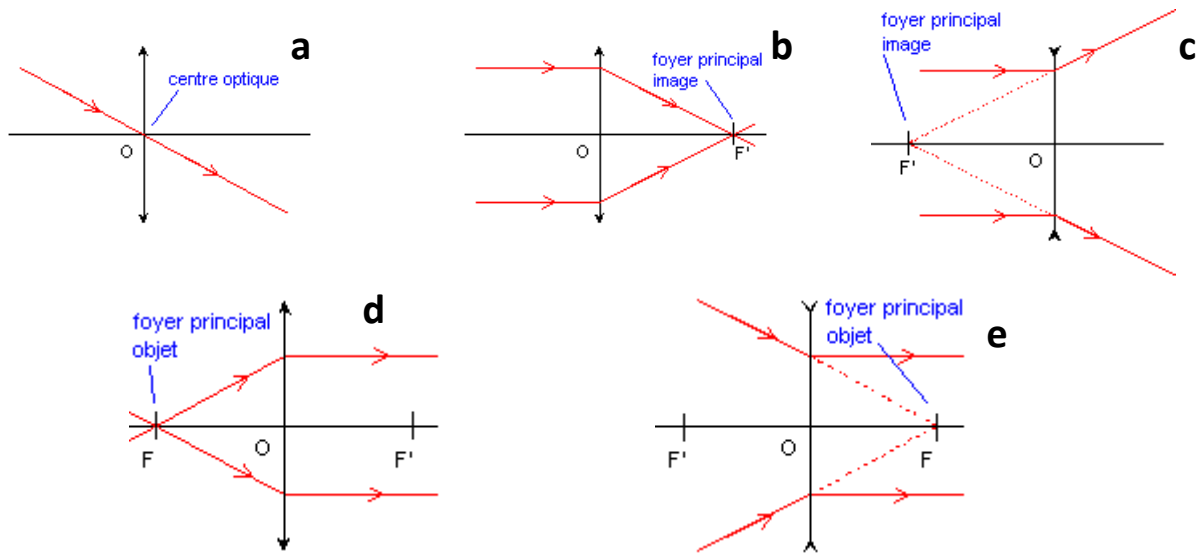
### IV .7.4. Foyers de la lentille

#### a) foyer objet principal

Un point de l'axe principal de la lentille, noté F dont l'image est l'infini.

#### b) Foyer image principal

C'est l'image, noté F' d'un point de l'axe principal de la lentille, situé à l'infini



#### IV .7.5.Distance focale de la lentille

Distance qui sépare le foyer objet F ou foyer image F' de la lentille de son centre optique

0, on la note  $f$  ( $f'$ ) :  $f = OF$ ,  $f' = OF'$

Suivant la direction de propagation :

$f' > 0$  : lentille convergente.

$f' < 0$  : lentille divergente.

#### IV .7.6. Vergence d'une lentille

On appelle vergence d'une lentille de distance focale  $f$  la grandeur  $C$  tel que:

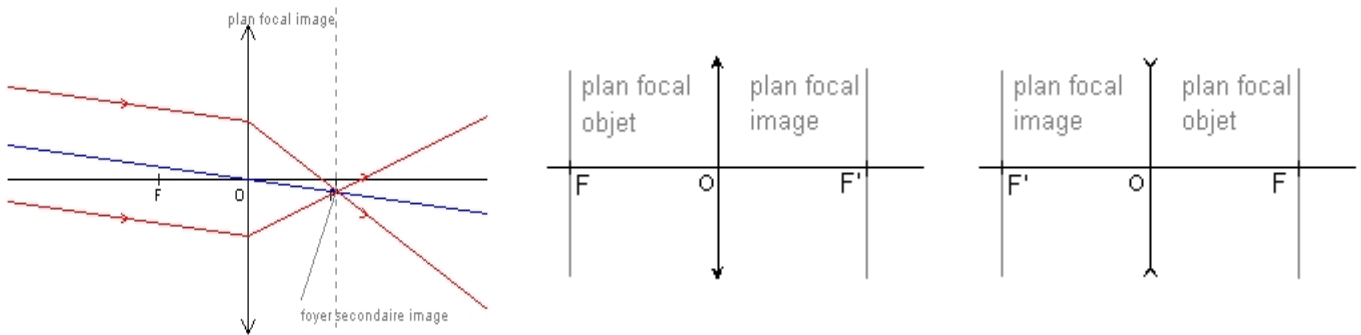
$$C = 1/f' = -1/f \quad (\text{d'unité dioptrie Puisque } f \text{ s'exprime en m}).$$

#### IV .7.7. Plan focal objet (image) :

Plan passant par un foyer principal objet (image) et perpendiculaire à l'axe principal.

Un point situé dans le plan focal (objet ou image) est appelé foyer secondaire (objet ou image), il ya une infinité de foyers secondaires





#### IV .7.8. Construction de l'image d'un objet

**Objet :** intersection des rayons incidents ou de leur prolongement.

**Image :** intersection des rayons émergents ou de leur prolongement.

##### Règles de construction

Pour déterminer la position de l'image d'un objet, il faut de tracer le trajet des rayons incidents.

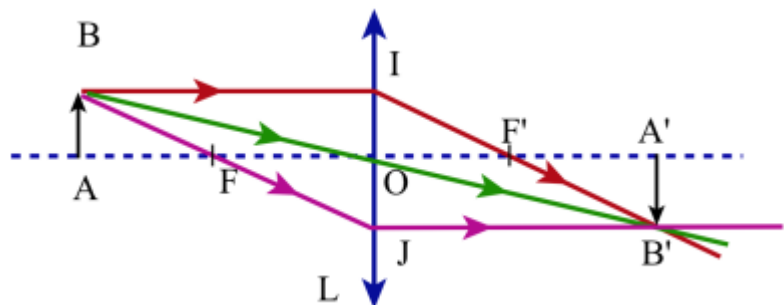
Un rayon passant par le centre optique n'est pas dévié.

Un rayon parallèle à l'axe principal émerge en passant par le (ou semblant provenir du) foyer principal  $F'$ .

Un rayon passant (ou semblant passer) par le foyer principal objet  $F$  émerge parallèlement à son axe principal.

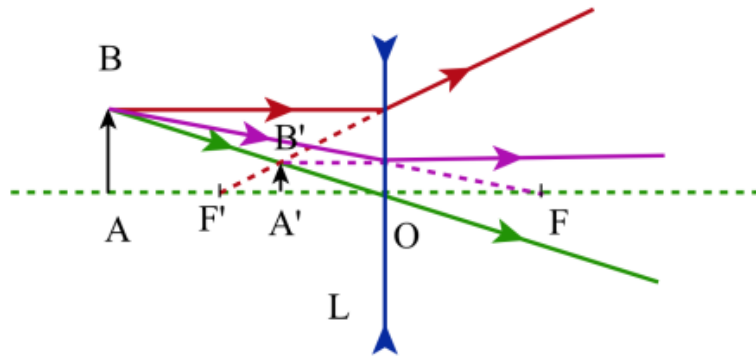
Exemple :

Objet réel, image réelle



Lentille convergente

Objet réel, image virtuelle



Lentille divergente

#### IV .7.9. Qualité des images

Les lentilles présentent des défauts (géométrique, chromatique (couleur)). Pour obtenir des images de bonne qualité il faut :

Conditions de gauss :

- le faisceau doit travers la lentille au voisinage du centre optique.
- les rayons incidents doivent faire un angle faible avec l'axe optique.

Pour réaliser ces conditions il faut observer des objets de petite dimensions au voisinage du centre optique.

#### IV .7.10. Formule des lentilles minces

- **Lentille convergente** :  $1/OA' - 1/OA = 1/f$
- **Lentille divergente** :  $1/OA' - 1/OA = -1/f$

#### IV .7.11. Grandissement d'une lentille :

$$\gamma = A'B' / AB$$

#### IV .7.12. Association de lentilles minces

$$1/OA' - 1/OA = C_1 = 1/f_1$$

$$1/OA'' - 1/OA' = C_2 = 1/f_2$$

$$1/OA'' - 1/OA = C_1 + C_2$$

# Chapitre V: Les Capteurs Photoélectriques

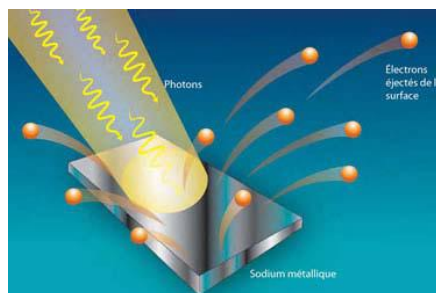
## V.1. Introduction

L'optoélectronique s'intéresse aux composants et techniques permettant l'émission ou la réception de signaux lumineux par des systèmes électroniques ; les applications sont nombreuses ; La signalisation ; La transmission d'information ; La détection et la mesure

## V.2. L'effet photoélectrique

En 1886, le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz réalisa expérimentalement qu'un **matériau métallique exposé à la lumière** pouvait **émettre des particules chargées négativement** (qui porteront le nom « d'électron »). Cette découverte fut baptisée au nom de **l'effet photoélectrique**. Malheureusement, Hertz ne fut pas en mesure d'expliquer théoriquement le phénomène, car certaines caractéristiques de cet effet ne fonctionnaient pas avec la théorie classique de l'électromagnétisme de l'époque. Un électron lié à une structure possède une énergie potentielle électrique  $U_e$  négative et la somme de son énergie cinétique  $E_c$  et de son énergie potentielle électrique est également négative ( $E_c + U_e < 0$ ).

Éjection d'électrons d'une plaque métallique par effet photoélectrique sous la présence d'une source lumineuse.



Pour éjecter des électrons de la structure, il faut fournir beaucoup d'énergie aux électrons. Dans ce phénomène, l'énergie acquise par les électrons provient du champ électromagnétique de la lumière.

Après absorption de la lumière, le gain d'énergie de l'électron se transforme en énergie cinétique et l'électron se déplace plus rapidement. Il peut ainsi s'éloigner de la structure en augmentant son énergie potentielle ce qui réduit son énergie cinétique. L'électron sera éjecté si son énergie totale (après le travail  $W$  de la lumière) est supérieure à zéro (éjection d'un électron si : ( $E_c + U_e + W > 0$ )).

## Photorésistance

Une photorésistance est composée d'un semi-conducteur à haute résistivité. Si la lumière incidente est de fréquence suffisamment élevée (donc d'une longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde seuil), elle transporte une énergie importante. Au-delà d'un certain niveau propre au matériau, les photons absorbés par le semi-conducteur donneront aux électrons liés assez d'énergie pour passer de la bande de valence à la bande de conduction. La compréhension de ce phénomène entre dans le cadre de la théorie des bandes. Les électrons libres et les trous d'électron ainsi produits abaissent la résistance du matériau.

## Application de la collision d'un photon

De nos jours, une variante à l'effet photoélectrique est utilisée dans plusieurs composantes électroniques (les électrons ne sont pas éjectés, mais subissent des variations d'énergie potentielles électriques pouvant générer des courants électriques).

## Cellule photoélectrique

Capteur photosensible dont la résistance varie selon l'exposition à la lumière. Cette cellule est utilisée par exemple pour activer des systèmes d'éclairage automatisés.



Détecteur de luminosité.

## Cellule photovoltaïque

Composante électronique qui génère une tension électrique de l'ordre de 0,5 V lorsqu'elle est exposée à la lumière. Cette cellule est utilisée par exemple dans les panneaux solaires



Panneau solaire.

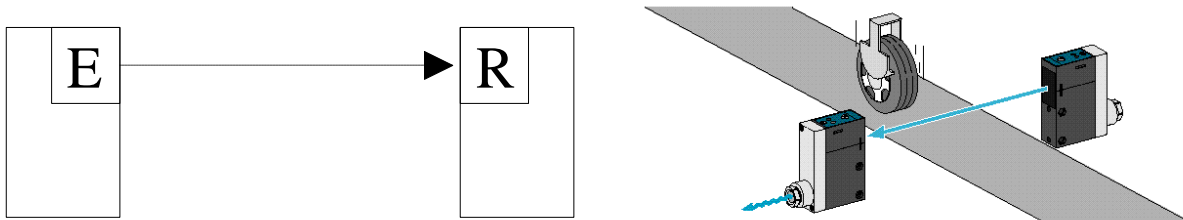
### V.3. Détecteur photo électrique

Un détecteur photo-électrique se compose essentiellement d'un émetteur de lumière (diode électroluminescente) associé à un récepteur sensible à la quantité de lumière reçue (phototransistor).

Il y a détection quand la cible pénètre dans le faisceau lumineux émis par le détecteur et modifie suffisamment la quantité de lumière reçue par le récepteur pour provoquer un changement d'état de la sortie.

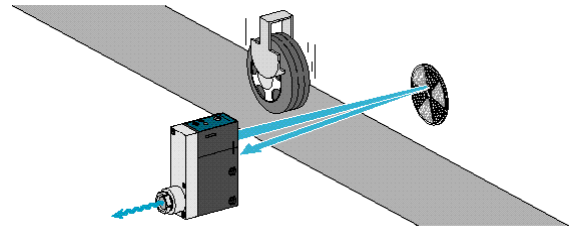
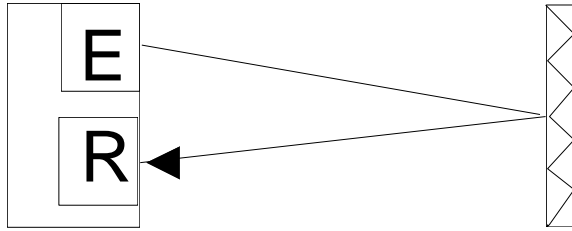
#### Principe des capteurs de type barrage.

Le capteur est constitué d'un émetteur et d'un récepteur. Lorsque l'objet à détecter coupe le faisceau le récepteur en l'absence de faisceau lumineux commute la sortie. Ce détecteur possède une grande portée.



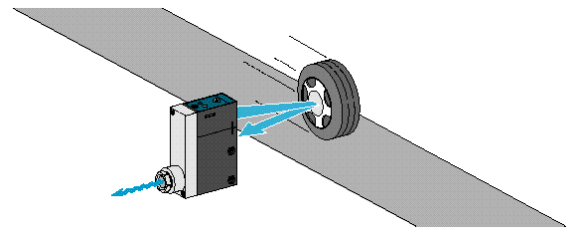
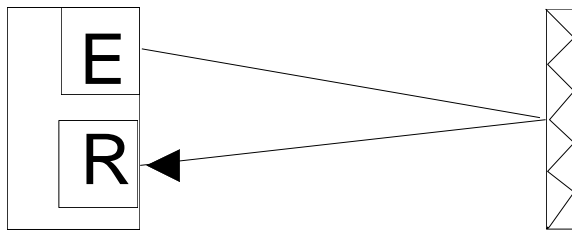
#### Principe des capteurs de type Reflex.

Le capteur est constitué d'un émetteur et d'un récepteur placés dans le même boîtier. Le faisceau est réfléchi par un réflecteur. Lorsque l'objet à détecter coupe le faisceau le récepteur en l'absence de faisceau lumineux commute la sortie. Ce détecteur détecte principalement les objets sombres.



## Principe des capteurs de type Proximité.

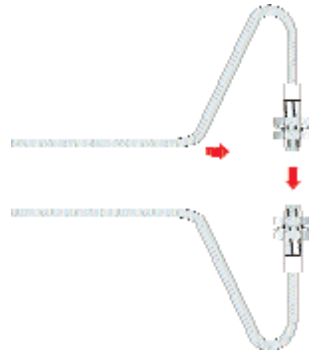
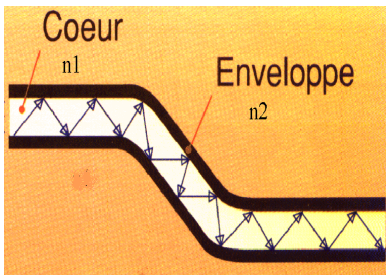
Le capteur est constitué d'un émetteur et d'un récepteur placés dans le même boîtier. Le faisceau est réfléchi par l'objet à détecter. Lorsque l'objet a réfléchi le faisceau le récepteur en présence du faisceau lumineux commute la sortie. Ce détecteur détecte les pièces claires.



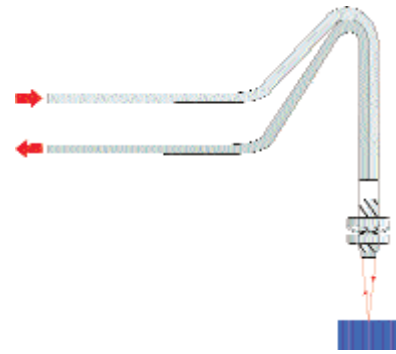
## Détecteurs à fibre optique

Toutes les fonctions optiques universelles de base de barrière et de proximité, ainsi que toutes les fonctions d'applications, de la détection de contraste et de luminescence à la reconnaissance de la couleur, peuvent être réalisées par des détecteurs à fibre optique. Les fibres optiques peuvent être considérées comme des câbles qui transportent la lumière et sont utilisées pour déplacer l'optique du détecteur dans des espaces restreints, ou pour la détection d'objets de très petites dimensions .

Le cœur et l'enveloppe possèdent des indices de réfraction différents, l'indice de réfraction  $n_2$  est légèrement inférieur à  $n_1$ , si l'angle d'ouverture du rayon à l'entrée de la fibre est inférieur à une certaine limite, la transmission du cœur de la fibre vers l'enveloppe de celle-ci est impossible, le rayon lumineux reste prisonnier du cœur et s'y transmet par réflexion. Les conditions de propagation sont liées à la nature du matériau utilisé.



**Fibres émetteur – récepteur**



**Fibres proximité**

**Exercice 01**

Trouver la dimension et l'unité des grandeurs suivantes :

Une surface, un volume, une masse volumique.

Une accélération, une force.

Un travail, une énergie cinétique, une énergie potentielle.

Une puissance, une pression.

**Exercice 02**

Vérifier l'homogénéité dimensionnelle de l'égalité dans l'équations :

- 1)  $X = vt$
- 2)  $X = \frac{1}{2} a t$
- 3)  $V^2 = 2ax^2$

X : distance, V : vitesse, a : accélération, t : temps.

**Exercice 03**

La relation entre la résistance de l'air et la vitesse d'un corps en mouvement est donnée par l'équation :

$$F = K V^n; \quad K : \text{constante, } n : \text{nombre entier positif.}$$

- Trouver la dimension de K en fonction de n.
- Déterminer l'unité de K dans le système international pour n=1, n=2.

**Exercice 04**

L'énergie d'une particule de masse **m** et vitesse **v** et de hauteur **z** donnée par :

Energie cinétique  $E_c = \frac{1}{2} m v^2$ , Energie potentielle  $E_p = m g z$  (g : accélération de la pesanteur)

- Vérifier l'homogénéité dimensionnelle de ces équations.
- La grandeur  $E_m = m^\alpha C^\beta$  est une énergie. trouver  $\alpha$  et  $\beta$ . (C : la vitesse de la lumière dans le vide).

**Exercice 05**

Un ressort est caractérisé par sa constante de raideur **k** et sa longueur au repos **l<sub>0</sub>**. Lorsqu'il subit une déformation, **l** devient alors **l**, et il exerce une force de rappel de module  $F = k |l - l_0|$ .

- Quelle est la dimension et l'unité de k ?
- Montrer que l'expression  $\frac{1}{2} k (l - l_0)^2$  est homogène à une énergie.

**Exercice 06**

- a)
  - La masse volumique de Fer est de  $\rho_{\text{fer}} = 7860 \text{ Kg/ m}^3$ , Calculer  $\rho_{\text{fer}}$  en (tonne/  $\text{m}^3$ ).
  - La masse volumique de l'eau est de  $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ Kg/ m}^3$ , Calculer  $\rho_{\text{eau}}$  en (Kg/ L).
  - La masse volumique de l'hélium est de  $\rho_{\text{He}} = 0.1785 \text{ Kg/ m}^3$ , Calculer  $\rho_{\text{He}}$  en (g/  $\text{cm}^3$ ).
- b) Une charge électrique  $q = 2 e^-$  soumise à une tension accélératrice  $V = 5v$ .
  - Quelle est la valeur de la charge en (C).
  - Calculer l'énergie cinétique de la charge en (eV) et en (Joule).
- c) Le débit volumique  $Q_v$  de l'eau est de  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ . Calculer  $Q_v$  en (L/s).



**Exercice 01**

Donner l'amplitude de la fonction d'onde  $\varphi(x, t) = a \sin(\omega t + kx + \pi/2)$  en  $x=0, x=\lambda/4, x=\lambda/2, x=3\lambda/4, x=\lambda$ , aux temps  $t=0, t=T/4, t=T/2, t=3T/4, t=T$ . dessiner l'onde aux différents temps.

$$\omega = 2\pi/T, k = 2\pi/\lambda$$

**Exercice 02**

-Une onde de fréquence  $3.10^{14}$  Hz se déplace à la vitesse  $3.10^8$  m/s. si la différence de phase en deux points est de  $\pi/3$ , que peut on dire de leur distance.

-Une onde lumineuse orange de fréquence 600 THz se déplace dans le vide ; quelle est sa variation de phase en temps de  $10^{-9}$  s ; quelle est la longueur correspondant à ce temps.

**Exercice 03**

-Calculer la fréquence, la longueur d'onde, dans le vide et l'énergie (en joule) d'un photon dont l'énergie est 2eV.

- Calculer en eV l'énergie d'un photon correspondante à une onde de longueur ;  $\lambda = 10\text{cm}, \lambda = 10\mu\text{m}, \lambda = 0,5\mu\text{m}, \lambda = 500\text{Å}, \lambda = 1\text{Å}$

**Exercice 04**

-Un électron de niveau k de l'atome de cuivre est arraché par l'absorption d'un photon dont l'énergie correspondante à longueur d'onde  $\lambda = 1,38\text{Å}$ . Calculer l'énergie de niveau k.

Une onde électromagnétique est émise lors d'un saut d'un électron de la couche L d'énergie 933eV à la couche k. quelle est la longueur d'onde correspondante.

**Exercice 05**

La longueur d'onde de la lumière visible est comprise approximativement entre 390nm (pour le violet) et 780nm (pour le rouge). Quelles sont les limites de la bande de fréquence correspondante. Calculer l'énergie des photons des limites du spectre visible.

- En passant d'un milieu transparent à un autre , la fréquence d'une onde ne change pas. Quelles sont les limites de la longueur d'onde du spectre visible dans l'eau.

**Exercice 06**

Combien de temps la lumière solaire met-elle pour nous parvenir du soleil, qui se trouve à  $1,49.10^8$  km de la terre

-On utilise en astrophysique l'année-lumière comme unité de distance. Une étoile se trouve à 10 années-lumière de la terre. quelle est sa distance en km.

**Exercice 01**

Un rayon laser possède une longueur d'onde dans le vide  $\lambda = 640 \text{ nm}$ . Il traverse un milieu en verre d'indice  $n = 1,55$  pour cette radiation.

1. De quelle couleur est ce rayon ?
2. Calculer la période et la fréquence de cette radiation dans le vide.
3. Calculer dans le verre, la période, la fréquence, la vitesse et la longueur de l'onde.

**Exercice 02**

On donne la célérité des ondes hertziennes dans l'air :  $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

1) Quelles sont les fréquences d'émission des ondes hertziennes suivantes dont les longueurs d'onde : radar :  $\lambda = 1 \text{ cm}$  ; TV :  $\lambda = 20 \text{ cm}$ .

2) Calculer les longueurs d'ondes des ondes hertziennes dont les fréquences :

radio FM : 100MHz ; téléphones portables : 30MHz ; radio GO (grandes ondes) : 0,2MHz

**Exercice 03**

Un rayon lumineux traverse trois milieux successifs ; air, eau, verre, d'indices de réfraction 1, 1.3, 1.5.

Pendant le même temps  $t = 5.10^{-8} \text{ s}$

1. Calculer la vitesse de lumière dans chacun de ces milieux.
2. trouver l'épaisseurs de ces milieux.
3. la longueur d'onde dans le vide est de 0.6 micromètre. Trouver le nombre d'ondes dans chaque milieu.
4. Calculer le chemin optique.

**Exercice 04**

Une lame à faces parallèles en verre d'épaisseur 3mm et d'indice de réfraction  $n = 1.5$  est placée dans l'air entre une source lumineuse et un écran. Sachant que la source est monochromatique de longueur d'onde 0.6 micromètre, le nombre d'ondes dans l'air est de 45000 onde.

1. Calculer le nombre d'ondes dans la lame.
2. Déterminer la distance source-écran .

**Exercice 05**

Supposons que vous ayez les yeux à une hauteur de 1,75m ; vous apercevez le sommet d'un arbre de 4,5m aligné avec le sommet d'un immeuble. Quelle est la hauteur de l'immeuble, si vous êtes à 20m de l'arbre et à 300m de l'immeuble ?.

**Exercice 06**

Le son se propage avec une vitesse de 332 m/s. Quelle est la longueur d'onde d'un son de 1000Hz ? si vous êtes devant un mur et quelqu'un crie derrière ce mur ; vous entendez le cri. Mais si une lampe est placée derrière ce mur vous ne la voyez pas. Expliquer pourquoi?

**Exercice 01**

Quels sont les angles d'incidence, de réflexion dans le cas d'un rayon lumineux tombant normalement sur l'interface de deux milieux et dans le cas d'un rayon incident rasant cette surface.

**Exercice 02**

1. Soit deux miroirs plans sont placés en parallèle. Un objet est placé à **2 cm** de l'un des miroirs et à **8 cm** de l'autre. Des images multiples de l'objet se forment derrière les miroirs.

Trouvez la position de cinq images sur les miroirs.

2. Un objet S est placé devant deux miroir  $M_1, M_2$  plans et perpendiculaires, quel est le nombre totale d'images qui peuvent être vues par l'observateur.

3. On accole deux miroirs plans  $M_1$  et  $M_2$  de sorte que leurs surfaces réfléchissantes fassent un angle de  $90^\circ$ . Un rayon lumineux, issu d'une source S, frappe  $M_1$  en I. Montrer que le rayon incident et le second rayon réfléchi sont parallèles et de sens contraire, quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence sur  $M_1$ .

4. Deux miroirs plans font entre eux un angle  $\alpha$ , le rayon incident sur  $M_1$  est parallèle au  $M_2$ , le second rayon réfléchi est parallèle au  $M_1$ . Quel sera l'angle  $\alpha$

**Exercice 03**

Face à un miroir plan vertical se trouve un observateur de hauteur 1,70 m et dont les yeux se situent à 1,60 m du sol. Quelle longueur minimale doit avoir le miroir et à quelle distance doit-il se trouver du sol pour que l'observateur s'y voie en entier ?

**Exercice 04**

1. Montrer que, si l'on déplace un miroir plan d'une distance **d** dans la direction normale, l'image d'un objet se déplace de **2d** dans la même direction.

2. si un miroir plan tourne d'angle  $\alpha$  autour d'un axe, qui lui est parallèle, montrer que l'image d'un objet tourne d'un angle **2 $\alpha$**  autour de même axe

**Exercice 05**

Un miroir plan M de longueur **1m** est placé horizontalement. L'oeil d'un observateur **O** se trouve à une distance de **1,5 m** au dessus du bord du miroir. Un objet lumineux ponctuel **S** est situé au dessus du miroir **1m**. L'observateur regarde le miroir et observe l'image de l'objet S donnée par le miroir.

1. Expliquer pourquoi le miroir donne de l'objet S une image.

Préciser la position de cette image.

2. Construire la marche du rayon lumineux issu de S et qui, après réflexion sur le miroir arrive en O.

3. Le point S se déplace suivant une droite  $\Delta$  parallèle au miroir et qui coupe la verticale OM.

Déterminer les positions de S pour lesquelles l'observateur peut voir l'image S' de S en regardant la face du miroir.

**Exercice 01**

On schématise la réfraction d'un rayon de lumière monochromatique passant de l'air dans l'eau.

- a) produire et compléter ce schéma en indiquant le point d'incidence, en dessinant la normale à la surface de séparation des deux milieux et en indiquant les angles d'incidence et de réfraction.
- b) Donner l'expression de la seconde loi de Snell-Descartes.
- c) Quels sont les angles d'incidence, de réfraction dans le cas d'un rayon lumineux tombant normalement sur l'interface (air- eau) et dans le cas d'un rayon incident rasant cette surface. Calculer l'angle de réfraction si l'angle d'incidence vaut  $45^\circ$ , sachant que l'indice de réfraction absolu de l'eau vaut 1,33 et que celui de l'air vaut 1,00.
- d) Calculer l'angle de réfraction maximum

**Exercice 02**

Un rayon lumineux se propageant dans le verre d'indice de réfraction 1,5 et faisant un angle de  $70^\circ$  avec le dioptre, sort dans l'eau d'indice de réfraction absolu 1,33 (2<sup>ème</sup> cas dans l'air).

- a) Quel est l'angle d'incidence? Calculer l'angle de réfraction. Déduire la déviation du rayon lumineux
- b) Calculer l'angle limite (l'angle de réflexion totale) dans les deux cas.

c) si l'angle d'incidence est de  $45^\circ$ , Obtiendra-t-on un rayon réfracté dans l'air (dans l'eau)? Justifier la réponse.

**Exercice 03**

Le rayon d'un faisceau de lumière monochromatique est dirigé sur une lame de verre ( $n=1.5$ ) d'épaisseur 0.2m.

- a) Trouver la direction des rayons réfractés (pénètre dans le verre, sort du verre), sachant que l'angle d'incidence est de  $30^\circ$ .  
Conclusion !
- b) Calculer le décalage latéral subi par le rayon.
- c) Calculer le chemin optique.

**Exercice 04**

Un poisson est à une profondeur apparente de 2m si elle est observée au voisinage de la verticale

qui passe par le poisson. Trouver la profondeur réelle du poisson. Quelle est la profondeur apparente si elle est observée dans une direction faisant  $45^\circ$  avec la verticale.

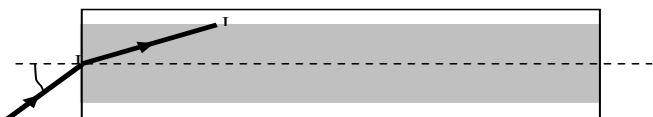
**Exercice 05**

Un rayon lumineux incident sur la face horizontale d'un cube d'indice  $n$ . Trouver la valeur maximale de  $n$  sachant que le rayon sort du cube est rasant de la face verticale.

**Exercice 06**

Le cœur d'une fibre de verre a un indice de  $n_2 = 1,48$  et sa gaine un indice de  $n = 1,46$ .

1. Calculer la valeur de l'angle limite  $i_L$  de réflexion totale d'un rayon à l'intérieur de la fibre au point J.
2. Quelle est la valeur de l'angle d'incidence du rayon correspondant arrivant au point I.
3. Quel est le trajet d'un rayon dans la fibre pour une incidence d'entrée supérieure ? Pour une incidence d'entrée inférieure?



**Exercice 01**

a) Un faisceau parallèle de lumière blanche pénètre dans un prisme en verre. On observe la dispersion. Expliquer ce phénomène.

b) Un rayon lumineux se propageant dans l'air ( $n_1 = 1$ ) arrive à la surface AB d'un prisme d'angle au sommet  $\alpha$ , de section droite ABC et d'indice de réfraction  $n$ . Exprimer la condition de son émergence par la face AC en fonction de  $\alpha$  puis de l'angle d'incidence.

Application : dans les deux cas :  $\alpha = 60^\circ$ ,  $n = 1,5$ ,  $\theta_1$  (angle d'incidence) =  $30^\circ$ .  $\alpha = 120^\circ$ ,  $n = 1,5$ ,  $\theta_1$  (angle d'incidence) =  $30^\circ$ .  
Le rayon lumineux émergera-t-il par la face AC.

**Exercice 02**

Dans l'air un rayon lumineux incident aborde un prisme d'angle au sommet  $\alpha = 30^\circ$  et d'indice de réfraction  $n = 1,25$

a) Déterminer les angles d'incidence  $\theta$  et d'émergence  $\theta'$  dans chacun des cas suivants : incidence normale, au minimum de déviation, émergence rasante, incidence rasante, émergence normale.

b) Représenter le graphe de la déviation totale en fonction de l'angle d'incidence.

**Exercice 03**

Pour mesurer l'indice de réfraction d'un liquide, on utilise un prisme de section droite ABC d'angle au sommet  $\alpha = 90^\circ$ , et d'indice de réfraction  $n = 1,732$ . sur la face AB, on pose une goutte de liquide d'indice  $n'$  et on envoie, sur elle et tangentiellement à la face AB, un faisceau de lumière monochromatique puis, on mesure par la face AC l'angle d'émergence des rayons lumineux.

a) Construire la marche d'un rayon lumineux qui traverse le système.

b) Trouver la relation qui donne  $n'$  en fonction de  $n$  et l'angle d'émergence.

c) Pour un liquide l'angle d'émergence vaut  $30^\circ$ . Quelle est la valeur de son indice de réfraction.

d) Quelle est la fourchette des indices de réfraction, des liquides, que l'on peut mesurer avec cette méthode.

**Exercice 04**

Un prisme d'angle  $\alpha = 60^\circ$  a un indice qui varie en fonction de la longueur d'onde selon la relation

$$n = 1,620 + 8,9 \cdot 10^3 / \lambda^2 \text{ . où } \lambda \text{ est exprimée en nm.}$$

a) Calculer l'indice pour les longueurs d'onde 606nm (rouge), 578nm (jaune), 546nm (vert), et 405nm (violet).

b) Déterminer la déviation minimale  $D_m$  pour le vert et l'angle d'incidence  $\theta_m$  correspondant.

c) Un faisceau de lumière contient les quatre couleurs précédentes, il est incident sur ce prisme sous le même angle  $\theta_m$ . Déterminer la déviation des trois autres radiations.

**Exercice 05**

Un prisme d'indice de réfraction  $n$  baigne dans un milieu d'indice  $n' = 1,26$ . on veut déterminer son indice  $n$ . pour cela, on fait tomber un faisceau de lumière monochromatique sur l'une de ses faces et on mesure sur l'autre la déviation du faisceau émergent. Quand l'angle d'incidence est de  $35^\circ$ , sa déviation par le prisme est minimale et vaut  $12^\circ$

a) Tracer la marche d'un rayon lumineux du faisceau. Précisez les valeurs des angles d'incidence et émergence.

b) Déterminer l'angle du prisme et son indice de réfraction.

**Exercice 01**

- a) Définir les mots suivants : lentille, lentille convergente, lentille divergente, foyer objet, foyer image, distance focale, vergence.
- b) comment la distance focale d'une lentille est-elle modifiée, si on la place dans l'eau ? Est-ce qu'on peut voir nettement dans l'eau ? pourquoi utilise-t-on des lunettes de plongée ? un poisson peut-il voir nettement dans l'air.
- c) Etablir les formules de conjugaison et grandissement d'une lentille.

**Exercice 02**

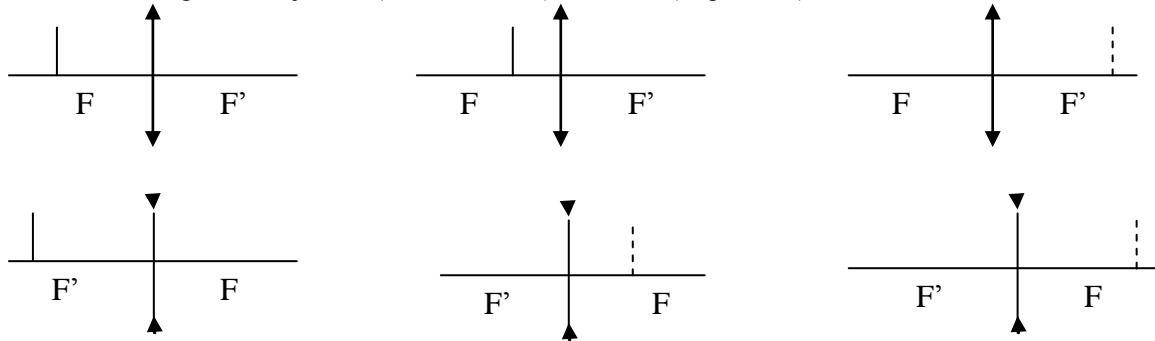
a) Trouver la distance focale de lentilles suivantes : Biconvexe ( $R_1= 15\text{cm}$ ,  $R_2= 25\text{cm}$ ), plan-convexe ( $R= 15\text{cm}$ ), biconcave ( $R_1= 15\text{cm}$ ,  $R_2= 25\text{cm}$ ), plan-concave ( $R= 15\text{cm}$ ).

b) la face sphérique d'une lentille plan-convexe a un rayon de courbure de 50cm. L'indice de réfraction du verre, dont elle est formée, dépend de la longueur d'onde de la lumière (en nanomètre) selon la relation

$$n = 1,62 + (8,9 \cdot 10^3 / \lambda^2). \text{ Calculer les distances focales correspondantes de la lentille.}$$

**Exercice 03**

Construire l'image d'un objet réel (en trait continu) ou virtuel (en pointillé) à travers chacune des lentilles



**Exercice 04**

Une lentille mince et convergente, a une vergence de 20 Dp. Déterminer, par le calcul et par la construction graphique, la position, la nature, et la grandeur de l'image d'un objet réel AB, perpendiculaire à son axe optique, de 5mm de longueur et situé à 4cm d'elle.

**Exercice 05**

à 1.4m devant une lentille mince convergente  $L_1$  de (distance focale 45cm, grandissement 2), on place une autre lentille mince convergente  $L_2$ . L'image d'un objet à travers les deux lentilles située à 15cm de  $L_2$ .

Déterminer : a) la position de l'objet b) la distance focale de  $L_2$ . c) grandissement totale.

Si les deux lentilles sont accolées, Calculer la vergence équivalente.

**Exercice 06**

L'objectif d'un appareil photo, de vergence 10 Dp, est assimilable à une lentille mince.

1. A quelle distance de l'objectif doit se trouver la pellicule, si on veut photographier des objets très éloignés (mise au point sur l'infini).

2. de combien et dans quel sens faudrait-il déplacer la pellicule si, après la mise au point sur l'infini, on désire photographier un objet, situé à 2,1m de l'objectif ?

**Répondre Vrai ou Faux ? Justifier ?**

01. Dans les unités fondamentales du SI, le joule est de kg.m.s
02. Dans l'équation  $v = At^3 - Bt$  ; l'unité de A est de  $m.s^{-1}$ , l'unité de B est de m .(v : vitesse, t : temps.).
03. Les ondes lumineuses ne sont pas des ondes électromagnétiques.
04. La lumière blanche est une lumière monochromatique.
05. La lumière monochromatique est constituée d'une seule longueur d'onde mais de plusieurs fréquences différentes
06. Les longueurs d'onde des lumières visibles par l'oeil humain dans le vide sont comprises entre 400 et 800 A°
07. Les ultraviolets sont des radiations de longueurs d'onde supérieurs à 400 nm.
08. Dans le vide la longueur d'onde d'une lumière rouge est plus petite que la longueur d'onde d'une lumière bleu.
09. La couleur d'un rayon lumineux dépend de la longueur d'onde.
10. Une radiation lumineuse a pour longueur d'onde dans le vide  $\lambda = 0,6 \mu m$ . sa fréquence est de  $6.10^{14} Hz$ .
11. Une radiation lumineuse a pour longueur d'onde dans le verre  $\lambda = 0,4 \mu m$ . Sa énergie est de 12,4eV.
12. Une radiation lumineuse a pour longueur d'onde dans le vide  $\lambda = 0,6 \mu m$ . Dans l'eau sa vitesse est de  $2.10^8 m/s$ , sa longueur d'onde est de  $0.6 \mu m$
13. Un objet est éclairé par une lumière blanche peut être bleu, car il réfléchit toutes les couleurs sauf le bleu
14. La lumière se propage toujours en ligne droite.
15. L'existence d'un phénomène de diffraction est une preuve de la nature corpusculaire de la lumière.
16. Lors du passage d'une lumière monochromatique d'un milieu transparent à un autre, la fréquence, la vitesse et la longueur d'onde correspondantes sont modifiées.
17. La propagation de la lumière s'accompagne d'un transfert de matière et d'énergie
18. La lumière se propage dans n'importe quel milieu.
19. Le chemin optique d'un rayon lumineux travers un milieu en verre d'épaisseur l est de 2l
20. Un rayon lumineux est dit normal à une surface si son angle d'incidence est égal à 90°.
21. Un rayon lumineux se propage dans un milieu en verre est dirigé vers une surface réfléchissante sous un angle incident 30°, l'angle réfléchi est d'environ 17°
22. Si vous vous approchez d'un miroir plan avec une vitesse v, votre image s'approche de miroir avec une vitesse 2v
23. Si l'on déplace un miroir plan d'une distance d dans la direction normale, l'image d'un objet se déplace de même distance dans la même direction.
24. Un rayon lumineux arrive perpendiculairement à la surface d'un milieu transparent, il est toujours dévié.
25. Si le rayon réfracté s'écarte de la normale au dioptre, alors la lumière est passée d'un milieu  $n_1$  dans un milieu  $n_2 (n_2 > n_1)$
26. Un lumineux se propage dans un milieu en verre est dirigé vers l'eau sous un angle incident 30°, l'angle réfracté est d'environ 30°
27. Un rayon lumineux se propage dans un milieu  $n_1$  est dirigé vers un milieu  $n_2$ , il ne peut y a avoir réflexion totale que  $n_2 > n_1$
28. Le phénomène observé lorsque la lumière travers une fente fine (de l'ordre de la longueur d'onde) s'appelle la réfraction.
29. Un rayon lumineux se propageant dans l'air est dirigé vers un milieu en verre l'angle de réfraction maximum est de 90°
30. Un rayon lumineux se propageant dans le verre est dirigé vers l'eau sous un angle incident 70°, il est réfracté.

Données :  $C = 3.10^8 m/s$ ,  $n$  (verre) = 1.5,  $n$  (eau) = 1.3,  $n$  (air) = 1.0.

**BONNE CHANCE**