

**PHYS 102 :**

**LUMIÈRE, IMAGES ET COULEURS**



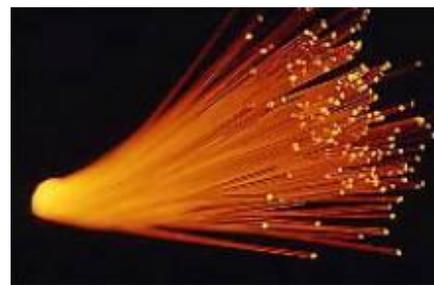
*arc-en-ciel*



*mirage supérieur*



*Le télescope spatial Hubble*



*faisceau de fibres optiques*

*Orsay, sept. 2008. Ne pas reproduire ce poly sans autorisation.*

## Introduction générale au module Phys102 :

Le module Phys102 comprend des **cours, TD et TP intégrés**. Il s'agit d'une introduction à **l'optique de base**. Il est organisé sur deux principes :

- Il est axé sur l'**expérimentation**, l'idée étant que vous découvrirez d'abord les notions par vous-mêmes à travers les expériences que vous réaliserez, puis interprétez. Dans la mesure du possible, des expériences qualitatives sont proposées avant les expériences quantitatives correspondantes. La complémentarité entre les notions de cours introduites et les expériences proposées est aussi développée que possible.
- Le cours est le plus ouvert possible sur la **vie quotidienne**, tant pour les expériences proposées (fibres optiques, mirages, couleurs des objets, fonctionnement de l'œil, etc) que pour les ouvertures suggérées tout au long, documents à l'appui (fibres optiques et télécommunications, arc-en-ciel, télescope Hubble, etc).

Ce module comprend 6 séances de cours-TP de 3h30, et 7 séances de TD (ou cours) de 1h30. L'organisation de ces 13 séances est décrite page suivante.

Ce polycopié sera votre outil essentiel en séance. Il est prévu pour être complété au fur et à mesure : un certain nombre de questions vous sont posées, des schémas sont à remplir, etc.

De plus, un cours interactif en ligne a été développé spécifiquement pour ce module. Vous y trouverez des compléments par rapport au poly, notamment des figures en couleur et des animations permettant d'illustrer les différents phénomènes et de mieux les comprendre. Vous le trouverez sur :

<http://formation.u-psud.fr> (entrez votre identifiant et mot de passe)

Dans ce poly, les références aux animations apparaissant dans le cours interactif en ligne sont indiquées par le symbole **(A)**.

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• <b><i>PENSEZ A VOUS MUNIR DU MATERIEL SUIVANT POUR CHAQUE SEANCE (cours-TP ou TD): règle, crayon à papier, calculatrice, compas, rapporteur, ainsi que ce poly!</i></b></li><li>• <b><i>RANGER LE MATÉRIEL SUR VOTRE TABLE A LA FIN DES SEANCES DE COURS-TP. Pour vous aider dans cette tâche, un inventaire du matériel correspondant à la salle où vous êtes se trouve au début de chaque chapitre.</i></b></li></ul> |
|---|



### **ORGANISATION DES SEANCES :**

<b>Séance</b>	<b>Salle</b>	<b>Contenu</b>
<b>S0</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Cours</b> : chap 1, §1 (Nature de la lumière)</li><li>• <b>Exercices</b> du chap.1</li></ul>
<b>S1</b>	<b>041 ou 102</b>	<b>Cours-TP</b> : chap 1, §2 (réflexion et réfraction de la lumière)
<b>S2</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Cours</b> : chap. 5 (incertitudes)</li><li>• <b>Application</b> : mesures du TP1</li></ul>
<b>S3</b>	<b>041 ou 102</b>	<b>Cours-TP</b> : chap. 1, §3 et §4
<b>S4</b>		<b>Exercices</b> du chap. 1
<b>S5</b>	<b>030 ou 100</b>	<b>Cours-TP</b> : chap 2
<b>S6</b>		<b>Exercices</b> sur le chap. 2
<b>S7</b>	<b>030 ou 100</b>	<b>Cours-TP</b> : chap. 3
<b>S8</b>		<b>Exercices</b> sur le chap. 3
<b>S9</b>	<b>039 ou 109</b>	<b>Cours-TP</b> : 4.1 Lentilles
<b>S10</b>		<b>Exercices</b> sur le chap4
<b>S11</b>	<b>039 ou 109</b>	<b>Cours-TP</b> : 4.2 L'œil humain 4.3 Association de lentilles
<b>S12</b>		<b>Exercices</b> sur le chap4

## **SOMMAIRE :**

<b><u>CHAPITRE 1</u> : LES BASES DE L'OPTIQUE</b>	<b>7</b>
<b><u>CHAPITRE 2</u> : COULEURS ET SPECTROSCOPIE</b>	<b>41</b>
<b><u>CHAPITRE 3</u> : IMAGES OPTIQUES</b>	<b>69</b>
<b><u>CHAPITRE 4</u> : LENTILLES ; ŒIL ; ASSOCIATION DE LENTILLES</b>	<b>97</b>
<b><u>CHAPITRE 5</u> : MESURES PHYSIQUES ; INCERTITUDES ET MODÉLISATION</b>	<b>127</b>
<b><u>EXERCICES</u></b>	<b>139</b>
<b><u>INDEX</u></b>	<b>161</b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE</u></b>	<b>164</b>

*Les points difficiles sont signalés par un astérisque.*

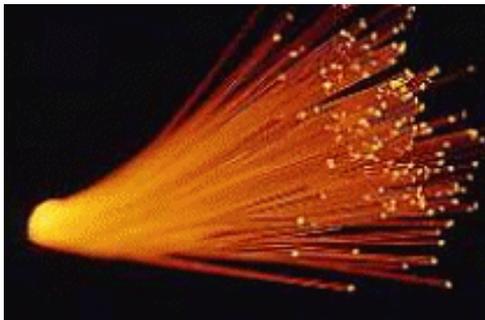
*Les mots apparaissant dans le texte comme soulignés sont rassemblés dans l'index à la fin de ce poly.*

# CHAPITRE 1

## LES BASES DE L'OPTIQUE



*mirage supérieur (Cantal, 1900)*



*faisceau de fibres optiques*

**Salles : « laser » 041 ou 102**

## SOMMAIRE DU CHAPITRE 1 :

<b>1 NATURE DE LA LUMIERE</b>	<b>10</b>
<hr/>	
<b>1.1 LA NATURE DE LA LUMIERE : UNE LONGUE HISTOIRE</b>	<b>10</b>
<b>1.2 LE MODELE ONDULATOIRE AUJOURD'HUI</b>	<b>11</b>
A) LA LUMIERE : CAS PARTICULIER DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES	11
B) PARTICULARITES DE LA PROPAGATION DE LA LUMIERE	11
C) LE MODELE DES RAYONS ET SURFACES D'ONDE	12
D) PROPAGATION DANS UN MILIEU MATERIEL	14
E) RETOUR SUR LE RAYON LUMINEUX	15
F) RETOUR INVERSE DE LA LUMIERE	15
<b>1.3 LA LUMIERE CORPUSCULAIRE ?</b>	<b>15</b>
<b>2 REFLEXION ET REFRACTION DE LA LUMIERE</b>	<b>19</b>
<hr/>	
<b>2.1 EXPERIENCES QUALITATIVES</b>	<b>19</b>
<b>2.2 LES LOIS DE SNELL-DESCARTES</b>	<b>20</b>
<b>2.3 ÉTUDE QUANTITATIVE</b>	<b>22</b>
A) DISPOSITIF ET REGLAGES	22
B) EXPERIENCES SUR LA REFLEXION ET LA REFRACTION	23
<b>2.4 CONSEQUENCES DES LOIS DE SNELL-DESCARTES</b>	<b>26</b>
A) REFRACTION DANS LE CAS $n_1 < n_2$	26
B) REFRACTION DANS LE CAS $n_1 > n_2$	26
<b>2.5 INTERPRETATION DE LA REFRACTION EN TERMES DE PROPAGATION D'ONDE</b>	<b>27</b>
<b>3. EXEMPLES D'APPLICATIONS</b>	<b>30</b>
<hr/>	
<b>3.1. LA REFLEXION TOTALE ; APPLICATION AU GUIDAGE DE LA LUMIERE</b>	<b>30</b>
<b>3.2 LE PRISME</b>	<b>33</b>
A) EXPERIENCES	33
B) INTERPRETATION, ET DEUXIEME DETERMINATION DE L'INDICE DE L'ALTUGLAS	34
<b>3.3 BILAN DES DIFFERENTES MESURES DE L'INDICE DE L'ALTUGLAS</b>	<b>36</b>
<b>4. PROPAGATION DE LA LUMIERE DANS UN MILIEU INHOMOGENE</b>	<b>37</b>
<hr/>	
<b>4.1 EXPERIENCES</b>	<b>37</b>
<b>4.2 INTERPRETATION</b>	<b>37</b>

### **Matériel à votre disposition par table**

- Un laser
- Un plateau tournant gradué
- Un ensemble de prismes, hémicylindre, règle en altuglas
- Une fibre optique

#### **Les dangers du laser**

*Le faisceau laser constitue un moyen très performant pour transporter une grande densité d'énergie sur d'assez grandes distances. Les risques liés au faisceau sont donc surtout des risques d'incendie ou de brûlure. Ces risques dépendent en particulier de la puissance. Les lasers très puissants peuvent brûler les tissus vivants (certains sont utilisés comme bistouris, ou pour la découpe de métaux).*

*La plupart des lasers, même de faible puissance, peuvent provoquer de graves lésions dans l'œil. En effet, un faisceau parallèle qui atteint l'œil est focalisé sur la rétine. Toute la puissance est ainsi concentrée sur quelques cellules seulement. Les lésions provoquées dépendent alors de la puissance du laser et peuvent aller jusqu'à la destruction complète des cellules de la rétine, laissant alors définitivement aveugles les zones atteintes. Ainsi, même pour un laser de faible puissance (inférieure à 1 mW, laser dit de classe II) tel que ceux que vous utilisez en TP, il est encore plus dangereux et dommageable pour l'œil de regarder le faisceau dans l'axe que de regarder le soleil en face ! Il convient donc d'observer quelques règles de sécurité lors de vos manipulations :*

#### **NE REGARDEZ JAMAIS LE FAISCEAU DANS L'AXE.**

*Évitez les risques de réflexions parasites : prenez soin, avant de manipuler, d'enlever tout objet métallique ou vitreux (montre, bagues, bracelets..) qui pourraient les provoquer.*

*Un obturateur mécanique vous permet d'occulter le faisceau sans éteindre le laser. Utilisez-le chaque fois que vous modifiez les éléments placés sur le parcours du faisceau.*

*Ne cherchez pas à enlever ou modifier les rideaux noirs disposés autour de votre table.*

*Ne luttez pas contre le réflexe de fermeture des paupières.*

#### **Matériel pour l'enseignant**

- Laser (cylindrique) + pince + support à tige
- Grande cuve en plexiglas
- Sucre en poudre
- Récipient en verre avec trou (pour fontaine lumineuse) + bouchon
- Support élévateur (« boy »)
- Source de lumière blanche

# 1. Nature de la lumière (TD0)

## 1.1 La nature de la lumière : une longue histoire<sup>1</sup>

Jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle, l'optique se développe sans chercher à connaître la nature de la lumière. C'est ce qu'on appelle aujourd'hui l'optique géométrique. En effet, celle-ci est basée sur : le *principe de propagation rectiligne de la lumière* dans le vide ou dans un milieu transparent homogène, et sur les *lois de la réflexion et de la réfraction*. Celles-ci sont tirées de l'expérience par Ptolémée (voir l'encadré correspondant plus loin) puis par Snell<sup>2</sup>. On construit des instruments d'optique : télescope et lunette astronomique pour observer les étoiles, microscope pour observer des micro-organismes<sup>3</sup>... Mais la *nature* de la lumière n'est pas en question.

Le premier modèle est proposé par Newton qui considère *la lumière comme des corpuscules matériels soumis à la gravitation universelle*. Il explique la réfraction comme l'effet de l'attraction de la matière : lorsque la lumière passe, par exemple, de l'air à un milieu dense, elle serait attirée par le milieu - donc accélérée - et irait alors plus vite dans un milieu plus dense. Parallèlement, il s'intéresse à la question des couleurs et conclut de ses expériences avec le prisme que la lumière du Soleil est composée de différentes lumières correspondant à des couleurs différentes qui, combinées ensemble, donnent la lumière blanche.

Contemporain de Newton, Huygens défend un autre modèle : la lumière se propagerait de proche en proche par le jeu des "chocs" de particules très proches : *la lumière se propagerait donc comme une onde mécanique*. Une différence essentielle avec les prédictions de Newton, était le fait que dans le modèle de Huygens, la vitesse de la lumière devait être plus faible dans le verre que dans l'air.

Vers 1800, Young interprète l'existence des couleurs observées sur une couche d'huile en faisant une analogie avec le son. Il modélise la lumière par une *onde progressive périodique* et introduit l'idée que de la lumière ajoutée à de la lumière peut donner de l'obscurité ! Il appelle ce phénomène interférences lumineuses et met ensuite au point une nouvelle expérience pour tester son hypothèse. Obtenant une source quasiment ponctuelle en éclairant un petit trou, il fait passer la lumière dans un système constitué de 2 trous voisins. A la sortie du système, il observe bien des franges alternativement claires et sombres dans la tache lumineuse résultant de la superposition de la lumière provenant de chacun des trous. Si Young peut interpréter l'apparition des franges, il ne peut expliquer le fait que la lumière éclairant les trous est déviée à leur passage. C'est Fresnel qui interprète ce phénomène appelé diffraction en combinant *le principe des ondes-enveloppes* de Huygens et *le principe de superposition des ondes périodiques* de Young. Plus tard, Fresnel montre que l'analogie avec le son a des limites. Il faut en effet considérer l'onde lumineuse comme une onde transversale et non comme une onde longitudinale pour expliquer les effets de polarisation.

C'est en 1862 que Léon Foucault, expérimentateur de génie, parvient à estimer la vitesse de la lumière sur un parcours de quelques mètres seulement : il a montré que la lumière allait plus vite dans l'air que dans l'eau, et donc que la vision de Huygens était la bonne<sup>4</sup>...

En 1864 James Clark Maxwell synthétise les lois de l'électricité et du magnétisme en les ramenant à 4 relations fondamentales : les équations de Maxwell de l'électromagnétisme. De

---

<sup>1</sup> De nombreux problèmes ont en effet, durant des décennies, suscité interrogations et controverses ! Voir encadrés pages suivantes.

<sup>2</sup> Ptolémée n'avait trouvé qu'une loi de proportionnalité pour les petits angles. La "loi des sinus" a été découverte par le Hollandais Snell, mais publiée par... Descartes. Elle est ainsi appelée en France (uniquement !) "loi de Descartes" et partout ailleurs "loi de Snell".

<sup>3</sup> Voir l'encadré sur les instruments d'optique à la fin du chap. 4

<sup>4</sup> Pour la mesure effectuée par Fizeau, voir l'encadré correspondant. Pour la mesure de Foucault, voir l'ex. 1.6.

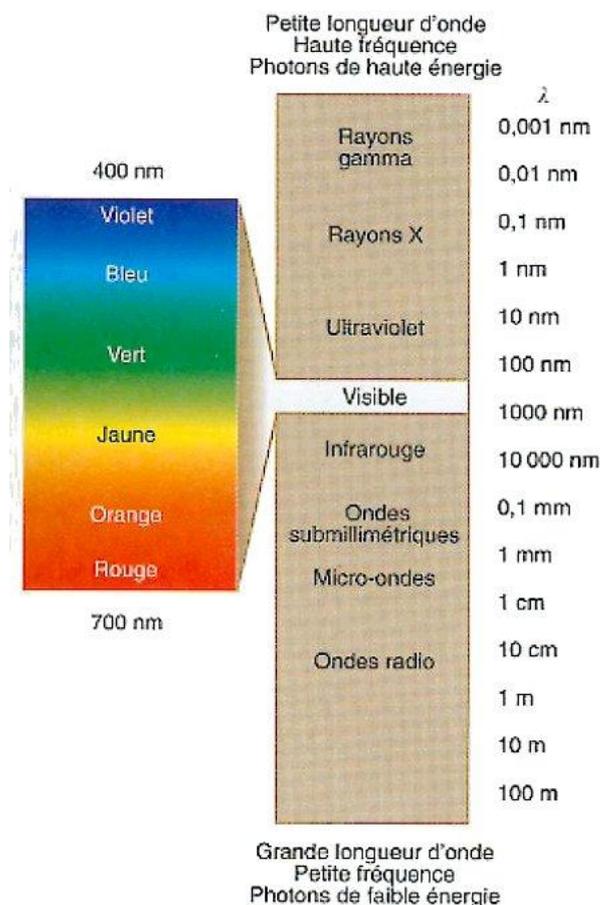
ces équations, il tire une conséquence extraordinaire : les champs électrique et magnétique peuvent se combiner pour donner lieu à une "perturbation" qui se propage, et la vitesse de propagation est précisément celle de la lumière. *Le modèle de l'onde électromagnétique de la lumière* était né.

## 1.2 Le modèle ondulatoire aujourd'hui

### a) La lumière : cas particulier des ondes électromagnétiques (A)

Les ondes électromagnétiques sont désormais détectées et utilisées dans un très large domaine de fréquence. Celles-ci vont en effet des bien connues "ondes radio", et micro-ondes des fours modernes, aux rayons X et rayons gamma de très haute énergie.

Le terme de "lumière" désigne en fait la gamme de fréquence des ondes électromagnétiques pour lesquelles l'œil est sensible.



*Les ondes électromagnétiques*

### b) Particularités de la propagation de la lumière

Deux particularités sont essentielles pour les ondes électromagnétiques et en particulier la lumière :

- Contrairement aux ondes mécaniques (ondes acoustiques, ondes sismiques, ondes à la surface de l'eau, etc.), la lumière possède la particularité de ne pas avoir besoin de support matériel pour se propager : *la lumière se propage dans le vide !*

- La célérité de la lumière dans le vide, traditionnellement notée  $c$ , est la même quelle que soit la fréquence et *quel que soit le référentiel* (galiléen) : la lumière qui se propage à la célérité  $c$  dans une fusée en mouvement, se propage à la même célérité vue de la Terre !

### Encadré : Un peu de métrologie..

La valeur de la célérité de la lumière, est de  $299792,458 \text{ km.s}^{-1}$ . Cette valeur a été fixée par décret en 1983 comme "valeur exacte".

Elle sert depuis à définir le mètre dans le système international d'unités : le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299792458$  de seconde.

La seconde est définie par ailleurs à partir de transitions électroniques de l'atome de césium 133.

### c) Le modèle des rayons et surfaces d'onde

En fait, comme l'histoire l'a montré, dans de nombreux phénomènes, il n'est pas nécessaire de connaître la nature électromagnétique de la lumière. Il suffit de modéliser la lumière comme un onde progressive périodique. Sa périodicité est fixée par sa fréquence  $f$  (associée aux couleurs de l'arc-en-ciel) et sa célérité dans le vide est égale à  $c$ , quelle que soit sa fréquence.

A toute onde périodique, on peut donc également associer une longueur d'onde *dans le vide* :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

Une onde lumineuse comprenant une seule fréquence (ou de manière équivalente, une seule longueur d'onde et donc une seule couleur) est appelée monochromatique. Les sources de lumière sont en général polychromatiques (voir chapitre II). La lumière d'un laser peut être considérée dans de nombreuses applications comme quasiment monochromatique.

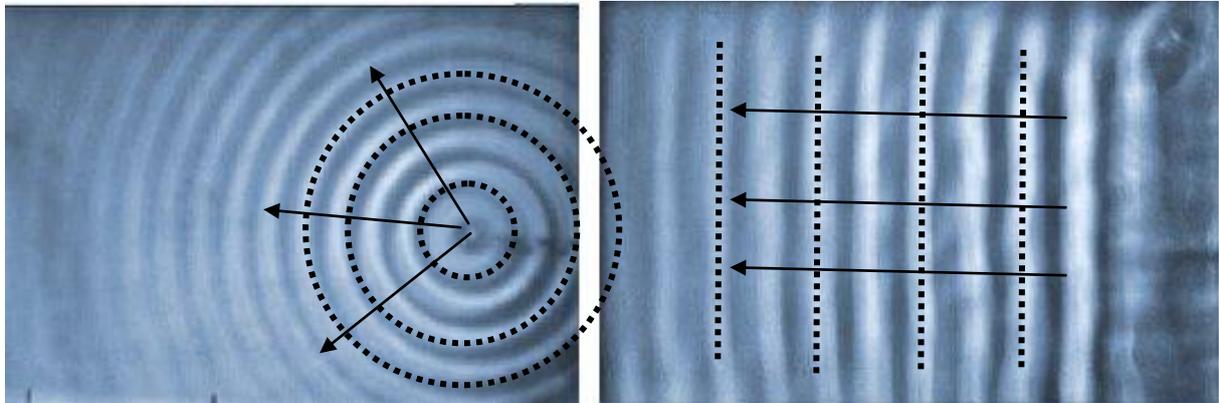
Cette onde se déplace dans tout l'espace, c'est-à-dire en 3 dimensions. Tout en gardant à l'esprit que la lumière se propage dans le vide, on peut imaginer le "front" d'une onde émise par une source ponctuelle comme progressant à la manière d'une bulle que l'on gonfle. L'ensemble des points de l'espace atteints au même instant par le front est appelé surface d'onde. Dans le cas d'une onde périodique, nous avons une succession de telles surfaces qui "s'expansent" à la célérité  $c$  et qui sont séparées par une longueur d'onde.

Pour se faire une idée de la façon dont les surfaces d'onde s'agrandissent dans l'espace, on peut regarder les ondes à la surface de l'eau.



On voit que la forme de l'onde est telle qu'*en tout point, une surface d'onde est normale à la direction de propagation*. S'il n'y a pas d'obstacle, l'onde se propage à la même célérité à partir du point d'émission de l'onde : les surfaces d'onde sont donc des cercles, et les directions de propagation sont les rayons.

On peut également faire des vagues "planes". La direction de propagation est alors représentée par des droites parallèles.

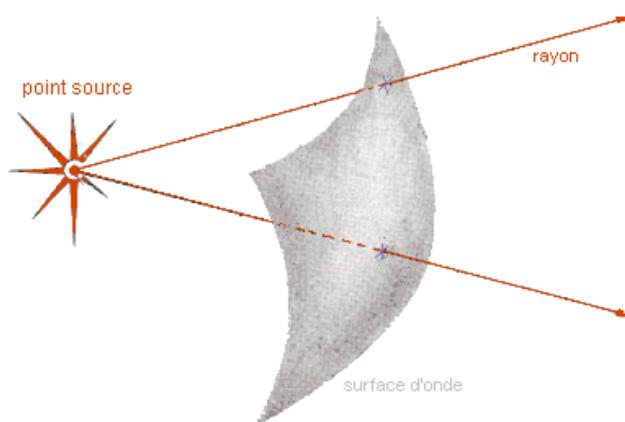


*Surfaces d'onde circulaires (gauche) ou planes (droites) ; cliché expérimental représentant des vagues à la surface de l'eau (dans une cuve à ondes).*

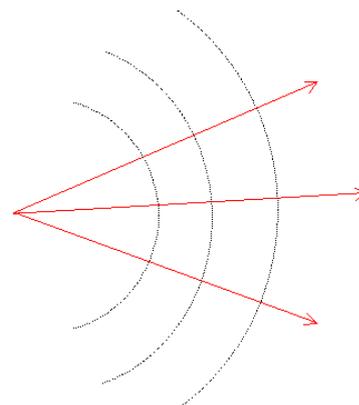
Les éléments en pointillés représentent des surfaces d'onde et les flèches les directions de propagation, perpendiculaires à celles-ci. Sur la figure de gauche, les surfaces d'onde sont circulaires et les flèches sont selon les rayons des cercles. Sur la figure de droite, les surfaces d'onde sont rectilignes et les flèches sont parallèles entre elles.

Pour une onde lumineuse monochromatique, on peut définir de façon équivalente un tel front d'onde et les directions de propagation s'appellent les... rayons.

Un faisceau de lumière émis par un point source pourra se représenter par une onde sphérique (on dessinera un arc de cercle) et les rayons "proviennent" du point.

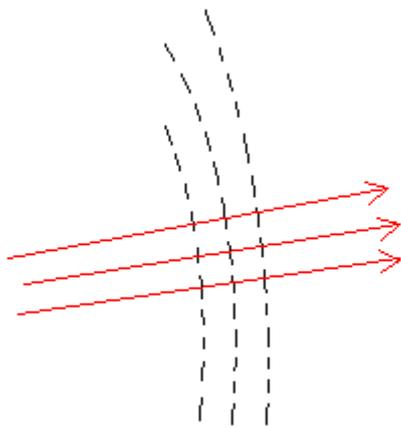


représentation dans l'espace

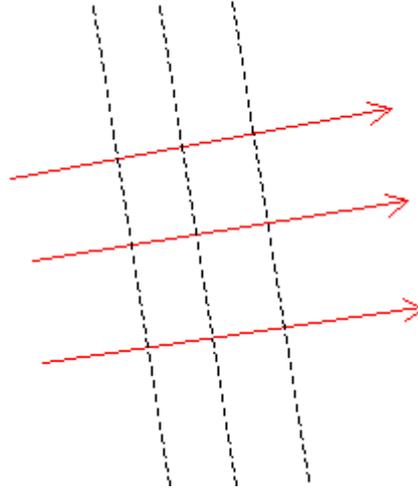


représentation dans un plan  
(image en 2D)

Si la source est très éloignée, les rayons qui nous parviennent sont quasiment parallèles : on dit que le faisceau est parallèle et que l'onde est plane.



Source éloignée



Source à l'infini : onde plane

#### d) Propagation dans un milieu matériel

Un milieu dans lequel la lumière peut se propager est un milieu transparent. Un tel milieu, s'il a les mêmes propriétés en tout point est dit homogène ; s'il a les mêmes propriétés pour toute direction de propagation de la lumière, il est dit isotrope ; la propagation de la lumière dans un tel milieu peut se décrire de la même manière que dans le vide.

Toutefois, on sait depuis Foucault que la célérité n'est pas la même : elle est toujours plus faible que dans le vide.

Le milieu est alors caractérisé par son indice optique. Si on note  $v$  la célérité dans le milieu, l'indice optique est défini par :  $n = \frac{c}{v}$

#### Remarques importantes :

- La célérité dans le vide étant une valeur maximale, l'indice est donc toujours supérieur ou égal à 1.
- L'indice de l'air est très voisin de 1 : il est égal à 1,000 292 6 dans les conditions normales de température et de pression ; cet indice dépend de la masse volumique de l'air, et sa variation est continue entre des couches d'air de températures différentes. Ce dernier effet permet d'expliquer les mirages (voir à la fin de ce chapitre).
- La célérité dans un matériau dépend en général de la fréquence : dans le verre par exemple, le "rouge" se déplace plus vite que le "bleu". Ceci sera essentiel pour comprendre la *dispersion* de la lumière (chapitre II).
- Attention à l'expression "longueur d'onde" souvent utilisée en optique : elle désigne de façon implicite la longueur d'onde *dans le vide*. En effet, la longueur d'onde d'une onde est une conséquence de la célérité, donc elle dépend du milieu.... En toute rigueur, il ne faudrait utiliser pour caractériser une onde que sa *fréquence*. C'est cette grandeur qui ne change pas lorsque l'onde change de milieu de propagation.

Quelques valeurs d'indices mesurées dans différents matériaux (pour  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$ ) :

Matériau	Indice
Air (0 °C, 101 325 Pa)	1,000293
Eau (20°C)	1,3330
Verre ordinaire	entre 1,51 à 1,53
Diamant	2,4173

Une dernière remarque : en y réfléchissant un peu, on se rend compte que les milieux transparents sont plutôt rares parmi les matériaux qui nous entourent... Au chapitre II, nous comprendrons un peu mieux pourquoi les matériaux sont plutôt opaques, et colorés.

#### e) Retour sur le rayon lumineux

En fait, le modèle du rayon lumineux correspond à la plus ancienne description de la lumière. Il traduit le fait que, *dans un milieu homogène et isotrope, la lumière "se propage en ligne droite"*, ceci provenant de l'observation des ondes portées, qui permet d'expliquer les éclipses, etc.

En résumé, un rayon lumineux est une modélisation mathématique. Les technologies modernes, en particulier le laser, permettent de faire des faisceaux très étroits. On les appelle des pinces lumineuses, mais souvent, par abus de langage, on parle de "rayon laser".

#### f) Retour inverse de la lumière

La *trajectoire* de la lumière dans un milieu homogène et isotrope est une ligne droite, et ce, indépendamment du *sens* de propagation de la lumière.

### 1.3 La lumière corpusculaire ?

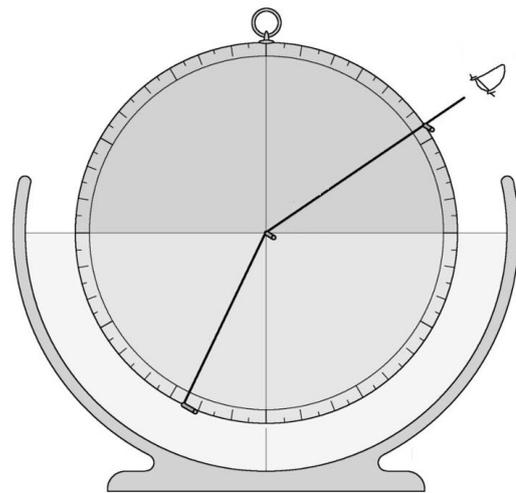
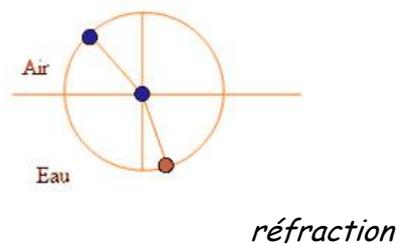
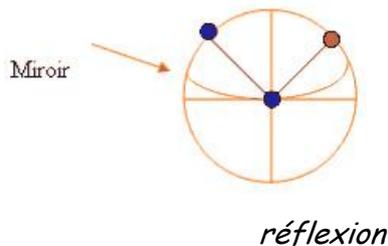
Malheureusement (ou peut-être heureusement pour le renouveau de la physique !), un certain nombre de phénomènes se sont avérés très difficiles à interpréter avec le modèle ondulatoire de Maxwell. Il s'agissait en particulier de l'effet photoélectrique, c'est-à-dire de la possibilité d'éjecter des électrons d'un métal simplement en l'éclairant ! Encore fallait-il que la fréquence de la lumière soit adéquate...

C'est Einstein qui montra en 1905 que si l'on modélise la lumière comme des paquets d'énergie (*licht quantum*) on pouvait expliquer ces propriétés étranges de l'effet photoélectrique (voir l'encadré correspondant). Cette hypothèse fut confirmée sur d'autres phénomènes et le concept de photon fut ainsi inventé. Albert Einstein obtint le prix Nobel de physique pour sa contribution à la théorie de l'effet photoélectrique en 1921.

Le photon est considéré en physique quantique comme une particule tout à fait particulière : de masse nulle, elle possède de l'énergie et se déplace à la vitesse  $c$ . Le photon est aussi considéré comme la particule "porteuse" de l'interaction électromagnétique.

### Encadré : Ptolémée et l'étude expérimentale de la réflexion et de la réfraction

Aux alentours de 150 après J.-C., Claude Ptolémée accomplit un travail astronomique colossal, et met notamment en évidence la précession des équinoxes. Le problème de la réfraction atmosphérique rencontré dans ses travaux astronomiques l'amène à s'intéresser à l'optique. Il réalise entre autres un dispositif expérimental qui lui permet de mener une étude systématique de la réflexion et de la réfraction. Il utilise un disque circulaire divisé en 4 quadrants gradués en degrés.



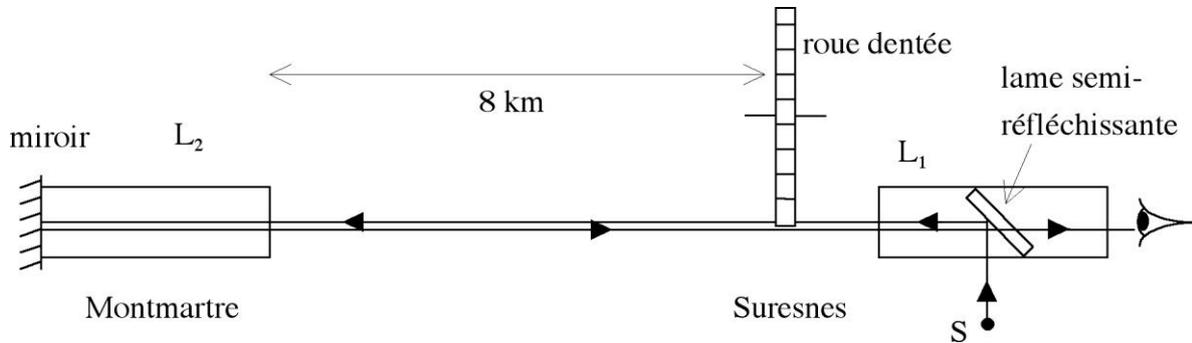
Pour étudier la *réflexion* il fixe sur le disque une lame de fer rectangulaire polie suivant le diamètre horizontal (pour le cas du miroir plan) ou en la courbant de façon à former un miroir cylindrique concave ou convexe, tangent au centre du diamètre horizontal. Pour définir la direction du *rayon incident*, il place un point de mire sur le bord du disque et un au centre. Il vise les deux points de mire de telle façon qu'ils lui paraissent alignés. Il place un petit bâtonnet coloré sur l'arc du quadrant voisin et le déplace jusqu'à ce que ce dernier soit masqué par les deux points de mire. Il définit ainsi la direction du *rayon réfléchi*.

Pour étudier la *réfraction* il plonge le disque dans l'eau de telle façon que la surface de l'eau coïncide avec le diamètre horizontal. Il définit le *rayon incident* de la même façon que dans le cas précédent, et déplace le petit bâtonnet coloré sur l'arc opposé situé dans l'eau jusqu'à ce que ce dernier soit masqué par les deux points de mire. Il définit ainsi la direction du *rayon réfracté* et mesure les angles correspondants. Pour la réfraction air-verre il colle sur le disque un demi-cylindre de verre et procède ensuite de la même manière.

Ptolémée a aussi étudié la réfraction verre-eau mais il a modifié son protocole vraisemblablement pour éviter la *réflexion totale*... Ptolémée a pu ainsi fournir des tables de réfraction qui furent utilisées pendant plus de dix siècles. Les valeurs données par Ptolémée sont fiables à moins d'un demi-degré près en général.

### Encadré : Fizeau et la mesure directe de la vitesse de la lumière.

Hippolyte Fizeau (1819-1896) réalise en 1849 la première mesure directe de la vitesse de la lumière. Le principe de sa mesure repose sur l'utilisation d'une roue dentée en rotation à grande vitesse, et est illustré par le schéma ci-dessous :



Pendant le temps que met la lumière pour faire l'aller-retour entre  $L_1$  et  $L_2$ , la roue dentée a légèrement tourné. Pour certaines valeurs de la vitesse de la roue, elle aura tourné d'un nombre entier d'échancrures, et la lumière réfléchi pourra bien être observée par l'expérimentateur (dans le cas d'un nombre demi-entier, le point lumineux disparaît!)

Le dispositif de renvoi de la lumière est constitué de deux lunettes astronomiques en regard. La lumière d'une source très intense située en  $S$  pénètre dans la lunette  $L_1$  perpendiculairement à son axe. Une lame semi-réfléchissante inclinée à  $45^\circ$  renvoie le faisceau dans l'axe de la lunette. Le faisceau émergent, après passage par la roue dentée et parcours d'une distance d'environ 8 km, traverse l'objectif de la lunette  $L_2$ , au foyer de laquelle Fizeau a placé un miroir. La lumière est réfléchi et parcourt un trajet analogue à celui de l'aller, entrant cette fois par l'objectif de  $L_1$ . L'image de la source est observée à l'oculaire de  $L_1$ .

La lunette  $L_1$  est placée à Suresnes sur la terrasse de la maison de Fizeau et  $L_2$  sur la terrasse d'un ami à Montmartre à 8633 mètres de  $L_1$ . La roue dentée a 720 dents, et la vitesse la plus faible pour laquelle le point lumineux réapparaît est de 25.2 tours/s.

On trouve ainsi (vérifiez-le!) une vitesse de  $313274 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , en accord avec les mesures astronomiques. Une détermination plus précise de  $298000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  sera donnée par Foucault en 1862 avec l'expérience à miroir tournant (voir l'exercice 1.6).

Une version modernisée de l'expérience de Fizeau a été montée en 2005 dans le cadre de l'exposition "c à Paris", à l'Observatoire de Paris. Dans ce cadre, un laser vert a été tiré entre l'Observatoire et Montmartre (photo ci-contre) pour mesurer la vitesse de la lumière.



### Encadré : La théorie corpusculaire de la lumière de retour au début du vingtième siècle ! Les quanta de Planck et Einstein

La nature ondulatoire de la lumière est universellement admise à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle quand survient un nouvel évènement majeur de la physique : la théorie des quanta.

En 1900, Max Planck (1858-1947) cherche à interpréter les spectres (c'est-à-dire la variation de l'intensité de la lumière émise en fonction de la longueur d'onde<sup>5</sup>, voir le chapitre 2) des corps incandescents. Il montre que la forme du spectre ne peut s'interpréter qu'avec l'hypothèse suivante : l'énergie lumineuse ne s'échange pas avec la matière d'une façon continue mais seulement par paquets d'énergie appelés *quanta* dont l'énergie est  $E=h\nu$ , où  $\nu$  est la fréquence du rayonnement et  $h$  une constante universelle (appelée aujourd'hui *constante de Planck*  $h= 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$ ). C'est par une adroite manœuvre mathématique que Planck établit sa formule. Il reste cependant dubitatif. C'est en effet comme si un pendule pouvait osciller en décrivant des arcs de cercle de 1, 2, 3cm, etc., par exemple mais pas de 0,5 ;1,3 ;2,6 cm, etc.

Personne à l'époque ne prend au sérieux cette théorie, sauf...Albert Einstein (1879-1955), qui a l'audace en 1905 d'identifier les paquets d'énergie à des grains de lumière, auxquels N.G. Lewis donnera en 1926 le nom de photons. Il montre que l'effet photoélectrique, c'est-à-dire le fait que l'énergie cinétique maximale des électrons éjectés d'un métal éclairé ne dépend pas de l'*intensité* de la lumière mais seulement de sa *fréquence*, incompris jusqu'alors, peut s'expliquer de cette façon.

Pour interpréter ce résultat expérimental, Einstein fait appel à la théorie des quanta : les énergies de tous les grains d'une lumière monochromatique de fréquence  $\nu$  sont identiques :  $E = h\nu$ . Un électron est expulsé si l'énergie apportée par un photon est supérieure à l'énergie  $W$  requise pour extraire un électron du métal (c'est le "seuil photoélectrique"). La conservation de l'énergie impose la relation  $h\nu = W + 1/2 m_e v^2$  où  $v$  est la vitesse de l'électron et  $m_e$  sa masse au repos.  $W$  ne dépend que de la nature du métal. Cette relation montre que plus la fréquence de la lumière est élevée, plus l'énergie cinétique  $1/2 m_e v^2$  des électrons arrachés est grande.

---

<sup>5</sup> abus de langage : il s'agit de la fréquence... Cet abus est très fréquent.

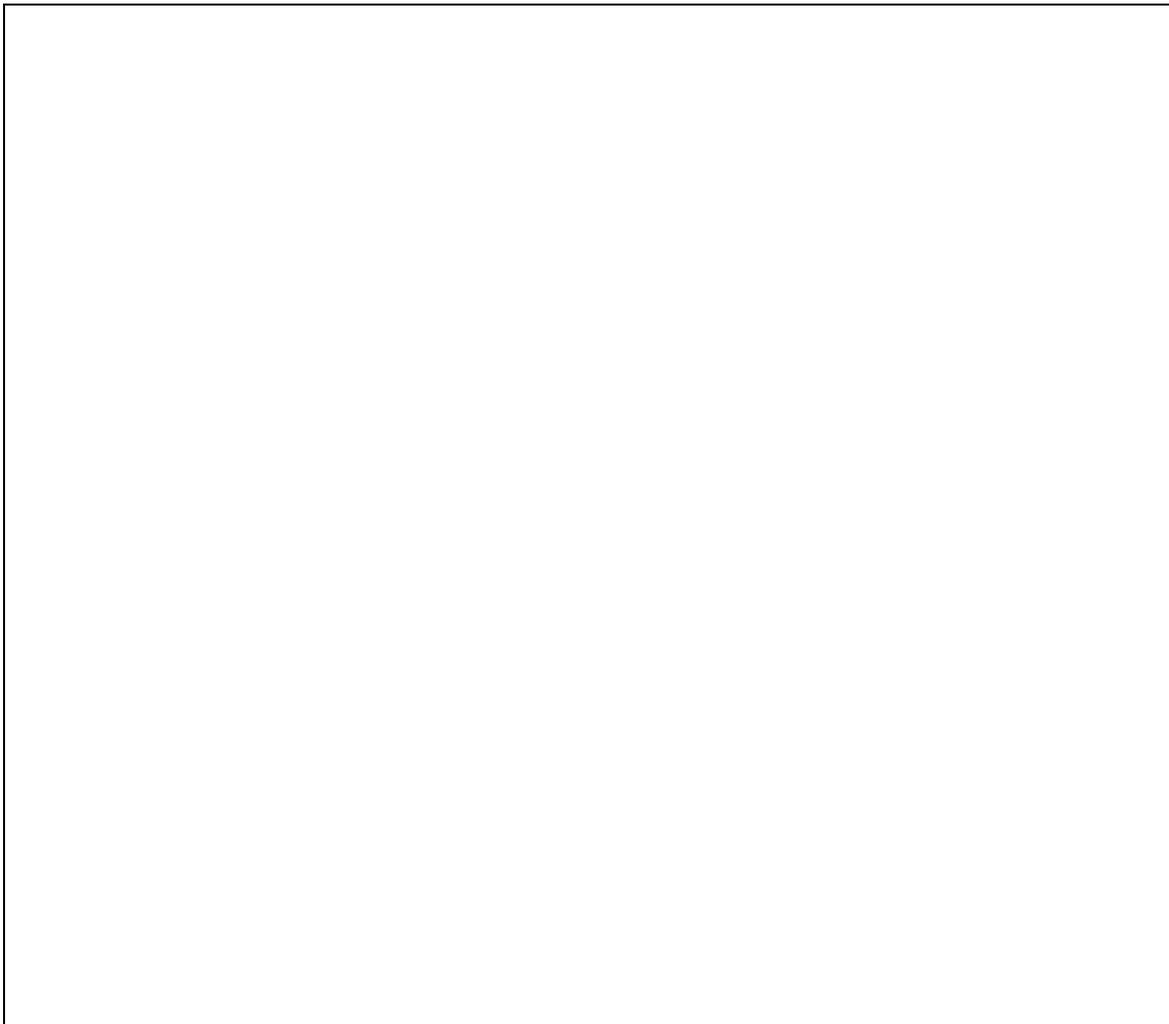
## 2. Réflexion et réfraction de la lumière

### 2.1 Expériences qualitatives

La réfraction de la lumière est responsable d'effets bien connus comme celui du "crayon brisé" (cf chapitre 3). Le mot provient d'ailleurs du mot fracture qui correspond au trajet "brisé" de la lumière : celle-ci change de direction lors du passage d'un milieu à un autre.



*Expérience 1 (à réaliser par l'enseignant) : montrer ce qu'il advient d'un faisceau laser à l'interface air/eau (utiliser une grande cuve remplie d'eau), et eau/air. Faire des dessins représentant les différents cas que vous observez.*



## 2.2 Les lois de Snell-Descartes

On appelle dioptre la surface séparant deux milieux transparents. Si la lumière se propage en ligne droite dans un milieu transparent homogène et isotrope, elle est déviée lors du passage d'un dioptre : il y a réfraction.

De façon générale, il y a à la fois réflexion et réflexion : une partie de la lumière est réfléchi à la surface du dioptre et l'autre partie est réfractée lors de son passage dans l'autre milieu.

Le changement de direction au niveau du dioptre est décrit par les lois de Snell-Descartes qui fondent l'optique dite « géométrique ». Ces lois peuvent se représenter graphiquement en les appliquant à un rayon unique - dit incident - interceptant le dioptre en un point dit point d'incidence.

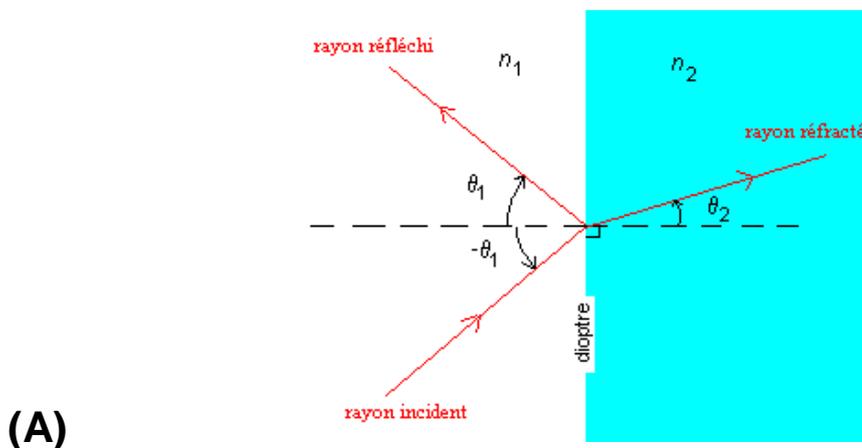
On considère un rayon se propageant dans un milieu transparent homogène et isotrope d'indice de réfraction  $n_1$ , et arrivant sur une surface séparant ce milieu d'un deuxième milieu d'indice  $n_2$ . Le plan d'incidence est le plan qui contient le rayon incident et la normale à la surface au point d'incidence. L'angle d'incidence est l'angle entre le rayon et la normale à la surface.

Les lois de Snell-Descartes sont au nombre de 3, et s'énoncent ainsi :

1. Les rayons lumineux réfléchi et réfracté sont dans le plan d'incidence.
2. L'angle de réflexion (angle entre le rayon réfléchi et la normale au dioptre au point d'incidence) est égal à l'angle d'incidence.
3. Le rayon lumineux transmis est tel que l'angle de réfraction (angle entre le rayon réfracté et la normale au dioptre au point d'incidence) est lié à l'angle d'incidence par la formule :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (\text{loi de la réfraction})$$

où  $n_1$  est l'indice du milieu d'incidence,  $n_2$  celui du milieu de réfraction,  $\theta_1$  l'angle d'incidence et  $\theta_2$  l'angle de réfraction.



(A)

Réfraction avec un indice  $n_2 > n_1$

Remarque 1 : la réfringence est la propriété d'un milieu de réfracter la lumière. La réfringence d'un milieu optique est mesurée par l'indice de réfraction. On parle ainsi de milieu « plus ou moins réfringent » suivant la valeur de l'indice (un milieu plus réfringent est un milieu d'indice plus grand). Celui-ci est introduit de manière empirique dans les lois de Snell-Descartes. Nous avons vu au 1. que l'indice pouvait aussi être défini par le rapport des célérités de la lumière ( $n = c/v$ ).

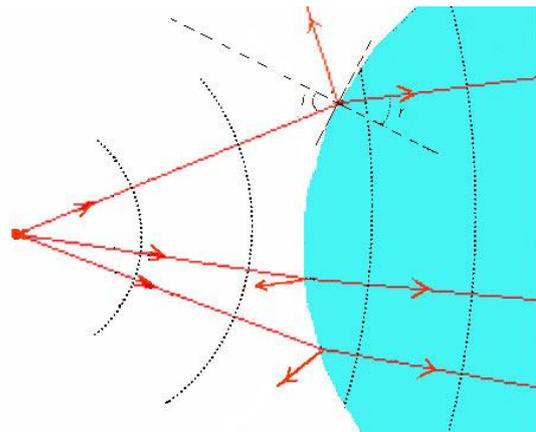
Remarque 2 : La photo ci-contre montre une lame de verre plongée dans un liquide (du glycérol, par exemple). Comment peut-on interpréter ce qu'on voit (la photo n'est pas truquée!)?



Remarque 3 : Lois de Snell-Descartes et surfaces courbes (voir le chapitre 3)

Les lois de Snell-Descartes s'appliquent même lorsque les surfaces sont courbes. Pour chaque rayon, il faut considérer *la normale à la surface en chaque point d'incidence*. L'application des lois de la réflexion et de la réfraction permet alors de tracer les rayons réfléchis et réfractés, donnant ainsi des informations sur la géométrie du faisceau réfléchi et du faisceau réfracté.

La figure ci-contre donne un exemple dans le cas d'un dioptré concave, où le milieu de réfraction (à droite) est plus réfringent que le milieu d'incidence.



Remarque 4 : D'où viennent les lois de Snell-Descartes ?

En optique dite « géométrique » (c'est le cadre de ce cours), elles sont *posées* par hypothèse.

En électromagnétisme, ce qui est posé, ce sont les équations de Maxwell, et on peut à partir de là *démontrer* les lois de Snell-Descartes.

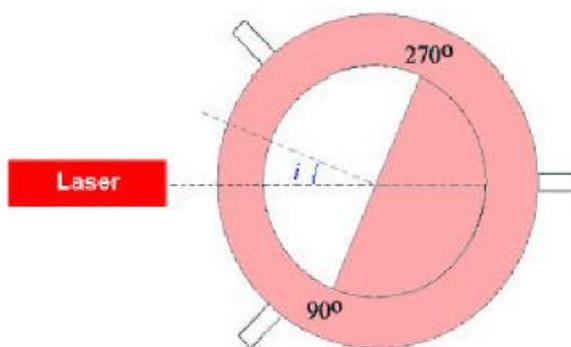
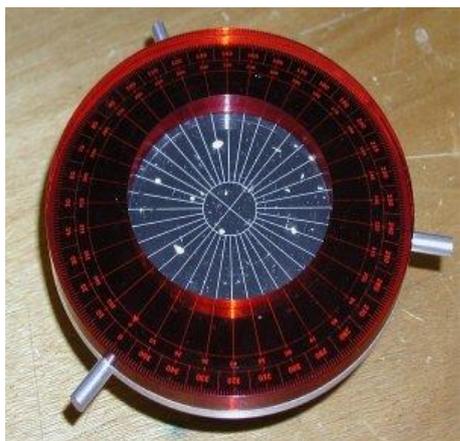
Notons que l'on peut également démontrer la loi de la réfraction à partir du principe de Fermat (voir exercice 1.9) ; c'est alors celui-ci qui est posé...

## 2.3 Étude quantitative

L'objectif du travail qui vous est demandé est de réaliser les mesures les plus précises et exactes possible des angles d'incidence et de réfraction, de façon à retrouver les lois de Snell-Descartes pour le dioptre air-altuglas<sup>6</sup>. Ces mesures permettront, après exploitation, de déterminer un encadrement pour la valeur de l'indice de l'altuglas.

### a) Dispositif et réglages

Expérience 2 : Vous disposez sur votre table d'un dispositif expérimental prévu pour l'étude de la réflexion et la réfraction d'un faisceau laser. Il s'agit d'une platine munie d'une couronne d'altuglas rouge, pouvant tourner sur son socle. Elle est également munie d'une graduation permettant des mesures d'angles.



Platine tournante. A gauche, la platine munie de la couronne d'altuglas. A droite, schéma de principe montrant la platine munie de l'hémicylindre d'altuglas correctement positionné par rapport à la source laser

Le principe du réglage est le suivant :

Allumez le laser. Positionnez, en le glissant sur la table, le plateau tournant afin de faire passer le faisceau au-dessus des graduations 0 et 360 de la graduation, puis faites tourner le plateau afin de vérifier que le faisceau passe toujours bien par le centre.

Obtenez le faisceau laser, puis placez l'hémicylindre d'altuglas dans la partie centrale de la couronne. Positionnez-le de façon à superposer sa face plane avec les graduations 90 et 270 de la platine. Cet hémicylindre permet d'étudier ce qu'il advient d'un rayon lors d'un changement de milieu : on peut ainsi étudier le passage air-altuglas ou altuglas-air.

Le dispositif ainsi réglé, vous pouvez tourner la platine sur elle-même. La face plane de l'hémicylindre constitue le dioptre plan qui sera étudié dans cette séance. La normale est ainsi repérée par la graduation 0 de la platine ; la lecture de l'angle d'incidence est donc immédiate.

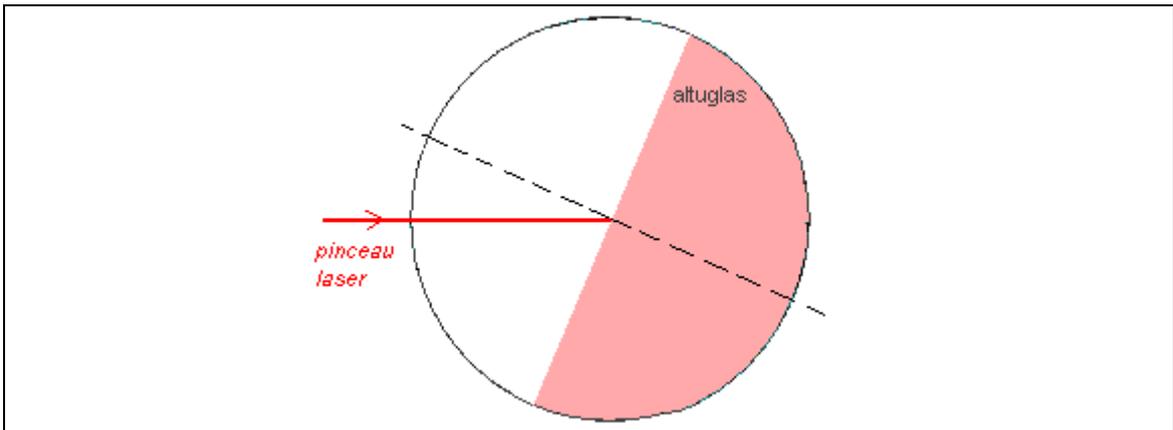
Quel est l'intérêt de la couronne d'altuglas ? (\*)

<sup>6</sup> L'altuglas est une marque déposée par la société Altulor pour désigner une matière plastique disponible sous la forme de plaques de polyméthacrylate de méthyle.

**b) Expériences sur la réflexion et la réfraction**

Expérience 3 : Passage air → altuglas

Que devient le faisceau laser lors d'un passage air → altuglas ? Repérez les différents faisceaux présents et nommez-les. Complétez le schéma ci-après.



Observez-vous toujours un faisceau réfracté et un faisceau réfléchi ? Ceci est-il compatible avec la loi de Snell-Descartes ?

Faites varier l'angle d'incidence  $i$  entre  $0$  et  $90^\circ$ , et mesurez à chaque fois l'angle de réfraction  $r$  correspondant. Effectuez ainsi une dizaine de relevés environ. Estimez les incertitudes notées  $\delta i$  et  $\delta r$  sur chaque mesure (l'incertitude peut varier d'un point à un autre).

Complétez le tableau ci-dessous (les colonnes  $\delta(\sin i)$  et  $\delta(\sin r)$  seront prises en compte lors du TD1)

$i$ (°)	$\delta i$ (°)	$r$ (°)	$\delta r$ (°)	$\sin i$	$\delta(\sin i)$	$\sin r$	$\delta(\sin r)$

Indiquez comment vous avez estimé les incertitudes :

Tracez un premier graphique en portant  $\sin i$  en fonction de  $\sin r$  sur un papier millimétré (ne pas porter les barres d'erreur pour le moment).

Les mesures sont elles conformes à la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction ?

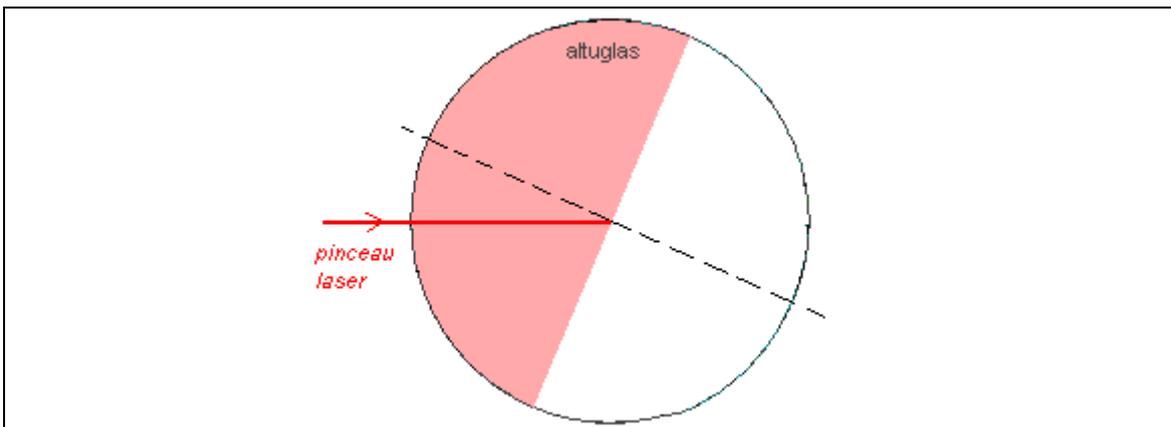
Quelle estimation peut-on alors déduire pour l'indice de l'altuglas ?

$n \approx$

La détermination de l'encadrement tenant compte des incertitudes de mesures sera faite en TD.

Expérience 4 : passage altuglas → air

Que devient le faisceau laser lors d'un passage altuglas → air ? Repérez les différents faisceaux présents et nommez-les. Complétez le schéma ci-après.



Observez-vous toujours un faisceau réfracté et un faisceau réfléchi ? Ceci est-il compatible avec la loi de Snell-Descartes ?

Effectuez une mesure de l'angle d'incidence, noté  $i$ , et de l'angle de réfraction correspondant, noté  $r$ , et déduisez-en une estimation de l'indice  $n$  de l'altuglas.

Repérer la valeur de l'angle d'incidence  $i_{lim}$  à partir duquel vous n'observez plus de réfraction. Noter celle-ci sous forme d'un encadrement représentant l'incertitude de votre estimation.

Déterminer ensuite la relation entre  $i_{lim}$  et l'indice  $n$  de l'altuglas. L'appliquer afin d'en déduire une estimation de  $n$ , en encadrant cette valeur.

$< i_{lim} <$

Expression de  $n$  en fonction de  $i_{lim}$  :

Valeur de  $n$  :

$< n <$

Utilisez maintenant la méthode vue au chapitre 5 pour déterminer directement l'incertitude  $\delta n$  sur  $n$  en fonction de l'incertitude  $\delta i_{lim}$  sur  $i_{lim}$ . Vérifiez que les deux méthodes donnent bien le même résultat.

$i_{lim} = \quad \pm$

$\delta i_{lim} =$

$n =$

$\delta n =$

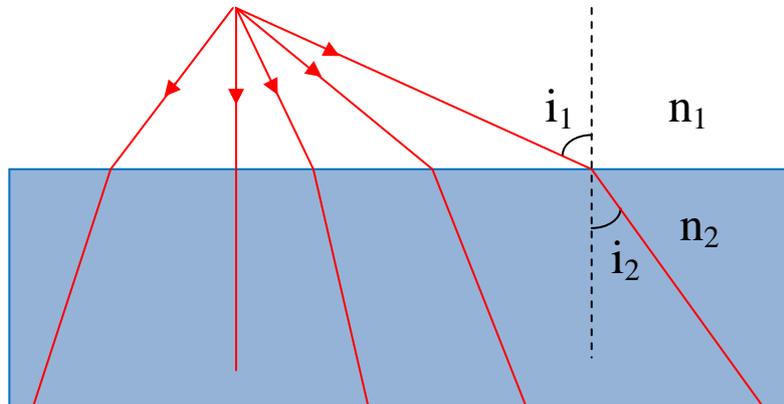
  
  

$n = \quad \pm$

## 2.4 Conséquences des lois de Snell-Descartes

Reprenons ici les différents cas vus expérimentalement.

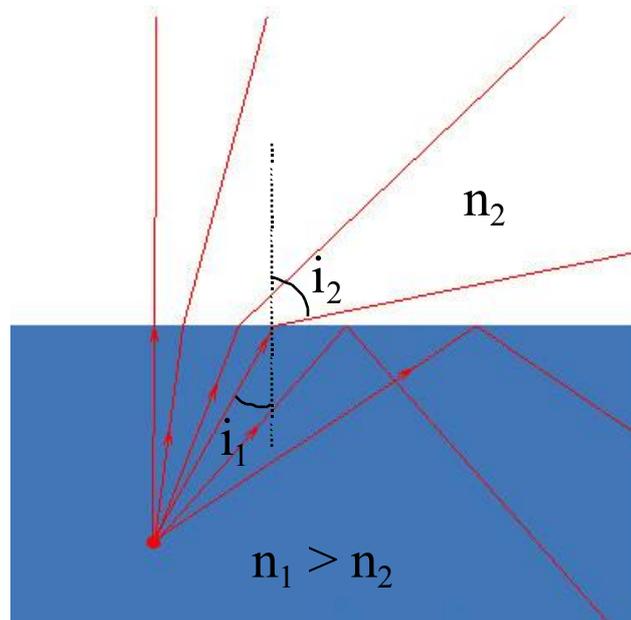
### a) Réfraction dans le cas $n_1 < n_2$



Dans ce cas on a  $\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 < \sin i_1$ , puisque  $n_1 < n_2$

Donc :  $i_2 < i_1$  quel que soit  $i_1$  entre 0 et  $90^\circ$ . L'angle  $i_2$  étant toujours défini, le rayon réfracté dans le milieu 2 existe toujours. Le rayon réfléchi existe également toujours.

### b) Réfraction dans le cas $n_1 > n_2$ (A)



Ici on a  $\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 > \sin i_1$  puisque  $n_1 > n_2$

Et donc cette fois :  $i_2 > i_1$  (schéma).

L'angle  $i_2$  est défini pour  $\sin i_2 \leq 1$  soit  $\frac{n_1}{n_2} \sin i_1 \leq 1$

Soit encore  $\sin i_1 \leq \frac{n_2}{n_1}$ .

Soit  $i_{lim}$  la valeur particulière de  $i_1$  telle que  $\sin i_{lim} = \frac{n_2}{n_1}$

L'angle  $i_2$ , et donc le rayon réfracté dans le milieu 1, est donc défini pour  $i_1 \leq i_{lim}$

Pour  $i_1 > i_{lim}$  le rayon réfracté n'est plus défini, donc il n'existe plus que le rayon réfléchi, c'est le cas de la réflexion totale.  $i_{lim}$  est appelé angle limite de réflexion totale.

## 2.5 Interprétation de la réfraction en termes de propagation d'onde (A)

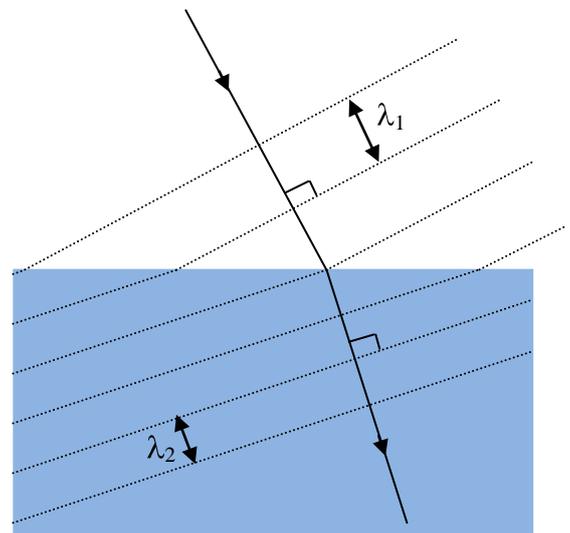
On considère une onde plane qui se propage dans un milieu transparent donné, et qui arrive sur un milieu dans lequel la vitesse de l'onde est plus faible que dans le premier milieu.

On peut alors comprendre pourquoi l'onde est déviée grâce au raisonnement suivant.

Lorsqu'une partie du front d'onde atteint le milieu où la célérité est plus faible, cette partie progresse moins vite que celle qui est encore dans le premier milieu.

Le schéma ci-contre représente ainsi plusieurs fronts d'ondes (ou un même front d'onde qui s'est déplacé) sous forme de droites en pointillés (il faut imaginer les plans vus en coupe).

Se déplaçant moins vite, les fronts d'onde qui en résultent dans le second milieu ont donc subi un "changement de cap" : une déviation. On peut alors dessiner un rayon (parmi d'autres) comme perpendiculaire aux fronts d'onde (trait continu avec une flèche). La déviation correspondante est évidemment la même pour le rayon.



On peut également voir le phénomène du point de vue de la longueur d'onde. En effet la longueur d'onde, définie par  $\lambda = \frac{v}{f}$ , où  $v$  désigne la célérité de l'onde dans le milieu, sera plus

faible dans le milieu de célérité moindre. Si l'on interprète le schéma ci-dessus, en considérant que les droites en pointillés représentent les surfaces d'onde séparées par la longueur d'onde  $\lambda_1$  dans le premier milieu, alors on constate bien que la longueur d'onde dans le second milieu est plus faible. Et comme une célérité plus faible correspond à un indice plus grand...

Ce modèle permet aussi d'interpréter le cas "inverse" où la lumière passe d'un milieu à un autre milieu moins réfringent, et en particulier la réflexion totale : dans le cas, contraire à celui traité ci-dessus, d'une onde arrivant d'un milieu d'indice plus élevé vers un milieu d'indice plus faible (il suffit de retourner le dessin ci-dessus de  $180^\circ$ ), il existe un angle d'incidence tel que les fronts d'onde de l'onde transmise sont perpendiculaires à l'interface, et donc l'onde transmise se propage parallèlement à celle-ci.

Remarque : pour l'onde réfléchie, elle a nécessairement la même longueur d'onde que l'onde incidente (étant dans le même milieu que celle-ci) ; elle est donc symétrique de l'onde incidente par rapport à la normale à l'interface.

### Encadré : un modèle microscopique pour expliquer la réflexion de la lumière (\*)

Dans tout ce qui précède, on a admis l'existence de l'onde réfléchie et de l'onde réfractée. Mais quelle est leur origine physique ? Ici, on tente d'expliquer l'existence de l'onde réfléchie en se basant sur un modèle microscopique simple. Le même type de raisonnement peut être fait pour l'onde réfractée.

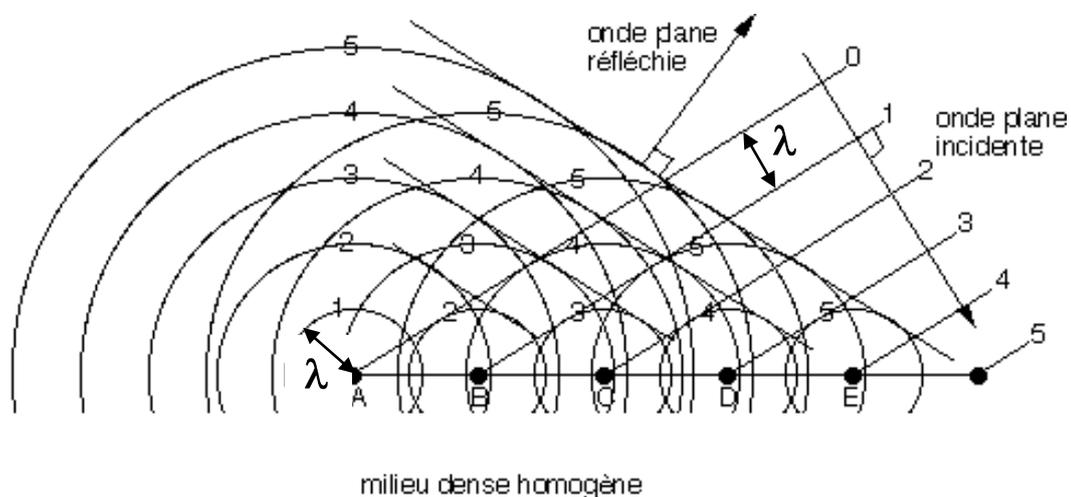
Considérons un milieu matériel homogène à l'état solide. Il est constitué d'atomes dont la taille (de l'ordre de 0.1 à 1 nm) est très petite par rapport à la longueur d'onde de la lumière (0.5  $\mu\text{m}$  environ). Que se passe-t-il quand une onde plane arrive sur un atome ? L'onde lumineuse est absorbée par l'atome, puis réémise dans toutes les directions de l'espace ; on dit qu'elle est diffusée (voir l'encadré suivant). L'onde réémise par un atome est donc une onde sphérique.

Maintenant que se passe-t-il si l'on considère, non plus un seul atome, mais une assemblée d'atomes constituant un milieu dense ? Les ondes réémises par les atomes vont se superposer entre elles et interférer de manière constructive ou destructive.

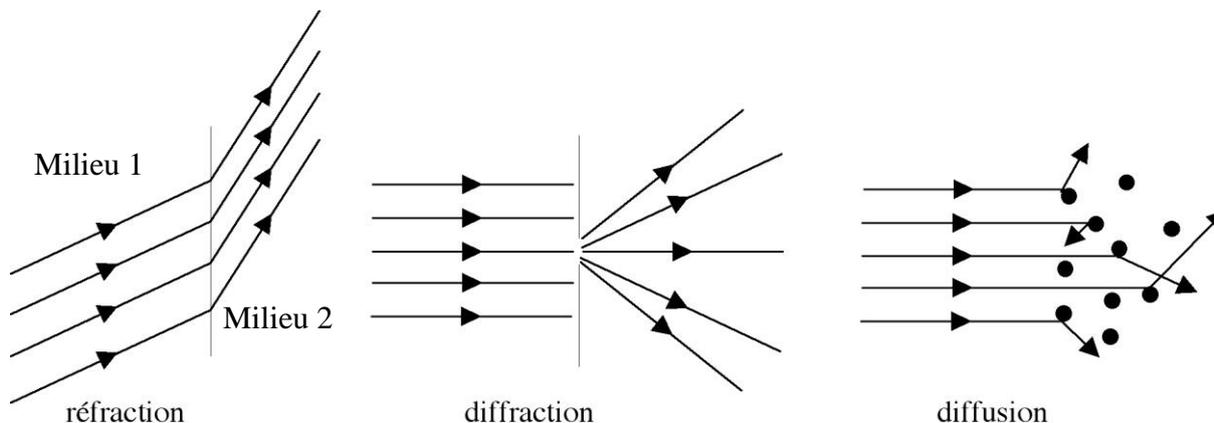
C'est ce mécanisme qui est sous-jacent dans les phénomènes de : propagation de la lumière dans un milieu matériel, réflexion et réfraction à une interface entre deux milieux. Nous allons ci-dessous examiner plus en détail le cas relativement simple de la réflexion.

Considérons le cas où une onde lumineuse se propageant dans l'air arrive à la surface d'un milieu dense homogène. En pratique, *seule une mince couche d'atomes située à la surface contribue à l'onde réfléchie*. Intéressons-nous donc uniquement à la couche juste à la surface. Quand le front d'onde de l'onde incidente avance, il arrive sur les atomes de la surface les uns après les autres. On a représenté sur la figure ci-dessous les différentes positions du front d'onde (numérotées de 0 à 5) lorsqu'il arrive successivement sur les différents atomes : la position 0 correspond à l'arrivée sur l'atome A, 1 à celle sur l'atome B, etc. Entre deux positions successives, on a une période temporelle de l'onde : le front d'onde s'est donc déplacé d'une longueur d'onde  $\lambda$ . Quand le front d'onde arrive en position 1, l'onde sphérique réémise par A dans le milieu de l'onde incidente correspond au cercle numéroté 1 (le rayon de ce cercle est égal au parcours du front d'onde entre les positions 0 et 1). Un même chiffre sur le dessin correspond donc à un même instant dans le temps. On voit ainsi comment se superposent les ondes réémises par les atomes : elles forment pratiquement une onde plane dans une direction dont on peut facilement se convaincre qu'elle est symétrique par rapport à la direction de l'onde incidente.

Remarque : plus les atomes seront serrés, "plus l'onde sera plane". En pratique, la distance interatomique est beaucoup plus petite que la longueur d'onde (dans le domaine optique), donc l'onde peut bien être considérée comme plane.



**Encadré : réfraction, diffraction, et diffusion : des notions à ne pas confondre !**



Les mots *réfraction* et *diffraction* ont en commun de contenir l'idée de fracture.

Dans le cas de la réfraction, un faisceau de rayons parallèles arrivant sur un dioptre plan est dévié en passant dans le second milieu, de telle sorte que *tous les rayons soient déviés de la même façon*.

Dans le cas de la diffraction, un faisceau parallèle arrivant par exemple sur un trou assez petit (de taille pas trop grande devant la longueur d'onde du rayonnement lumineux) sera diffracté : à la sortie du trou, les rayons sont dirigés dans toutes les directions .

Le terme de diffusion signifie qu'un rayonnement incident est dévié dans de multiples directions ("éparpillé" en quelque sorte), en général par une particule ou une assemblée de particules. Citons quelques exemples :

- Diffusion de la lumière par de fines particules (poussière par exemple) : c'est ce qui permet de voir un faisceau laser, ou la lumière sous un nuage.
- Diffusion de la lumière par les molécules de l'atmosphère. Il se trouve qu'elle dépend de la fréquence de l'onde lumineuse (le bleu étant nettement plus diffusé que le rouge), c'est donc ce phénomène qui explique que le ciel nous apparaisse lumineux, et bleu (sans atmosphère, le ciel serait noir, comme celui qu'on voit de la Lune...).

### 3. Exemples d'applications

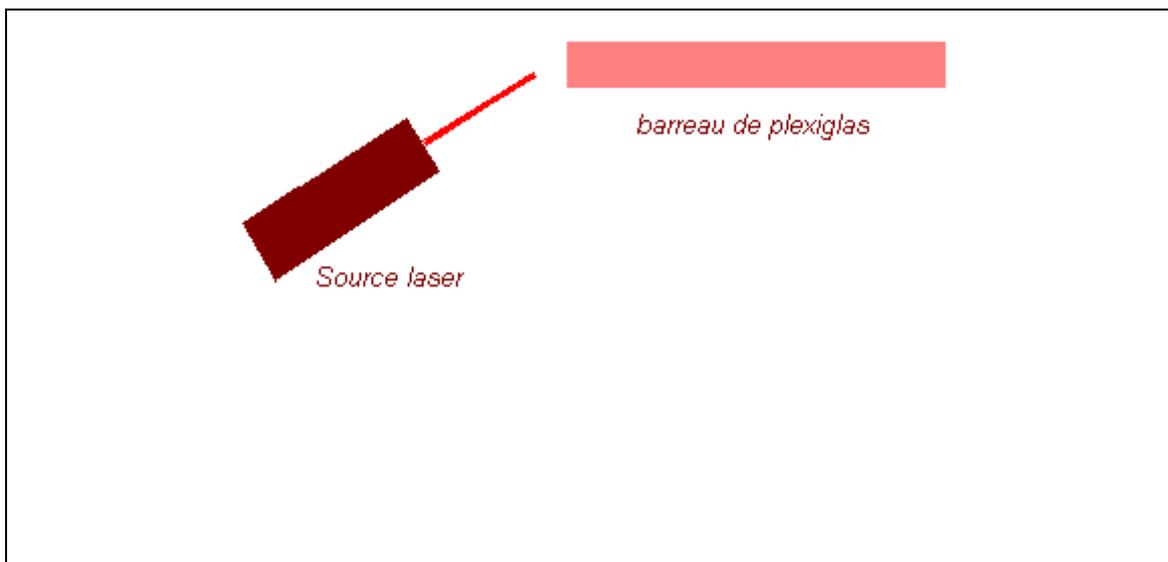
#### 3.1. La réflexion totale ; application au guidage de la lumière

Le phénomène de réflexion totale est utilisé pour le guidage de la lumière dans les fibres optiques, très utilisées dans le domaine des télécommunications (voir l'encadré correspondant, ainsi que l'exercice 1.7).

Comment est-il possible de guider la lumière ? La théorie des fibres optiques est complexe, nous aborderons ici leur fonctionnement uniquement du point de vue de l'optique géométrique<sup>7</sup>. Tout d'abord, nous allons montrer que la lumière peut être guidée par une simple règle en altuglas.

##### Expérience 5 : guide de lumière dans l'altuglas

*Faites entrer le faisceau laser par un bout de la règle en altuglas à votre disposition. En orientant convenablement celle-ci par rapport au faisceau, que constatez-vous ? Quel phénomène est responsable de la propagation du faisceau dans la règle ? Jusqu'à combien de réflexions pouvez-vous observer ? Que pouvez-vous dire de l'intensité du faisceau à la sortie de la règle par rapport à l'entrée ? Représentez ci-dessous ce que vous observez sur un schéma aussi exact que possible.*



##### Expérience 6 : fibre optique

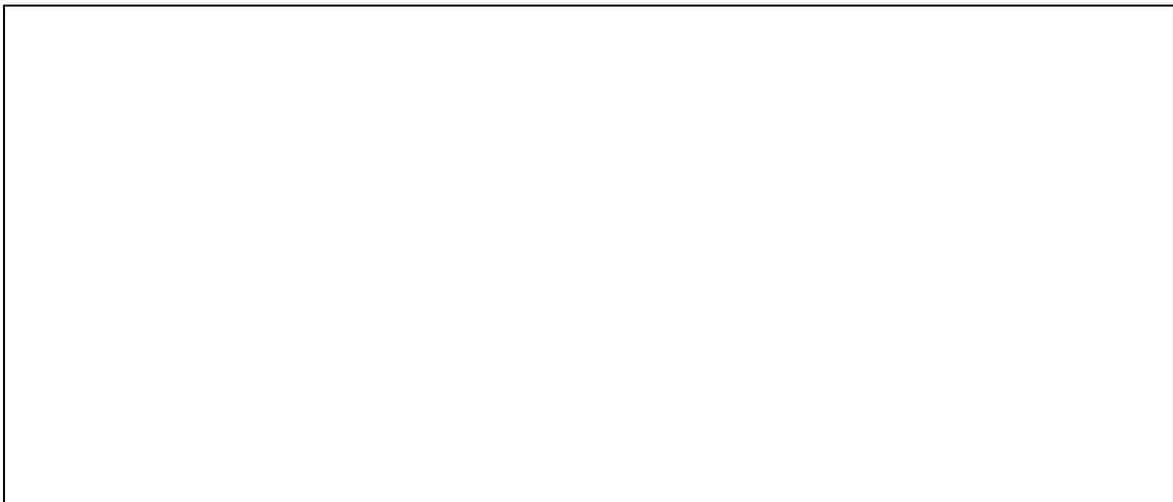
*Faites entrer le faisceau laser par un bout de la fibre en optimisant l'orientation de la fibre par rapport au laser. Qu'observez-vous ? Faites un schéma, et expliquez. Que pouvez-vous dire de l'intensité en sortie de fibre ? Quelles sont à votre avis les difficultés rencontrées lorsqu'on veut transmettre de la lumière par fibre optique ?*

<sup>7</sup> Ceci est valable tant que le diamètre de la fibre est très grand devant la longueur d'onde de la lumière.



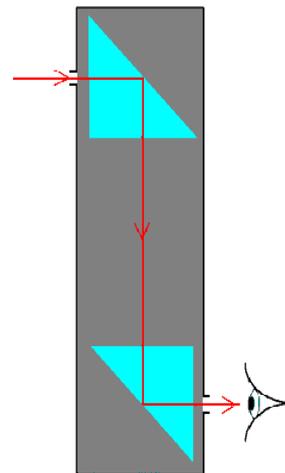
Expérience 7 (à réaliser par l'enseignant) : *fontaine lumineuse*

L'eau d'un récipient transparent s'écoule par un orifice latéral proche de sa base. On fait passer un faisceau laser à travers le récipient, dans l'axe de l'orifice d'évacuation. Qu'observez-vous ? Expliquez<sup>8</sup>.



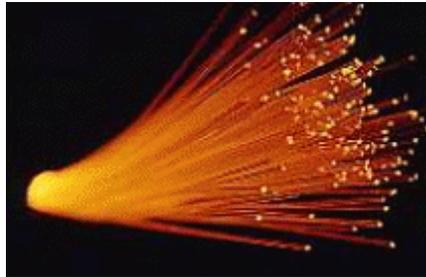
Une autre application du phénomène de réflexion totale est : les *prismes à réflexion totale*, qui remplacent parfois les miroirs (en effet les prismes sont moins onéreux) dans les systèmes optiques, comme par exemple dans un périscope (voir ci-dessous), ou encore dans des jumelles.

*Schéma de principe d'un périscope (en réalité, on trouve un certain nombre de lentilles entre les deux prismes, non représentées ici).*



<sup>8</sup> Ce phénomène de guidage de la lumière par un filet d'eau avait déjà été observé par John Tyndall en 1870.

## Encadré : les applications des fibres optiques



*Faisceau de fibres optiques*

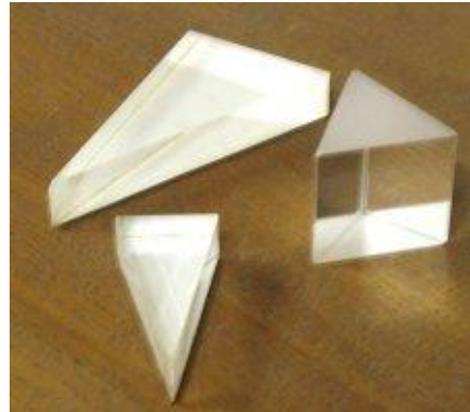
On utilise des fibres optiques en verre pour *le transport d'information* depuis les années 1950 environ. C'est surtout quand le laser est apparu dans les années 1960 que l'utilisation de la lumière pour le transport d'information (plutôt que d'autres ondes électromagnétiques de plus basse fréquence, comme les micro-ondes) s'est beaucoup répandue. Aujourd'hui, 2/3 des communications mondiales s'effectuent par câble, contre 1/3 seulement par satellite. Les fibres optiques sont utilisées dans les communications terrestres : elles sont présentes le long des autoroutes, des voies ferrées, et sous nos pieds lorsque nous marchons sur les trottoirs des villes. Elles sont également enfouies dans les océans : 200 000 km de câbles sont posés chaque année dans tout ce que la planète compte de mers et d'océans. Avant d'utiliser des fibres optiques, des câbles en cuivre avaient été posés, par exemple sous l'Atlantique ; le premier avait été posé en 1956, et ne permettait de transporter que 51 conversations simultanées. Le premier câble transatlantique à fibre optique a été installé au fond de l'océan en 1988, et permet de transporter 40000 conversations téléphoniques simultanées. Comme le signal s'atténue au fur et à mesure de sa propagation le long de la fibre, il est nécessaire de l'amplifier régulièrement. Dans ce but, des répéteurs sont disposés tous les 50 km environ. Le câble est posé à deux mètres sous terre et jusqu'à 2000 m de profondeur. C'est la seule méthode pour le protéger des filets de pêche et des ancres des bateaux...

On utilise également les fibres optiques sous forme de faisceau de fibres bien parallèles entre elles. Un tel faisceau permet de transporter point par point une image. C'est ce principe qui est utilisé par exemple dans les *endoscopes* (pour explorer les organes du corps humain, détecter d'éventuelles tumeurs...), ou pour aller voir dans le cœur d'un réacteur nucléaire.

### 3.2 Le prisme

Un prisme est un milieu homogène limité par deux dioptries plans non parallèles, appelés les *faces d'entrée* et *de sortie* du prisme (toutes les deux sont polies). Leur intersection forme l'*arête* du prisme, caractérisée par un angle  $A$ .

Les deux propriétés principales des prismes sont de *dévier* et de *dispenser* la lumière. La dispersion signifie la séparation d'un rayonnement polychromatique en ses différentes composantes et sera étudiée au chapitre suivant. Ici, nous nous intéresserons à la déviation d'un faisceau monochromatique par un prisme.



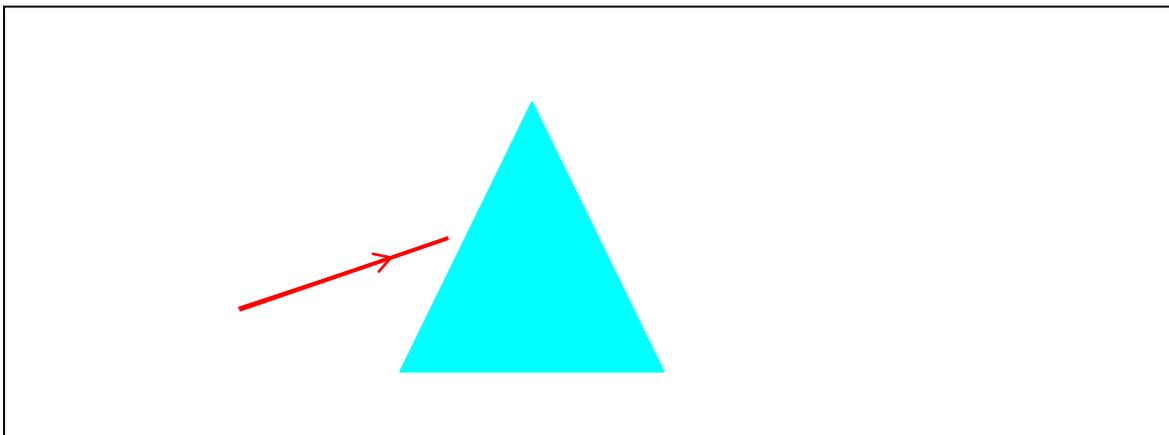
#### a) Expériences

Dans la pratique, la propriété qu'ont les prismes de dévier la lumière est utilisée dans de nombreux instruments d'optique, souvent dans le but de réduire la taille du système optique, en le "pliant". Nous avons déjà cité l'exemple des prismes à réflexion totale qui remplacent souvent les miroirs.

##### Expérience 8 : observation

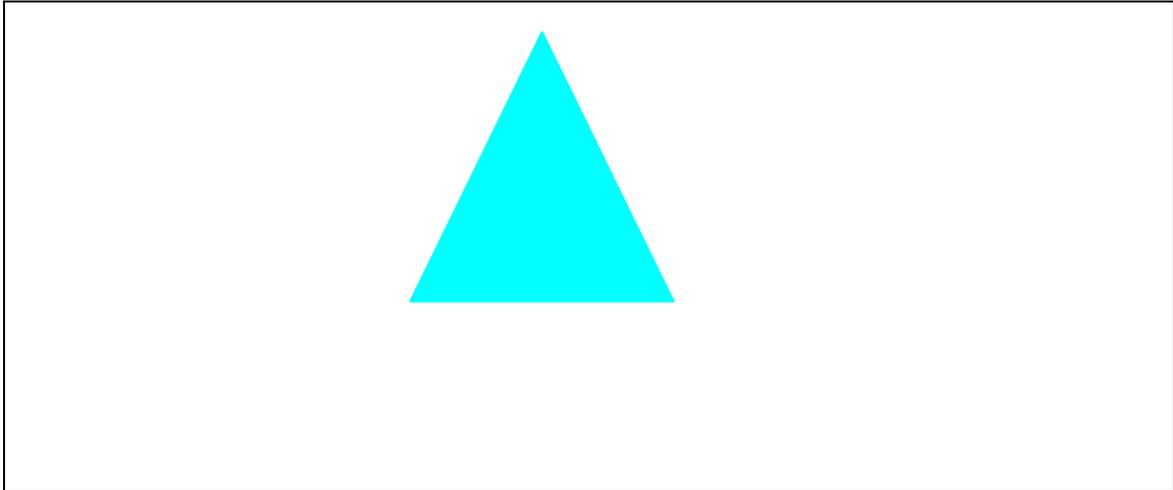
*Envoyer le faisceau laser sur un des prismes à votre disposition et observer la déviation du faisceau engendrée par le prisme.*

*Compléter le schéma ci-dessous en fonction de ce que vous observez. Définissez sur votre dessin l'angle de déviation  $D$  du faisceau (angle formé par les directions du faisceau avant et après le prisme).*



*Quel est l'intérêt d'un prisme par rapport à un dioptre plan unique ?*

*Existe-t-il toujours un faisceau émergent de la face de sortie du prisme? Sinon, dans quelles conditions ce faisceau n'existe-t-il plus? Interpréter ce phénomène.*



**Expérience 9 : observation du minimum de déviation (A)**

Tourner le prisme sur lui-même et constater l'existence d'un minimum de l'angle de déviation.

Valeur de la déviation minimale ( $D_m$ ) :

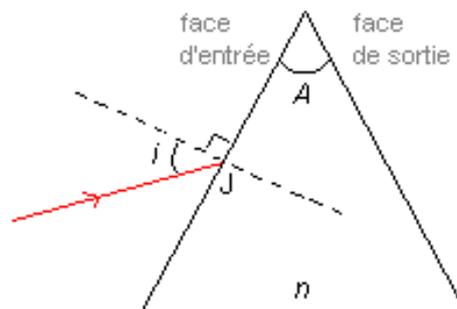
$$D_m = \pm$$

**Expérience 10 : obtention de la courbe  $D(i)$  (facultatif)**

Pour chaque valeur de l'angle d'incidence  $i$  (défini au §b ci-dessous), mesurer l'angle de déviation  $D$ . Tracer la courbe  $D(i)$  sur papier millimétré, avec les barres d'erreur sur  $D$  et  $i$  correspondant à leurs incertitudes respectives. **Retrouver la valeur du minimum  $D_m$  déterminé lors de l'expérience 9.**

**b) Interprétation, et deuxième détermination de l'indice de l'altuglas (A)**

On peut calculer la déviation d'un rayon en utilisant les lois de Snell-Descartes au passage de chacun des deux dioptries. La différence ici vient évidemment de ce que les deux dioptries forment un angle (noté traditionnellement  $A$ ) qui intervient dans la réfraction sur le second dioptre.



Complétez le schéma ci-dessus avec les notations suivantes :

$i$  est appelé *angle d'incidence*, c'est l'angle entre le rayon incident et la normale à la face d'entrée du prisme, au point J.

$r$  est l'angle entre le rayon dans le prisme et la normale à la face d'entrée du prisme au point J.

$r'$  est l'angle entre le rayon dans le prisme et la normale à la face de sortie du prisme au point J' (point de la face de sortie par lequel le rayon sort du prisme).

$i'$  est l'angle entre le rayon émergent du prisme et la normale à la face de sortie du prisme au point J'.

Montrer par des arguments qualitatifs (\*) que le minimum de déviation correspond nécessairement à la situation symétrique telle que  $i = i'$  et  $r = r'$ . Le cas échéant, vérifiez-le expérimentalement.

On montrera en TD (voir l'exercice 1.5) que l'indice du prisme s'exprime comme suit :

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + D_m}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}$$

En considérant que l'incertitude sur l'angle  $A$  est négligeable devant celle sur la mesure de  $D_m$ , déterminer l'incertitude  $\delta n$  sur l'indice  $n$ , en fonction de  $\delta D_m$ .

En déduire une nouvelle estimation de l'indice  $n$  avec l'incertitude associée :

$$\delta n =$$

$$n = \pm$$

### 3.3 Bilan des différentes mesures de l'indice de l'altuglas

Méthode	Valeur obtenue ( <u>avec incertitude</u> )
Mesure de l'angle de réfraction limite altuglas/air $n = \frac{1}{\sin(i_{\text{lim}})}$	
Mesure de l'angle de déviation minimale $D_m$ $n = \frac{\sin\left(\frac{A + D_m}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}$	

*Conclusion ?*

## 4. Propagation de la lumière dans un milieu inhomogène

### 4.1 Expériences

Expérience 11 (à faire par l'enseignant) : courbure d'un faisceau lumineux

On dispose du sucre en poudre au fond d'une cuve (sur une épaisseur de 3 mm environ) que l'on remplit doucement d'eau (en versant l'eau le long des bords de la cuve). Après environ une heure d'attente, on envoie un faisceau laser à travers la cuve, légèrement incliné soit vers le haut, soit vers le bas.

Qu'observez-vous ? Faire un schéma.

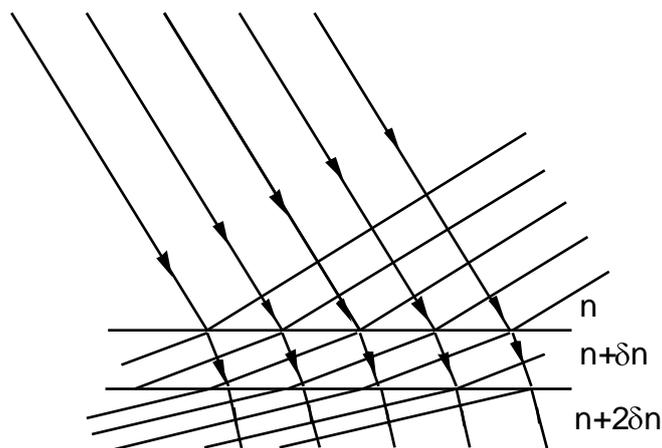


### 4.2 Interprétation (A)

On voit ici que le principe de propagation rectiligne n'est pas toujours valide. Il n'est vrai qu'en milieu homogène. En milieu inhomogène, les rayons lumineux sont courbes.

Essayons de comprendre pourquoi les rayons lumineux sont courbes dans un milieu inhomogène, à l'aide d'un modèle ondulatoire.

Le fait que le milieu soit inhomogène signifie que l'indice n'est plus uniforme : sa valeur varie d'un point à un autre du milieu. Supposons que cette variation d'indice soit assez "douce". Par exemple, dans le cas de l'eau sucrée, l'indice augmente continûment entre celui de l'eau (1.33) et celui de l'eau saturée en sucre (environ 1.5), suivant un axe vertical orienté vers le bas.



On coupe le milieu en « tranches » horizontales, en considérant que l'indice est uniforme à l'intérieur d'une tranche, et qu'il varie d'une petite quantité  $\delta n$  ( $>0$  dans le cas du schéma ci-dessus) entre une tranche donnée et celle située immédiatement en-dessous d'elle. On effectue le même type de dessin que pour l'interprétation de la loi de la réfraction (2.5). On trouve que la direction de la lumière dévie à chaque fois qu'on passe d'une tranche à la tranche du dessous. Le faisceau se courbe donc. On a traité ici le cas où l'indice augmente au fur et à mesure que la lumière avance. Dans le cas où l'indice diminue le long du trajet de celle-ci, on

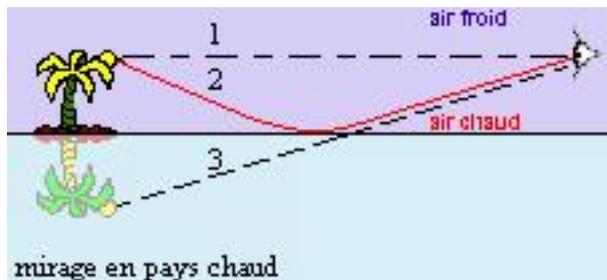
trouve que le faisceau doit se courber dans l'autre sens.

- C'est ce phénomène qui se produit lors des *mirages* que l'on observe facilement en été. D'une manière générale, les mirages se produisent à cause d'une variation de l'indice de l'air induite par une variation de la température (voir encadré ci-dessous).
- *L'atmosphère terrestre* est inhomogène en température et en densité, et donc son indice optique varie également suivant la hauteur. Ceci est à la base du fait que le soleil apparaisse plus haut sur l'horizon qu'il n'est en réalité.
- Dans les *fibres optiques à gradient d'indice*, les rayons lumineux sont également courbés.

### Encadré : les mirages

#### **Le mirage inférieur**

Quand la température de l'air diminue lorsqu'on s'éloigne d'une surface chauffée par le soleil (asphalte, sable..), il se produit le phénomène de mirage inférieur (ou « mirage du désert »). La densité de l'air augmente quand on s'éloigne de la surface chauffée, et l'indice aussi. On peut alors montrer que les rayons lumineux provenant du ciel sont courbés vers le haut. L'œil d'un observateur perçoit le reflet du ciel comme si le sol se comportait comme un miroir : c'est le mirage de l'oasis des Dupont dans l'album de Hergé « Tintin au pays de l'or noir ». La figure suivante montre les trajets réel (2) et apparent (3) des rayons lumineux dans le cas d'un mirage inférieur (le trajet 1 correspondrait au cas d'un milieu homogène).



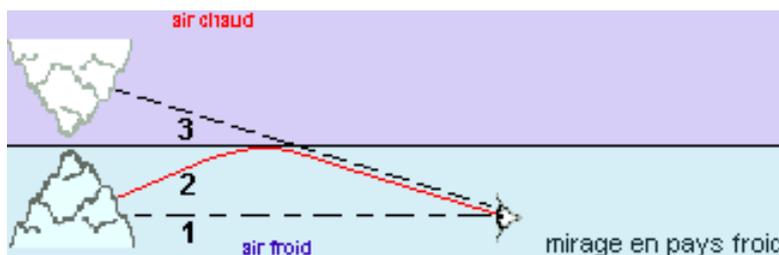
*principe du mirage inférieur*



*exemple (W. Tape, 1985)*

#### **Le mirage supérieur**

Au contraire du « mirage du désert », il se produit lorsque la surface est plus froide que l'air au-dessus d'elle. Les rayons lumineux sont alors déviés vers le sol. Ce second type de mirage est observé plus rarement que le premier. C'est ce phénomène qui explique qu'on puisse parfois voir le Canigou (sommets des Pyrénées) depuis Cassis (près de Marseille).



*principe du mirage supérieur*



*Le Canigou vu de Cassis*

### Résumé du chapitre 1

Le terme de lumière désigne la gamme de fréquence des ondes électromagnétiques pour lesquelles l'œil est sensible. La valeur de la célérité (vitesse dans le vide) de la lumière, est de  $299792,458 \text{ km.s}^{-1}$  Soit environ  $300\,000 \text{ km.s}^{-1}$  dans la conversation courante.

A toute onde lumineuse, on peut associer une longueur d'onde dans le vide :  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$

La fréquence d'une onde lumineuse ne varie pas mais seule sa longueur d'onde varie quand elle traverse des milieux différents

Le milieu est alors caractérisé par son indice optique. Si on note  $v$  la célérité dans le milieu, l'indice optique est défini par :  $n = \frac{c}{v}$ .

L'onde est caractérisée par des surfaces d'onde perpendiculaires aux rayons.

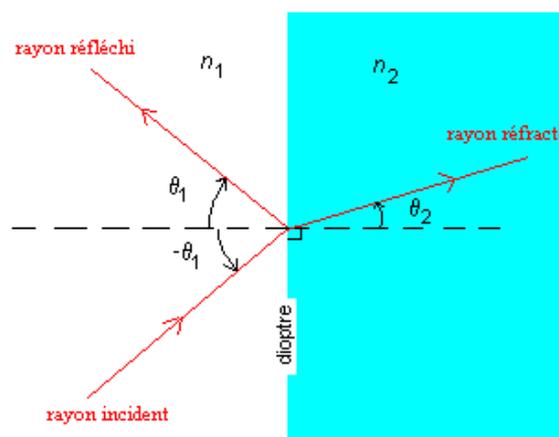
### Réflexion et réfraction : lois de Snell-Descartes :

On appelle dioptre la surface séparant deux milieux transparents. De façon générale, au passage d'un dioptre, il y a à la fois réfraction et réflexion : une partie de la lumière est réfléchi à la surface du dioptre et l'autre partie est réfractée lors de son passage dans l'autre milieu.

- Les rayons lumineux réfléchis sont dans le plan d'incidence, et tels que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.
- Les rayons lumineux transmis sont dans le plan d'incidence, et tels que l'angle de réfraction est lié à l'angle d'incidence par la formule

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

où  $n_1$  est l'indice du milieu d'incidence,  $n_2$  celui du milieu de réfraction,  $\theta_1$  l'angle d'incidence et  $\theta_2$  l'angle de réfraction.



Réfraction avec un indice  $n_2 > n_1$

Un prisme permet de dévier la lumière.



**CHAPITRE 2 :**  
**COULEURS ET SPECTROSCOPIE**



*arc-en-ciel*

**Salles : « images » 030 ou 100**

## SOMMAIRE DU CHAPITRE 2 :

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>44</b>
<hr/>	
1.1 COULEURS ET NATURE DE LA LUMIERE	44
1.2 COULEUR ET LONGUEUR D'ONDE DU PHYSICIEN	46
<b>2. DISPERSION DES COULEURS</b>	<b>46</b>
<hr/>	
2.1 DISPERSION DE LA LUMIERE BLANCHE PAR UN PRISME	46
A) EXPERIENCE	46
B) INTERPRETATION DE LA DISPERSION	48
2.2. ET L'ARC-EN-CIEL ?	49
<b>3. SPECTROSCOPIE</b>	<b>51</b>
<hr/>	
3.1 DEFINITION	51
3.2 UTILISATION DU PRISME EN SPECTROSCOPIE : MINIMUM DE DEVIATION	51
3.3 OBTENTION DE SPECTRES PAR DES "RESEAUX DE DIFFRACTION"	52
3.4 SPECTRES DE RAIES	53
A) EXPERIENCES :	53
B) SPECTRES DE RAIES ET STRUCTURE DE L'ATOME	54
C) SPECTRE DE RAIES EN EMISSION : MODELE QUANTIQUE DE L'ATOME	56
D) RETOUR SUR LA SPECTROSCOPIE	56
3.5 SPECTRES D'ABSORPTION	57
A) CAS D'UN GAZ	57
B) CAS D'UN SOLIDE OU D'UN LIQUIDE	58
<b>4. LA COULEUR DES OBJETS</b>	<b>59</b>
<hr/>	
4.1 DE QUOI DEPEND LA COULEUR D'UN OBJET ?	59
4.2 SYNTHESE ADDITIVE	60
4.3. L'ŒIL ET LA VISION DES COULEURS	61
4.4 SYNTHESE SOUSTRACTIVE	62

### **Matériel à votre disposition par table**

- *Source de lumière blanche + transfo*
- *2 plateaux supports*
- *1 prisme*
- *1 fente variable*
- *1 lentille +10 ou +20 cm*
- *1 écran*
- *6 pieds*
- *2 petites cuves*
- *1 jeu de filtres colorés*
- *1 réseau*
- *1 support diapo*
- *1 grande boîte de rangement*
- *1 boîte en plastique pour le prisme*
  
- *1 lampe Hg*
- *1 lampe « X »*
- *1 lampe Cd*
  
- *1 petit miroir plan*
- *1 lampe de poche*
- *2 ampoules (dont une sur support) + une pile*
- *1 petite plaque de plexiglas + support pour la faire tenir verticalement*
- *1 petit miroir sphérique*

### **Matériel pour l'enseignant**

- *colorants*
- *Dispositif de démonstration avec source laser multifaisceaux (laserbox) + panneau métallique+ kit optique magnétique*
- *1 rétroprojecteur, à aller chercher à l'accueil du bât. 333*
- *1 dispositif pour synthèse additive + support à tige + noix*
- *1 dispositif pour synthèse soustractive*
- *1 jeu de 3 miroirs (concave, convexe et plan)*

# 1. Introduction

## 1.1 Couleurs et nature de la lumière

L'arc-en-ciel (photo ci-dessous) est un phénomène que chacun a pu observer de nombreuses fois. Ses couleurs, sa forme d'arc plus ou moins étendu ont toujours fasciné. Ne dit-on pas qu'un trésor se trouve au pied des arcs-en-ciel ?



Pendant près de vingt siècles, physiciens et philosophes se sont interrogés sur la nature de la lumière et ont tenté d'expliquer les couleurs (voir l'encadré page suivante). Le philosophe latin Sénèque avait déjà noté, au début de notre ère, que les couleurs de l'arc-en-ciel étaient les mêmes que celles obtenues en faisant passer la lumière du soleil à travers un morceau de verre taillé de façon à comporter trois angles : on a là l'une des premières utilisations du prisme pour l'étude des couleurs.

Le prisme sera utilisé par de grands savants comme Descartes ou Grimaldi, au XVII<sup>e</sup> siècle, mais il faudra attendre Isaac Newton et ses expériences historiques d'analyse de la lumière pour comprendre que la lumière "blanche" est composée de « lumières élémentaires homogènes ».

La notion de couleur est reliée à l'effet perçu par l'œil, c'est une notion subjective... On peut appeler couleur l'effet ressenti par l'œil suite à la superposition d'une ou plusieurs fréquences optiques. C'est une notion perceptive : nous y reviendrons à la fin de ce chapitre.

Dans une première partie, nous allons nous intéresser aux couleurs de la lumière, telle qu'elle nous apparaît dans l'arc-en-ciel ou dans le jeu de la lumière sur des verres ou d'autres corps transparents.

## Encadré : les couleurs au fil du temps

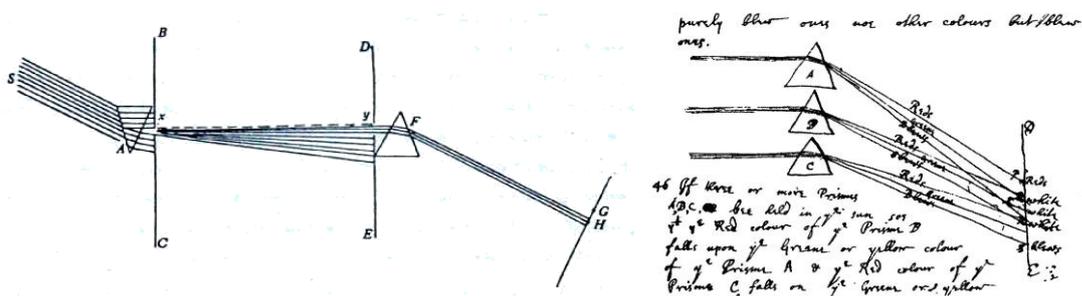
Une question qui a longtemps préoccupé les philosophes et scientifiques est celle de savoir d'où proviennent les couleurs observées dans le ciel lors de l'apparition d'un arc-en-ciel.

Dans l'Antiquité, *Aristote* (384-322 av JC) avance une théorie qui perdura pendant de nombreux siècles, celle de la modification de la lumière blanche. Cette théorie consiste à dire qu'une lumière colorée est un mélange de lumière blanche et d'ombre, la quantité d'ombre incorporée augmentant avec l'épaisseur de matière traversée. Les couleurs étaient ainsi classées en fonction de l'impression subjective de plus ou moins grande luminosité sur un axe allant du blanc au noir (qui sont des couleurs à part entière), en passant par le jaune, le rouge, le vert, le bleu et le violet.

Cette théorie de la modification de la lumière blanche fut aussi utilisée pour expliquer l'apparition des couleurs créées lors du passage de la lumière à travers un prisme (*de Dominis*, 1611). Le prisme est perçu comme un élément qui introduit de l'opacité : ainsi les couleurs obtenues à la sortie du prisme correspondent chacune à une épaisseur traversée différente (et effectivement, le rouge est plus proche du sommet du prisme que le bleu...).

*Newton* cherchant à construire une théorie "atomique" de la lumière a l'idée que la réfraction d'un rayon peut dépendre de sa couleur. Pour le vérifier, il réalise plusieurs expériences avec des prismes<sup>9</sup>.

Il obtient les différentes couleurs à l'aide d'un premier prisme, et il a l'idée de recevoir « les rayons purement rouges » sur un second prisme (figure ci-dessous, gauche). Il n'apparaît pas d'autre couleur que le rouge! Il opère de même avec le bleu : les « rayons purement bleus ( $\gamma$ ) subissent vraiment une plus grande réfraction avec le deuxième prisme que les rouges ». La théorie de la modification qui prévoit un changement de couleur puisque l'épaisseur de verre traversé est plus grande est mise en défaut. Il prend alors plusieurs prismes et fait tomber sur eux autant de rayons de lumière blanche : il observe que le rouge est toujours moins dévié, le bleu toujours plus. Dans la zone de l'écran où se superposent les couleurs, il observe du blanc (fig. ci-dessous, dte)



*Expériences de Newton*

Il est ainsi le premier à comprendre (même si cela nous paraît "évident" aujourd'hui...) que "La blancheur de la lumière solaire résulte de toutes les couleurs primitives mêlées dans une juste proportion."

<sup>9</sup> Ces expériences cruciales pour l'optique furent réalisées au cours d'un séjour forcé à la campagne en 1665. Il a en effet été obligé d'interrompre ses études à Cambridge à cause de la peste qui s'était abattue sur la ville.

## 1.2 Couleur et longueur d'onde du physicien

À une longueur d'onde donnée<sup>10</sup> du domaine du visible (cf. chapitre précédent), on peut faire correspondre une couleur. Ainsi, les lampes à vapeur de sodium émettent une lumière jaune-orangé, tandis qu'un laser He-Ne émet une lumière rouge.

Le tableau ci-dessous donne les noms des couleurs "pures" associées à différents intervalles de longueur d'onde du visible (couleurs de l'arc-en-ciel) :

Couleurs	fréquences ( $10^{14}$ Hz)	longueurs d'onde dans le vide (nm)
<i>Rouge</i>	4,05 - 4,8	~ 625-740
<i>Orange</i>	4,8 - 5,08	~ 590-625
<i>Jaune</i>	5,08 - 5,31	~ 565-590
<i>Vert</i>	5,31 - 5,77	~ 520-565
<i>Cyan</i>	5,77 - 6	~ 500-520
<i>Bleu</i>	6 - 6,67	~ 450-500
<i>Indigo</i>	6,67 - 6,97	~ 430-450
<i>Violet</i>	6,97 - 7,89	~ 380-430

Mais à une couleur donnée on ne peut pas généralement faire correspondre une seule longueur d'onde. Pour vous en convaincre, comparez les couleurs des objets autour de vous à celles de l'arc-en-ciel et vous verrez qu'il y a très peu de coïncidences.

## 2. Dispersion des couleurs

Newton a fait de nombreuses expériences avec des prismes de verre. En effet, certains verres permettent d'obtenir une dispersion des couleurs, et la forme du prisme permet de faire des études quantitatives.

Nous avons déjà vu le comportement du prisme en lumière monochromatique dans le chapitre précédent ; nous allons ici voir ses effets sur la lumière blanche.

### 2.1 Dispersion de la lumière blanche par un prisme

#### a) Expérience

##### Expérience 1 :

*Allumez la source de lumière blanche. Placez une fente de largeur réglable à la suite et assurez-vous qu'elle est bien en face de la lampe. Réglez la tirette de façon à éclairer complètement la fente.*

*Placez la lentille mise à votre disposition à distance de la fente. Placez alors un écran à la suite et déplacez-le jusqu'à obtenir l'image **nette** de la fente sur l'écran. Vous*

<sup>10</sup> Il s'agit de la longueur d'onde *dans le vide*. En toute rigueur, il vaut mieux parler de fréquence (cf p. 14)

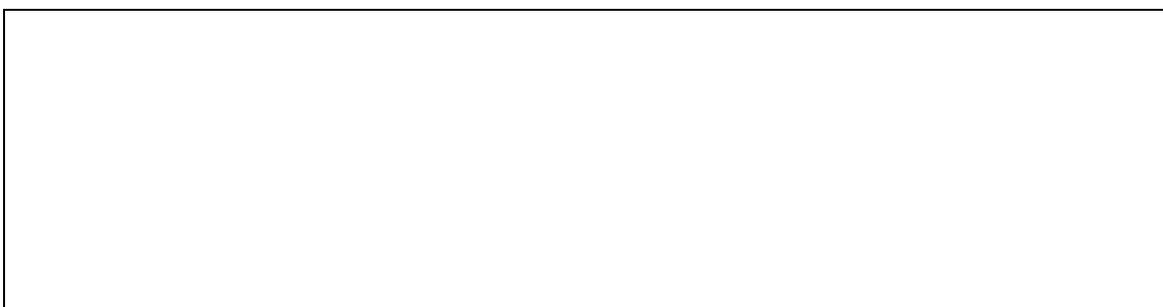
*pouvez jouer sur la taille de celle-ci en rapprochant ou en éloignant la lentille de la fente, et en recherchant la netteté en déplaçant l'écran. Soignez à chaque fois l'alignement de l'ensemble des éléments présents : il peut être nécessaire d'ajuster aussi les hauteurs avec les pieds à vis de la fente ou de la lentille.*

*Interposez alors, entre la lentille et l'écran, un prisme placé sur un plateau sur pied, de façon à ce qu'une de ses faces soit dans le faisceau incident. Ajustez la hauteur si nécessaire. Tournez légèrement le prisme et recherchez le faisceau émergent en déplaçant l'écran autour du prisme.*

*Que constatez-vous ? Décrivez. Reproduisez (en couleur) ce que vous voyez sur l'écran.*



*Dans cette expérience, on observe deux phénomènes : la déviation et la dispersion de la lumière. Définir ces deux termes.*



*Quelle est la couleur la plus déviée, le rouge ou le bleu ?*



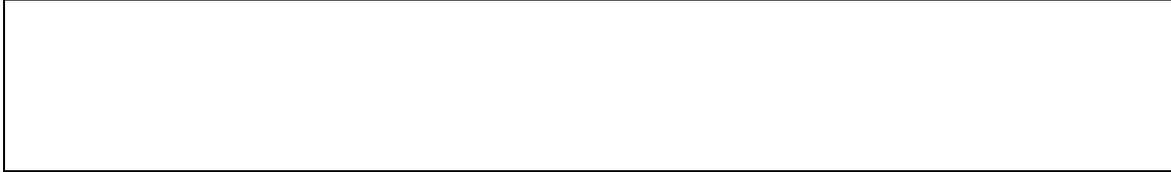
*Élargir la fente, puis la rétrécir. Otez la fente. D'après ces observations, la fente vous semble-t-elle utile ? En quoi ?*



## b) Interprétation de la dispersion (A)

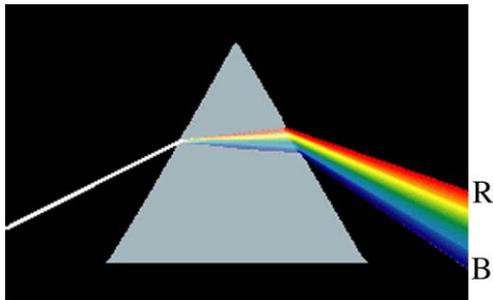
Par ses expériences, Newton a montré que les couleurs à la sortie du prisme n'étaient pas créées par le prisme qui aurait "modifié" la lumière, mais celui-ci avait "simplement" séparé les différentes composantes contenues dans la lumière du Soleil.

*Voyez-vous quelle(s) expérience(s) parmi celles illustrées précédemment (voir l'encadré) pouvai(en)t effectivement le montrer?*

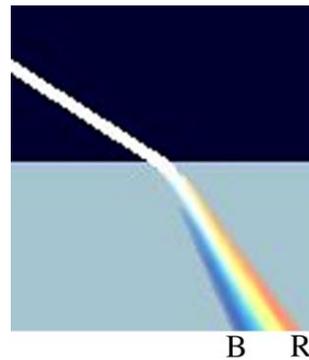


La séparation des couleurs, si vous l'avez obtenue avec un prisme, vient de ce qu'à *chaque dioptré* il y a une séparation des composantes chromatiques.

Le jeu des deux dioptrés formant un angle permet en quelque sorte, d'amplifier le phénomène.



*Dispersion de la lumière blanche par un prisme*



*Vue avec grossissement : effet de dispersion au niveau d'un seul dioptré*

Mais alors, dire que l'angle de réfraction dépend de la couleur, signifie que l'indice de réfraction dépend de la fréquence de l'onde<sup>11</sup>.

*Montrer que cela implique nécessairement pour les indices que  $n_{\text{Bleu}} > n_{\text{Rouge}}$ . (faites un dessin). Voir aussi l'exercice 2.4.*

<sup>11</sup> Attention à la phrase classique "l'indice dépend de la longueur d'onde", car elle sous-entend qu'on parle de la longueur d'onde *dans le vide*, c'est pourquoi nous préférons ici parler de dépendance en fréquence, qui est sans ambiguïté.



Si l'on regarde les valeurs d'indice mesurées avec précision, cette dépendance est faible dans le cas d'un prisme standard de verre, comme le montre le tableau ci-dessous.

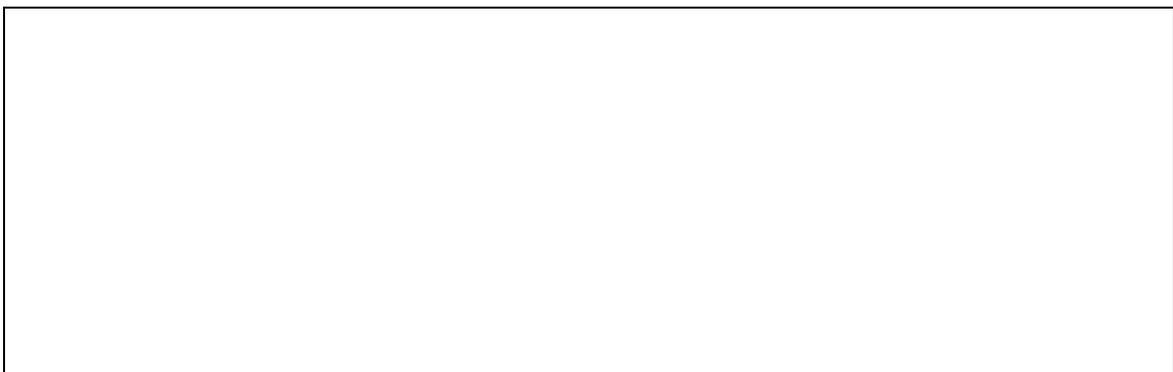
Longueur d'onde dans le vide (nm)	Indice
400	1.5242
600	1.5095
800	1.5043

Pour utiliser des prismes pour l'étude de la dispersion, on utilise des verres spéciaux appelés "crown".

## 2.2. Et l'arc-en-ciel ?

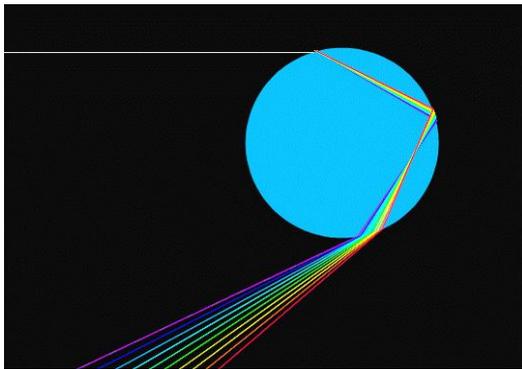
### Expérience 2 (à réaliser par l'enseignant)

*Envoyer un faisceau parallèle de lumière blanche sur un ballon sphérique rempli d'eau. Observer la lumière renvoyée vers la source. Faire le schéma ci-dessous de l'expérience, en notant bien l'ordre des couleurs que vous observez sur l'écran.*



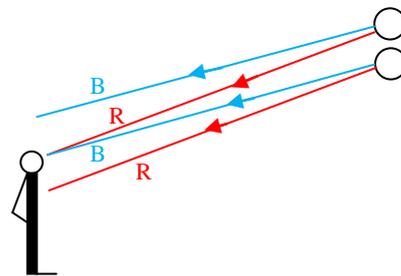
Le phénomène que vous observez est à la base des arcs-en-ciel. C'est Descartes qui en a

donné le premier une interprétation satisfaisante. Celui-ci apparaît quand la lumière du soleil tombe sur des gouttes de pluie, le soleil étant *derrière* l'observateur (vérifiez-le par vous-mêmes !). Descartes s'est rendu compte que la forme de l'arc ne dépendait pas de la taille des gouttes, il a donc étudié le passage de la lumière à travers *une seule* grosse goutte (cf expérience précédente). Son expérience lui permit de conclure que la lumière entrant dans la goutte d'eau sphérique était réfléchie sur la paroi interne de la goutte, puis en sortait. Par la suite, c'est Newton qui a expliqué la présence des différentes couleurs : c'est lui en effet qui a compris que la lumière blanche était un mélange de couleurs (cf plus haut), et que les gouttes d'eau agissaient comme des prismes en dispersant les différentes couleurs pour former l'arc-en-ciel.



B R

*Dispersion de la lumière par une goutte : un pinceau de lumière blanche peut être décomposé en ses différentes couleurs. (A)*



*La lumière bleue, qui est plus déviée que la rouge, provient donc de gouttes qui sont plus basses !*

Pour expliquer complètement pourquoi on voit bien les couleurs dans la myriade de gouttes, et pourquoi cette forme d'arc, il faut une analyse plus complète. Ceci sera vu en exercice (voir l'exercice 2.5).

### 3. Spectroscopie

#### 3.1 Définition

Pourquoi s'intéresser à la dispersion de la lumière (si ce n'est pour comprendre le merveilleux phénomène des arcs-en-ciel...)?

- Comment connaît-on la composition chimique des étoiles, des planètes, etc ? Comment a-t-on su, par exemple, qu'il y avait de l'eau sur Mars ou qu'il y en a sur certains satellites de Jupiter, avant d'y envoyer des sondes (pour Mars)?

- Comment un chimiste analyse-t-il les molécules qu'a produites une réaction?

La réponse à ces deux questions est : par spectroscopie. Celle-ci signifie qu'on décompose en ses différentes fréquences un rayonnement donné.

Dans le cas des objets de l'Univers, on obtient des informations sur ces objets en analysant la lumière qu'ils nous envoient (parfois, il ne s'agit pas de lumière à proprement parler, mais d'ondes électromagnétiques dans d'autres domaines que le visible...). C'est ce qu'on appelle de la *spectroscopie d'émission*.

Dans le cas de la chimie, on fait passer de la lumière (ou des ondes électromagnétiques dans une autre gamme) à travers la solution dont on souhaite déterminer la composition, et on analyse la lumière transmise par cette solution. C'est de la *spectroscopie d'absorption*.

#### 3.2 Utilisation du prisme en spectroscopie : minimum de déviation (A)

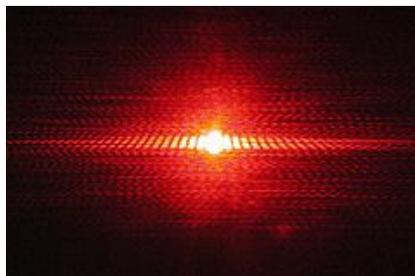
##### Expérience 3 :

*Comme dans le cas d'un faisceau de lumière monochromatique (chapitre 1), tourner le prisme sur lui-même autour d'un axe vertical, et constater l'existence d'un minimum de déviation. En fait, peut-on parler d'un seul minimum de déviation?*

*A votre avis, comment utilise-t-on un prisme en spectroscopie?*

### 3.3 Obtention de spectres par des "réseaux de diffraction"

Vous avez vu en Terminale, que le passage de la lumière dans une fente très fine entraînait la formation d'une tache étalée sur un écran. La largeur de la tache centrale de diffraction dépend de la distance  $D$ , de la largeur  $a$  de la fente et... de la longueur d'onde  $\lambda$ .

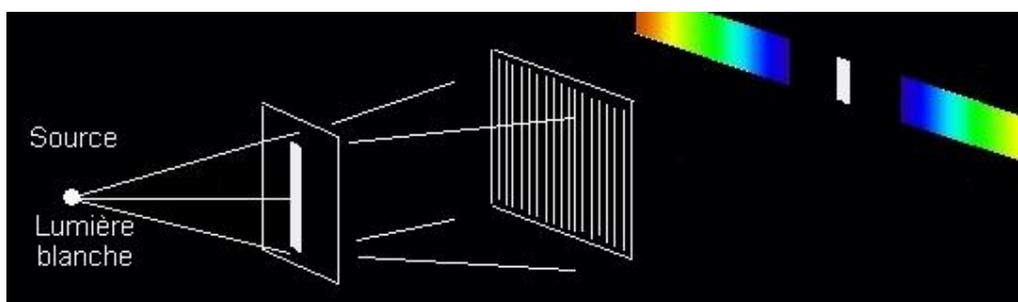


*Tache de diffraction d'un faisceau laser par une fente*

C'est cette propriété qui est exploitée dans la fabrication de réseaux de diffraction : on n'obtient pas l'effet d'une seule fente, mais d'un très grand nombre de fentes très serrées.

Schématiquement, un réseau (dit "par transmission") est constitué d'un grand nombre de fentes identiques et parallèles de très faible largeur. La distance entre deux fentes est appelée « pas du réseau ». La lumière qui est envoyée sur le réseau est alors diffractée et l'angle à la sortie dépend de la longueur d'onde.

Les ordres de grandeur des paramètres caractéristiques varient beaucoup d'un réseau à l'autre. Les réseaux utilisés ici en travaux pratiques ont un pas de quelques microns (soit quelques centaines de fentes par millimètre !)



*Représentation schématique d'un spectrographe à réseau par transmission*

C'est ce type de phénomène que vous observez chaque jour avec un cédérom : dans ce cas, c'est l'ensemble des cuvettes de l'enregistrement numérique qui fait office de "réseau".



Expérience 4 :

Dans l'expérience de dispersion de la lumière blanche, remplacer le prisme par un réseau.

Décrire ce que vous observez : forme, répartition et couleurs des taches lumineuses.

Quelles sont les différences entre le spectre obtenu par un prisme et celui obtenu par un réseau?

### **3.4 Spectres de raies**

La lumière peut être produite par différentes sources. Vous avez utilisé des lanternes contenant des lampes à incandescence, du type de celle utilisées dans la vie courante ; vous avez également utilisé une source laser qui donne un rayonnement rouge correspondant à une longueur d'onde bien déterminée.

Mais il existe d'autres lampes permettant l'obtention de lumières colorées. Vous avez sans doute remarqué les éclairages jaune-orangé au-dessus des carrefours et les lampes des routes.

Il s'agit de lampes dont l'ampoule contient un gaz et dont l'excitation va produire une lumière particulière.

#### **a) Expériences :**

Vous avez à disposition sur votre table, des lampes dites "spectrales basse pression" : il s'agit de cylindres montés sur pied et reliés à un boîtier d'alimentation via un cordon.

Expérience 5 :

Choisir une lampe spectrale connue (vous pouvez par exemple choisir Hg (mercure) ou Cd (cadmium). L'allumer, et attendre quelques minutes.

À l'aide du même montage que précédemment (prisme ou réseau), réaliser le spectre de la lampe choisie sur l'écran. Le décrire.

Élargir la fente, puis la rétrécir. D'après ces observations, la fente vous semble-t-elle utile ? En quoi ?

*Au bout d'un moment, changer de lampe (prendre encore une lampe connue) et décrire le nouveau spectre obtenu. Le comparer avec le précédent. Conclusion ?*

Détermination qualitative d'un élément inconnu :

*Mettre maintenant la lampe "X" à la place de la précédente. Grâce à l'observation de son spectre, et au poster affiché dans la salle donnant les spectres de différents éléments chimiques, essayer de trouver quel élément se trouve dans cette lampe.*

### **b) Spectres de raies et structure de l'atome**

La principale différence que vous avez dû observer entre le spectre de la lumière blanche et celui d'une lampe spectrale quelconque est que celui de la lumière blanche est *continu* (toutes les longueurs d'onde y sont présentes), alors que celui d'une lampe spectrale est *discret* : on parle aussi de spectre de raies.

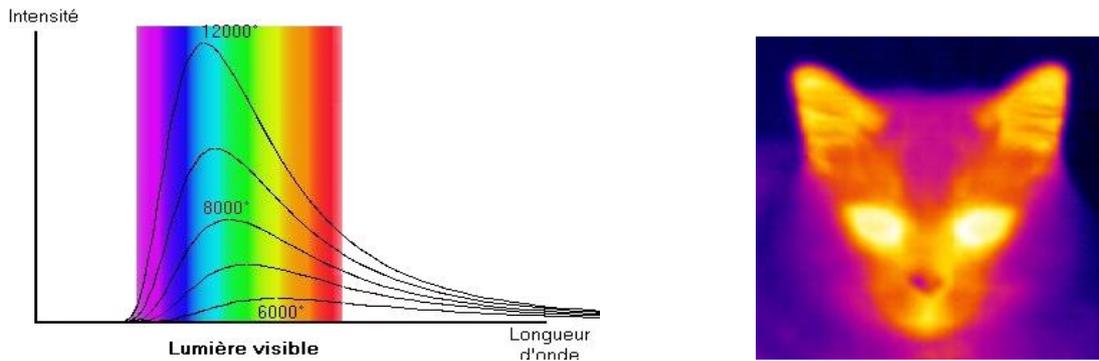
Les mécanismes physiques d'émission de la lumière dans ces deux types de sources sont différents :

- La lumière blanche est obtenue par chauffage du filament de l'ampoule, il s'agit d'une émission thermique. On parle (à première vue, paradoxalement) de "corps noir" (voir l'encadré correspondant).
- Une lampe spectrale contenant un gaz donné émet un spectre de raies caractéristique de l'élément chimique contenu dans la lampe.

### Encadré : le corps noir

Lorsqu'un corps solide est porté à incandescence, il émet un rayonnement possédant toutes les longueurs d'onde. Vous connaissez les expressions « chauffé au rouge » ou « chauffé à blanc » en parlant du fer que l'on veut forger, par exemple. Ces expressions indiquent que la lumière émise par le corps chauffé dépend de sa température.

La quantité de rayonnement émis par longueur d'onde est distribuée suivant une courbe, dite de Planck. La figure ci-dessous montre cinq exemples de courbes de Planck.



*Courbes de Planck d'un corps noir à différentes températures*

*Tête de chat dans l'infrarouge<sup>12</sup>*

La longueur d'onde à laquelle un maximum d'énergie est émise,  $\lambda_m$ , décroît lorsque la température augmente, selon la loi de Wien :

$$\lambda_m = \frac{C}{T},$$

où  $C$  est une constante et  $T$  la température du corps chauffé. Cette dépendance est illustrée sur la figure ci-dessus. Le rayonnement émis par le corps chauffé, et décrit par la courbe de Planck, caractérise ainsi la température du corps en question. Ainsi, le Soleil, qui se trouve à une température de 6000° C environ, a une longueur d'onde au maximum d'émission qui se situe à environ 500 nm. Le corps humain, et celui des mammifères en général (cf image ci-dessus) qui est à 37° C, correspond à une longueur d'onde au maximum d'émission située dans l'infrarouge.

On appelle corps noir un tel corps, c'est-à-dire un corps chauffé dont le rayonnement suit la courbe de Planck. Le Soleil et le corps humain ne sont qu'approximativement des corps noirs. Pourquoi appeler le soleil "corps noir" alors qu'il est blanc?(!) Ce terme signifie qu'il émet, mais également qu'il absorbe à toutes les fréquences, d'où l'idée qu'il est "noir".

L'énergie émise par unité de surface d'un corps noir ne dépend que de la température de celui-ci et est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$W = \sigma T^4$$

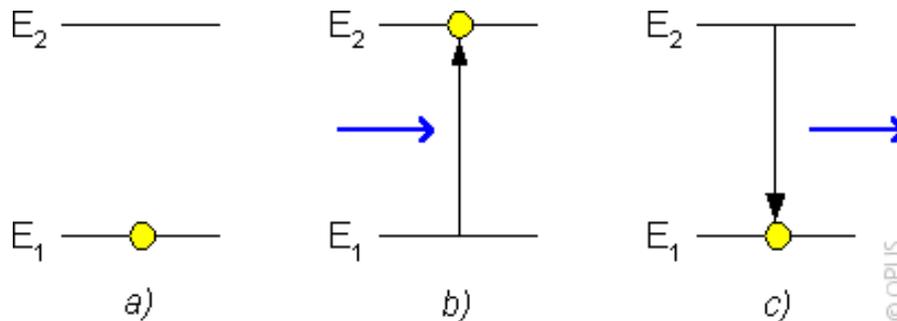
où  $\sigma$  la constante dite de Stefan.

<sup>12</sup> <http://www.astrosurf.org/lombry/seti-polymorphisme9.htm> : les couleurs sont évidemment de fausses couleurs (l'image a été colorisée avec un jeu de teinte permettant de distinguer les zones chaudes et froides)

### c) Spectre de raies en émission : modèle quantique de l'atome

En physique quantique, les niveaux d'énergie d'un atome sont quantifiés (*discrets*), ce qui signifie qu'un atome ne peut pas avoir n'importe quelle valeur d'énergie ; celle-ci ne peut prendre que certaines valeurs bien précises, et il en est donc de même pour les énergies libérées ou absorbées par un atome.

On peut illustrer ce fait sur le schéma suivant :



Sur le dessin ci-dessus,  $E_1$  et  $E_2$  représentent deux des niveaux d'énergie possibles d'un atome. Le point jaune est un électron qui peut avoir soit l'énergie  $E_1$  soit l'énergie  $E_2$ . Pour que l'électron passe du niveau  $E_1$  au niveau  $E_2$  ( $E_2 > E_1$ ), il faut lui fournir de l'énergie, par exemple thermiquement (en chauffant) ou électriquement (en appliquant une décharge). Une fois sur le niveau  $E_2$  (état dit *excité*), l'électron se « désexcitera » tout seul, en émettant un photon (un quantum d'énergie lumineuse) d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$ , où  $h$  est une constante appelée *constante de Planck*. Ainsi l'énergie est restituée sous forme de lumière dont la longueur d'onde, qui dépend de l'énergie, a alors une valeur bien précise  $\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1}$ , où  $c$  est

la vitesse de la lumière. Ceci correspond à *une raie*.

Dans le cas d'une lampe spectrale, la lumière est émise par les atomes excités d'une vapeur métallique (mercure, cadmium, deutérium par exemple). Les atomes pouvant se désexciter depuis plusieurs niveaux, la lumière émise est donc en général constituée d'émissions de plusieurs longueurs d'onde distinctes, formant les différentes raies du spectre observées.

Le processus d'émission de lumière décrit ci-dessus est appelé émission spontanée. Il existe un autre processus à la base du fonctionnement des lasers appelé émission stimulée (voir l'encadré "Les lasers et leurs applications").

### d) Retour sur la spectroscopie

Pour faire de la spectroscopie de manière quantitative, on étalonne le spectroscope avec des éléments connus. Ensuite, on peut mesurer des longueurs d'onde émises par une source contenant des éléments à déterminer. On peut ainsi retrouver quels éléments sont dans cette source (trouver de l'eau sur Mars, de l'hélium dans le Soleil...)

### 3.5 Spectres d'absorption

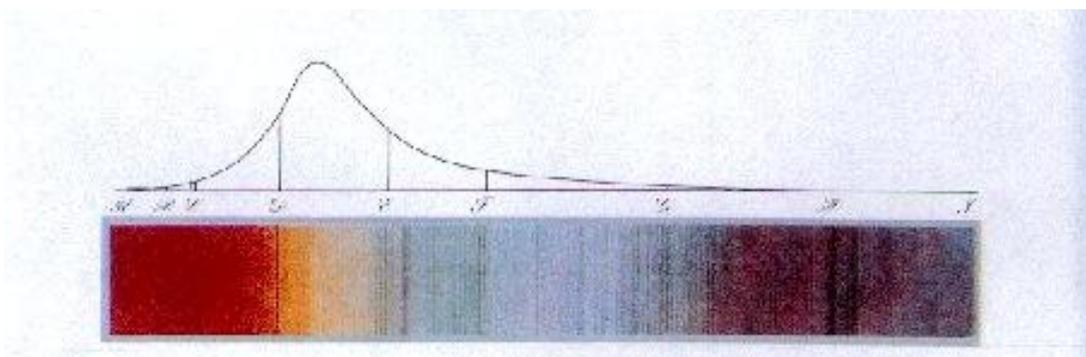
#### a) Cas d'un gaz

La lumière, lorsqu'elle interagit avec la matière, peut être absorbée. S'il s'agit d'un gaz atomique (comme dans une lampe spectrale, ou dans une étoile gazeuse), on constate expérimentalement que l'absorption a lieu selon *les mêmes longueurs d'onde* que celles correspondant à l'émission : si l'on éclaire le gaz considéré par une lumière blanche dont le spectre est continu, la lumière transmise présente des raies sombres montrant que la lumière correspondante a été absorbée (voir l'encadré sur l'hélium).

Grâce à la faible densité du gaz, on peut considérer que les atomes le constituant sont indépendants les uns des autres. On peut ainsi raisonner sur un seul atome comme suit : dans le modèle quantique, un atome dans un état de basse énergie  $E_1$ , peut absorber un quantum de rayonnement ayant la valeur nécessaire pour passer de l'état  $E_1$  à l'état  $E_2$ . Il effectue alors une transition et passe dans un état *excité*. La longueur d'onde de la lumière absorbée par un atome est donc la même que celle qu'il peut émettre par désexcitation.

#### Encadré : Hélium, du grec $\eta\lambda\iota\omicron\varsigma$ (soleil)

Savez-vous que le nom d'hélium donné au gaz rare correspondant vient du grec  $\eta\lambda\iota\omicron\varsigma$  (Hélios) qui signifie Soleil ? Et savez-vous pourquoi ? C'est simplement parce que c'est dans le Soleil que l'on a d'abord découvert la présence de cet élément, et ce, en étudiant finement le spectre de la lumière solaire. C'est Fraunhofer qui, dès 1814, a relevé le premier les raies sombres dans le spectre de la lumière solaire, raies qui portent désormais son nom. Kirchhoff, en 1859, a démontré que les longueurs d'onde correspondant à ces raies noires dans le spectre solaire coïncident avec les longueurs d'onde d'émission de lumière observées en laboratoire dans un certain gaz de faible densité et chauffé à haute température (l'hélium!). Il en déduisit que chaque élément produit son propre spectre de raies, caractéristique de sa nature.



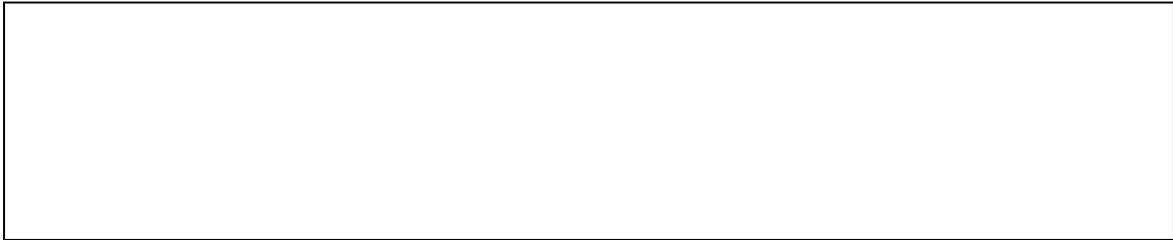
Ainsi, les raies noires du spectre solaire ne sont autres que les raies d'absorption de l'hélium qui constitue l'essentiel de la couronne solaire. La lumière en provenance du cœur du Soleil traverse cette atmosphère et les atomes d'hélium qui s'y trouvent absorbent les composantes correspondant aux transitions d'énergie possibles.

## **b) Cas d'un solide ou d'un liquide**

### Expérience 6 : spectre d'absorption de filtres ou de colorants

Reprendre la source de lumière blanche. Intercalez sur le trajet des filtres colorés ou des colorants suivant disponibilité.

Reproduire en couleur ce que vous observez. Précisez le filtre ou le colorant utilisé.



Comment expliquez-vous la couleur observée ? Que devient d'après vous la (ou les) radiation(s) qui ont disparu ?



Placez le filtre avant puis après le prisme. Cela change-t-il quelque chose ?



Piste d'interprétation (\*) : Le cas d'un solide ou d'un liquide est plus compliqué que celui d'un gaz. Dans un solide ou un liquide, les atomes sont très proches les uns des autres, et on ne peut plus les considérer comme indépendants les uns des autres. Il en résulte que les énergies accessibles à l'atome ne sont plus discrètes comme pour un atome mais sont des bandes continues, éventuellement séparées par des "bandes interdites"...

## 4. La couleur des objets

### 4.1 De quoi dépend la couleur d'un objet ?

Si l'on résume ce que nous avons vu au cours de ce chapitre :

- La *lumière* qui éclaire un objet joue un rôle dans la couleur perçue de l'objet. Ainsi, par exemple, les lampes au sodium (jaune) qui éclairent les monuments de nos villes la nuit leur confèrent des teintes dorées qu'ils n'ont pas le jour (de même au soleil couchant..). Supposons dorénavant que l'on éclaire un objet en lumière blanche, c'est-à-dire contenant toutes les fréquences du visible.
- La *nature chimique* de l'objet est sans doute la première chose à laquelle on pense. Si l'objet nous apparaît coloré, c'est qu'il *absorbe* certaines fréquences contenues dans le spectre de la lumière (cf 3.4). L'énergie correspondante est transformée en chaleur. Un objet noir absorbe toutes les longueurs d'onde (et "chauffe" donc particulièrement..).

*On dit que Newton, en éclairant de l'or avec une lumière particulière, a réussi à lui donner l'apparence de l'argent. A votre avis, comment a-t-il fait ?*

- Enfin, *l'œil* lui-même joue un rôle. Dans le paragraphe suivant, nous détaillerons la vision des couleurs.

#### **Encadré : le blanc est-il une couleur ?**

Pourquoi les nuages sont-ils blancs, alors qu'ils sont formés de gouttelettes d'eau, et qu'on sait bien que l'eau est transparente ?

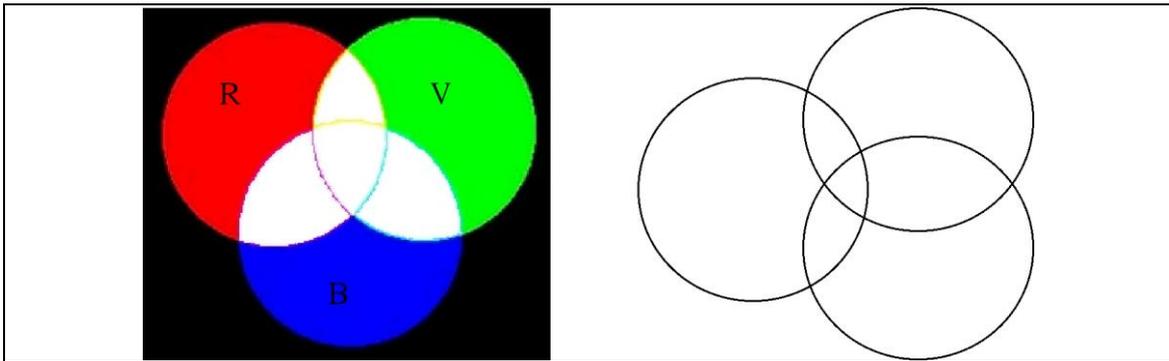
En fait, c'est la *taille* de l'objet qui joue un rôle : un grand volume d'eau est transparent, alors que de nombreuses petites gouttes forment un nuage blanc. C'est la *diffusion* qui explique ce phénomène : la lumière entre dans la goutte, s'y réfléchit et réfracte de nombreuses fois et ressort en étant diffusée dans toutes les directions. Chaque goutte se comporte ainsi comme une petite source secondaire de lumière blanche, donc elle nous apparaît comme blanche! C'est la même chose pour les poudres comme le sucre, le sel, etc. qui nous apparaissent blanches alors qu'elles sont formées d'éléments transparents, mais de petite taille (en pratique, cette taille est quand même grande devant la longueur d'onde). C'est encore la même chose pour la peinture blanche : celle-ci est composée de fines particules d'un matériau transparent diluées dans un liquide d'indice différent.

## 4.2 Synthèse additive (A)

Expérience 7 (à réaliser par l'enseignant) : synthèse additive

Réaliser l'addition des trois couleurs primaires (rouge, vert et bleu), en superposant trois faisceaux. Utiliser pour cela le dispositif tout fait de Jeulin avec rétroprojecteur, ou additionner les faisceaux de trois lampes suivies d'un filtre respectivement rouge, vert et bleu.

Complétez le schéma ci-dessous en indiquant les couleurs observées.



*Jaune : addition de rouge et de vert en proportions égales*

*Cyan = addition de bleu et de vert en proportions égales*

*Magenta = addition de rouge et de bleu en proportions égales*

L'expérience précédente montre qu'on peut construire une nouvelle couleur par superposition de plusieurs couleurs. Elle présente néanmoins le défaut de ne pas pouvoir varier les intensités relatives des trois faisceaux. En effet, on peut construire toutes les couleurs par mélange de trois couleurs dites "primaires" dans des proportions variables. Le choix de ces couleurs primaires est assez arbitraire, chacune d'entre elles devant couvrir une bande de fréquences donnée du domaine optique, avec des recouvrements entre les trois bandes de manière à restituer tout le domaine optique. C'est le système RVB (RGB en anglais), système de base pour les écrans informatiques, les écrans de télévision ou les logiciels de traitement d'images (voir plus loin l'encadré sur les écrans cathodiques).

On peut reconstruire les couleurs des objets autour de soi à l'aide d'un logiciel sur ordinateur (n'importe quel logiciel d'images ou de dessin fait l'affaire, ou même Word ou PowerPoint<sup>13</sup>..). Essayez par exemple de reproduire la teinte marron d'un tronc d'arbre...

Comme Young en a eu l'intuition au XIX<sup>e</sup> siècle, notre vision des couleurs repose sur le même principe.

<sup>13</sup> Sur Internet, voir par exemple [http://www.ac-poitiers.fr/sc\\_phys/cres\\_lr/eleves/optique/ecrantv.htm](http://www.ac-poitiers.fr/sc_phys/cres_lr/eleves/optique/ecrantv.htm)

### 4.3. L'œil et la vision des couleurs

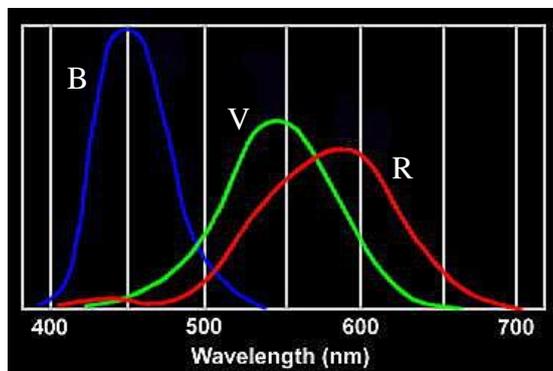
Comment fonctionne notre vision des couleurs? La réponse à cette question a été suggérée par Young, médecin et physicien anglais de génie au XIX<sup>e</sup> siècle, connu en physique pour ses études sur les interférences. Il a suggéré que notre vision des couleurs était basée sur l'existence de trois types de détecteurs différents dans notre œil.

Grossièrement, l'œil fonctionne comme une lentille qui effectue une image de la scène extérieure sur un "écran" situé au fond de l'œil, la rétine (voir le chapitre 4). Sur la rétine, sont disposées des cellules photoréceptrices de deux sortes : les cônes et les bâtonnets, qui tirent leur nom de leur forme. La rétine humaine comporte environ 125 millions de bâtonnets et 6 millions de cônes, soit 70% des récepteurs de notre organisme, ce qui souligne l'importance des yeux et de l'information visuelle. Les cônes et les bâtonnets assurent des fonctions différentes de la vision.

- Les bâtonnets sont plus sensibles à la lumière que les cônes, mais ils ne distinguent pas les couleurs ; ils permettent la vision nocturne mais seulement en noir et blanc.
- Les cônes permettent la reconnaissance des couleurs mais requièrent davantage de lumière, et ils n'interviennent donc pas dans la vision nocturne.

La vision des couleurs chez l'homme repose sur trois types de cônes, sensibles à des longueurs d'onde différentes :

- les cônes "bleus" absorbent le mieux les longueurs d'onde autour de 455 nm
- les cônes "verts" absorbent le mieux les longueurs d'onde autour de 530 nm
- les cônes "rouges" absorbent le mieux les longueurs d'onde autour de 575 nm.



*Courbes de réponse des cônes : de gauche à droite : pour les "bleus", les "verts" et les "rouges"*

La figure ci-dessus montre les courbes de réponse des cônes en fonction de la longueur d'onde. Les intervalles de longueurs d'onde caractérisant la sensibilité de chacun des types de cônes ne sont pas séparés les uns des autres mais se chevauchent. Le cerveau recrée la couleur perçue en combinant les informations des trois types de cônes. Ainsi, une lumière bleuâtre autour de 500 nm stimule principalement les cônes verts, mais aussi les rouges et les bleus dans une moindre mesure. La perception d'une lumière jaune autour de 575 nm stimule à peu près également les cônes verts et rouges<sup>14</sup>. La plupart des couleurs que nous voyons sont donc des *couleurs de synthèse* que le cerveau réalise en combinant les informations des différents types de cônes. Si tous les cônes sont stimulés de manière égale, nous voyons du blanc.

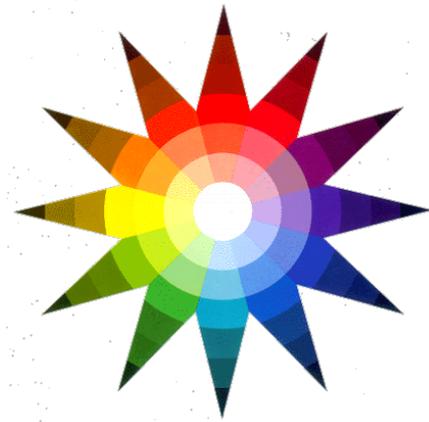
<sup>14</sup> En conséquence, un jaune ("pur") émis par une lampe à vapeur de sodium est une couleur de synthèse pour l'œil!

#### 4.4 Synthèse soustractive

La méthode soustractive consiste à soustraire à de la lumière blanche ses composantes bleues, vertes ou rouges à l'aide de filtres (filtres de gélatine, peintures, encres...) respectivement jaune, magenta ou cyan.

Les nuances intermédiaires sont obtenues en faisant varier l'absorption des filtres. Ce principe est essentiellement utilisé pour l'impression des couleurs (trichromie).

Le cercle des couleurs des peintres est une représentation conventionnelle de la gamme des couleurs visibles. Sur le cercle illustré ci-contre, on représente à la fois les couleurs et la façon dont on peut les dégrader par les valeurs, en allant au centre du cercle vers le blanc, et à l'extérieur vers le noir.

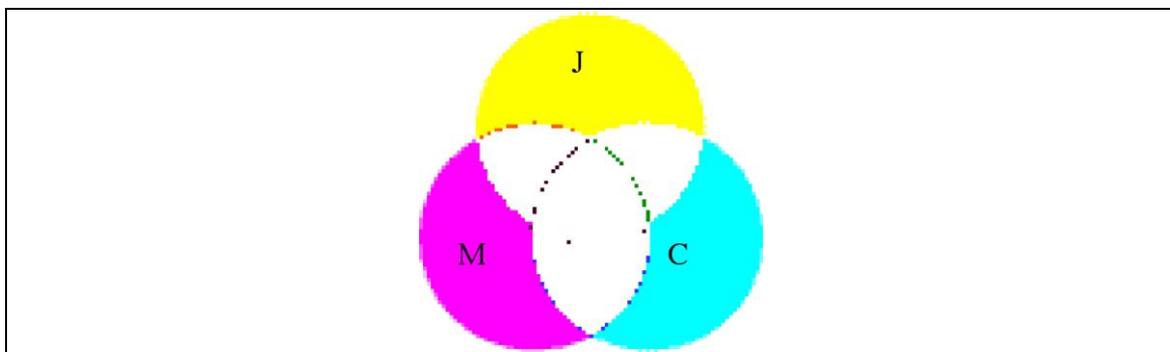


*Cercle des couleurs des peintres*

Expérience 8 (à réaliser par l'enseignant) : synthèse soustractive des couleurs

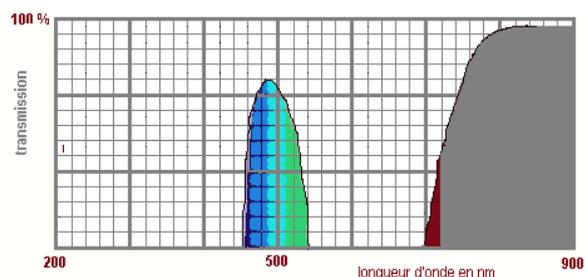
Réaliser la synthèse soustractive des couleurs en superposant trois filtres colorés (jaune, magenta et cyan).

Complétez le schéma ci-dessous en indiquant les couleurs observées. **(A)**



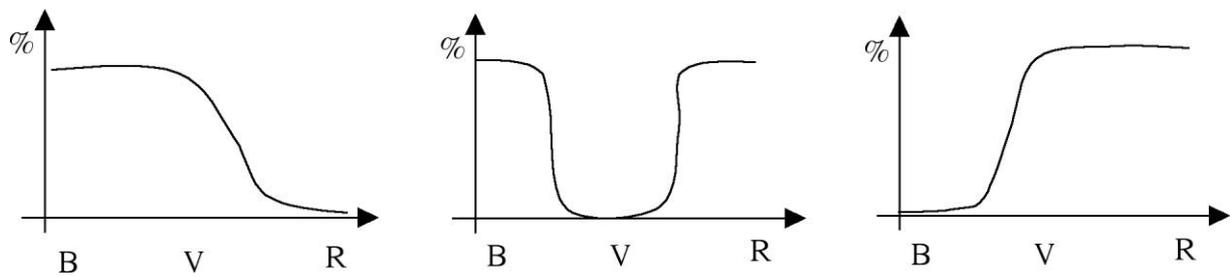
Interprétation :

Les filtres sont caractérisés par leur courbe de transmission en fonction de la longueur d'onde. Un filtre bleu-vert par exemple, aura un bon coefficient de transmission autour de 500 nm, et ne transmettra pas les autres longueurs d'ondes du visible.



*Courbe de transmission spectrale d'un filtre bleu-vert Kodak : on remarque que ce filtre laisse aussi passer les infrarouges ce qui peut être un inconvénient pour certains détecteurs.*

De façon schématique, on peut représenter les courbes de réponse spectrale des filtres de base permettant la synthèse soustractive :



*Courbes modélisées de transmission spectrale des filtres cyan, magenta et jaune*

*En vous basant sur les courbes ci-dessus, expliquez l'effet sur la lumière blanche de la superposition de deux de ces filtres :*

#### **Encadré : le daltonisme**

Dans le cas d'un œil daltonien, un des trois types de cônes est déficient.

Le plus souvent, il s'agit des cônes verts. Dans ce cas, il est impossible de distinguer le rouge du vert. C'est la forme la plus commune de daltonisme, celle-là même dont John Dalton (chimiste et physicien britannique, 1766-1844, auteur de la théorie atomiste de la matière) était atteint.

Les autres formes de daltonisme sont nettement plus rares, comme la confusion du bleu et du jaune, la plus rare de toutes étant la déficience totale de vision des couleurs (achromatopsie), où le sujet ne perçoit que des nuances de gris (quelle tristesse...!).

### Encadré : couleur réfléchie ou transmise ? (\*)

Faites l'expérience suivante (chez vous) : prenez un feutre d'une couleur donnée (par exemple rouge), et faites un trait sur une surface noire. De quelle couleur est ce trait ?

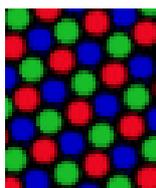
On peut faire également un trait sur une lame de verre d'une certaine épaisseur, et regarder sous le bon angle de manière à voir deux traits réfléchis à la fois. Que constatez-vous ?

Piste d'explication : quand un matériau absorbe particulièrement dans une gamme de longueur d'onde donnée, il réfléchit aussi fortement dans cette même gamme. Les couleurs des objets observées sont pour la plupart des couleurs par transmission et non par réflexion<sup>15</sup>, sauf dans le cas de l'expérience ci-dessus.

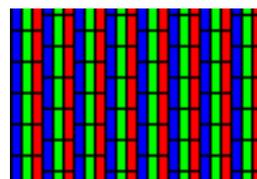
### Encadré : le principe des écrans dits cathodiques<sup>16</sup> (A)

Dans le système RVB (RGB en anglais), il existe trois couleurs - dites *primaires* - qui ont donné son nom au système : le rouge, le vert et le bleu. Afin d'obtenir d'autres couleurs, dites *intermédiaires*, on fait varier l'intensité des faisceaux lumineux. C'est comme cela que l'on reconstitue les couleurs sur un écran de télévision ou sur les écrans d'ordinateur (cathodique) : chaque point de l'écran est constitué en réalité de 3 pastilles (luminophores) permettant d'émettre du rouge, du vert et du bleu et ce, avec une intensité dépendant du faisceau électronique qui provoque l'émission. La couleur du point, vu de loin, est le résultat de l'addition de ces trois couleurs.

*A faire chez vous* : prenez une loupe de forte puissance et approchez-vous de l'écran d'un ordinateur ou d'un moniteur TV allumé. Comparer votre observation aux schémas ci-dessous.



Les tubes FST-Invar (*Flat Square Tube*) dont les luminophores sont ronds.



Les tubes *Cromaclear* de Nec dont le masque est constitué d'alvéoles (la meilleure technologie).

<sup>15</sup> Ceci n'a rien d'évident...

## Encadré : Les lasers et leurs applications



a)



b)



c)

a) Spectacle son et lumière utilisant des lasers ; b) laser à semi-conducteur (la monture fait 9 mm de diamètre) ; c) découpage de pièces métalliques par laser

Le mot « laser » vient de l'acronyme LASER qui signifie « light amplification by stimulated emission of radiation », soit « amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement ».

### Principe :

Reprenons le modèle d'atome quantique avec ses niveaux d'énergie discrets.

Nous avons vu le principe de l'émission de lumière, dite spontanée. C'est sur ce principe que fonctionnent les lampes spectrales.

Les lasers fonctionnent, eux, sur le principe de l'émission stimulée : dans ce cas, un photon émis par émission spontanée va *désexciter* un électron excité au niveau  $E_2$ , et le forcer à retomber sur le niveau  $E_1$ , en émettant un deuxième photon identique au premier. Pour cela, il faut qu'il y ait en permanence plus d'électrons sur le niveau  $E_2$  que sur le niveau  $E_1$ , ce qui n'est pas naturel (il faut réaliser ce que l'on appelle un « pompage optique »). En effet, un photon d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$  arrivant sur un électron se trouvant sur le niveau  $E_1$  a exactement la bonne énergie pour pouvoir être absorbé par l'atome, et réémis. Dans ce cas, il n'y a pas « production » de photons. Pour que ce soit le cas, il faut qu'il y ait plus d'électrons sur le niveau  $E_2$  que sur le niveau  $E_1$ .

Ensuite, on *amplifie* cette lumière émise par émission stimulée : pour cela, les photons émis font des aller-retours dans une cavité réfléchissante contenant les atomes utiles ; ainsi, un même photon sert un grand nombre de fois à stimuler des émissions de photons par ces atomes.

### Historique

Le principe de l'émission stimulée a été trouvé en premier par A. Einstein en 1917. Le premier maser (i.e. un laser, mais à micro-ondes au lieu d'être dans le domaine de l'optique) a été fabriqué aux USA en 1953 par Ch. Townes (prix Nobel de physique 1964). Le premier véritable laser a été fabriqué par Th. Maimann en 1960.

### Les différents types de lasers :

Il existe des lasers émettant de la lumière continûment, ou au contraire par impulsions. Les atomes qui sont successivement excités et désexcités sont à l'état gazeux, liquide ou solide.

*Lasers à gaz* : on peut citer le laser He-Ne utilisé en TP (rouge), le laser à CO<sub>2</sub> (infra-rouge, puissant), le laser à argon qui peut émettre du vert à l'ultra-violet et qui est utilisé dans les spectacles « son et lumière ».

*Laser à solide* : le YAG est un laser très intense émettant dans l'infra-rouge, permettant de découper des métaux, des diamants..

*Les lasers à semi-conducteurs*, plus récents, sont de petite taille et peu intenses ; ils sont utilisés dans les lecteurs de CD, les imprimantes laser, comme pointeurs lasers, comme sources de lumière dans les fibres optiques.. Au départ ils émettaient dans le rouge uniquement, mais on sait maintenant en fabriquer qui émettent dans le bleu, le vert, ou l'infra-rouge.

*Laser à liquide* : les lasers à colorants produisent un rayonnement puissant, par impulsions. Leur intérêt est qu'on peut émettre une longueur d'onde au choix dans une large gamme.

### Quelques applications :

*En médecine*, ils sont utilisés pour détruire des cellules, traiter des cancers, établir des diagnostics, positionner précisément un patient...

*Pour faire des mesures* : ils servent à mesurer des distances très précisément (hauteur d'un hélicoptère, mesure de la distance Terre-Lune...) ; voir exercice 1.1

*Dans le domaine de la communication* : le transport d'information se fait de plus en plus via de la lumière laser qui se propage dans une fibre optique.

Remarque finale : On sait maintenant faire des *lasers à atomes*. Il s'agit bien d'un faisceau d'atomes et non plus de lumière ! Les premiers à l'avoir réalisé sont Andrews, Mewes et Ketterle (USA) en 1997. Ketterle a eu le prix Nobel de physique en 2001 pour cette découverte<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> C'est également l'un des domaines de recherche poursuivi par l'équipe du Pr Alain Aspect à l'Institut d'Optique de l'Université Paris-Sud, Orsay (voir <http://atomoptic.iota.u-psud.fr>)

## Résumé du chapitre 2 :

La couleur est une notion subjective liée à l'effet perçu par l'œil qui reçoit la lumière. A chaque longueur d'onde du domaine visible (400-800 nm) on peut faire correspondre une couleur, mais à l'inverse à une couleur donnée on ne peut généralement pas faire correspondre *une* seule longueur d'onde, chaque couleur étant composée en général de l'addition de plusieurs longueurs d'onde. Par exemple, le prisme permet de « décomposer » la lumière « blanche » et de montrer que celle-ci est composée de toutes les longueurs d'onde du domaine visible, il est également possible de composer les longueurs d'onde pour « synthétiser » la lumière blanche. L'arc-en-ciel est le résultat de la décomposition de la lumière du soleil par les gouttes d'eau de pluie.

La spectroscopie est l'étude d'un rayonnement lumineux par sa décomposition en ses différentes fréquences au moyen de prismes, réseaux de diffraction, analyse de Fourier ... Il existe des rayonnements à spectres continus ou à spectres discrets.

Le rayonnement du corps noir est un exemple de spectre continu. Un corps noir *absorbe* toutes les fréquences et à l'inverse il *émet* toutes les longueurs d'onde quand il est chauffé. La longueur d'onde à laquelle un maximum d'énergie est émise,  $\lambda_m$ , décroît lorsque la température augmente selon la loi de Wien :  $\lambda_m = \frac{C}{T}$ ,

où C est une constante et T la température du corps chauffé. Ainsi, le Soleil, qui se trouve à une température de 6000° C environ, a une longueur d'onde au maximum d'émission qui se situe à environ 500 nm. Le corps humain, et celui des mammifères en général qui est à 37° C, correspond à une longueur d'onde au maximum d'émission située dans l'infrarouge.

Il existe des rayonnements constitués d'une ou plusieurs fréquences isolées (discrètes) comme les lampes spectrales, lasers ... Chaque élément chimique possède ainsi sa « signature » spectrale. L'interaction de la lumière et de la matière peut être observée en émission quand la matière émet de la lumière ou bien en absorption quand la matière absorbe la lumière. La découverte de l'hélium vint de l'observation par Fraunhofer (1814) de l'absorption du spectre de raies discrètes de l'hélium contenu dans la couronne solaire dans le fond continu émis par la surface du soleil.

La *couleur d'un objet* dépend :

- de la composition spectrale de la lumière qui éclaire cet objet
- des caractéristiques d'absorption de la surface de l'objet
- des caractéristiques de l'instrument d'observation : œil, détecteur ...

La couleur observée peut être le résultat de l'addition de plusieurs émissions lumineuses (synthèse additive) comme par exemple dans le cas des écrans informatiques ou des logiciels de traitement d'image qui utilisent le système RVB (rouge-vert-bleu) pour reproduire toutes les couleurs. Cela est possible car la rétine de l'œil humain est constituée de récepteurs sensibles à l'intensité lumineuse, les bâtonnets, et de trois types de récepteurs sensibles à des longueurs d'ondes différentes, les cônes, « rouges » autour de 575 nm, « verts » autour de 530 nm et « bleus » vers 455 nm.

La couleur observée peut également être le résultat de l'absorption (soustraction) de lumière à partir d'un rayonnement blanc comme dans le cas de la projection de diapositives (synthèse soustractive)



## CHAPITRE 3 :

# IMAGES OPTIQUES



*Un miroir à un carrefour*

**Salles : « images » 030 ou 100**

## SOMMAIRE DU CHAPITRE 3 :

<b>1. IMAGES EN OPTIQUE GEOMETRIQUE</b>	<b>72</b>
<hr/>	
1.1 IMAGES, ET IMAGES OPTIQUES	72
1.2. IMAGE GEOMETRIQUE ET STIGMATISME	73
1.3. IMAGE REELLE, IMAGE VIRTUELLE, OBJET VIRTUEL ...	75
<b>2. MIROIRS</b>	<b>77</b>
<hr/>	
2.1 MIROIR PLAN	77
A) EXPERIENCE	77
B) INTERPRETATION ; STIGMATISME DU MIROIR PLAN	78
2.2 MIROIRS SPHERIQUES	79
A) DEFINITIONS	79
B) EXPERIENCES	79
C) STIGMATISME RIGOREUX ET APPROCHE ; CONDITIONS DE GAUSS	80
D) MODELISATION DES MIROIRS SPHERIQUES DANS LES CONDITIONS DE GAUSS	81
<b>3. DIOPTRES</b>	<b>86</b>
<hr/>	
3.1 DIOPTRE PLAN	86
A) EXPERIENCES	86
B) INTERPRETATION	87
3.2. DIOPTRES SPHERIQUES	88
A) DEFINITIONS	88
B) EXPERIENCE	88
C) MODELISATION DES DIOPTRES SPHERIQUES DANS LES CONDITIONS DE GAUSS	90

### **Matériel à votre disposition par table**

- *Source de lumière blanche + transfo*
- *2 plateaux supports*
- *1 prisme*
- *1 fente variable*
- *1 lentille convergente*
- *1 écran*
- *6 pieds*
- *2 petites cuves*
- *1 jeu de filtres colorés*
- *1 réseau*
- *1 support diapo*
- *1 boîte rangement grande*
- *1 boîte plastique pour prisme*
- *1 lampe Hg*
- *1 lampe « X »*
- *1 lampe Cd*
- *1 petit miroir plan*
- *1 lampe de poche*
- *2 ampoules (dont une sur support) + une pile*
- *1 petite plaque plexi + support pour la faire tenir verticalement*
- *1 petit miroir sphérique*

### **Matériel pour l'enseignant**

- *Dispositif de démonstration avec source laser multifaisceaux (laserbox) + panneau métallique+ kit optique magnétique*
- *1 jeu de 3 miroirs (concave, convexe et plan)*

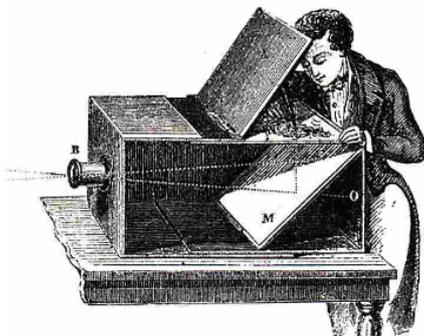
# 1. Images en optique géométrique

## 1.1 Images, et images optiques

Parmi les cinq sens dont dispose l'être humain pour appréhender le monde, la vision est sans doute un des plus essentiels. La possibilité de voir le monde est due au fait que notre œil forme des images des objets qui l'entourent<sup>18</sup> (pourvu que ces objets soient éclairés par de la lumière). Le cerveau enregistre ces informations et nous pouvons nous faire l'image de certains lieux, de certaines personnes.

Le miroir, inventé au XIII<sup>e</sup> siècle (constitué de feuilles d'étain fixées derrière des plaques de verre), et perfectionné au XVI<sup>e</sup> siècle (par Roger Lembrechet), permet chaque jour de voir sa propre image.

Mais l'homme a également cherché à créer des images durables, et ce depuis très longtemps : dès la préhistoire, il a inventé l'art pictural. Plus tard, pour obtenir des représentations les plus exactes possibles, certains artistes utilisaient pour le dessin un dispositif avec un miroir (décrit par Léonard de Vinci vers 1515).



*Dispositif à miroir utilisé par les artistes*



*La première photographie, par N. Niepce (1822), intitulée "Point de vue de la fenêtre"*

En 1822, Nicéphore Niepce a inventé la photographie : avec du bitume de Judée déposé sur une plaque de verre, et une chambre noire<sup>19</sup>, il réalise la première image photographique.

Lorsque nous prenons une photographie, projetons une diapositive, etc., nous réalisons des images (sur la pellicule, sur l'écran, etc.) grâce à des instruments d'optique (appareil photographique, projecteur). On réalise aujourd'hui des images par des techniques qui ne reposent pas sur l'optique : Doppler, IRM, etc (voir l'encadré sur les images "non optiques", à la fin de ce chapitre).

Pour terminer, remarquons que le terme "image" dans le langage courant signifie "information présentée de manière bidimensionnelle" et possède donc un sens très large. Un tableau abstrait, un plan de métré ou une carte météorologique entrent dans cette catégorie.

Une image optique possède un sens plus restreint, celui de "reproduction homothétique d'un objet formée à partir de la lumière qu'il émet", et obtenue par un jeu de miroirs, lentilles, etc.

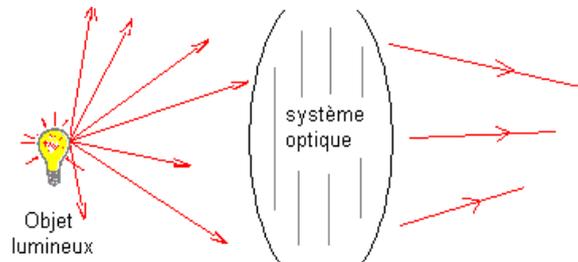
Remarquons enfin que l'image optique d'un objet est définie *indépendamment de la possibilité de la voir ou de l'obtenir sur un support* ! Et pourtant, elle se forme toujours à un endroit précis...

<sup>18</sup> Nous verrons comment au chapitre suivant.

<sup>19</sup> Une *chambre noire* est simplement constituée d'un petit trou percé dans une boîte. C'est le dispositif le plus simple pour obtenir des images. Essayez par vous-mêmes! Elle a longtemps été utilisée par les artistes...

## 1.2. Image géométrique et stigmatisme

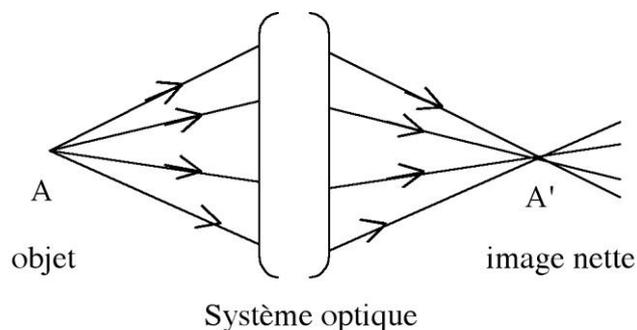
Un objet lumineux est constitué d'un ensemble de points lumineux, c'est-à-dire émettant de la lumière dans tout un ensemble de directions. Une lampe (ou le Soleil) est un objet produisant lui-même la lumière qu'il émet : on l'appelle source primaire. Les objets qu'elle éclaire sont également des objets lumineux au sens de l'optique : ils réémettent une partie de la lumière qu'ils reçoivent par diffusion. On les appelle sources secondaires (la Lune en est une).



*Dessin d'un point-source et d'un objet étendu.*

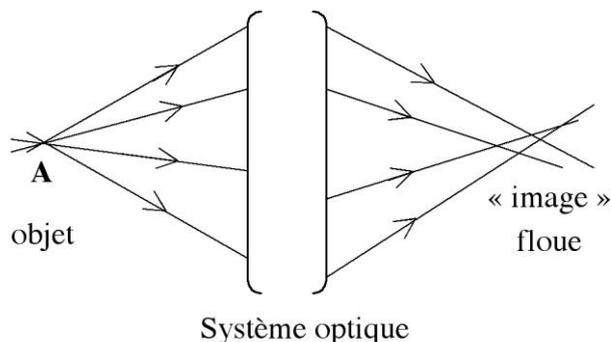
Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à l'image d'un des points lumineux constituant l'objet étendu. Ce point est un point-objet que nous qualifierons de "réel" et que nous noterons A.

On dispose maintenant sur le trajet de la lumière issue du point A un système optique qui est, de manière générale, un ensemble constitué de miroir(s) et/ou de lentille(s). Si, à la sortie de ce système optique, les rayons issus de A convergent en un point unique A', ce point est appelé image de A (par le système optique). On dit alors qu'il y a stigmatisme pour le système optique considéré et le couple de points A et A'.



*Cas où il y a stigmatisme : l'image de chaque point A de l'objet est un point. Dans ce cas, l'image obtenue est nette, et l'on parle en optique d'image.*

Mais est-ce toujours le cas ? En fait non... La propriété de stigmatisme est en fait rare (cf figure ci-après ; voir aussi l'exercice 3.1).



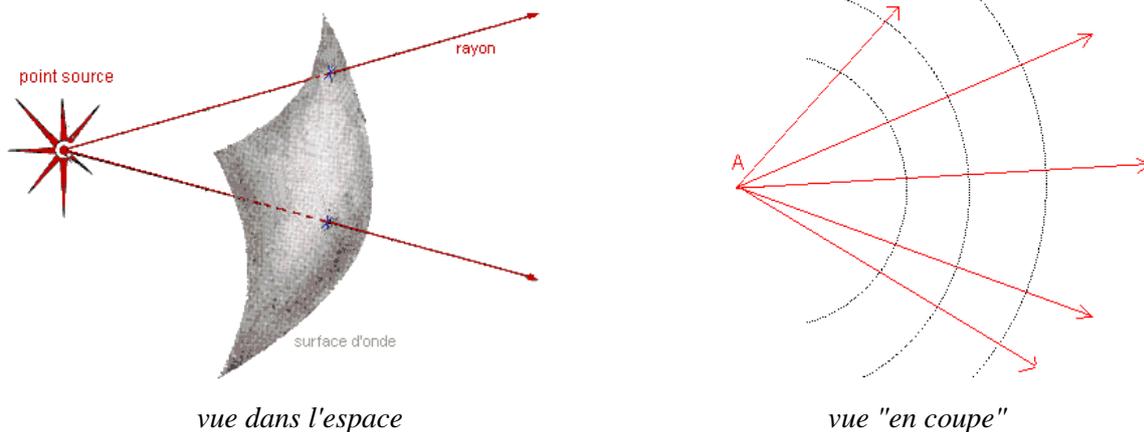
*Cas où l'on n'a pas stigmatisme : les rayons issus de A, après traversée du système optique, ne convergent pas en un point. L'image obtenue est floue. On considère en optique qu'il n'y a pas d'image.*

Remarque importante :

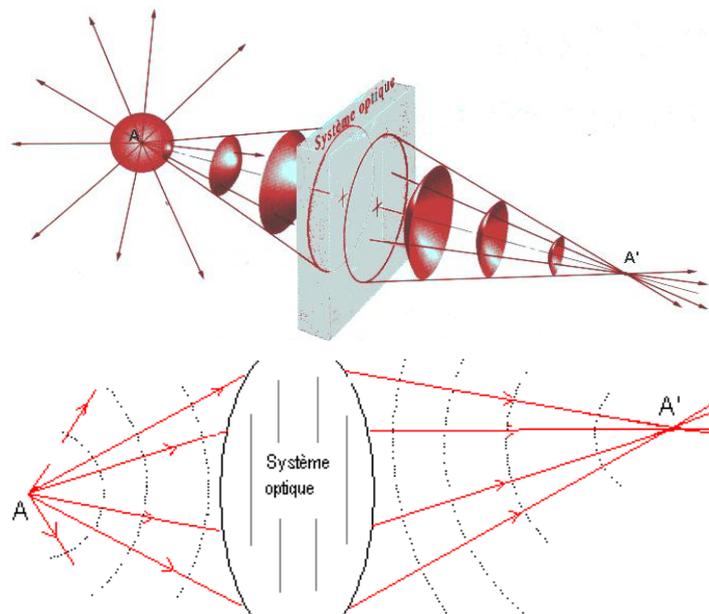
Attention au sens du mot « image » en optique par rapport à celui de la vie de tous les jours !  
*En effet, on ne parle d'image optique que lorsqu'il y a stigmatisme. Sinon, on considère qu'il n'y a pas d'image (en réalité, il y a une image dans le sens courant du terme, et elle est floue).*

Remarque : Pourquoi suffit-il de faire se croiser des rayons pour dire que c'est là qu'il y a la lumière qui se concentre ?...

Nous avons vu au chapitre précédent comment les rayons représentaient les lignes de propagation d'une onde lumineuse étendue dans l'espace :



Le dessin qui définit le point A' peut ainsi être repris en faisant apparaître les surfaces d'onde, comme suit:



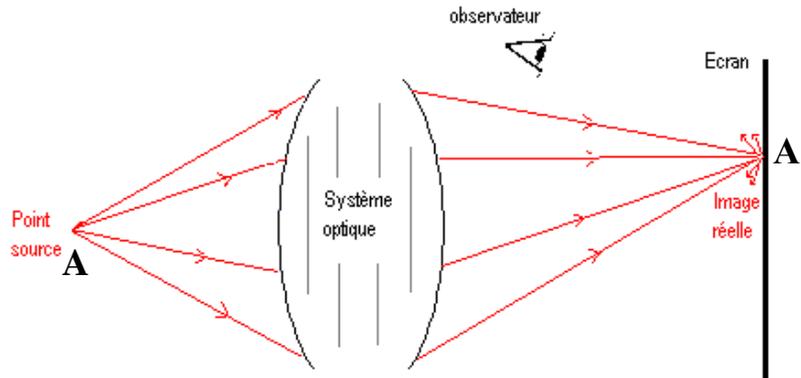
Remarque: la condition de stigmatisme n'est pas suffisante pour que l'image ressemble bien à l'objet. Si l'on prend l'exemple d'un miroir déformant, il est approximativement stigmatique, mais l'image est distordue par rapport à l'objet. Si l'on veut que l'image ressemble à l'objet, il faut en plus que l'image soit *homothétique* de l'objet...

### 1.3. Image réelle, image virtuelle, objet virtuel ...

On se place maintenant dans les conditions du stigmatisme.

#### Image réelle :

Reprenons le cas vu au 1.2, où les rayons issus du point A, après traversée du système optique, convergent en un point A'. A' est dans ce cas l'image réelle de A.

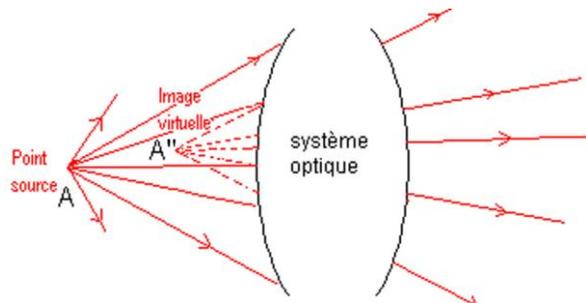


Il y a de l'énergie lumineuse au point A', ce que l'on peut mettre en évidence en y plaçant par exemple, un écran, une plaque photographique...

Notons également que *l'image réelle se trouve alors en aval du système optique*. La notion d'amont ou d'aval est bien entendu à comprendre en fonction du sens de propagation de la lumière. Elle est mal adaptée au cas des miroirs.

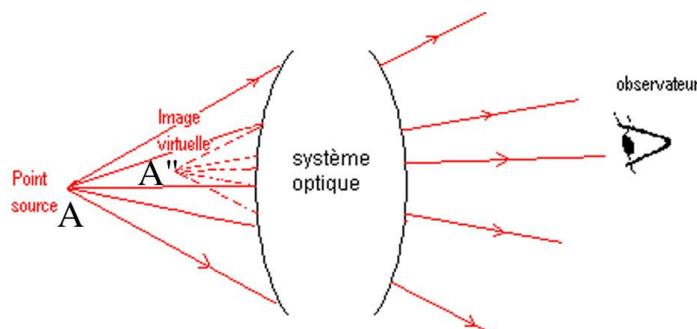
#### Image virtuelle :

Il est possible que les rayons sortant du système optique divergent à nouveau après traversée du système, en *paraissant* provenir d'un point unique A". Il y a encore stigmatisme, mais ce point est alors appelé image virtuelle de A. La différence essentielle avec le cas précédent est qu'il n'y a pas d'énergie lumineuse en A".



Pourquoi est-ce quand même l'image de A? Supposons qu'on place l'œil derrière le système optique comme indiqué sur le schéma ci-dessus. Il reçoit des rayons qui semblent provenir de A'' ; il ne fait donc pas la différence avec un objet réel qui serait situé en ce même point.

Notons qu'*une image virtuelle se trouve toujours en amont du système optique*.



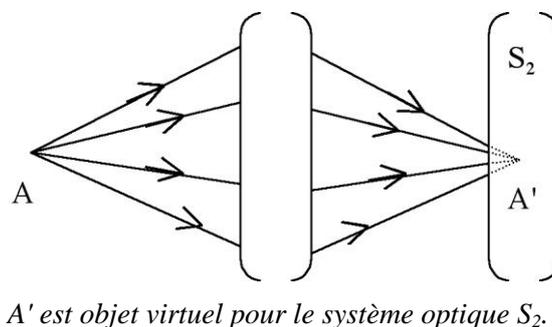
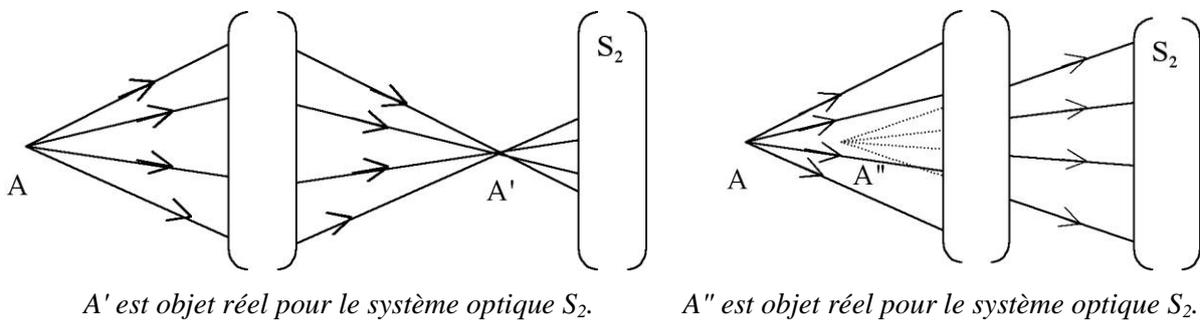
### Objet virtuel ou réel :

Une notion un peu plus subtile est celle d'objet virtuel. Elle intervient si l'on place un deuxième système optique  $S_2$  à droite du premier (sur les dessins, la lumière va toujours conventionnellement de la gauche vers la droite).

Si  $S_2$  est à droite de  $A'$ ,  $A'$  est un objet réel pour  $S_2$  (voir fig. de gauche ci-dessous).

Mais  $A''$  (fig. ci-dessous, droite) est également un objet réel pour  $S_2$ , bien qu'il n'y ait pas de lumière en  $A''$ ! On peut le voir de la manière suivante :  $S_2$  ne fait pas la différence entre les prolongements de rayons qui viennent d'un point ( $A''$ ) et des rayons qui viennent véritablement de ce point (à méditer...).

Enfin, si  $S_2$  est intercalé entre  $S$  et  $A'$ , dans ce cas  $A'$  est un objet virtuel pour  $S_2$  (voir figure page suivante).



En résumé :

Si l'objet est situé en amont du système optique, il est réel pour ce système optique.

S'il est situé en aval de ce système optique, il est virtuel.

### Remarque importante concernant les constructions géométriques :

Les rayons lumineux sont représentés en traits pleins. Leurs prolongements sont indiqués en pointillés.

Un objet ou une image réelle est représenté(e) en trait plein, un objet ou une image virtuel(le) en trait pointillé.

## 2. Miroirs

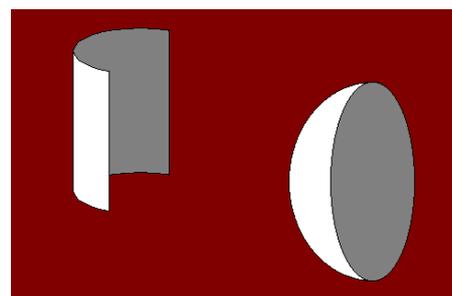
Le miroir plan est certainement l'élément optique le plus utilisé dans la vie courante, mais on utilise également des miroirs "courbes" dans de nombreuses situations : miroirs de toilette, rétroviseurs de voiture, fond des blocs optiques des phares de voiture, miroirs à certains carrefours, etc.



*Un miroir à un carrefour*

La forme donnée à ces miroirs dépend de leur utilisation. Suivant les cas, ils pourront être sphériques, cylindriques ou paraboliques. Un miroir sphérique est une portion de sphère dont on a couvert la surface d'une couche totalement réfléchissante, en général composée d'un dépôt métallique.

Remarque : Un miroir cylindrique (respectivement parabolique) est une telle surface mais il est constitué d'une portion de cylindre (respectivement de parabole).



*Miroir cylindrique ou sphérique*

Le miroir est donc un objet de notre quotidien auquel nous sommes habitués. Mais comment caractériser l'image que nous voyons de nous-même ou d'un objet dans un miroir? Où est-elle située et quelle est sa nature ?

### 2.1 Miroir plan

#### a) Expérience

Expérience 1 : image dans un miroir plan

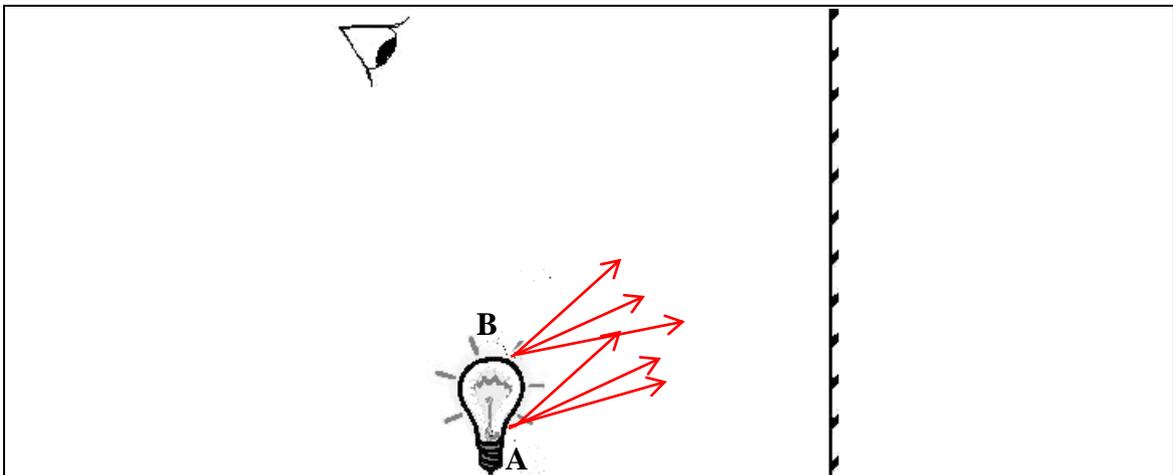
Posez un objet sur la table et placez le miroir verticalement, à une vingtaine de centimètres. Regardez l'image de l'objet. Où vous paraît-elle située ?

Prenez maintenant la plaque de plexiglas et mettez-la à la place du miroir. Utilisez comme objet une lampe de poche allumée (ou une petite ampoule), et observez l'image par réflexion de cette lampe. Utilisez une seconde lampe identique mais éteinte, et tentez de la superposer à l'image de la première. Où se trouve alors la lampe éteinte ? Pouvez-vous maintenant préciser où se trouve l'image de la lampe allumée, de même que l'image de l'objet dans le miroir plan (expérience précédente) ?

Caractériser l'image : dans quel sens est-elle<sup>20</sup> ? Est-elle réelle ou virtuelle ? Est-elle nette ?

### b) Interprétation ; stigmatisme du miroir plan (A)

Tracer au moins trois rayons issus du point A de l'objet et venant se réfléchir sur le miroir : effectuer le tracé avec précision en tenant compte des lois de Snell-Descartes. Faire de même avec 3 rayons issus du point B.



Cette construction permet-elle de retrouver les caractéristiques de l'image précédemment établies ?

Le miroir plan est-il un système rigoureusement stigmatique ? Si oui, pour quels points de l'espace possède-t-il cette propriété ?

<sup>20</sup> Le sens d'une image est à comprendre par rapport à la verticale : une image droite a « la tête en haut » et une image inversée (ou renversée) a « la tête en bas ».

## 2.2 Miroirs sphériques

### a) Définitions

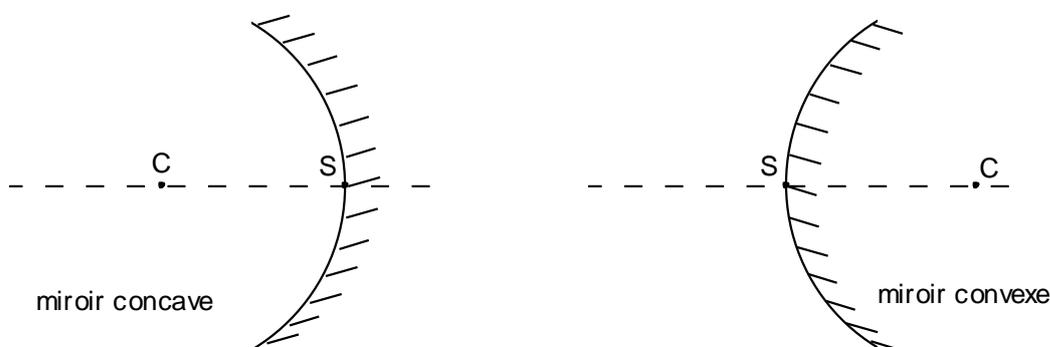
Un miroir sphérique est une portion de sphère dont on a couvert la surface d'une couche totalement réfléchissante.

De tels miroirs sont caractérisés par un axe optique, un centre et un rayon de courbure. Suivant le sens de la courbure, le miroir sera dit concave ou convexe<sup>21</sup>.



*Miroir-boule sur la place Stanislas de Nancy*

Sur les deux schémas ci-dessous, la lumière arrive conventionnellement par la gauche. Les miroirs sont représentés *par leur coupe selon un plan vertical*. C est le *centre de courbure* du miroir, et S est appelé le *sommet*. L'axe en pointillé est l'axe optique, axe de symétrie de révolution de miroir.



### b) Expériences

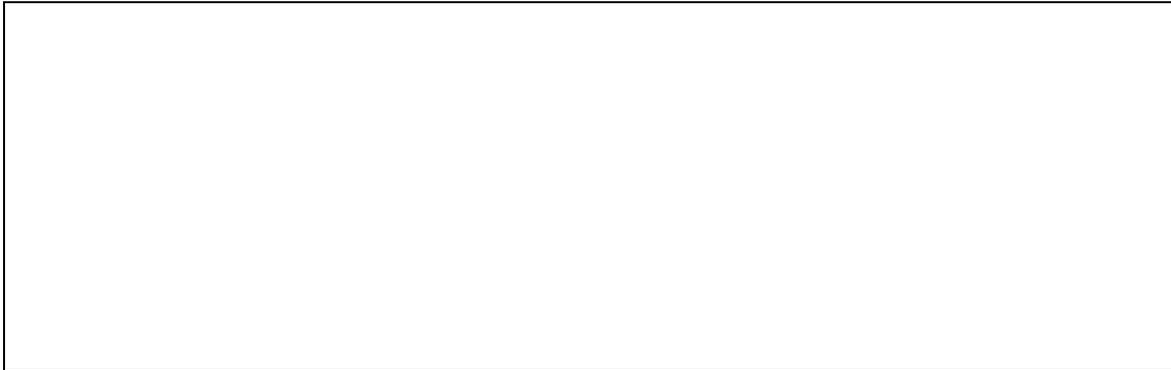
#### Expérience 2 (à réaliser par l'enseignant) : **(A)**

Utiliser le dispositif "laserbox" pour montrer comment se réfléchissent un ensemble de "rayons" parallèles à l'axe optique d'un miroir concave. Incliner le miroir sur son axe. Que constatez-vous?



<sup>21</sup> Comment retenir ces deux termes? Un moyen mnémotechnique possible est le suivant : concave évoque "cave" donc l'idée de quelque chose de creusé : voir l'allure du miroir concave. Sinon, trouvez le vôtre!

Le miroir sphérique est-il un système rigoureusement stigmatique en tout point comme le miroir plan ? Dessinez le trajet de quelques rayons pour justifier votre réponse.



### c) Stigmatisme rigoureux et approché ; conditions de Gauss

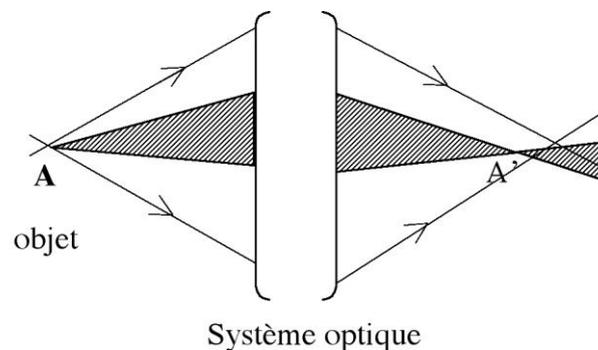
Comme on l'a vu, le miroir plan est le seul système optique rigoureusement stigmatique pour tous les points de l'espace. On vient de voir que le miroir sphérique n'est pas stigmatique, mais qu'on peut le rendre stigmatique en limitant le faisceau lumineux.

De manière générale, un système optique présente un stigmatisme approché pour un couple de points A et A' si l'on peut limiter un faisceau tel que tout rayon de ce faisceau issu de A passe au voisinage de A' après avoir traversé le système.

Dans le cas particulier d'un système optique dit centré, c'est-à-dire présentant un axe de symétrie de révolution (axe optique), on définit les conditions de Gauss, qui correspondent à une limitation du faisceau de lumière dans les conditions suivantes : les rayons lumineux doivent être 1) proches de l'axe et 2) peu inclinés par rapport à celui-ci.

On peut alors montrer qu'un système optique centré utilisé dans les conditions de Gauss :

- présente un stigmatisme approché (ceci sera fait au paragraphe suivant, d).
- est aplanétique : ceci signifie que l'image d'un petit objet plan perpendiculaire à l'axe optique est également plane et perpendiculaire à cet axe (pour vous en convaincre, voir l'exercice 3.1). *Cette propriété est essentielle pour les constructions géométriques de la suite.*

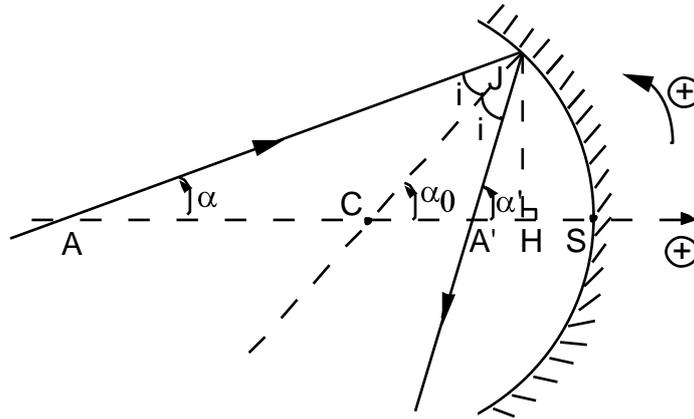


*stigmatisme approché*

#### d) Modélisation des miroirs sphériques dans les conditions de Gauss

- Image d'un point par un miroir sphérique dans les conditions de Gauss

On cherche l'image  $A'$  d'un point  $A$  situé sur l'axe optique du miroir, dans les conditions de Gauss. Nous allons chercher la position du point  $A'$ , en utilisant la loi de la réflexion. Le dessin est fait dans le cas d'un miroir concave, mais la démonstration est valable aussi pour un miroir convexe.



Les conventions et notations sont définies sur la figure ci-dessus :

- Les distances sont algébriques, l'axe optique étant orienté vers la droite.
- Les angles sont également algébriques, orientés dans le sens trigonométrique.

Pour trouver l'image de  $A$ , on trace deux rayons particuliers issus de  $A$ .

Le premier est confondu avec l'axe optique : il se réfléchit sans être dévié. Le second est un rayon quelconque issu de  $A$  incident sur le miroir en  $J$ . Ce rayon forme un angle  $i$  avec la normale au miroir en  $J$ , qui passe nécessairement par le centre de courbure  $C$ . Suivant la loi de la réflexion, il est réfléchi en formant le même angle  $i$  avec cette normale. Le rayon réfléchi intersecte l'axe optique au point  $A'$ , l'image cherchée.

On a dans  $AJC$  :

$$\alpha + i + \pi - \alpha_0 = \pi$$

Soit :

$$\alpha + i = \alpha_0$$

De même, dans  $A'JC$  :

$$\alpha_0 + i = \alpha'$$

En soustrayant ces deux équations, on obtient :

$$\alpha + \alpha' = 2\alpha_0$$

Dans le cadre de l'approximation de Gauss, la première approximation est de considérer tous les angles ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha_0$  et  $i$ ) comme suffisamment petits pour assimiler sinus et tangente d'un angle à la valeur de l'angle (en radians !).

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{\overline{HJ}}{\overline{AH}} \quad ; \quad \alpha' \approx \tan \alpha' = \frac{\overline{HJ}}{\overline{A'H}} \quad ; \quad \alpha_0 \approx \tan \alpha_0 = \frac{\overline{HJ}}{\overline{CH}}$$

La seconde hypothèse est que les rayons sont proches de l'axe. Ceci signifie, entre autres, que l'on peut confondre H et S on a donc :

$$\alpha \approx \frac{\overline{SJ}}{AS} \quad ; \quad \alpha' \approx \frac{\overline{SJ}}{A'S} \quad ; \quad \alpha_0 \approx \frac{\overline{SJ}}{CS}$$

D'où :

$$\frac{\overline{SJ}}{AS} + \frac{\overline{SJ}}{A'S} = 2 \frac{\overline{SJ}}{CS}$$

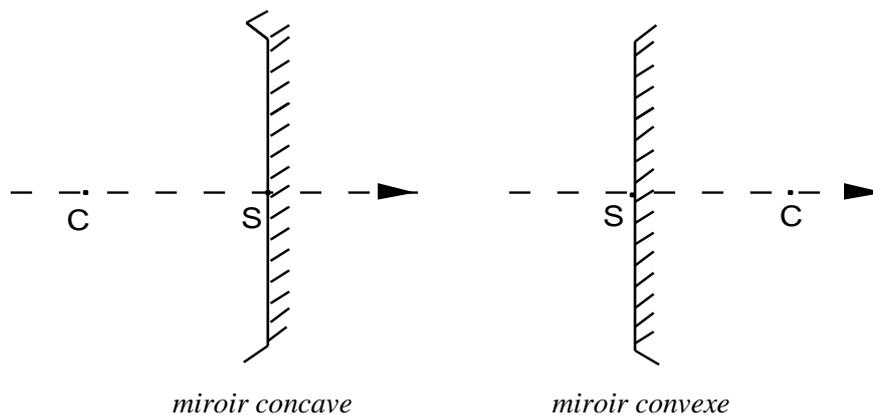
Soit encore :

$$\boxed{\frac{1}{\overline{SA'}} + \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{2}{\overline{SC}}}$$

On voit ainsi que, *dans les conditions de Gauss* :

- A et A' sont bien reliés par une relation biunivoque, appelée relation de conjugaison (avec origine au sommet).
- le seul paramètre pertinent est le rayon de courbure algébrique du miroir  $\overline{SC}$ .

Les miroirs sont alors schématisés de la façon suivante :



*Représentation symbolique d'un miroir sphérique concave ou convexe, utilisé dans les conditions de Gauss. L'axe optique est orienté vers la droite (sens de propagation de la lumière).*

- Foyers et distance focale

### Foyer image

L'expérience 2 vous a montré que si on envoie un faisceau de lumière parallèle à l'axe optique sur un miroir concave dans les conditions de Gauss, les rayons convergent en un point : le foyer image noté F'. Ce point est défini *de manière générale* (dépassant le cas particulier du miroir sphérique) comme suit :

On considère des rayons incidents sur le miroir, parallèles à l'axe optique. *Ceci correspond à un point A situé à l'infini sur l'axe*. Le point A' correspondant sera le point F', ce que l'on peut résumer par :

$$A_\infty \rightarrow F'$$

Dans le cas du miroir sphérique, on peut trouver la position du foyer image en utilisant la définition ci-dessus, et la formule de conjugaison du miroir sphérique, avec  $\overline{SA} \rightarrow \infty$ , et l'on obtient :

$$\overline{SF'} = \frac{\overline{SC}}{2}$$

### Foyer objet

La définition générale du foyer objet d'un système optique centré est symétrique de celle du foyer image : les rayons issus du foyer objet, noté F, doivent, après passage par le système optique, être parallèle à l'axe optique. On peut résumer ceci par :

$$F \rightarrow A'_\infty$$

On obtient ici :

$$\overline{SF} = \frac{\overline{SC}}{2}$$

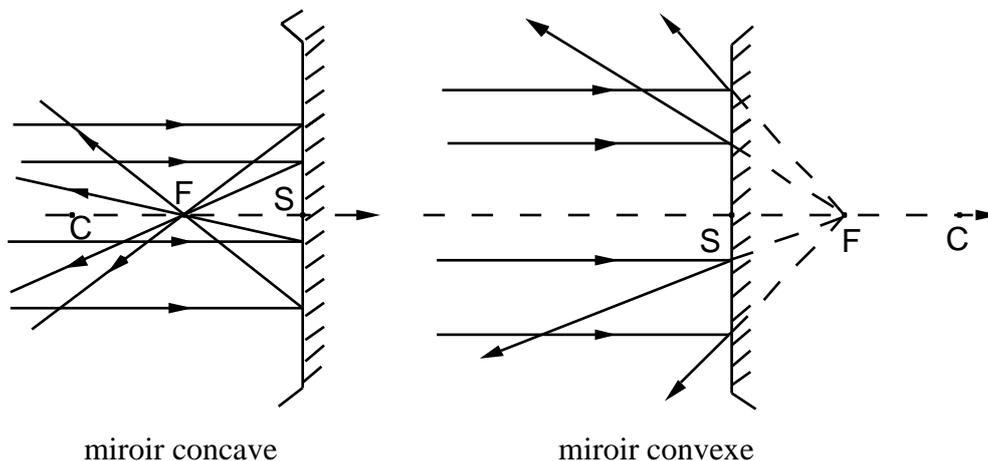
Dans ce cas particulier, foyers image et objet sont donc *confondus*, en un point que nous noterons F. Ceci peut se comprendre grâce à la loi de retour inverse de la lumière ...

On peut donc réécrire la relation de conjugaison :

$$\boxed{\frac{1}{\overline{SA'}} + \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{2}{\overline{SC}} = \frac{1}{\overline{SF}}}$$

La distance  $\overline{SF}$  est appelée distance focale du miroir sphérique. Attention, il s'agit d'une *grandeur algébrique*, comme toutes les grandeurs apparaissant dans les relations de conjugaison.

La figure ci-dessous résume la définition des foyers dans le cas d'un miroir concave ou convexe dans les conditions de Gauss. Le dessin a été fait dans le cas où F apparaît comme le foyer image. Pour le voir apparaître comme le foyer objet, il suffit d'inverser le sens des flèches.



Expérience 3 : "téléscope"

Choisir un objet très éloigné : cet objet doit être suffisamment lumineux. On peut ouvrir la fenêtre et prendre un objet de l'extérieur (le bâtiment d'en face...), à condition que la luminosité soit suffisante.

Réaliser l'image de cet objet sur le mur ou sur un écran, en utilisant le miroir sphérique concave dont vous disposez sur votre table. Quelle est la nature de cette image?

L'image est-elle nette partout ? Commenter.

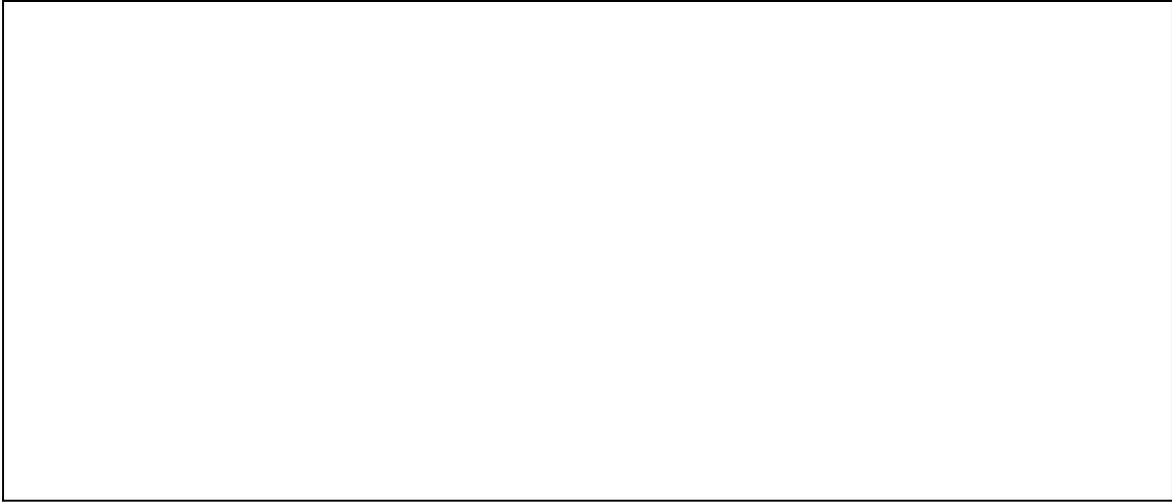
Expliquer pourquoi on peut déduire de cette expérience une estimation de la distance focale du miroir, et mesurer cette distance focale. Comparer avec les tables voisines.

Pourquoi cette expérience modélise-t-elle (grossièrement, bien sûr...) le fonctionnement d'un télescope (voir l'encadré en fin de chapitre sur le télescope de Hubble)?



Expérience 4 : images par les miroirs convexes et concaves

Regardez votre image dans les miroirs concave et convexe à votre disposition, en faisant varier la distance entre le miroir et vous. Décrire ce que vous observez.



- Constructions géométriques de l'image d'un objet par des miroirs sphériques : voir en TD (exercices 3.1 et 3.2). **(A)**

### 3. Dioptrés



*aquarium-boule*



*effet grossissant d'une goutte d'eau sur une feuille*

Vous avez vu dans le chapitre 1 ce qu'on appelle un dioptré : la surface de séparation de deux milieux d'indices différents.

La surface calme d'un plan d'eau, par exemple, constitue un dioptré plan.

Mais la surface bombée d'une goutte d'eau, d'un aquarium-boule constituent aussi des dioptrés, mais des dioptrés *courbes*. Nous étudierons ici le cas des dioptrés sphériques.

#### 3.1 Dioptré plan

En regardant un plan d'eau, on peut y apercevoir le fond - dont les cailloux semblent à portée de main - ou une branche qui plonge et semble cassée au niveau de la surface de l'eau.

Nous allons tenter d'expliquer - à l'aide des lois de Snell-Descartes - pourquoi nous pouvons observer de tels phénomènes.

Nous allons également voir si la notion de stigmatisme s'applique au cas du dioptré plan.

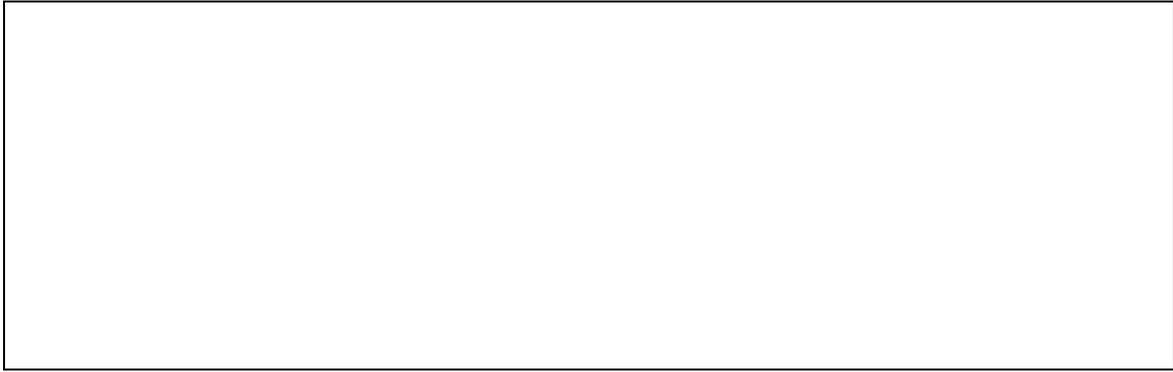


#### a) Expériences

*Les deux expériences qui suivent peuvent être soit faites individuellement par chaque étudiant, soit montrées à l'ensemble de la classe par l'enseignant grâce au dispositif Didacam + moniteur vidéo.*

##### Expérience 5 : le bâton brisé

*Utiliser un petit aquarium à faces parallèles rempli à moitié d'eau ; y plonger un crayon, une baguette verticale et regarder par une face (placer les yeux au niveau de l'aquarium) ; observer et dessiner le crayon en vous décalant vers la droite, puis vers la gauche. Interpréter.*



*Expérience 6 : placer au fond d'une tasse opaque (gobelet de café...) un petit objet (une pièce de monnaie, par exemple) de telle sorte qu'il n'apparaisse pas à la vue ; verser de l'eau progressivement et observer. Décrire ce que vous avez constaté, et interpréter.*



### **b) Interprétation (A)**

Voir en TD (exercice 3.6) : on montrera notamment qu'un point objet n'a pas une image unique par un dioptre plan.

On comprendra également pourquoi l'œil voit quand même une image nette, et aussi que cette image dépend de la position de l'observateur.

### 3.2. Dioptrés sphériques

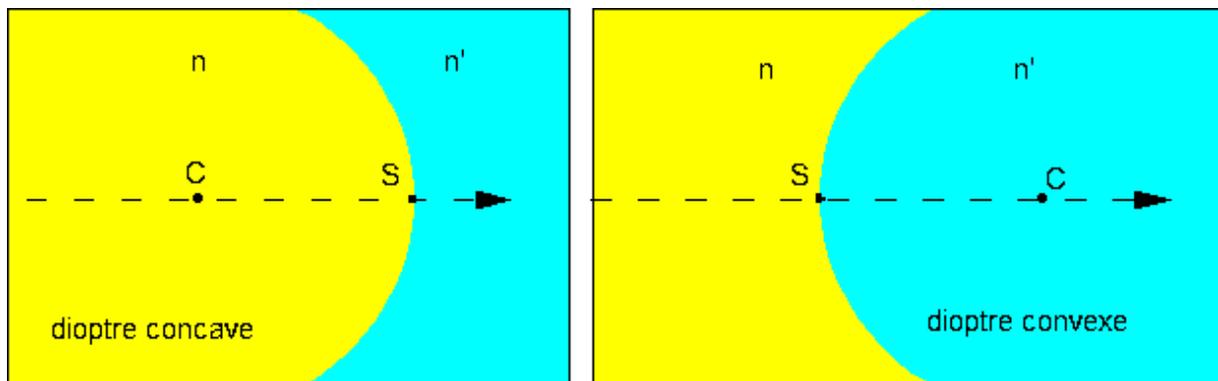
#### a) Définitions

Un dioptré sphérique est une surface de séparation courbée entre deux milieux d'indices  $n$  et  $n'$  pour laquelle on peut définir un centre  $C$  et un rayon de courbure.

Un exemple en est la surface de l'œil. En effet, la lumière arrivant sur notre œil rencontre tout d'abord une surface pratiquement sphérique constituée d'un milieu transparent qui sépare l'air extérieur (d'indice 1) de l'humeur aqueuse d'indice 1,33.

Les dioptrés sphériques sont aussi à la base de la construction des lentilles (minces ou épaisses, convergentes ou divergentes, voir le chapitre 4) qui sont des éléments de base pour la formation des images.

Comme pour les miroirs sphériques, on a deux sortes de dioptrés sphériques : concaves et convexes (relativement à l'arrivée de la lumière, par convention : de la gauche).



Sur les deux représentations ci-dessus, la lumière se propage de la gauche vers la droite. L'axe optique représenté en pointillés est orienté conventionnellement positivement vers la droite. Le rayon de courbure algébrique du dioptré est défini par  $R = \overline{SC}$ . Il est positif dans le cas d'un dioptré convexe, négatif dans le cas d'un dioptré concave.

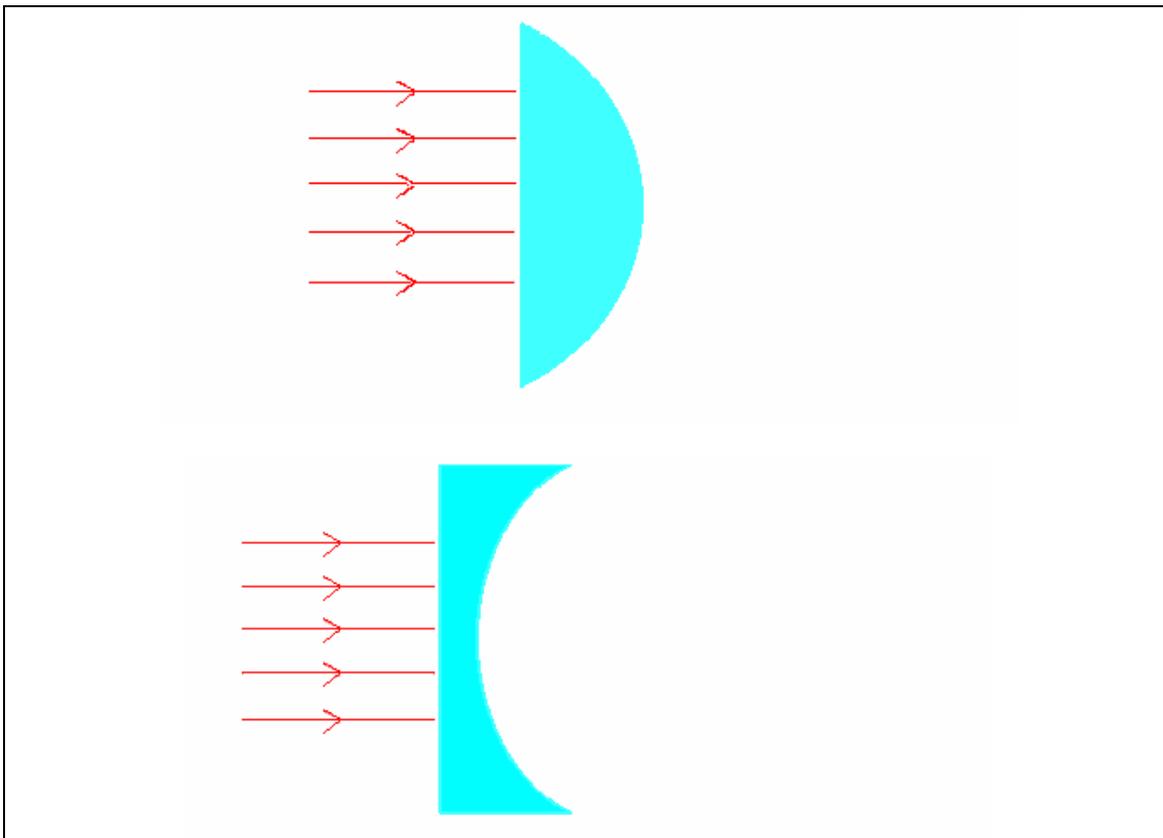
#### b) Expérience

*Expérience 7 (à réaliser par l'enseignant) : à l'aide du dispositif "laserbox", éclairer un dioptré sphérique par un faisceau de lumière parallèle à l'axe du dioptré. Observer les rayons réfractés. Faire un schéma.*

*Le dioptré sphérique est-il un système rigoureusement stigmatique ? Préciser (et dessiner) ce que vous observez. (A)*



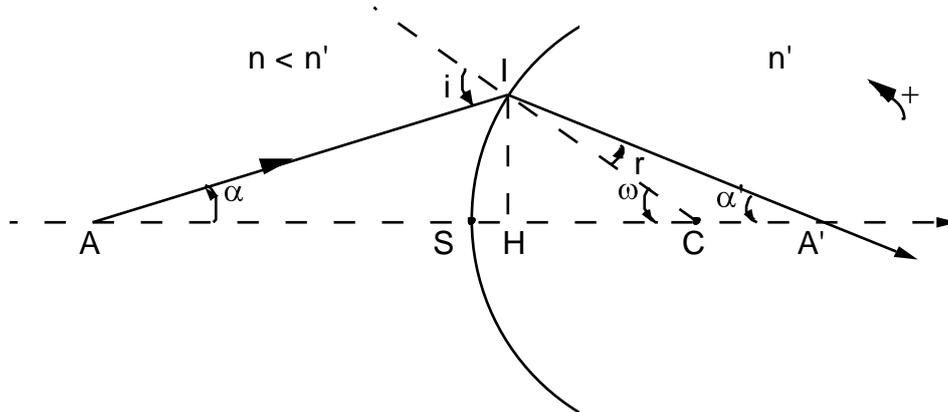
Interpréter qualitativement l'expérience précédente grâce à la loi de la réfraction, en complétant les deux schémas suivants :



### c) Modélisation des dioptries sphériques dans les conditions de Gauss

- Relation de conjugaison

On cherche l'image  $A'$  d'un point  $A$  situé sur l'axe optique du dioptré, dans les conditions de Gauss. Nous allons chercher la position du point  $A'$ , en utilisant la loi de la réfraction. La relation de conjugaison liant les positions de  $A$  et  $A'$  ne dépend pas du type de dioptré étudié. Nous l'établirons dans un cas particulier : un dioptré sphérique convexe avec  $n < n'$ .



Les conventions et notations sont définies sur la figure ci-dessus :

- Les distances sont algébriques, l'axe optique étant orienté vers la droite.
- Les angles sont également algébriques, orientés dans le sens trigonométrique.

Pour trouver l'image de  $A$ , on trace deux rayons particuliers issus de  $A$  : l'un est l'axe optique lui-même, l'autre est un rayon quelconque issu de  $A$  incident sur le dioptré en  $I$  avec un angle  $i$ , réfracté avec un angle  $r < i$  (car  $n' > n$ ) et intersectant l'axe optique en  $A'$ , l'image cherchée.

Dans le cadre de l'approximation de Gauss, tous les angles ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\omega$ ,  $i$  et  $r$ ) sont petits. La loi de la réfraction s'écrit donc :

$$n i = n' r \quad (1)$$

On a dans AIC :

$$\alpha + \omega + \pi - i = \pi$$

D'où :

$$i = \omega + \alpha$$

De même, dans A'IC :

$$\alpha' + r + \pi - \omega = \pi$$

D'où :

$$r = \omega - \alpha'$$

Pour trouver l'expression de  $\omega$ ,  $\alpha$  et  $\alpha'$ , on utilise l'approximation des petits angles et, comme pour le miroir sphérique, on confond  $H$  et  $S$  et on assimile les angles à leurs tangentes :

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{\overline{HI}}{\overline{AH}} \approx \frac{\overline{HI}}{\overline{AS}} = -\frac{\overline{HI}}{\overline{SA}}$$

$$\alpha' \approx \tan \alpha' = \frac{\overline{HI}}{\overline{HA'}} \approx \frac{\overline{SI}}{\overline{SA'}}$$

$$\omega \approx \tan \omega = \frac{\overline{HI}}{\overline{HC}} \approx \frac{\overline{SI}}{\overline{SC}}$$

On remplace  $\alpha$ ,  $\alpha'$  et  $\omega$  par ces expressions dans (1), qui devient donc :

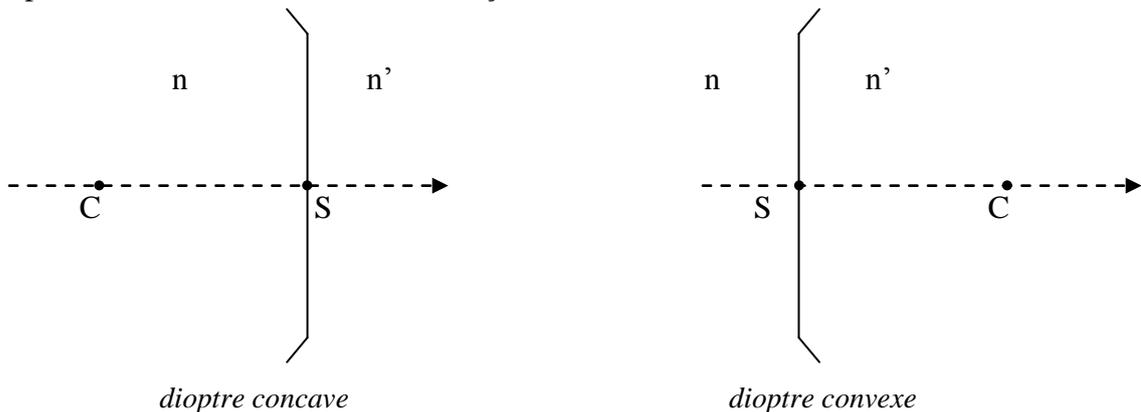
$$\boxed{\frac{n'}{\overline{SA'}} - \frac{n}{\overline{SA}} = \frac{n'-n}{\overline{SC}}}$$

Cette relation est la relation de conjugaison du dioptre sphérique (avec origine au sommet), et on peut montrer qu'elle est tout à fait générale dans la limite des conditions de Gauss.

Remarque : à partir de cette relation, on peut retrouver la relation de conjugaison pour le dioptre plan (dans les conditions du stigmatisme approché), en faisant tendre le rayon de courbure SC vers l'infini. On obtient en effet :

$$\frac{\overline{HA'}}{\overline{HA}} = \frac{n'}{n}$$

Les dioptres sont alors schématisés de la façon suivante :



*Représentation symbolique d'un dioptre sphérique concave ou convexe, utilisé dans les conditions de Gauss.*

- Foyers

Il suffit d'appliquer la définition des foyers objet/image en utilisant la relation précédente pour trouver leur position.

Ainsi, le foyer image  $F'$  est le point conjugué d'un point A « à l'infini » ( $A_\infty \rightarrow F'$ ), on obtient :

$$\frac{n'}{\overline{SF'}} = \frac{n'-n}{\overline{SC}}$$

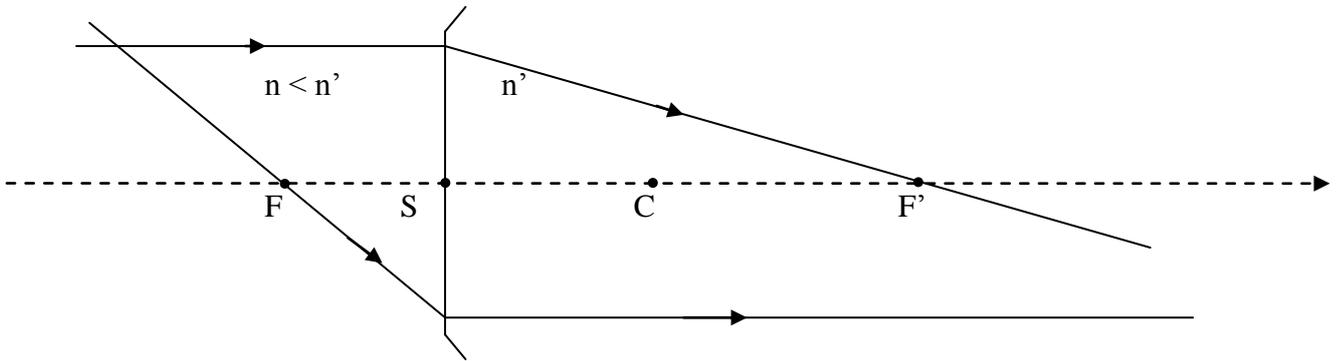
Le foyer objet est le point conjugué d'un point image  $A'$  à l'infini ( $F \rightarrow A'_\infty$ ) :

$$-\frac{n}{\overline{SF}} = \frac{n'-n}{\overline{SC}}$$

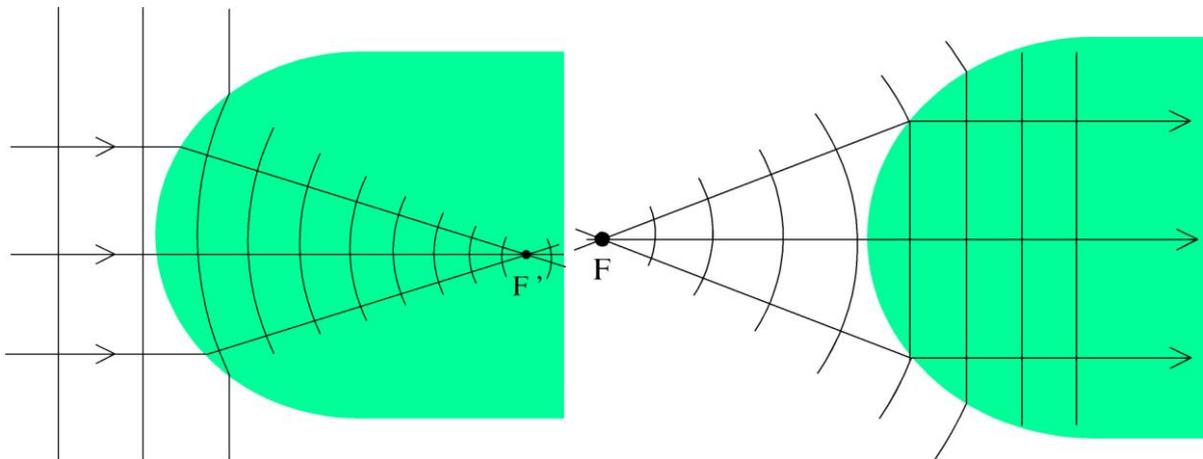
Par exemple, dans le cas particulier de la figure précédente,  $\overline{SC} > 0$  et  $n < n'$ , donc  $\overline{SF'} > 0$  et  $\overline{SF} < 0$  :  $F'$  est à droite du dioptre et F à gauche.

On voit que dans ce cas, les foyers image et objet ne sont pas confondus, contrairement au cas du miroir sphérique. Ils ne sont pas non plus symétriques par rapport au point S... (il n'y a d'ailleurs aucune raison pour qu'ils le soient!)

La figure ci-dessous résume la définition des foyers dans le cas d'un dioptre convexe avec  $n < n'$  et dans les conditions de Gauss.



Enfin, la figure ci-dessous illustre la définition des foyers à l'aide du modèle en termes de surfaces d'onde vu au chapitre 1.



*Le milieu de gauche est de l'air (d'indice 1), celui de droite est un milieu matériel quelconque, d'indice  $>1$ . L'onde va plus vite dans l'air que dans le matériau.*

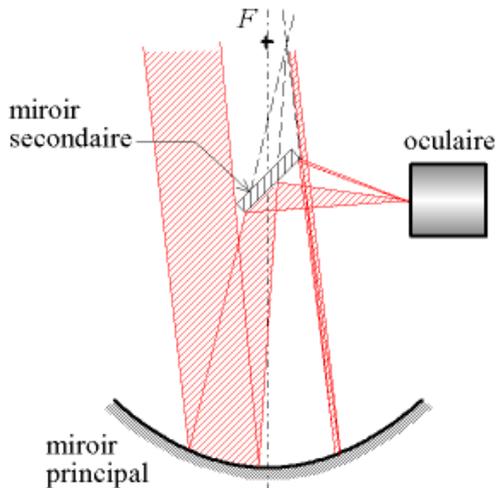
*Figure de gauche : Les ondes planes sont transformées en ondes sphériques à la traversée du dioptre sphérique, et convergent au foyer image  $F'$ .*

*Figure de droite : les ondes sphériques provenant du foyer objet  $F$  sont transformées en ondes planes à la traversée du dioptre sphérique.*

*Réfléchissez afin d'interpréter le mieux possible ces deux dessins...*

## Encadré : le télescope spatial Hubble

Le télescope aurait été inventé par Newton au XVII<sup>e</sup> siècle.



*Principe du télescope de Newton*



*Le télescope spatial Hubble*

Le télescope spatial Hubble fonctionne sur le même principe que le premier télescope de Newton. Ce principe est le suivant : un miroir concave de grande taille forme une image de l'astre observé dans son plan focal. Cette image est ensuite généralement renvoyée sur un oculaire à l'aide d'un petit miroir plan. Ce télescope a été mis sur orbite en avril 1990. Il a permis de progresser dans la réponse à des questions telles que : à quelle vitesse l'Univers se dilate-t-il ?

Dès le début, les astronomes se sont rendu compte que les images qu'ils réalisaient comportaient une grossière aberration : certains rayons lumineux sortent des conditions de Gauss ; en conséquence, les rayons provenant d'un même point ne convergent pas tous au même endroit, et « l'image » obtenue est floue (voir figure de gauche ci-dessous). En 1993, des astronautes de la navette spatiale Endeavor ont réussi à corriger ce défaut (voir figure de droite ci-dessous) en installant une nouvelle caméra comprenant sa propre optique corrective.



*Images de la galaxie M-100 prises par le télescope spatial Hubble avant (gauche) et après (droite) réparation de l'aberration « de sphéricité ».*

**Encadré : quelques images « non optiques »**

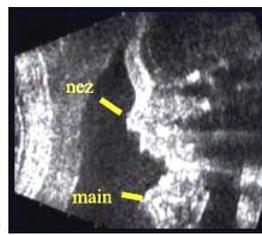
Au cours du XXe siècle, de nouvelles méthodes pour obtenir des images homothétiques des objets, mais qui ne sont pas basées sur l'optique, ont été inventées. Ces nouvelles méthodes permettent d'explorer le monde à une échelle plus petite (par exemple, de « voir » les atomes), ou d'observer ce qui est caché à notre œil (l'intérieur du corps humain, par exemple).

- On peut réaliser des images à l'aide d'ondes électromagnétiques dans une autre gamme de longueur d'ondes que l'optique, par exemple avec des rayons X dont la longueur d'onde est comprise entre 10 nm et 1 pm ( $10^{-12}$  m). Les radiographies du corps humain sont ainsi obtenues grâce à des rayons X (voir figure a).
- On peut obtenir des images grâce à des ondes mécaniques ultrasonores, c'est le principe de l'échographie (voir figure b).
- Des particules constitutives de la matière, comme les électrons ou les neutrons, peuvent servir à réaliser des images. La microscopie électronique (par réflexion, par transmission ou à balayage - MEB), très utilisée notamment en biologie, est sans doute l'exemple le plus connu (figures c, d et e).
- Il existe enfin des techniques particulières pour « voir » les surfaces à l'échelle atomique : citons la microscopie à effet tunnel (STM) qui permet d'imager des surfaces conductrices (figure g), et la microscopie à force atomique (AFM) qui permet d'obtenir des images de surfaces isolantes (figure f).



a)

a) Une « radio » des poumons ;



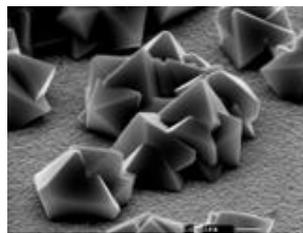
b)

b) Une échographie d'un fœtus



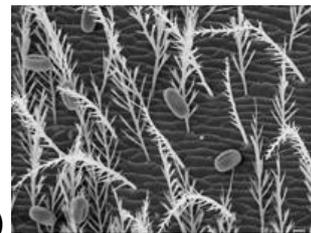
c)

c) Image MEB d'une crevette ;



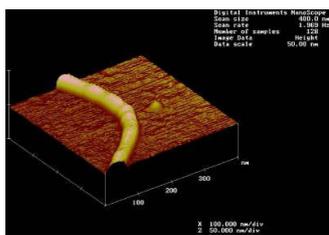
d)

d) Image MEB de microcristaux de cuivre (de taille quelques  $\mu\text{m}$ ) ;



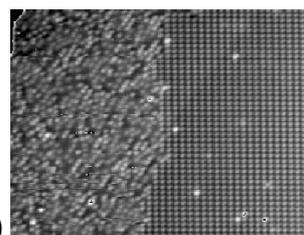
e)

e) Soies d'abeille et grains de pollen (la taille d'un grain est de l'ordre de  $10 \mu\text{m}$ ) en MEB



f)

f) Image AFM d'un nanotube de carbone (la largeur du tube est de 50 nm environ) ;



g)

g) Image STM d'atomes de phosphore, ordonnés à droite, désordonnés à gauche.

### Résumé du chapitre 3

On appelle image optique la reproduction homothétique d'un objet formée, à partir de la lumière qu'il émet, par un système optique composé de miroirs, lentilles ...

Un objet situé en amont du système optique est réel pour ce système optique. S'il est situé en aval de ce système optique, il est virtuel.

Si les rayons issus d'un point – objet convergent vers (ou semblent provenir d') un point, celui-ci est appelé image géométrique (point – image) et on dit qu'il y a stigmatisme (pour ce couple de points).

Si l'image est en aval du système optique, elle est réelle pour ce système optique. Si elle est en amont du système optique, elle est virtuelle pour ce système.

Il y a vraiment de la lumière à l'endroit où est une image réelle. Ce n'est pas le cas pour une image virtuelle.

Le miroir plan est rigoureusement stigmatique pour tous les points de l'espace.

Un système optique présente un stigmatisme approché pour un couple de points A et A' si l'on peut limiter un faisceau tel que tout rayon de ce faisceau issu de A passe au voisinage de A' après avoir traversé le système.

Un système optique est dit centré s'il possède un axe de symétrie de révolution appelé axe optique. Les conditions de Gauss correspondent à une limitation du faisceau de lumière dans les conditions suivantes : les rayons lumineux doivent être proches de l'axe et peu inclinés par rapport à celui-ci. On peut alors montrer qu'un système optique utilisé dans les conditions de Gauss présente un stigmatisme approché, et est aplanétique.

Miroir sphérique, on peut écrire une relation de conjugaison entre la position d'un point A et celle de son image A', dans les conditions de Gauss :

$$\frac{I}{SA'} + \frac{I}{SA} = \frac{2}{SC} = \frac{I}{SF}$$

où S est le sommet du miroir, C son centre de courbure et F son foyer.

Dioptrique sphérique : un dioptrique sphérique est une surface de séparation courbée entre deux milieux d'indices  $n$  et  $n'$  pour laquelle on peut définir un centre C et un rayon de courbure . Dans les conditions de Gauss la relation de conjugaison s'écrit :

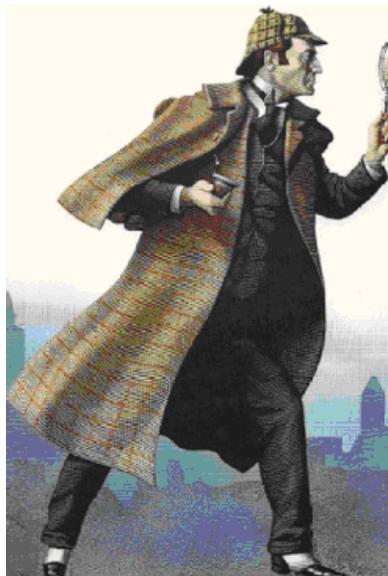
$$\frac{n'}{SA'} - \frac{n}{SA} = \frac{n'-n}{SC}$$



## CHAPITRE 4 :

## LENTILLES

## OEIL



*Une représentation de Sherlock Holmes, muni de son indispensable loupe*

**Salles : « lentilles » 039 ou 109**

## SOMMAIRE DU CHAPITRE 4 :

<b>1. LENTILLES OPTIQUES : NATURE, EFFET, MODELISATION</b>	<b>100</b>
<b>1.1 PETIT HISTORIQUE</b>	<b>100</b>
<b>1.2 EXPERIENCES QUALITATIVES</b>	<b>100</b>
<b>1.3 INTERPRETATION PAR LES LOIS DE LA REFRACTION</b>	<b>102</b>
<b>1.4 LE MODELE DES LENTILLES MINCES</b>	<b>102</b>
A) FORMULE DE CONJUGAISON AVEC ORIGINE AU SOMMET	102
B) FOYERS, PLANS FOCALUX	103
<b>1.5 MESURES DE LA DISTANCE FOCAL D'UNE LENTILLE CONVERGENTE</b>	<b>105</b>
A) DIFFERENTES MESURES	105
B) BILAN COMPARATIF DES DIFFERENTES MESURES	108
<b>1.6 CONSTRUCTIONS GEOMETRIQUES AVEC LE MODELE DES LENTILLES MINCES</b>	<b>108</b>
A) COMMENT CONSTRUIRE UNE IMAGE?	108
B) LIEN ENTRE CONSTRUCTION GEOMETRIQUE ET RELATION DE CONJUGAISON	109
C) NOTION DE GRANDISSEMENT	110
D) IMAGES PAR UNE LENTILLE CONVERGENTE D'UN OBJET REEL	110
E) IMAGES PAR UNE LENTILLE DIVERGENTE D'UN OBJET REEL	112
<b>2. L'ŒIL HUMAIN ET LES CORRECTIONS DE LA VISION</b>	<b>113</b>
<b>2.1 DECOUVERTE DU FONCTIONNEMENT DE L'ŒIL HUMAIN</b>	<b>113</b>
<b>2.2 ANATOMIE DE L'ŒIL</b>	<b>113</b>
A) STRUCTURE	113
B) ACCOMMODATION	114
<b>2.3 DEFAUTS DE L'ŒIL</b>	<b>116</b>
<b>3. ASSOCIATION DE LENTILLES, INSTRUMENTS D'OPTIQUE</b>	<b>118</b>
<b>3.1 LENTILLES ACCOLEES</b>	<b>118</b>
<b>3.2 LENTILLES NON ACCOLEES : EXEMPLE DU TELEOBJECTIF</b>	<b>119</b>

### **Matériel à votre disposition par table**

- 1 banc d'optique + 5 pieds
- Source de lumière blanche + transfo + 1 noix + 1 ensemble {pièce cylindrique + support diapo}
- 1 pièce cylindrique
- 1 support diapo
- 1 lentille convergente de courte focale
- 1 lentille convergente de grande focale
- 1 lentille divergente
- 1 jeu de diapositives dans une boîte (œuvres d'art, monuments de Paris..)
- 1 petit miroir plan

### **Matériel pour l'enseignant**

- Dispositif de démonstration avec source laser multifaisceaux (laserbox) + panneau métallique+ lentilles convergentes et divergentes magnétiques de différentes courbures
- 2 manips : « œil » Jeulin + source de lumière blanche + pied
- papier calque

# 1. Lentilles optiques : nature, effet, modélisation

## 1.1 Petit historique

On raconte qu'en l'an 57, Néron observa les combats de gladiateurs au travers d'une émeraude montée sur bague : correction de myopie ou lunettes de soleil ? Les pierres précieuses et autres verres étaient connus pour leurs vertus optiques depuis l'Égypte pharaonique : « *Une écriture mince et embrouillée paraît plus grosse et plus distincte à travers une boule remplie d'eau* » (Sénèque).

Ce n'est qu'au XI<sup>e</sup> siècle que la loupe, constituée d'une lentille de verre épais, fait son apparition. Les copistes s'en servent pour mieux voir les caractères des livres qu'ils reproduisent. À la fin du XIII<sup>e</sup> siècle, le physicien florentin Salvino Degli Armati découvre que, si on amincit la lentille ou si on change sa courbure, on voit nettement les objets situés à une certaine distance.

Au XVI<sup>e</sup> siècle, le microscope et la lunette astronomique ont été inventés en Hollande. Dans les deux cas, il s'agit d'une association de plusieurs lentilles.

Depuis, de nombreux dispositifs optiques comprenant des lentilles ont été inventés, qu'il s'agisse du projecteur de cinéma, de l'appareil photo, de la caméra, etc. La lentille est ainsi devenue un élément essentiel en optique.



## 1.2 Expériences qualitatives

Expérience 1 : image d'un objet proche par une lentille concave ou convexe

En touchant les lentilles présentes sur votre table à **travers un chiffon**, identifiez les lentilles concaves et convexes.

Dans un premier temps, prenez une lentille convexe.

Regardez un objet en approchant cette lentille à quelques centimètres.

Qualifier l'image obtenue (réelle ou virtuelle, droite ou inversée, plus grande ou plus petite que l'objet):

Faites la même expérience avec une lentille concave. Comment qualifiez-vous l'image obtenue dans ce cas?

Expérience 2 : image d'un objet lointain par une lentille concave ou convexe

Prenez une lentille convexe et utilisez-la pour former l'image d'un objet lointain (choisir un objet bien éclairé : à l'extérieur, ou un de vos camarades bien éclairé par le néon du tableau...).

Regardez l'objet à travers la lentille. Comment apparaît-il?

Placer un papier calque entre la lentille et votre œil. Qu'observez-vous ?

Mêmes questions avec une lentille concave :

Expérience 3 (à réaliser par l'enseignant) **(A)** : visualisation du trajet des rayons d'un faisceau parallèle incident sur une lentille concave ou convexe.

Grâce à la « laser ray box » montrer le trajet de quelques rayons parallèles à la traversée d'une lentille concave ou convexe.

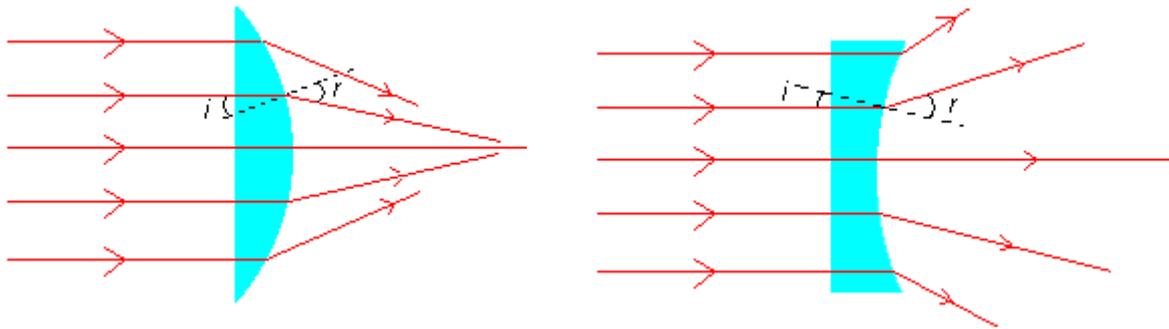
Faire le schéma correspondant à votre observation.

Que peut-on dire du stigmatisme de la lentille?

### 1.3 Interprétation par les lois de la réfraction

Une lentille est un corps transparent homogène d'indice  $n$ , limité par deux dioptries dont l'un au moins n'est pas plan, l'autre face pouvant être plane ou sphérique.

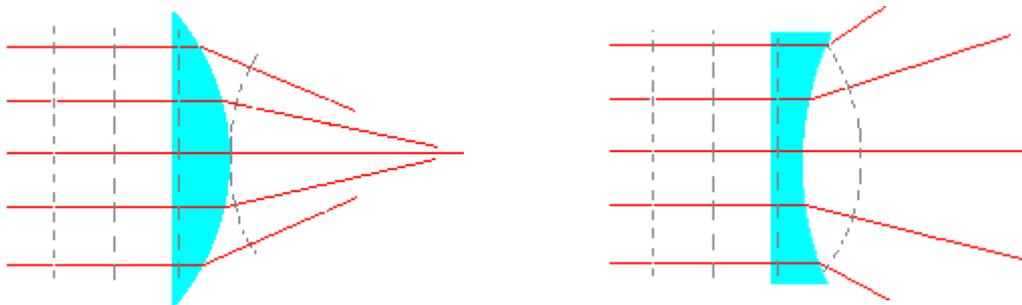
Chaque rayon passant successivement les deux dioptries subit deux réfractions suivant les lois de Snell-Descartes. On peut ainsi tracer assez facilement les rayons lors du franchissement d'une lentille plan/convexe ou plan/concave par un faisceau parallèle à l'axe. L'application des lois de la réfraction pour chaque rayon montre que le faisceau à la sortie est convergent ou divergent (on peut aussi le voir en termes de surfaces d'onde, cf chapitre précédent, 3.2.c).



Lors du franchissement du second dioptre, on a  $r > i$ . Le rayon qui est alors sous la normale est "rabattu" vers l'axe.

Lors du franchissement du second dioptre,  $r > i$ . Le rayon qui est alors au-dessus de la normale est "dévié vers l'extérieur".

En termes d'onde, on retrouve le même phénomène si on se souvient que l'onde se déplace plus vite dans l'air.



La partie de l'onde qui est sortie en premier, c'est-à-dire sur les bords de la lentille, a bien progressé plus loin que celle passée par le milieu.

Ici, c'est la partie qui est passée par le milieu qui est sortie d'abord et a donc pu progresser plus loin.

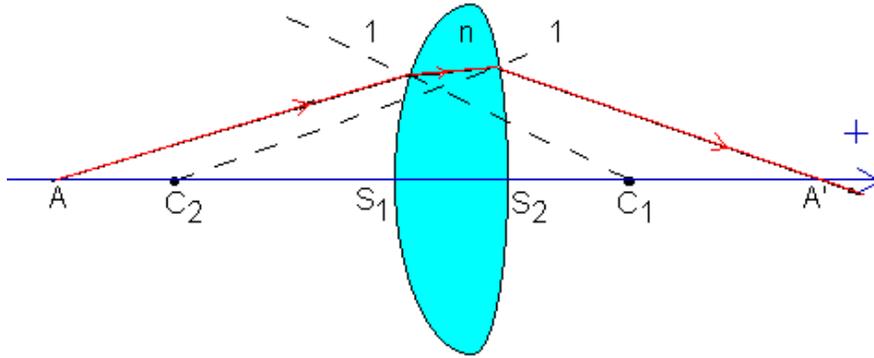
En résumé, on voit donc que **convexe**  $\rightarrow$  **convergente** et **concave**  $\rightarrow$  **divergente**.

### 1.4 Le modèle des lentilles minces

#### a) Formule de conjugaison avec origine au sommet

Si nous considérons le cas de lentilles minces (c'est-à-dire dont l'épaisseur peut être considérée comme négligeable devant le diamètre de la lentille), utilisées *dans les conditions de Gauss* étudiées dans le chapitre 3, on peut alors trouver la relation donnant la position de l'image  $A'$  d'un point objet  $A$  en appliquant deux fois la relation de conjugaison d'un dioptre.

La démonstration ci-dessous considère le cas d'une lentille constituée de deux dioptries sphériques.



Soit A'' le conjugué de A par le premier dioptré sphérique de centre C<sub>1</sub> et de sommet S<sub>1</sub> (non représenté sur le dessin ci-dessus<sup>22</sup>). On a (d'après la relation de conjugaison pour le dioptré sphérique vue au chapitre précédent) :

$$\frac{n}{S_1 A''} - \frac{1}{S_1 A} = \frac{n-1}{S_1 C_1} \quad (1)$$

Soit A' le conjugué de A'' par le second dioptré sphérique de centre C<sub>2</sub> et de sommet S<sub>2</sub>. On a :

$$\frac{1}{S_2 A'} - \frac{n}{S_2 A''} = \frac{1-n}{S_2 C_2} \quad (2)$$

Comme la lentille est mince, on néglige son épaisseur, et on confond donc S<sub>1</sub> et S<sub>2</sub> qu'on note désormais O, et qu'on appelle centre optique de la lentille. En additionnant (1) et (2), on obtient ainsi :

$$\boxed{\frac{1}{O A'} - \frac{1}{O A} = (n-1) \left( \frac{1}{O C_1} - \frac{1}{O C_2} \right)}$$

Ceci constitue la *formule de conjugaison des lentilles minces, avec origine au centre (O)*. Elle est en fait vraie quel que soit le type de lentille, plan/convexe, biconvexe, plan/concave ou biconcave, *pourvu que la lentille soit mince et les conditions de Gauss soient vérifiées*.

Remarque : Attention au *caractère algébrique* de cette relation!!

### b) Foyers, plans focaux

- Le foyer image F' est le conjugué d'un point objet A situé à l'infini sur l'axe optique, ce que l'on note :

$$A_\infty \rightarrow F'$$

Il est donc donné par :

$$\boxed{\frac{1}{O F'} = (n-1) \left( \frac{1}{O C_1} - \frac{1}{O C_2} \right) = \frac{1}{f'}} \quad (\mathbf{A})$$

où  $f' = \overline{O F'}$  est la distance focale (image) de la lentille.

On voit facilement que :

$\overline{O F'} > 0$  pour une lentille plan/convexe ou biconvexe (convergente). F' est donc à droite de O.

<sup>22</sup> D'ailleurs, où serait A'' sur ce dessin?

$\overline{OF'} < 0$  pour une lentille plan/concave ou biconcave (divergente). F' est donc à gauche de O.

- Le foyer objet F est le conjugué d'un point image A' situé à l'infini sur l'axe optique, soit :
  - $F \rightarrow A'_\infty$

Il est donné par :

$$\frac{1}{\overline{OF}} = -(n-1)\left(\frac{1}{\overline{OC}_1} - \frac{1}{\overline{OC}_2}\right) = -\frac{1}{f'}$$

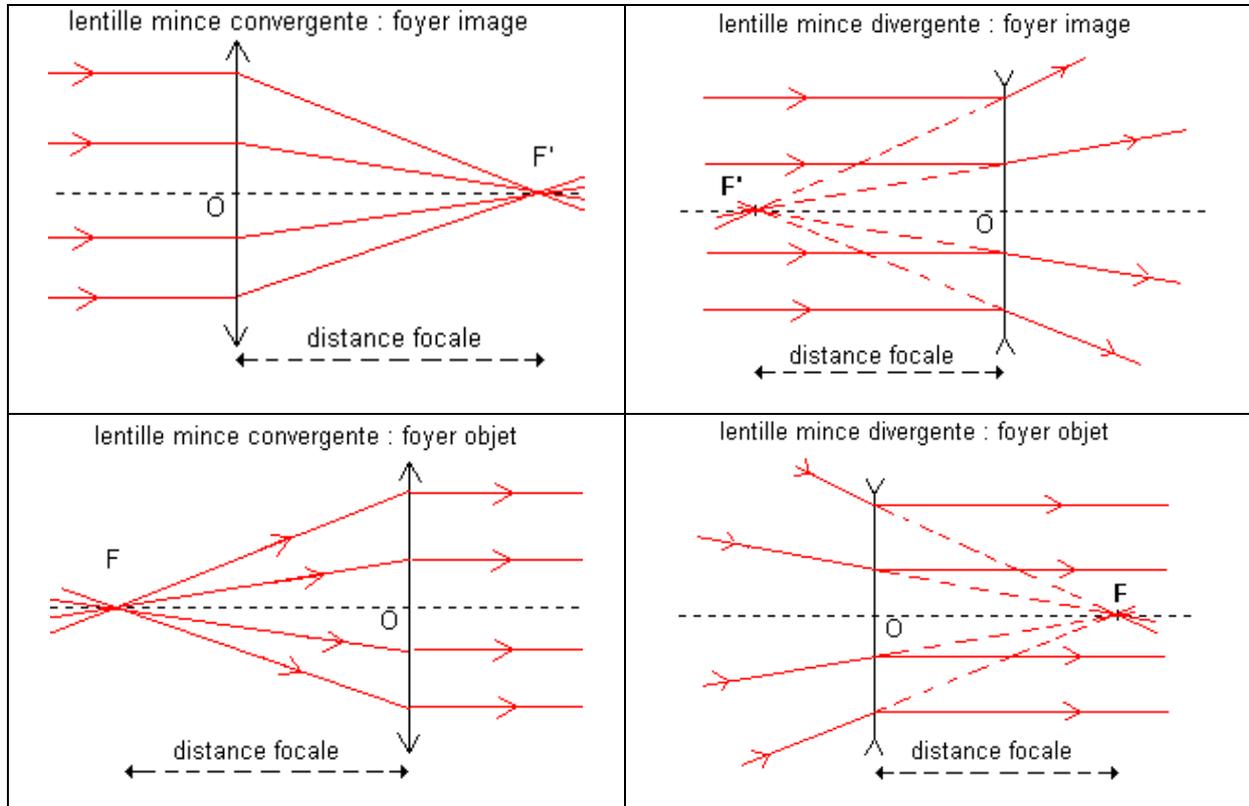
$\overline{OF} < 0$  pour une lentille plan/convexe ou biconvexe (convergente). F est donc à gauche de O.

$\overline{OF} > 0$  pour une lentille plan/concave ou biconcave (divergente). F est donc à droite de O.

Remarque 1 : pour une *lentille mince*, les foyers objet et image sont *symétriques* par rapport au centre optique O de la lentille. Il n'y a donc qu'une seule distance focale (contrairement au cas du dioptre sphérique). Que peut-on dire de son ordre de grandeur?

Remarque 2 : les foyers objet et image ne sont pas *conjugués* entre eux !<sup>23</sup>

Les schémas ci-dessous synthétisent les définitions précédentes des foyers dans le cas de lentilles minces, et introduisent au passage les symboles représentant respectivement les lentilles minces convergentes et divergentes :



On peut simplifier la relation de conjugaison avec origine au sommet sous la forme suivante :

<sup>23</sup> Erreur classique...

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$$

- Les plans perpendiculaires à l'axe optique en F et F' sont appelés les plans focaux objet et image de la lentille mince.

Intérêt du plan focal image : un objet très éloigné (comme une étoile) aura son image dans le plan focal image d'une lentille convergente (voir certaine(s) expérience(s) plus loin).

Intérêt du plan focal objet : un objet situé dans le plan focal objet émettra des rayons qui seront quasiment parallèles entre eux à la sortie de la lentille (voir plus loin également).

## 1.5 Mesures de la distance focale d'une lentille convergente

### a) Différentes mesures

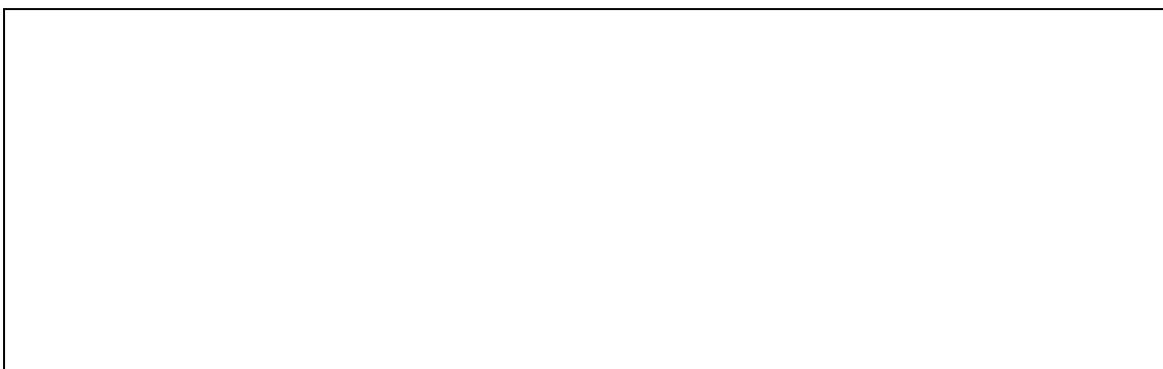
*Dorénavant, on utilisera les lentilles sur support et le banc d'optique.*



*Les sources de lumière blanche dont vous disposez comprennent une ampoule et une lentille convergente appelée "condenseur" qui permet de mieux collecter la lumière à la sortie de l'ampoule. Une tirette située à l'arrière de la lampe permet de faire plus ou moins converger le faisceau à la sortie de la lampe. Faire le schéma correspondant ci-dessous.*



Agir sur cette tirette afin de former un faisceau de lumière parallèle, ce que l'on vérifiera en intercalant une feuille de papier dans le faisceau et en la déplaçant le long du banc. Adapter le schéma précédent à ce cas particulier :



Expérience 4 : mesure simple

Placer une lentille convergente dans ce faisceau de lumière parallèle. Reprenez la feuille de papier et déplacez-la à nouveau le long du banc. Que constatez-vous ? En déduire une estimation (avec incertitude!) de la distance focale des lentilles convexes mises à votre disposition sur la table.



Expérience 5 : image d'un objet éloigné

Pourquoi le fait d'obtenir l'image d'une source éloignée (image sur le sol, par exemple, d'une lampe de plafond) permet-il de déterminer la distance focale d'une lentille ? Faites l'expérience avec la même lentille que précédemment et comparez le résultat. Estimer l'incertitude.



Pourquoi cette méthode est-elle moins adaptée à une lentille de plus grande distance focale ?



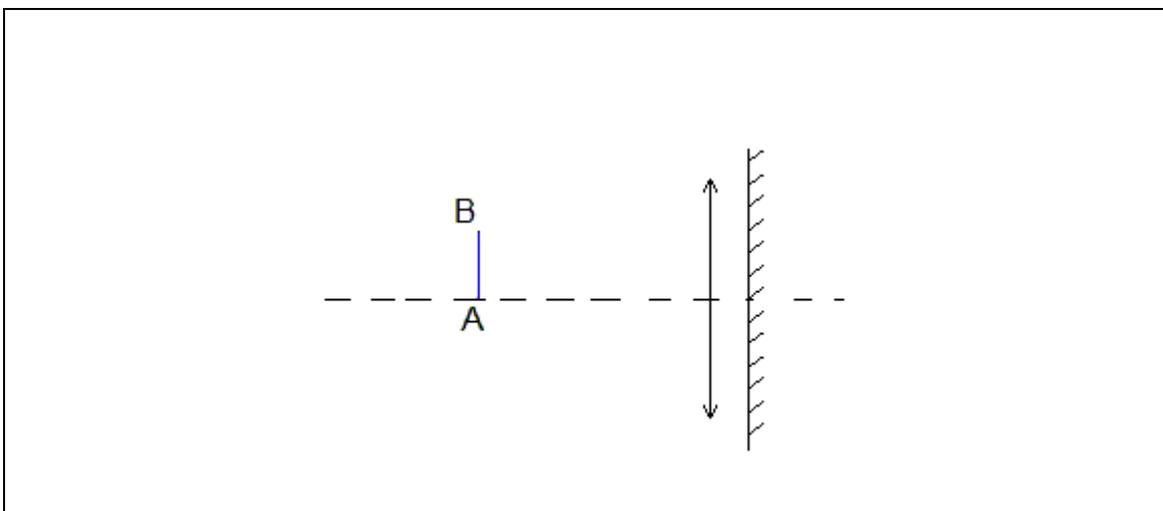
Expérience 6 : auto-collimation

Il s'agit d'une méthode simple permettant une détermination plus précise que la précédente de la distance focale d'une lentille convergente : l'idée est de réaliser, grâce à un miroir, l'image d'un objet sur l'objet lui-même.

Vous pouvez utiliser comme objet soit un trou, soit une diapositive éclairée par la

source blanche. Placez alors dans le prolongement la lentille que vous venez d'utiliser. Placez le miroir immédiatement derrière la lentille. Déplacer l'ensemble {lentille + miroir} le long du banc jusqu'à obtenir dans le plan de la diapositive une image nette et de même taille que celle-ci (pour voir cette image, il est nécessaire d'incliner légèrement le miroir). La distance focale est obtenue par mesure de la distance entre la lentille et l'objet. Noter la distance focale trouvée, avec son incertitude.

Interpréter l'expérience précédente en complétant le schéma ci-après. Chercher séparément l'image A' du point A, et B' du point B de l'objet. Considérer que le miroir est pratiquement collé sur la lentille. Caractériser l'image trouvée.



Expérience 7 : utilisation de la relation de conjugaison

Utiliser comme objet une diapositive. Utiliser la lentille pour en former une image réelle. Quelle est la condition sur la position de la lentille pour que l'image soit bien réelle ?

Réaliser ainsi plusieurs mesures des distances objet-lentille  $\overline{OA}$  et lentille-écran  $\overline{OA'}$  correspondante. Compléter le tableau ci-dessous (prendre une dizaine de points).

$\overline{OA}$	$\delta(\overline{OA})$	$1/\overline{OA}$	$\delta(1/\overline{OA})$	$\overline{OA'}$	$\delta(\overline{OA'})$	$1/\overline{OA'}$	$\delta(1/\overline{OA'})$

Représenter ensuite les mesures ci-dessus dans un graphique  $1/\overline{OA'} = f(1/\overline{OA})$ . En déduire une autre mesure de la distance focale de la lentille utilisée, **avec l'incertitude associée**.

## b) Bilan comparatif des différentes mesures

Comparer les différentes mesures de distance focale entre elles **avec leurs incertitudes associées**, pour la lentille convergente que vous avez utilisée : compléter le tableau ci-dessous, et commenter.

Mesure simple	Image d'un objet éloigné	Autocollimation	$1/\overline{OA'} = f(1/\overline{OA})$

## 1.6 Constructions géométriques avec le modèle des lentilles minces

### a) Comment construire une image? (A)

Lors des expériences qualitatives du début de ce chapitre, vous avez réalisé l'image d'un objet réel par une lentille convergente. On obtient suivant les cas, soit une image réelle qui peut être visualisée sur un écran, soit une image virtuelle, seulement visible à l'œil. Dans tous les cas, l'image d'un point est bien un point, et on a bien une véritable image au sens de l'optique géométrique.

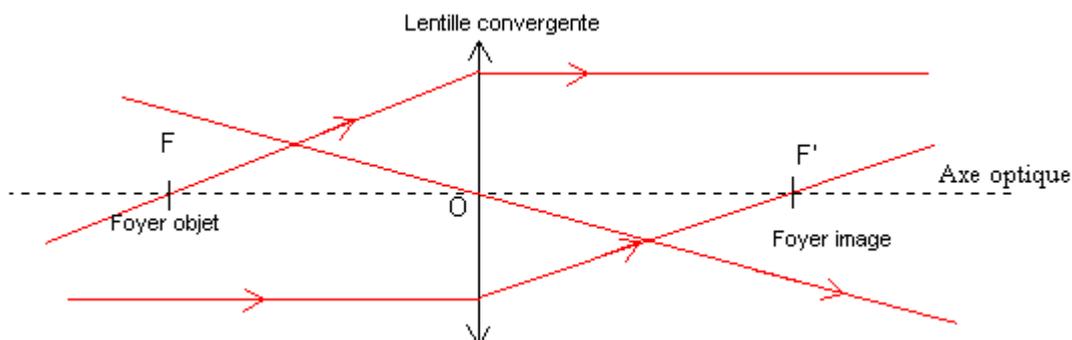
La position de cette image peut être trouvée par simple construction géométrique. En effet, nous avons vu que :

- Un rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image  $F'$  ;
- Un rayon incident et passant par le foyer  $F$  émerge parallèlement à l'axe optique.

À celles-ci, on peut ajouter :

- Un rayon lumineux passant par le centre  $O$  de la lentille n'est pas dévié.

Ces trois propriétés sont résumées sur la figure ci-dessous :



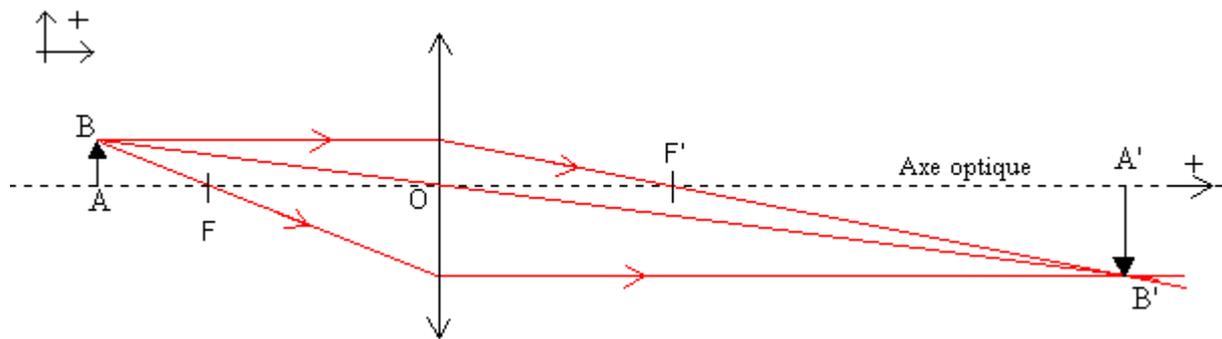
Nous allons maintenant chercher à construire *l'image d'un objet réel* dans différents cas possibles, pour une lentille convergente ou divergente.

Nous allons modéliser l'objet réel par un segment AB, représenté par une flèche de A vers B, A étant situé sur l'axe optique, B en dehors de cet axe, et AB étant perpendiculaire à l'axe optique (voir schéma suivant).

Comme la lentille est utilisée dans les conditions de Gauss, la propriété *d'aplanétisme* (voir chap. 3) est vérifiée : l'image de AB est également plane et perpendiculaire à l'axe optique. Par conséquent, nous nous contenterons de trouver géométriquement l'image B' du point B. L'image A' de A sera automatiquement sur l'axe, à la verticale de B'.

Par définition, l'image de B est un point (B'), tel que tout rayon issu de B passe par B' après avoir traversé la lentille. Il suffit donc de tracer deux rayons particuliers : le point B' cherché sera à l'intersection des deux rayons émergents. Deux des trois rayons particuliers indiqués ci-dessus peuvent alors servir pour trouver B' par construction géométrique.

On obtient par exemple le résultat ci-dessous :



Pour les constructions d'*images d'objets virtuels*, voir l'exercice 4.2 associé à ce chapitre, et le § 3 sur les associations de lentilles.

### b) Lien entre construction géométrique et relation de conjugaison

Comme nous allons le démontrer ci-dessous, la géométrie simple du modèle des lentilles minces respecte bien la relation de conjugaison.

Si l'on reprend le schéma de construction de l'image réelle d'un objet réel (ci-dessus) et que l'on considère les triangles semblables OAB et OA'B', on trouve :  $\frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA}$

De même, en considérant les triangles semblables centrés en F et en F', on trouve :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{F'A'}{F'O} = \frac{FO}{FA} = \frac{OA'}{OA},$$

d'où la relation suivante, dite *de conjugaison avec origines aux foyers*, ou *relation de Newton*:

$$\boxed{\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = \overline{FO} \cdot \overline{F'O'} = -f'^2}$$

En combinant avec la relation précédente, on peut écrire :

$$\overline{F'O} \cdot \overline{OA'} = \overline{OAF'A'} = \overline{OA} \cdot (\overline{F'O} + \overline{OA'}) = \overline{OAF'O} + \overline{OA} \cdot \overline{OA'}$$

En divisant par  $\overline{OA} \cdot \overline{OA'} \cdot \overline{OF'}$ , on obtient bien :

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

### c) Notion de grandissement

Le grandissement (linéaire) de l'image par rapport à l'objet est défini par :  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

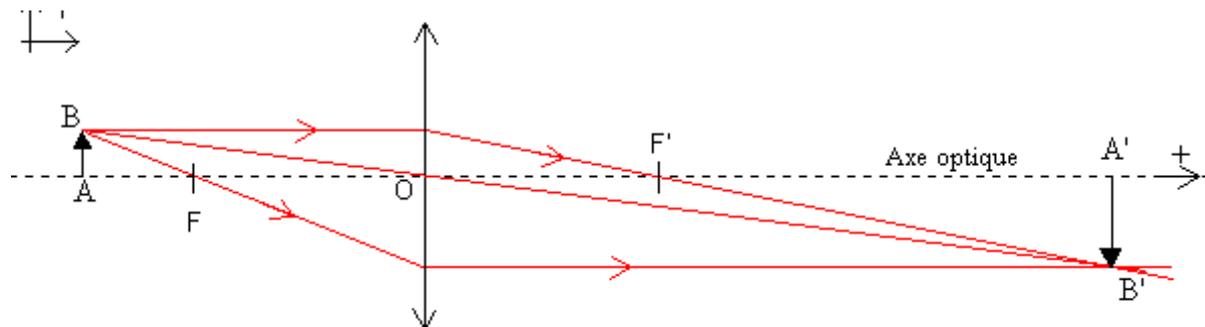
Il s'agit d'une grandeur algébrique, dont le signe renseigne sur le sens de l'image par rapport à celui de l'objet. La valeur absolue de  $\gamma$  indique bien de combien l'image A'B' est plus grande (ou plus petite) que l'objet AB.

Cette notion est particulièrement utile pour les instruments d'optique.

Nous allons maintenant réaliser des constructions géométriques dans un certain nombre de cas, pour un objet réel. Faites à chaque fois l'expérience correspondante !

### d) Images par une lentille convergente d'un objet réel (A)

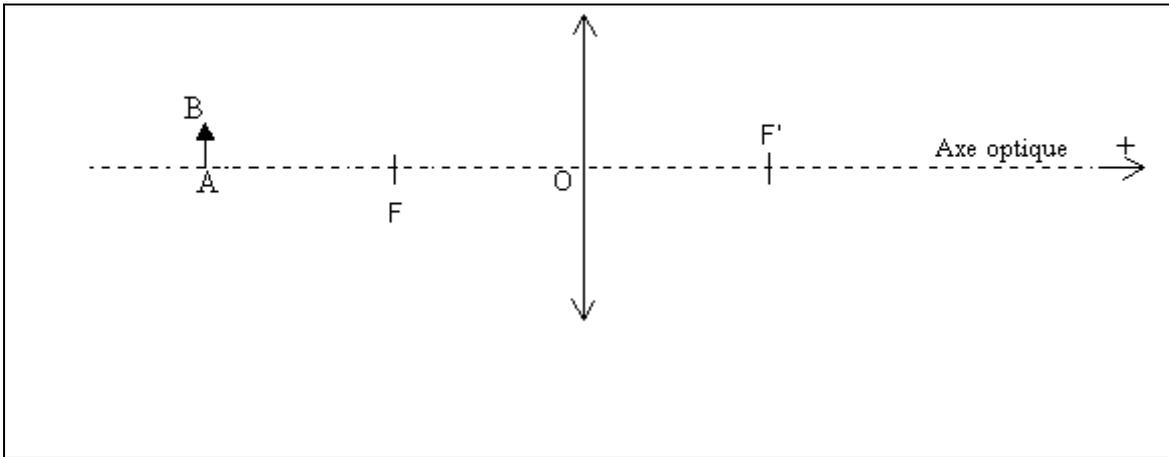
- Objet réel placé à gauche du foyer objet, tel que  $AF < f'$



*Caractériser l'image obtenue (réelle ou virtuelle, sens et taille par rapport à celle de l'objet). Donner une application concrète correspondant à ce cas.*

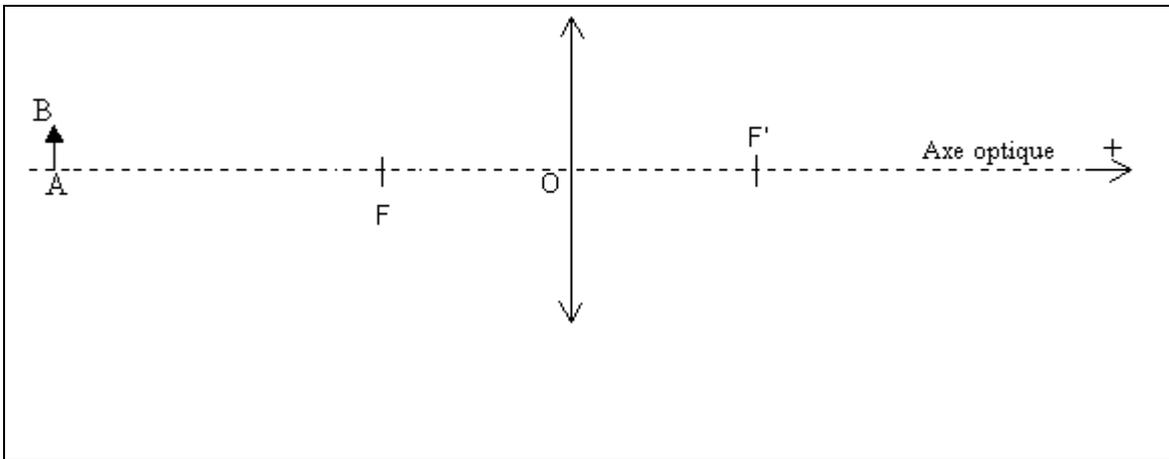
- Objet réel placé à gauche du foyer objet, tel que  $AF = f'$

*Compléter le schéma ci-dessous. Caractériser l'image obtenue et donner une application concrète correspondant à ce cas.*



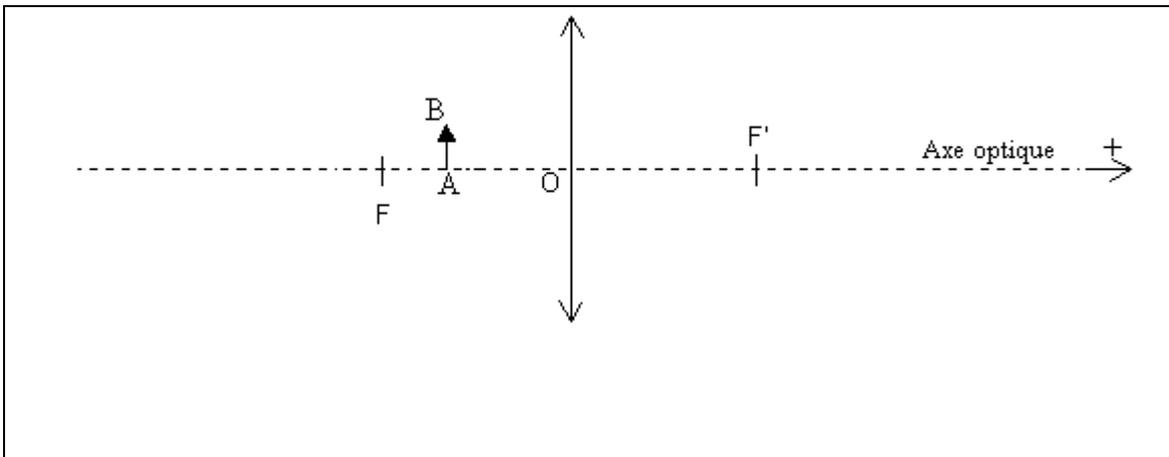
- Objet réel placé à gauche du foyer objet, tel que  $AF > f'$

Compléter le schéma ci-dessous. Caractériser l'image obtenue et donner une application concrète correspondant à ce cas.



- Objet réel placé entre F et la lentille

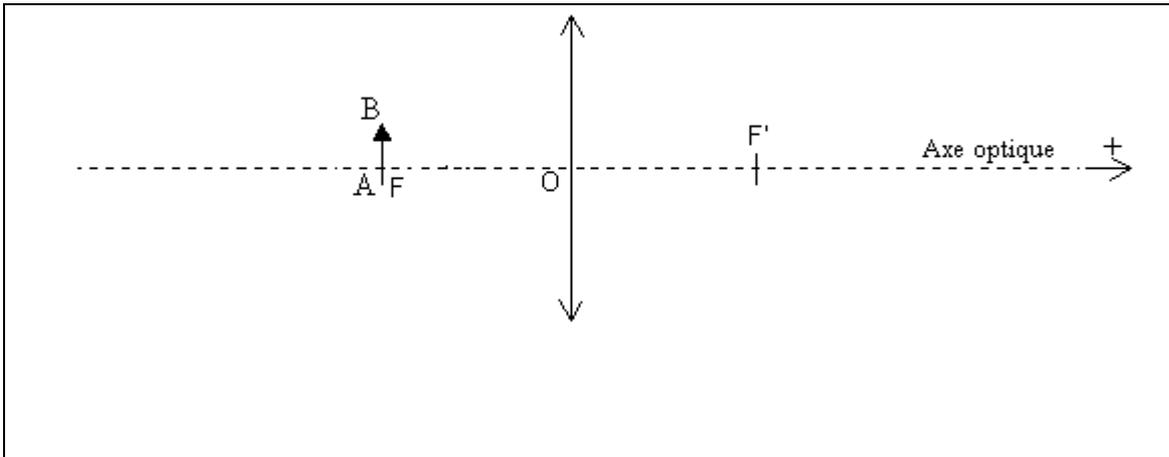
Compléter le schéma ci-dessous. Caractériser l'image obtenue.



- Objet réel placé en F

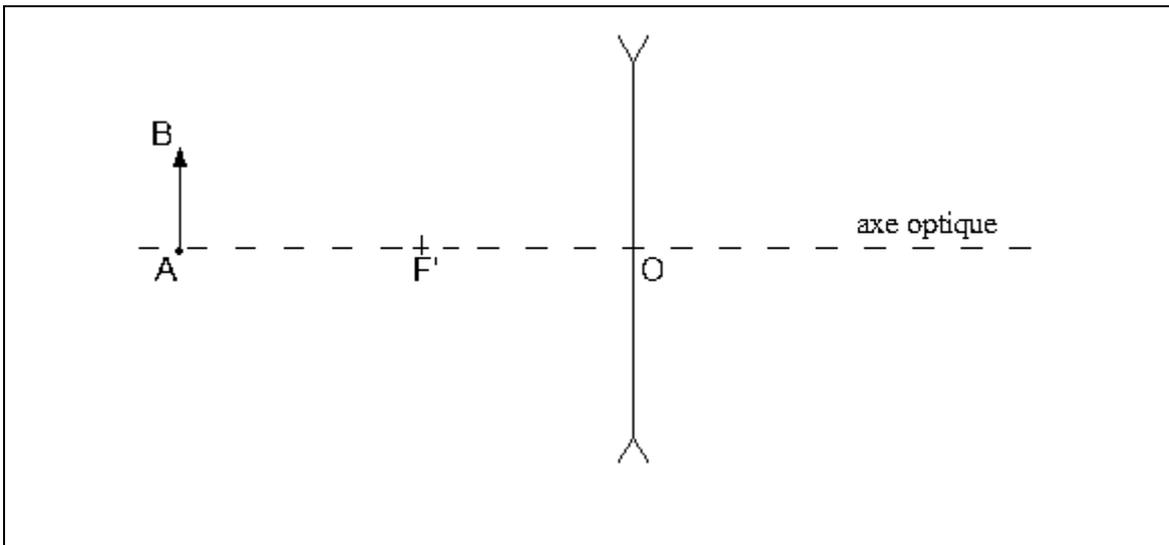
Ce cas est un cas particulier important. Que peut-on dire de l'image obtenue ?

Comparer avec la situation précédente. Laquelle des deux est la plus confortable pour l'œil ? Donner une application concrète correspondant à ce cas.



**e) Images par une lentille divergente d'un objet réel**

Compléter le schéma ci-dessous. Caractériser l'image obtenue. Faites éventuellement d'autres schémas (correspondant à d'autres cas possibles), et concluez sur la nature de l'image d'un objet réel par une lentille divergente.



Que peut-on en déduire sur la mesure de la distance focale d'une lentille divergente?

Finalement, comment peut-on distinguer une lentille convergente d'une divergente ?

## 2. L'œil humain et les corrections de la vision

### 2.1 Découverte du fonctionnement de l'œil humain

Vers l'an 1000, AlHazen (au Caire) a décrit l'œil humain comme étant constitué de trois régions : aqueuse, cristalline et vitreuse. Kepler en 1604 émit l'idée que la vision est due au fait que "l'image du monde extérieur est projetée sur la rétine". Cette idée fut confirmée par une expérience spectaculaire réalisée en 1625 par Scheiner (un jésuite allemand), au cours de laquelle il observa sur la rétine d'un animal (une grenouille) une image inversée de la scène extérieure.

#### Encadré : les yeux des différents animaux

- Les plus rudimentaires fonctionnent avec un simple petit trou sans lentille, sur le principe de la chambre noire. C'est le cas du serpent à sonnette ou de la seiche.
- D'autres animaux comme la langouste ou certains insectes ont un œil "multifacetté" constitué par un arrangement de multiples petites lentilles (voir l'image ci-contre), chacune effectuant l'image d'une portion de l'espace, le cerveau se chargeant d'en réaliser la synthèse.
- Enfin, la pieuvre, certaines araignées et les vertébrés (dont l'être humain) possèdent des yeux qui fonctionnent comme une seule lentille convergente, formant une seule image réelle sur un écran sensible, la rétine.

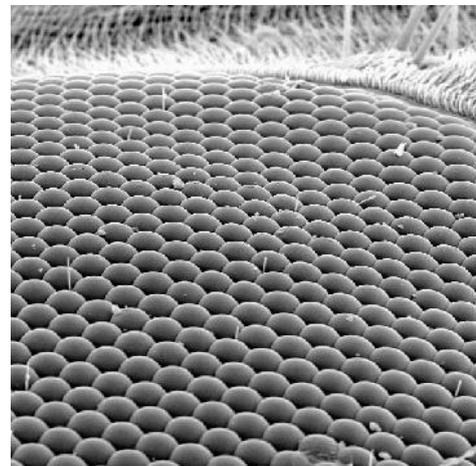
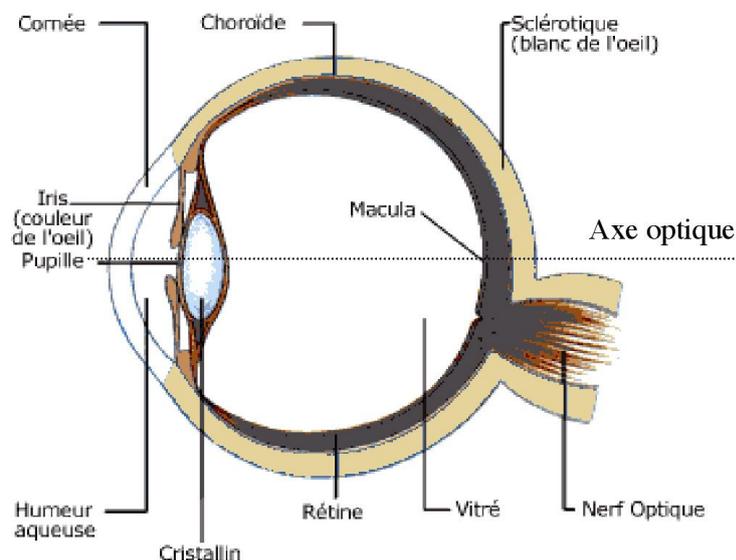


image d'œil de mouche (microscope électronique)

### 2.2 Anatomie de l'œil

#### a) Structure



La pupille agit comme un diaphragme de diamètre variable (2 à 8 mm) afin de contrôler la quantité de lumière entrant dans l'œil.

L'œil peut en première approximation être modélisé par *un simple dioptre sphérique* (voir l'exercice 3.7) : les indices de la cornée, du cristallin et de l'humeur vitrée sont en effet tous voisins de 1,33 (l'indice de l'eau!). La seule courbure de la cornée permet bien d'expliquer la convergence d'un faisceau parallèle.

L'ensemble {cornée + cristallin + humeur vitrée} donne alors d'un objet une image renversée sur la rétine (cf expérience de Scheiner citée plus haut).

#### Remarque :

Pour simplifier les raisonnements, on considère souvent que l'œil est équivalent à une *lentille convergente* située à une distance fixe de la rétine (environ 22 mm). En effet, on peut montrer plus précisément que l'œil est assimilable à une lentille mince convergente un peu particulière: elle sépare deux milieux différents, avec des distances focales objet et image différentes...

La rétine est constituée de cellules photosensibles : les *cônes* et les *bâtonnets* (voir le chapitre 2 pour plus de détails sur les cônes). L'ensemble {rétine + nerf optique} code l'image sous forme d'influx nerveux et le transmet au cerveau qui l'interprète : retournement de l'image, et impression de relief grâce aux informations transmises par les deux yeux. L'endroit où arrive le nerf optique est dépourvu de cellules réceptrices et constitue donc une *zone aveugle* de la rétine.

#### Expérience 8 : la tache aveugle

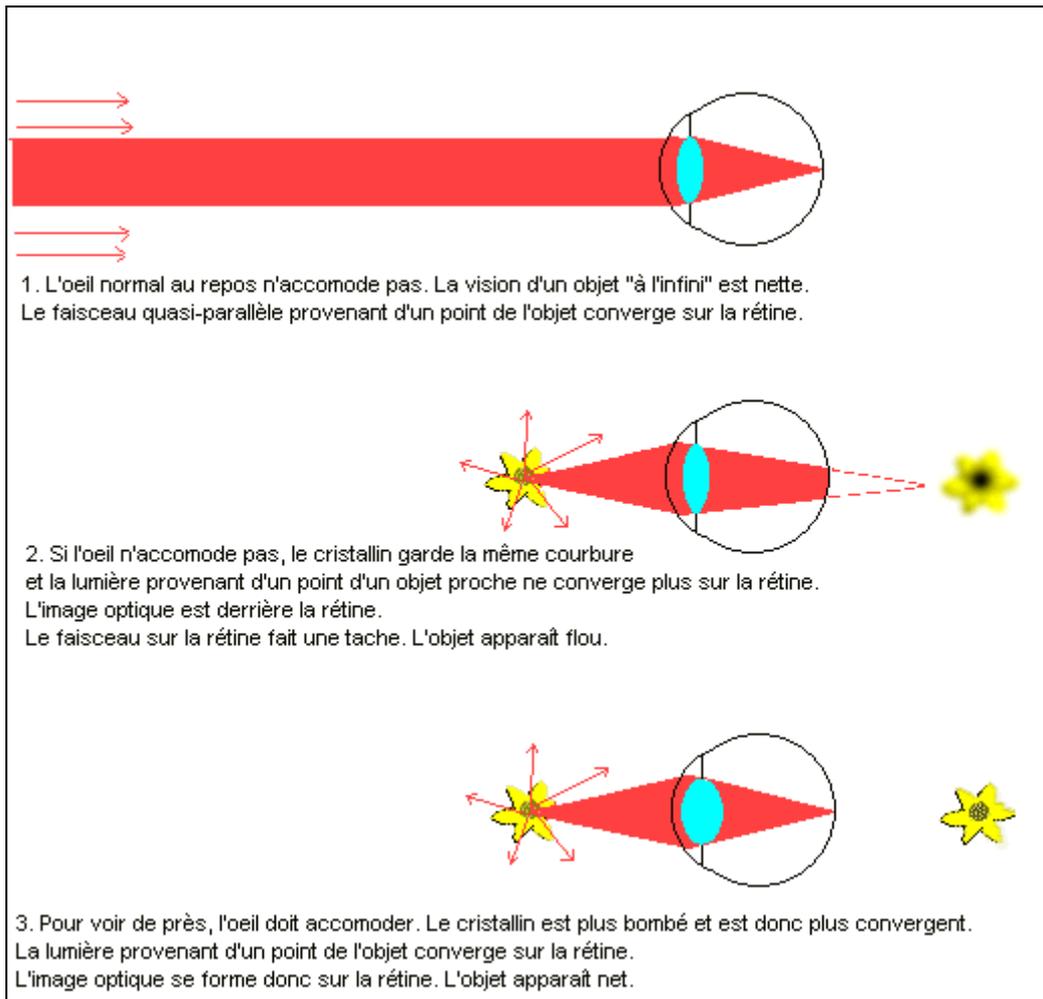
*Nous vous proposons maintenant une expérience amusante permettant de prendre conscience de l'existence de votre nerf optique.*



*Fermez l'œil gauche, et regardez fixement la croix. Éloignez et rapprochez la feuille de votre œil. Pour une certaine position de la feuille, le cercle doit disparaître de votre champ de vision, et réapparaître quand on éloigne ou rapproche la feuille.*

#### **b) Accommodation (A)**

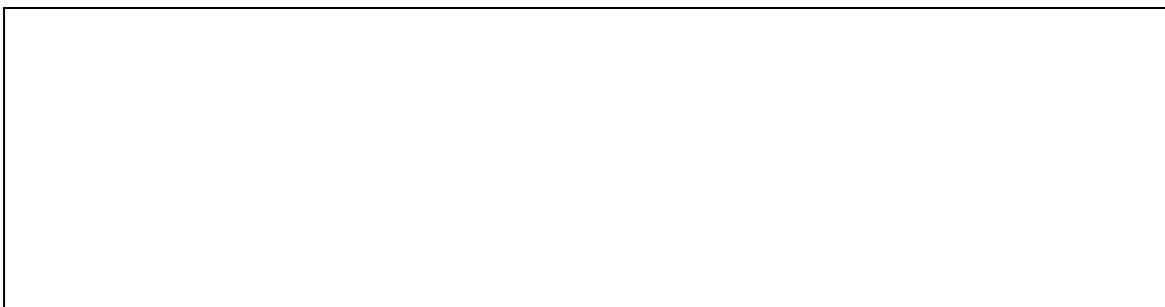
L'œil normal au repos ne voit nets que les objets situés à l'infini (punctum remotum, point le plus éloigné en latin) : la distance focale de l'œil est alors égale à 22 mm (soit la distance lentille-rétine). Lorsque l'objet se rapproche, le cristallin augmente sa courbure (et ainsi, devient plus convergent) par un jeu de muscles, pour maintenir une image nette au niveau de la rétine (voir le dessin ci-dessous). Cette augmentation de convergence est limitée, et on note  $\delta$  la distance à l'œil du point le plus proche que l'on peut voir net.  $\delta$  est appelée punctum proximum (point le plus proche). La distance  $\delta$  varie beaucoup avec l'âge : quelques centimètres pour un enfant, de l'ordre de 25 cm pour un adulte, plus d'un mètre pour les personnes âgées. Mesurez le vôtre (avec et sans lunettes si vos yeux sont corrigés..)!



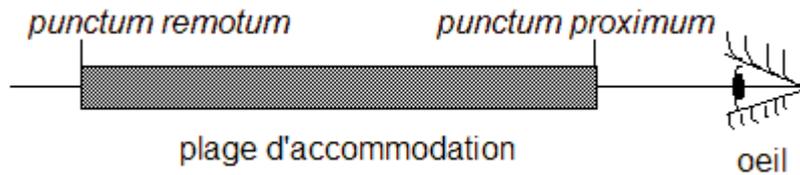
**Expérience 9 : modélisation de l'accommodation de l'œil**

Utiliser l'un des « modèles d'œil » de Jeulin pour simuler :

- un œil qui regarde un objet à l'infini (pas d'accommodation)
- un œil qui regarde un objet situé à distance finie (accommodation).

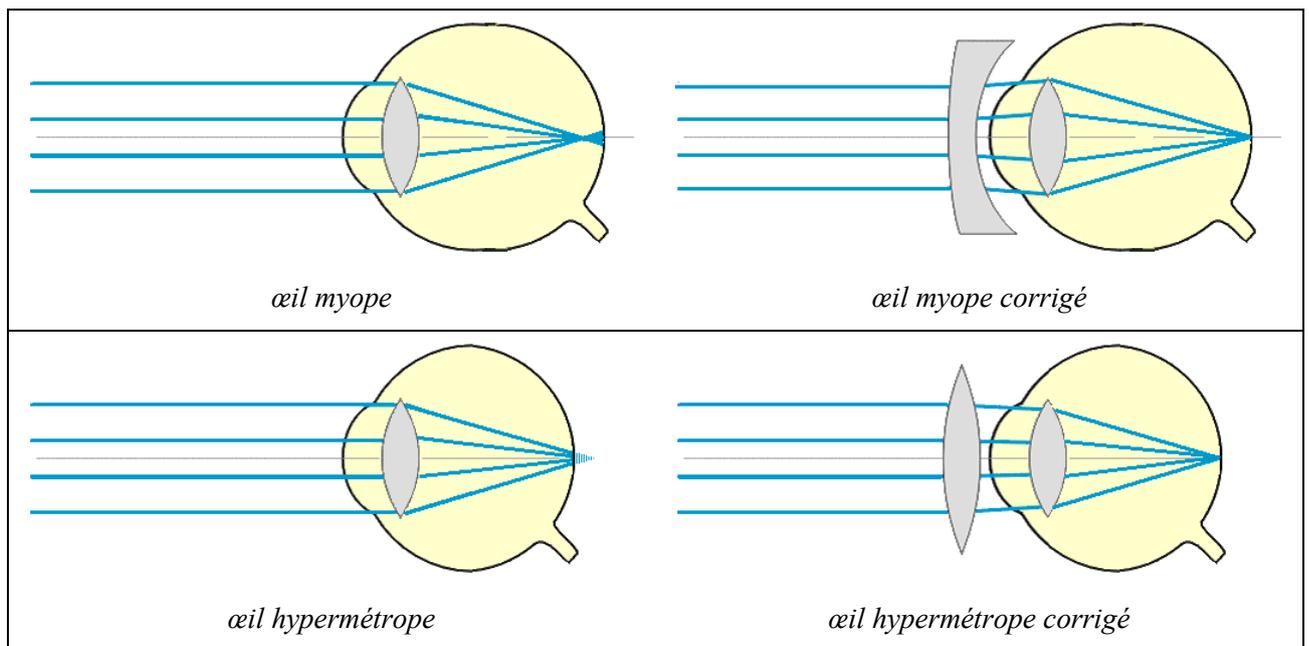


## 2.3 Défauts de l'œil



Les principaux défauts de la vision sont les suivants :

- La myopie : elle est causée par un œil légèrement trop long. On a alors un décalage du *punctum proximum* vers les courtes distances, et le *punctum remotum* se retrouve à distance finie : le myope ne voit bien que de près. La myopie se corrige à l'aide de lentilles divergentes (voir ci-dessous).
- L'hypermétropie : elle est causée par un œil légèrement trop court. On a alors un décalage du *punctum proximum* vers de plus grandes distances (tandis que le *punctum remotum* devient virtuel...). Les hypermétropes voient de loin, mais en accommodant (ce qui fatigue l'œil). L'hypermétropie se corrige à l'aide de lentilles convergentes (voir ci-dessous).



- L'astigmatisme : l'œil n'a pas la symétrie de révolution autour de son axe. Donc même en faisant un effort d'accommodation, l'image d'un point ne peut pas être obtenue.
- La presbytie : c'est une réduction avec l'âge de la souplesse des muscles du cristallin. Le *punctum proximum* s'éloigne, alors que le *punctum remotum* reste inchangé.

### Expérience 10 :

Reprendre le modèle d'œil de Jeulin et simuler :

- un œil myope qui regarde un objet à distance finie, sans correction
- un œil myope qui regarde un objet à distance finie, avec correction

Faire de même dans le cas d'un œil hypermétrope.

Expérience 11 :

Si vous avez un défaut de vision et que vous portez des lunettes, déterminer si vos verres sont convergents ou divergents (grâce à la méthode utilisée jusqu'à présent pour reconnaître les lentilles convergentes et divergentes) et vérifiez que la connaissance que vous avez de votre défaut visuel est compatible avec les explications qui précèdent.

Expérience 12 :

Si vous êtes myope, regardez (sans vos lunettes!) à travers un petit trou. Que constatez-vous et comment l'expliquer?

Encadré : l'histoire des lunettes

Depuis un peu plus de 700 ans, l'être humain est en mesure d'améliorer sa vision. Dans l'Antiquité (comme le rapporte Plin l'Ancien), des "pierres de lecture" telle que l'émeraude furent utilisées comme loupes. Ce n'est que vers la fin du 13ème siècle, date à laquelle des inventeurs vénitiens mirent sur le marché des "bésicles clouantes", que les aides visuelles eurent un écho croissant (au départ, elles étaient surtout répandues chez les érudits, les philosophes et les médecins). Les lunettes sous leur forme actuelle furent inventées en Angleterre autour de 1850.



### 3.Association de lentilles, instruments d'optique

La plupart des instruments d'optique sont constitués d'une association d'un certain nombre de lentilles convergentes ou divergentes, sur un même axe optique. Bien sûr, nous nous plaçons toujours dans les conditions de Gauss.

Il existe de multiples possibilités d'associations de lentilles, suivant que les lentilles sont convergente(s), divergente(s), suivant la distance entre les lentilles... En guise d'introduction au sujet, nous étudierons seulement ici deux cas particuliers.

#### 3.1 Lentilles accolées

*Expérience 13 : deux lentilles convergentes accolées*

*Accoler deux lentilles convergentes dont vous connaissez les distances focales. Le système est-il convergent ou divergent? Commenter.*

On peut montrer (voir l'exercice 4.5) que, pour un système de deux lentilles minces  $L_1$  et  $L_2$  accolées utilisées dans les conditions de Gauss, on a :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2}$$

où :

- $f'$  est la distance focale image du doublet de lentilles
- $f'_1$  (resp.  $f'_2$ ) est la distance focale image de  $L_1$  (resp.  $L_2$ ).

*Mesurer la distance focale du doublet et vérifier la relation ci-dessus. Préciser la méthode utilisée.*

*Expérience 14 : mesure de la distance focale d'une lentille divergente*

*Déduire de ce qui précède une méthode de mesure de la distance focale d'une lentille divergente, et l'appliquer à celle de votre table.*

Méthode :

Résultat :

$$f' = \quad \pm$$

### Expérience 15 (facultative)

Si vous portez des lunettes, mesurez la focale de l'un de vos verres. Déduisez-en la vergence, définie par :  $\phi = \frac{1}{f'}$ . Elle s'exprime en dioptries ( $\delta$ ),  $f'$  étant en  $m^{-1}$ .

## **3.2 Lentilles non accolées : exemple du téléobjectif**

Nous allons voir ci-dessous un exemple, qui est celui du principe du téléobjectif. Celui-ci est utilisé en photographie et en cinématographie pour obtenir un grandissement important d'un objet éloigné, avec un encombrement raisonnable.

### Expérience 16 : téléobjectif (\*)

1) Nous allons ici simuler un téléobjectif. Faites l'expérience au moins qualitativement (sans faire les mesures), afin de comprendre son principe de fonctionnement. Si vous avez le temps, faites toutes les mesures afin de pouvoir les exploiter pour l'exercice 4.7.

Dans un premier temps, nous allons fabriquer un objet "à l'infini". Pour cela, utiliser une diapositive représentant un motif géométrique simple, et mesurer une longueur bien définie sur cette diapositive (la longueur d'un trait...) notée  $l_0$ . Prendre la lentille convergente (notée ici  $L_0$ ) de plus courte focale à votre disposition sur la table. Où doit-on placer l'objet (noté AB) par rapport à la lentille  $L_0$  pour que l'ensemble {objet+ $L_0$ } simule un objet à l'infini? Faire ci-dessous le schéma correspondant à l'expérience. Ne plus toucher à ce montage pour la suite.

L'angle apparent sous lequel on voit l'objet à l'infini sera noté  $\alpha$ . Définissez-le sur votre schéma.



2) Un objectif photographique simple est équivalent à une seule lentille convergente. Dans un premier temps, prendre la deuxième lentille convergente (notée ici  $L_1$ , on notera sa focale  $f_1$ )<sup>24</sup> pour simuler cet objectif et réaliser l'image  $A_1B_1$  sur l'écran de l'objet à l'infini précédemment constitué. Mesurer la taille de cette image, notée  $l_1$ , et en déduire le grandissement obtenu grâce à la lentille  $L_1$ .

Mesurer la distance entre  $L_1$  et l'écran, notée  $D_1$ . Faire ci-dessous le schéma de cette expérience.

Quelle est la relation entre  $\alpha$  et  $l_1$ ? En déduire la valeur de  $\alpha$ .

En déduire également que, pour un angle  $\alpha$  donné, le seul moyen d'augmenter la taille de l'image est d'augmenter la distance focale de la lentille  $L_1$ .

L'encombrement de cet objectif est ici la distance  $L_1$  / écran, soit  $D_1$ . Que vaut-il par rapport à la distance focale de  $L_1$ ?

---

<sup>24</sup> Attention, les notations choisies ici pour les lentilles n'ont a priori rien à voir avec celles apparaissant sur les étiquettes de ces lentilles...



3) Un moyen d'augmenter le grandissement de l'image tout en gardant un encombrement raisonnable consiste à intercaler entre  $L_1$  et l'écran une lentille divergente notée  $L_2$  (dont vous connaissez la focale  $f'_2$  pour l'avoir mesurée précédemment). Trouver une position de  $L_2$  telle qu'on ait une image sur l'écran (déplacer l'écran!).

Que constatez-vous sur cette image, notée  $A_2B_2$ ? Mesurer sa taille  $l_2$ . En déduire le grandissement obtenu grâce à l'ensemble  $\{L_1 + L_2\}$ .

L'encombrement est défini par la distance entre  $L_1$  et l'écran, notée  $D'_1$ . Mesurer cette distance. Mesurer également la distance entre  $L_1$  et  $L_2$ , notée  $e$ .



Si, à la place de l'ensemble  $\{L_1 + L_2\}$ , on avait une seule lentille convergente notée  $L$ , quelle serait la valeur de sa focale, notée  $f'$ , afin d'obtenir le même grandissement ?

Comparer la distance focale  $f'$  trouvée à l'encombrement  $D'_1$  de ce téléobjectif et conclure sur l'intérêt du téléobjectif.



Tableau récapitulatif :

$f'_0 =$	$; f'_1 =$	$; f'_2 =$	
$l_0 =$	$; l_1 =$	$; l_2 =$	$; \alpha =$
$D_1 =$	$; D'_1 =$		
$f' =$			

Voir l'exercice 4.7 pour compléter l'interprétation de cette expérience. **(A)**

## Encadré : les instruments d'optique (A)

Il s'agit d'objets construits par l'homme permettant de réaliser des images optiques. On les classe en deux catégories :

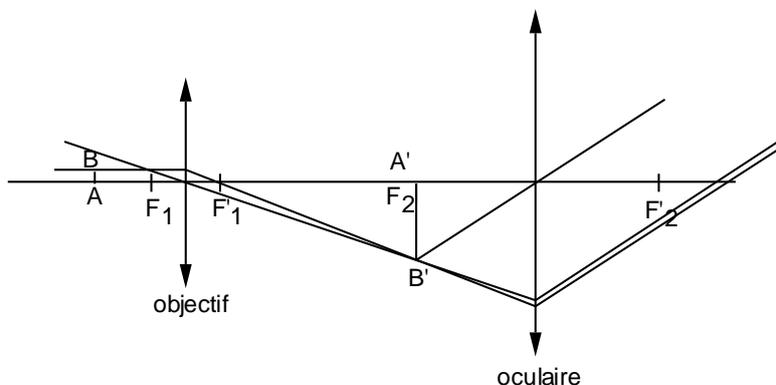
- les instruments visuels : ils fournissent une image virtuelle regardée par l'œil. Ils servent soit à la vision rapprochée (loupe, microscope), soit à la vision d'objets éloignés (jumelles, lunette, télescope)
- les instruments de projection : ils forment une image réelle sur un écran ou sur un détecteur (vidéoprojecteur, objectif d'appareil photo).

Pour comparer ces instruments entre eux, on utilise les notions de :

- grandissement : donne la taille de l'image par rapport à celle de l'objet
- grossissement : compare l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu avec celui sous lequel on voit son image donnée par l'instrument
- champ : définit la portion de l'espace visible à travers l'instrument

Ils peuvent être composés soit d'une seule lentille (loupe), soit d'associations de lentilles (lunette, microscope), soit de miroirs uniquement (télescope), soit d'association lentille(s)/miroir(s)...

- Le **microscope** aurait été inventé en Hollande à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle. Au XVII<sup>e</sup>, Leeuwenhoek est le premier à observer des cellules et des micro-organismes avec un microscope. Un microscope comprend deux lentilles : un objectif de courte focale (typiquement de l'ordre du cm) qui forme une image fortement agrandie de l'objet. Cette image est par construction dans le plan focal objet de l'oculaire, qui en donne donc une image à l'infini (donc que l'œil peut regarder sans accommoder). Lorsqu'on fait la mise au point, on déplace l'ensemble (objectif + oculaire) de telle sorte à amener l'objet « au bon endroit » pour que son image intermédiaire par l'objectif soit bien dans le plan focal objet de l'oculaire. Le chiffre indiqué sur l'objectif est le grandissement de l'objet lorsqu'il est situé à cette position particulière.

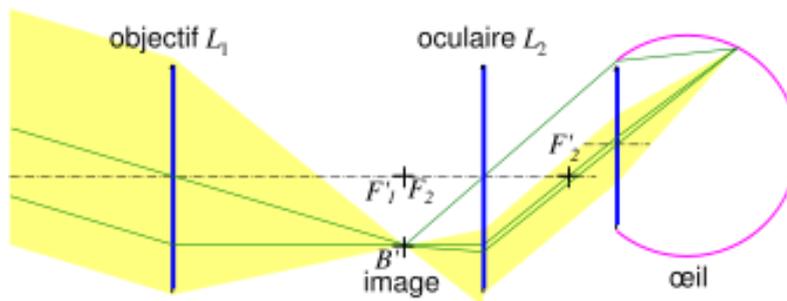


*principe du microscope*



*photo d'un microscope*

- La **lunette** aurait été inventée en Hollande également, au début du XVI<sup>e</sup> siècle, et utilisée pour la première fois par Galilée à des fins d'observations astronomiques. Elle est formée également d'une association de deux lentilles. Elle fonctionne un peu à l'inverse du microscope : comme elle sert à regarder des objets très éloignés, la première lentille (objectif) est de grande focale et la deuxième (oculaire) de courte focale. C'est un système afocal : ceci signifie que le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire. Ainsi, l'image d'un objet très éloigné est située dans le plan de ce foyer commun à l'objectif et à l'oculaire, et l'image résultante est à l'infini, ce qui évite là aussi à l'œil d'accommoder.



*principe de la lunette*



*photo d'une lunette*

Essayez de fabriquer une lunette avec les lentilles à votre disposition, afin d'observer un objet éloigné !

- Le **télescope** : voir l'encadré du chapitre 3, et l'expérience 3 du chapitre 3.
- L'**appareil photo** : à l'époque de la Renaissance les peintres utilisaient la chambre noire (simple petit trou percé dans une paroi, permettant de projeter l'image d'une scène extérieure). Son principal inconvénient était le manque de luminosité. Puis on eut l'idée d'utiliser une lentille, qui améliore considérablement la luminosité. Le problème devint alors de fixer l'image, ce qui fut réussi par Niepce en 1822. Depuis quelques années le support pour enregistrer l'image est non plus argentique mais le plus souvent numérique.

Dans un appareil photo, l'objectif est équivalent à une seule lentille convergente. On peut mettre en évidence la profondeur de champ en utilisant un diaphragme accolé à une lentille mince convergente. Faites-le !

## Résumé du chapitre 4

### **Lentilles**

Une lentille est un corps transparent homogène d'indice  $n$ , limité par deux dioptries dont l'un au moins n'est pas plan, l'autre face pouvant être plane ou sphérique. Dans le cas de lentilles minces utilisées *dans les conditions de Gauss* on peut trouver la relation donnant la position de l'image  $A'$  d'un point objet  $A$  en appliquant deux fois la relation de conjugaison d'un dioptre, en appelant  $O$  le centre de la lentille,  $F$  le foyer objet et  $F'$  le foyer image :

$$\boxed{\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}} \quad (\text{relation de conjugaison avec origine au sommet})$$

$$\boxed{\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = \overline{FO} \cdot \overline{F'O} = -f'^2} \quad (\text{relation de conjugaison avec origines aux foyers, dite de Newton})$$

On définit également le grandissement (linéaire) de l'image par rapport à l'objet  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$

Pour un système de deux lentilles minces  $L_1$  et  $L_2$  accolées utilisées dans les conditions de Gauss, on a :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} \quad \text{où } f' \text{ est la distance focale image du doublet de lentilles.}$$

### **L'œil humain**

L'œil peut en première approximation être modélisé par un simple dioptre sphérique. Pour simplifier, on considère que l'œil fonctionne comme *une seule lentille convergente de focale variable, située à une distance fixe de la rétine (environ 22 mm)*. L'œil normal au repos ne voit nets que les objets situés à l'infini. Lorsque l'objet se rapproche, le cristallin augmente sa courbure (et ainsi, devient plus convergent).

Les principaux défauts de la vision sont les suivants : la myopie, l'hypermétropie, l'astigmatisme et la presbytie.

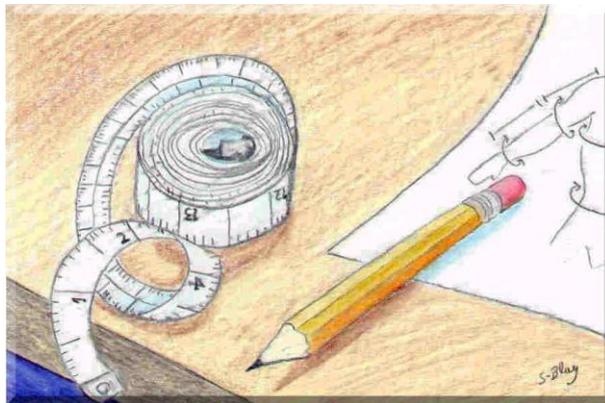
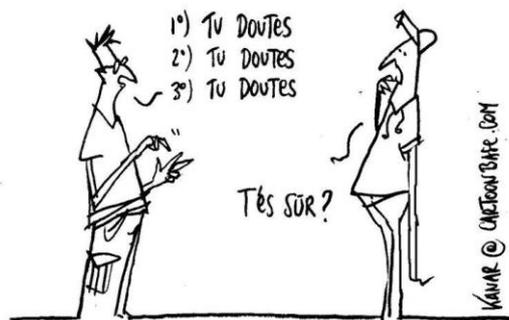


# CHAPITRE 5

## MESURES PHYSIQUES

### INCERTITUDES ET MODELISATION

Le Doute MÉTHODIQUE en 3 points



## SOMMAIRE DE CE CHAPITRE :

<b>1. NOTIONS UTILES</b>	<b>129</b>
<hr/>	
1.1 MESURE PHYSIQUE	129
1.2 ERREUR	129
1.3 INCERTITUDE ABSOLUE ET RELATIVE	129
1.4 CHIFFRES SIGNIFICATIFS	130
1.5 PRECISION ET EXACTITUDE	130
<b>2.COMMENT DETERMINER UNE INCERTITUDE?</b>	<b>131</b>
<hr/>	
2.1 CAS D'UNE GRANDEUR MESUREE DIRECTEMENT	131
A) METHODE STATISTIQUE	131
B) EVALUATION DIRECTE	131
2.2 CAS D'UNE GRANDEUR MESUREE INDIRECTEMENT (RELIEE A UNE GRANDEUR MESUREE PAR UNE LOI CONNUE)	132
A) LA METHODE PAR ENCADREMENT	132
B) LA METHODE DE LA DERIVEE	133
<b>3. MODELISATION ET DETERMINATION DE PARAMETRES</b>	<b>134</b>
<hr/>	
3.1. PREMIER CAS : ON CONNAIT LES INCERTITUDES SUR CHAQUE VALEUR	134
3.2. SECOND CAS : ON NE CONNAIT PAS LES INCERTITUDES SUR LES MESURES	135
<b>QUELQUES APPLICATIONS :</b>	<b>137</b>
<hr/>	

# 1. Notions utiles

## 1.1 Mesure physique

Commençons par signaler qu'on confond *l'action* de mesurer avec le *résultat* de cette action en un même terme, celui de mesure.

Si l'on répète plusieurs fois la mesure d'une grandeur, dans des conditions apparemment semblables, on obtient en général des résultats différents, caractérisés par une certaine *dispersion* sur ces résultats. L'origine de ce phénomène est multiple :

- La grandeur mesurée peut fluctuer de manière incontrôlée, comme c'est le cas par exemple pour la température ou la pression.

L'instrument de mesure n'est jamais parfait. Il a un certain temps de réponse, et il est plus ou moins précis et/ou sensible.

- Enfin, l'expérimentateur lui-même joue un rôle. Par exemple, les graduations de lecture sont plus ou moins épaisses, la résolution d'une image sur un écran pas toujours facile à apprécier...

On considère ainsi que la dispersion obtenue sur les résultats de la mesure résulte de phénomènes *aléatoires* (c'est-à-dire qui sont le fruit du hasard). La grandeur que l'on cherche à mesurer est donc modélisée par une *variable aléatoire*.

## 1.2 Erreur

On cherche à mesurer la valeur d'une grandeur, que nous appellerons valeur de référence, notée  $x_{ref}$ . D'après ce qui précède, on conçoit que la valeur réellement mesurée  $x$  sera toujours a priori différente de la valeur de référence, et que cette valeur de référence est, et restera inconnue. Par définition l'erreur de mesure est :

$$e = x - x_{ref}$$

Cette erreur est donc inconnue.

## 1.3 Incertitude absolue et relative

- Par définition, l'incertitude est une estimation de la valeur absolue de l'erreur.

On la note  $\delta x$ . Une fois qu'on l'a évaluée, on peut définir un intervalle de confiance à l'intérieur duquel on espère que la valeur de référence doit se trouver, avec une certaine probabilité. On traduit ceci de la manière suivante :

On estime que la valeur cherchée  $x_{ref}$  vaut  $x$ , à  $\delta x$  près, ce que l'on note :  $x \pm \delta x$ . Cette écriture signifie que la valeur cherchée  $x_{ref}$  a une probabilité importante (par exemple 95%) de se situer dans l'intervalle dit de confiance  $[x - \delta x ; x + \delta x]$ .

- L'incertitude  $\delta x$  est appelée incertitude absolue. Elle a la même dimension que la grandeur mesurée. C'est souvent elle que l'on évalue dans une mesure directe, mais elle n'est pas forcément une bonne indication de la précision de la mesure. En effet, mesurer une distance de 1 km à 1 cm près est intuitivement beaucoup plus précis que de mesurer 1 m à 1 cm près.
- On définit donc la notion d'incertitude relative, qui est tout simplement le rapport de l'incertitude absolue à la grandeur mesurée, soit  $\delta x/x$ . Ce rapport forme un nombre *sans dimension* que l'on écrit souvent comme un pourcentage (car les incertitudes usuelles sont

souvent de l'ordre de quelques pour cents). Ainsi, si l'on reprend les deux exemples précédents :

1 km à 1 cm près : l'incertitude relative vaut  $10^{-5} = 0.001\%$

1 m à 1 cm près : l'incertitude relative vaut  $10^{-2} = 1\%$

#### 1.4 Chiffres significatifs

Comme vous l'avez déjà vu au lycée, les chiffres significatifs d'un nombre sont ceux dont on est certain, sauf le dernier.

- Un résultat donné sans incertitude, mais avec un certain nombre de chiffres significatifs, donne en fait implicitement une indication sur la valeur de cette incertitude : ainsi, on considère généralement que l'incertitude porte sur le dernier chiffre. Par exemple, si l'on écrit :

$$d = 3,523 \text{ cm}$$

on sous-entend que l'incertitude sur la mesure de  $d$  vaut environ  $\delta d = 0,001 \text{ cm}$ .

Les écritures 3 cm, 3,0 cm et 3,00 cm ne sont donc pas équivalentes...

- Dans le cas où l'on s'est donné le mal d'estimer l'incertitude (!), il convient :
  - de conserver le bon nombre de chiffres significatifs *pour l'incertitude elle-même*. Celle-ci est rarement connue avec une grande précision. On l'arrondit donc en général à 1 ou 2 chiffres significatifs.
  - d'ajuster le nombre de chiffres du résultat trouvé en ne conservant pour sa valeur que les chiffres dont on peut être certain, compte tenu de l'incertitude. Par exemple :

Si on trouve  $x = 8,02137 \pm 0,057 \text{ m}$

On écrira  $x = 8,02 \pm 0,06 \text{ m}$

#### 1.5 Précision et exactitude

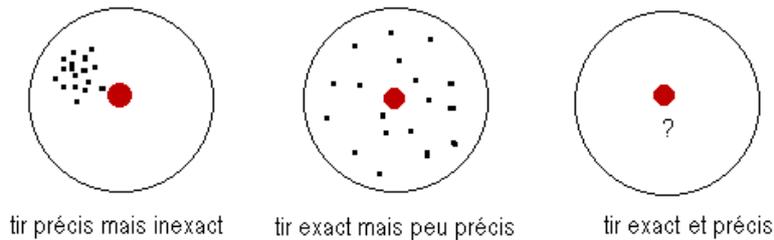
Lorsque l'erreur aléatoire est faible (et donc la dispersion des résultats de mesure aussi), on parle de mesure précise.

Mais attention, cela ne signifie pas pour autant que le résultat obtenu est proche de la valeur de référence. En effet, il peut exister, un écart reproductible entre la valeur mesurée et la valeur cherchée : on parle alors d'erreur systématique. Par exemple, un appareil peut être mal étalonné : le zéro peut être mal réglé, l'échelle peut être mal graduée, il peut y avoir une erreur de conversion... L'erreur systématique est donc une erreur de méthode.

Lorsque l'erreur systématique est faible, on dit que la mesure est exacte.

Les notions de précision et d'exactitude sont indépendantes : une mesure peut être inexacte et précise, inexacte et imprécise, exacte et imprécise, ou encore exacte et précise (cas souhaité !).

L'illustration ci-dessous est celle d'une cible d'un stand de tir à la fête foraine... Et si l'on donne un bon fusil à un bon tireur...



## 2. Comment déterminer une incertitude?

### 2.1 Cas d'une grandeur mesurée directement

#### a) Méthode statistique

L'incertitude étant liée à la dispersion des résultats expérimentaux, on peut, à partir d'un grand nombre de mesures réalisées dans des conditions supposées identiques, effectuer une analyse statistique de ces mesures. On détermine ainsi quantitativement la dispersion des mesures, et on exprime ensuite l'incertitude en fonction de la marge de confiance souhaitée. En principe, vous avez dû voir cette méthode au lycée.

#### b) Evaluation directe

La méthode précédente est rigoureuse mais également fastidieuse... Souvent en physique on ne prend pas, ou on n'a pas le temps de répéter un grand nombre de fois une mesure donnée, notamment pour des mesures effectuées "à la main".

Comment alors évaluer expérimentalement l'incertitude  $\delta x$  lors d'une *unique* mesure directe de la grandeur  $x$  étudiée ? Il s'agit bien d'une *évaluation*, la seule méthode rigoureuse étant celle du 2.1.a...

$\alpha$ ) Si la mesure implique un appareil de mesure, on peut se reporter à la *notice* de celui-ci qui indique souvent les incertitudes à prendre en compte (le travail statistique décrit au paragraphe précédent a été fait par le constructeur de l'appareil...)

$\beta$ ) Si l'instrument de mesure est simple, ou si on ne trouve pas la notice de l'appareil (!), on prend généralement *une graduation du dernier chiffre* (cf chiffres significatifs). Ainsi, pour un appareil à affichage numérique, on prendra comme incertitude une unité du dernier chiffre affiché (sauf évidemment si on observe les trois derniers chiffres fluctuer...). Pour une mesure impliquant une lecture de graduations (règle, vernier...), on prendra également une unité (ou une demi-unité, suivant les cas) de la dernière graduation.

$\gamma$ ) Une troisième méthode consiste à *surestimer l'incertitude*. On peut en effet effectuer, non pas un grand nombre de mesures identiques, mais seulement 3 ou 4. On évalue alors *une valeur maximale de l'incertitude* en prenant la différence des valeurs extrêmes divisée par deux :

$$\delta x \leq \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

Cette méthode s'applique notamment lorsque la mesure implique un jugement de l'expérimentateur. Par exemple, celui-ci doit apprécier la netteté d'une image (chapitre 4, TP5 et TP6). Si l'on veut déterminer la position de l'écran où l'image est considérée comme nette, il existe une certaine plage de positions de l'écran où l'observateur considèrera que l'image est nette. On peut alors déterminer les deux positions extrêmes de l'écran où l'image peut encore, à la limite, être considérée comme nette, et prendre comme incertitude la différence et diviser

par deux le résultat.

Lorsque vous donnerez une valeur expérimentale avec son incertitude, *expliquez toujours comment vous avez déterminé cette incertitude!*

## 2.2 Cas d'une grandeur mesurée indirectement (reliée à une grandeur mesurée par une loi connue)

Nous traiterons ici le cas d'une grandeur  $y$ , non plus mesurée directement, mais reliée à une grandeur  $x$  que l'on mesure *via une fonction connue*  $y = f(x)$ .

Par exemple, on veut déterminer le volume d'un cube (une pièce par exemple), et on mesure, non pas directement ce volume (!), mais le côté du cube : on trouve une valeur  $x_0$ , à  $\delta x$  près. Bien entendu, le volume du cube peut être estimé par  $x_0^3$ , mais à combien près? En d'autres termes, que vaut l'incertitude  $\delta y$ ?

### a) La méthode par encadrement

Sauf cas particulier, la méthode la plus simple est de calculer à partir des valeurs extrémales ( $x_{inf}$  et  $x_{sup}$ ) de la grandeur mesurée, les valeurs extrémales correspondantes  $y_{min}$  et  $y_{max}$  de la valeur calculée (en faisant attention à l'ordre...).

### Calcul

Exemple 1 : on mesure le côté d'un cube et on trouve 1 m, à 1%, 10% ou 25%. Que vaut l'incertitude sur le volume du cube dans les trois cas?

Exemple 2 : soit un angle  $\alpha$  mesuré à  $30^\circ$  avec une incertitude de  $\pm 2^\circ$ . Quelle est l'incertitude sur  $\sin \alpha$ , sur  $\cos \alpha$  ?

Avec une calculette, il est facile de remplir la suite d'encadrements :

$$\text{angle : } \quad 28^\circ < \alpha < 32^\circ \quad \text{ou bien : } \alpha = 30 \pm 2^\circ$$

$$\text{sinus : } \quad 0.47 < \sin \alpha < 0.53 \quad \text{ou bien : } \sin \alpha = 0.50 \pm 0.03$$

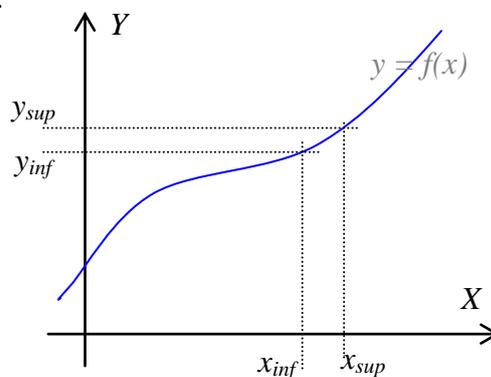
$$\text{cosinus : } \quad 0.84 < \cos \alpha < 0.88 \quad \text{ou bien : } \cos \alpha = 0.86 \pm 0.02$$

Là encore, *seuls les chiffres considérés comme significatifs sont à conserver.*

### Représentation graphique

Cette méthode peut être généralisée à une relation dont la fonction est compliquée ou inconnue, mais dont on dispose d'une représentation graphique (obtenue par une méthode informatique par itération, type méthode d'Euler).

Sur l'exemple ci-contre, on a tracé la courbe reliant les grandeurs  $x$  et  $y$ . Si la mesure de  $x$  donne une valeur comprise entre  $x_{inf}$  et  $x_{sup}$ , alors on peut déterminer l'incertitude qui en résulte sur la valeur de la grandeur  $y$ .



## b) La méthode de la dérivée

Une méthode qui peut ensuite se généraliser, repose sur l'utilisation de la dérivée.

### Calcul

Vous avez vu que, par définition,  $f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$

Ceci permet de considérer que, si l'intervalle  $\Delta x = x - x_0$  est suffisamment petit (c'est-à-dire que la dérivée ne varie pas beaucoup sur cet intervalle), on a :

$$f'(x_0) \approx \frac{\Delta f}{\Delta x} \text{ soit encore } \Delta f \approx f'(x_0) \Delta x$$

En général, les incertitudes constituent ainsi de faibles intervalles. Si l'on utilise la notation  $\delta$  introduite précédemment, en tenant compte de ce que les incertitudes sont des valeurs absolues, on peut donc résumer :

Si  $\delta x$  représente l'incertitude sur une valeur  $x_0$  de la grandeur  $x$ , alors on peut estimer l'incertitude correspondante sur la valeur de la grandeur  $y$  telle que  $y_0 = f(x_0)$  par :

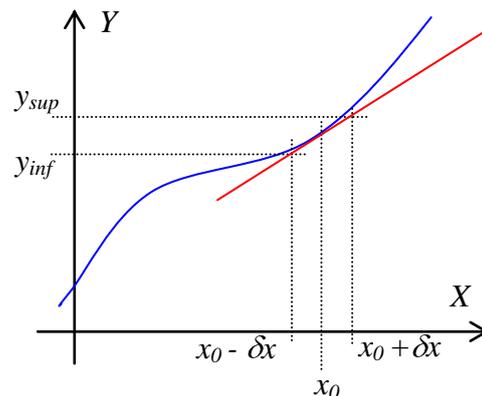
$$\delta y = |f'(x_0)| \delta x$$

### Représentation graphique

La représentation graphique correspondante repose sur l'interprétation graphique de la dérivée en un point.

Comme vous l'avez vu au lycée, la valeur de la dérivée en un point est la pente de la tangente à la courbe en ce point.

La relation ci-dessus revient donc à considérer les points non plus sur la courbe mais sur la tangente au point considéré.



### Exemples :

#### 1- Incertitude sur le calcul du volume d'un cube de côté $x$ .

Si  $\delta x$  représente l'incertitude sur la mesure du côté, alors, l'incertitude sur le volume  $V = x^3$  est :  $\delta V \approx 3x^2 \delta x$

Reprendre l'exemple où l'on trouve pour le côté du cube : 1 m, à 1%, 10% ou 25%. Que vaut l'incertitude sur le volume du cube dans les trois cas? Comparer au résultat obtenu précédemment par la méthode par encadrements.

#### 2- Incertitude sur l'accélération lors d'un glissement sur un plan incliné.

Si  $\alpha$  représente l'angle du plan incliné et  $\delta \alpha$  son incertitude, alors l'incertitude sur l'accélération

$a = g \cdot \sin \alpha$  est égale à  $\delta a = g \cdot \cos \alpha \cdot \delta \alpha$  (à condition d'utiliser "l'unité" d'angle des mathématiciens : le *radian* !!)

Et, pour être cohérent, on ne garde bien sûr que les chiffres significatifs !

### 3. Modélisation et détermination de paramètres

Dans d'autres cas, on réalise une série de mesures de deux grandeurs et ce, pour étudier la relation qui les relie. Vous avez ainsi tracé des "courbes" {tension, intensité} en électricité, {vitesse, temps} en mécanique, etc.

Il s'agit de tester un modèle, de retrouver une loi physique, et éventuellement d'en déduire la valeur d'un paramètre. On effectue alors une série de mesures en faisant varier l'une des grandeurs : mesures de I en faisant varier U, mesure d'allongement d'un ressort en faisant varier le poids accroché, etc.

L'analyse de telles mesures repose sur la représentation graphique des couples de mesures  $(x_i, y_i)$  dans un graphe  $(x, y)$

Seule cette méthode permet le contrôle de la modélisation et des calculs scientifiquement valides.

Ci-après, on ne considère que le cas où les points ainsi obtenus correspondent à un modèle affine ou linéaire, qui sera représenté par une droite d'équation  $y = ax + b$ , où  $a$  et  $b$  sont des paramètres inconnus à déterminer.

#### 3.1. Premier cas : on connaît les incertitudes sur chaque valeur

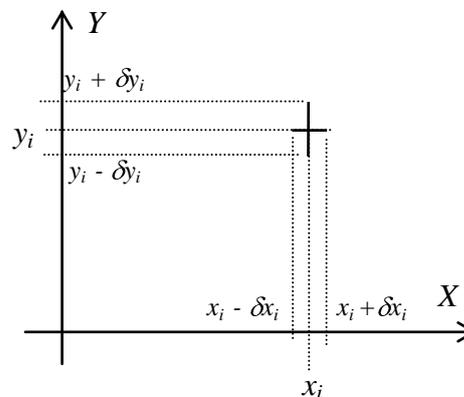
Dans un certain nombre de cas, on connaît les incertitudes sur chacune des valeurs  $x_i$  et  $y_i$  : incertitude liée à l'appareil ou à la qualité du repérage, incertitude mesurée ou calculée. (voir partie précédente). Pour chaque valeur  $x_i$ , on a donc un  $\pm \delta x_i$  (idem pour  $y_i$ ).

- La première étape consiste à reporter les incertitudes sur les valeurs représentées. Pour ce faire, on peut tracer des "croix" dont la taille représente les incertitudes "en x" et "en y" :

largeur  $2\delta x_i$  et hauteur  $2\delta y_i$

On parle de barres d'erreur.

Remarque : dans certains ouvrages, on trace un rectangle dit "rectangle d'incertitude".

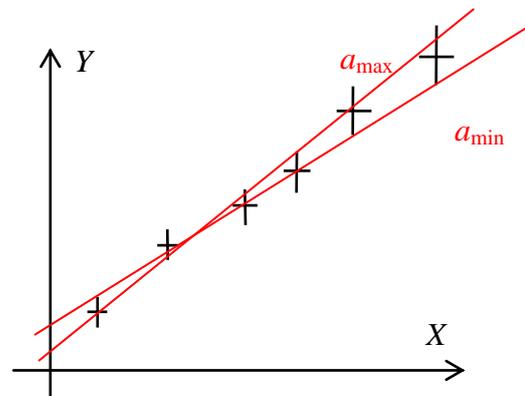


- Dans une seconde étape, le modèle attendu étant linéaire ou affine, on trace les droites de **pent**es extrêmes (pente minimale et pente maximale) passant par les croix ainsi tracées.

Ces deux droites fournissent chacune une valeur des paramètres  $a$  (pente) et  $b$  (ordonnée à l'origine).

On en déduit donc un encadrement pour les valeurs des paramètres cherchés. On écrira par exemple pour la pente :

$$a_{min} < a < a_{max}$$



Remarque importante : les croix ne sont pas nécessairement toutes de la même taille ! Ainsi l'incertitude peut être plus importante sur les points "éloignés" de l'origine (cas du dessin ci-dessus) : les points mesurés avec plus de précision ont une croix plus petite.

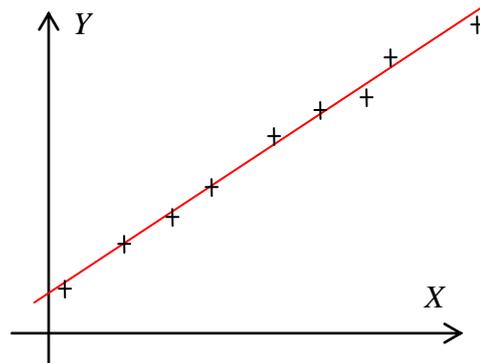
Le fait de faire passer la droite par ces croix, va donc faire que *l'on va en général passer plus près des points dont on est le plus sûr !* Ce qui est logique !

### 3.2. Second cas : on ne connaît pas les incertitudes sur les mesures

On trace alors une *droite moyenne* qui passe "au mieux" par l'ensemble des points : on essaie d'équilibrer le nombre de points au-dessus et le nombre de points au-dessous.

Remarques :

- 1- Les "petites croix" tracées ici ne représentent pas les incertitudes.
- 2- Il se peut que la droite ne passe par aucun point expérimental!
- 3- Ceci effectué, tout point de la droite constitue alors une meilleure estimation des mesures, puisque la droite tient compte de tous les points expérimentaux, et fait donc bien une sorte de *moyenne sur l'ensemble*.



Donc, si l'on conserve tous les points expérimentaux, et que l'on estime la droite comme représentative des mesures, alors *cela signifie que l'on considère que le fait que des points ne soient pas sur la droite est dû aux incertitudes de mesure*.

De plus, ayant considéré de la même façon tous les points, on suppose implicitement que l'incertitude est la même pour tous (Cf. remarque précédente). *L'écart le plus grand entre un point et la droite est donc représentatif des incertitudes pour tous les points*.

La figure ci-dessous (à gauche) est un zoom sur la partie du graphique ci-dessus où l'un des points est le plus éloigné de la droite. Si l'on suppose que les incertitudes sont essentiellement sur la grandeur Y, alors, on a l'estimation de  $\delta y$  (figure de droite).



Cette incertitude peut alors être reportée sur tous les points et l'on est ramené au cas précédent.

Remarques importantes :

- 1- La méthode repose ici sur l'hypothèse que l'incertitude est négligeable sur la grandeur portée en abscisse (mais l'on pourrait généraliser en traçant les perpendiculaires à la droite).

2- La méthode suppose que les incertitudes sont les mêmes pour tous les points. C'est ce qui permet d'interpréter la dispersion des points de part et d'autre de la droite moyenne comme représentative des erreurs aléatoires, donc des incertitudes.

3- On a ici maximisé l'incertitude sur  $y$ , en prenant l'écart *maximum* entre un point et la droite. La méthode "correcte" pour ne pas surestimer cette incertitude consiste à prendre l'écart *moyen* entre les points et la droite (moyenné sur l'ensemble des points). C'est ce que fait une régression linéaire...

## Quelques applications :

### 1. Volume d'une bille

On mesure le diamètre  $D$  d'une bille d'acier à l'aide d'un pied à coulisse au  $\frac{1}{50}$  de mm près.

On lit  $D = 10,02$  mm. Ecrire  $D$  avec son incertitude absolue sous la forme  $D = \dots \pm \dots$

Quel est le volume  $V$  de la bille, avec son incertitude ? Ecrire le résultat sous la forme

$V = \dots \pm \dots$

### 2. Incertitude sur le sinus d'un angle

Connaissant l'incertitude sur  $i$  (en degrés), quelle est l'incertitude sur  $\sin i$ ?

Application numérique : compléter le tableau ci-contre.

$i$ (°)	$i$ (rad)	$\delta i$ (°)	$\delta i$ (rad)	$\sin i$	$\cos i$	$\delta(\sin i) = ?$
2,5		1				
35		1,5				
40		2,5				

### 3. Extrait du sujet d'examen de janvier 2007

Un réfractomètre permet de déterminer la valeur de l'indice de réfraction  $n$  d'un fluide à partir de la mesure de l'angle de déviation  $D$  d'un fin faisceau de lumière parallèle. On connaît l'indice  $N$  du prisme constituant le réfractomètre, ainsi que son angle d'inclinaison  $\alpha$  par rapport à la verticale.

Le dispositif expérimental, appelé réfractomètre de Godat, est tel qu'il existe une relation simple entre ces quatre variables, à savoir  $n = N - \frac{D}{\alpha}$ . On suppose que les valeurs de  $N$  et de  $\alpha$ , sont connues avec une précision négligeable par rapport à celle correspondant à la mesure de  $D$ .

Déterminer la valeur de l'indice de réfraction  $n$ . On écrira le résultat sous la forme  $n = \dots \pm \dots$  et on déterminera la précision de la mesure.

Données :

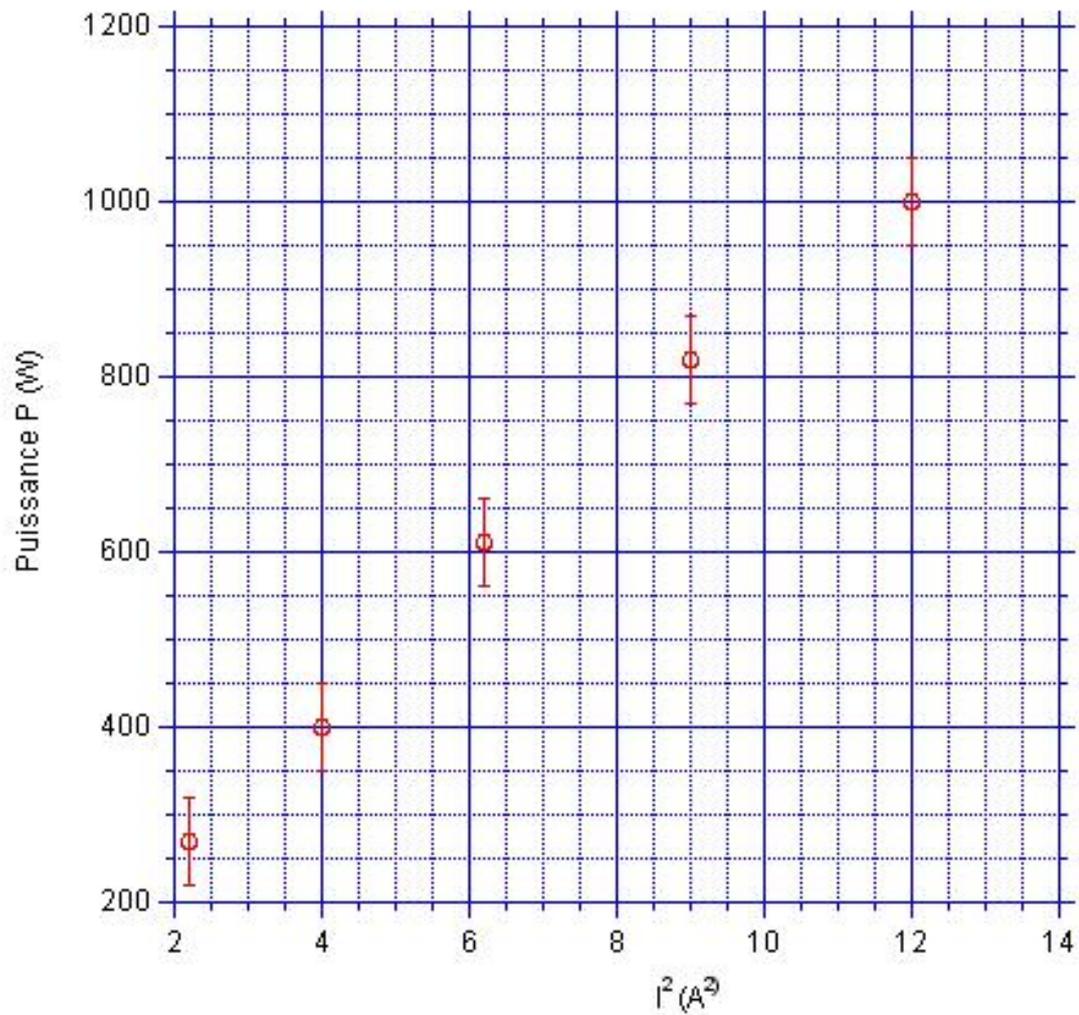
$N = 1.768$ ,  $\alpha = 10.00^\circ$ ,  $D = 3.2^\circ$ , valeur mesurée avec une précision de 3%.

### 4. Puissance dissipée dans une résistance électrique

Une résistance  $R$  soumise à un courant électrique  $I$  délivre une puissance  $P$  donnée par la relation supposée  $P = RI^2$ . Pour vérifier celle-ci, un étudiant applique différents courants à une résistance inconnue immergée dans de l'eau dont l'augmentation de température renseigne sur la puissance dissipée. Les résultats sont reportés sur le graphe ci-joint. Les incertitudes sur  $I$  et  $I^2$  sont négligeables.

- a) Les points de mesures vous semblent-ils en accord avec la relation attendue ? Pourquoi ?

- b) On cherche à ajuster les mesures par une droite. Que représente la pente de cette droite ? En quelle unité s'exprime-t-elle ?
- c) Utiliser le graphe ci-joint pour déterminer la pente de la droite ajustant au mieux les mesures. Quelle est l'incertitude sur la valeur de la pente ? Exprimer le résultat sous la forme  $x \pm \delta x$ .



## **EXERCICES**

## **SOMMAIRE DES EXERCICES :**

**EXERCICES DU CHAPITRE 1 :** **141**

**EXERCICES DU CHAPITRE 2 :** **147**

**EXERCICES DU CHAPITRE 3 :** **152**

**EXERCICES DU CHAPITRE 4 :** **158**

# **EXERCICES DU CHAPITRE 1 :**

## **Assimilation du cours**

### **1.1 Temps de parcours de la lumière.**

#### a) Temps mort entre deux téléphones cellulaires :

Deux personnes discutent entre elles via leurs téléphones cellulaires. Chaque téléphone cellulaire envoie ces informations sous forme d'ondes électromagnétiques à un satellite en orbite géostationnaire, c'est-à-dire à une altitude de 36000 km. On suppose ici que les deux personnes sont séparées d'une distance négligeable devant la distance entre la surface de la Terre et le satellite. Quel est le temps mort, c'est-à-dire le temps entre le moment où la personne commence à parler et où son interlocuteur commence à entendre la phrase prononcée ?

#### b) Distance Terre-Lune :

En 1969, lors de la mission Apollo XI, Neil Armstrong et Edwin Aldrin ont déposé, à la surface de la Lune un réflecteur laser. Ce réflecteur laser permet de renvoyer vers la Terre des faisceaux d'impulsions laser tirés de centre d'études comme le CERGA près de Grasse ou la station Mac Donald au Texas. Une impulsion laser est un signal lumineux très bref. On mesure avec une grande précision la durée mise par cette impulsion pour effectuer un aller-retour Terre-Lune.

Lors d'un tir d'impulsion laser, le temps de parcours d'une impulsion pour un aller-retour Terre-Lune est 2,65s. Déterminer la distance Terre-Lune au moment de la mesure.

### **1.2 Longueur d'onde dans un milieu d'indice $n > 1$**

Le maillot de bain rouge que porte une personne réfléchit principalement, dans l'air, une longueur d'onde de 750 nm. On rappelle que, quand on parle de longueur d'onde associée à une couleur, on se réfère en fait à la longueur d'onde dans le vide,  $\lambda_0$ .

a) Quelle est la relation qui relie la longueur d'onde  $\lambda$  dans un matériau d'indice  $n$  et la longueur d'onde dans le vide, notée traditionnellement  $\lambda_0$ ?

b) L'indice de l'air  $n_{air}$  étant pratiquement égal à 1, justifier le fait que la longueur d'onde dans l'air est assimilée à la longueur d'onde dans le vide,  $\lambda_0$ . On note donc  $\lambda_0 = 750\text{nm}$ .

c) L'indice de l'eau  $n_{eau}$  étant de 1.33, calculer la valeur de  $\lambda$ , longueur d'onde dans l'eau.

d) Comment explique-t-on que la couleur du maillot soit perçue comme identique, qu'il soit vu dans l'air ou sous l'eau ?

### **1.3 Angles de réfraction et de réflexion**

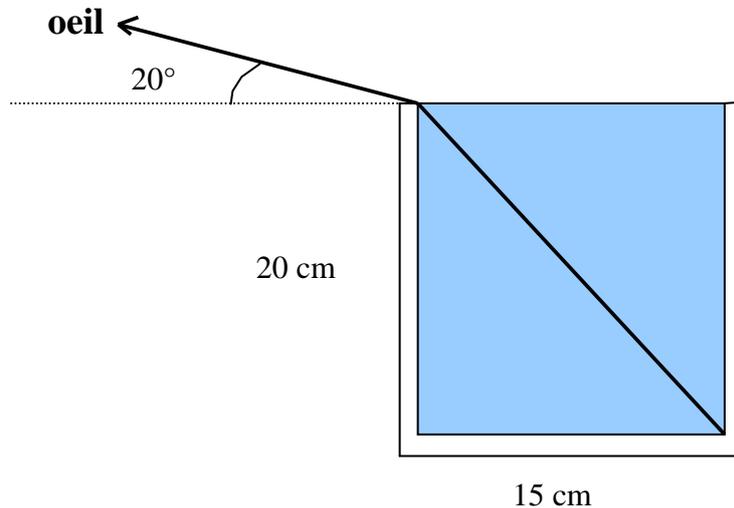
a) Quel est l'angle de réflexion dans le cas d'un rayon tombant perpendiculairement sur une surface plane ?

b) Quel est l'angle de réfraction dans le cas d'un faisceau tombant perpendiculairement sur l'interface air-verre ?

## 1.4 Indice de réfraction d'un liquide

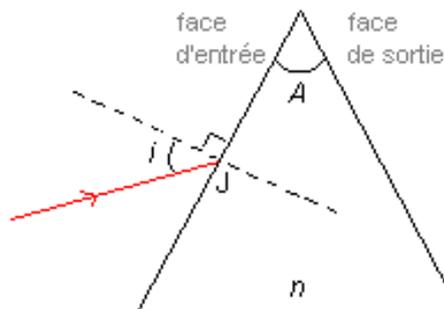
a) Un faisceau de lumière tombe sur l'interface air-liquide sous une incidence de  $55^\circ$ . L'angle du rayon réfracté dans le liquide est alors  $40^\circ$ . Quel est l'indice du liquide ?

b) Un liquide remplit un petit récipient (voir figure ci-dessous). On trouve que le bord arrière du fond du récipient est juste visible sous un angle de  $20,0^\circ$  avec l'horizontale. Quel est l'indice de réfraction du liquide ?



## Application du cours

### 1.5 Réfractions successives par un prisme



Reprendre les notations vues en cours pour les angles  $i$ ,  $i'$ ,  $r$ ,  $r'$  et  $D$ , ainsi que pour les points  $J$  et  $J'$ .

On note  $S$  le sommet du prisme.

1) En utilisant la loi de la réfraction aux points  $J$  et  $J'$ , trouver une relation entre  $i$  et  $r$ , et entre  $i'$  et  $r'$ .

2) A l'aide d'un raisonnement dans le triangle  $SJJ'$ , trouver une relation entre  $r$ ,  $r'$  et  $A$ .

3) Déviation

a) Exprimer, à l'aide des angles  $i$  et  $r$ , la déviation  $D_1$  subie en  $J$  par le rayon incident.

b) Exprimer, à l'aide des angles  $i'$  et  $r'$ , la déviation  $D_2$  subie par le rayon incident en  $J'$ , et en déduire la déviation totale  $D$ .

4) Minimum de déviation

a) En étudiant la dérivée de la déviation  $D$  par rapport à l'angle d'incidence  $i$ , on montre que la déviation passe par un minimum lorsque la condition suivante sur les angles est remplie :

$$\cos i' \cos r = \cos i \cos r'$$

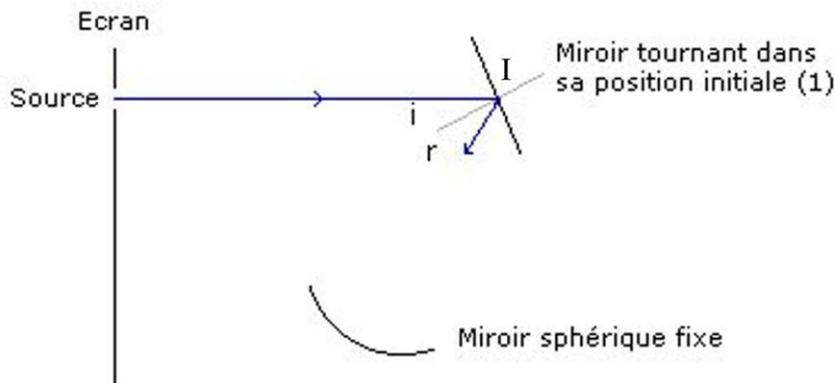
En utilisant les relations trouvées dans les questions précédentes, en déduire que le minimum de déviation a lieu pour  $r = r' = A/2$

b) En déduire que l'indice du prisme s'exprime par 
$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + D_m}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}$$
.

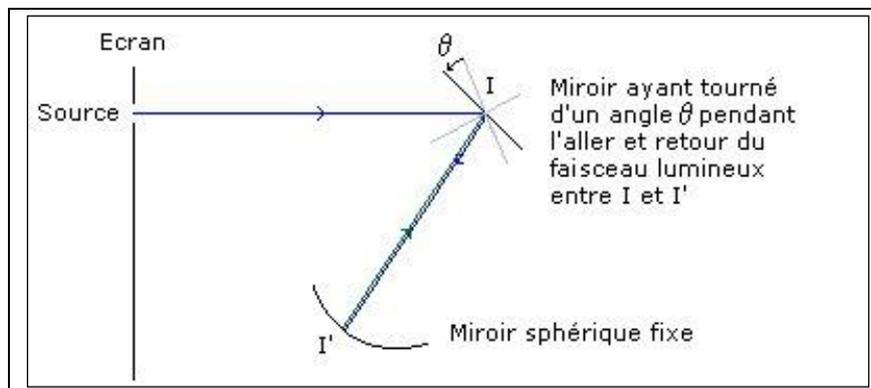
## Problèmes

### 1.6 Mesure de la vitesse de la lumière (Foucault, 1862) (\*)

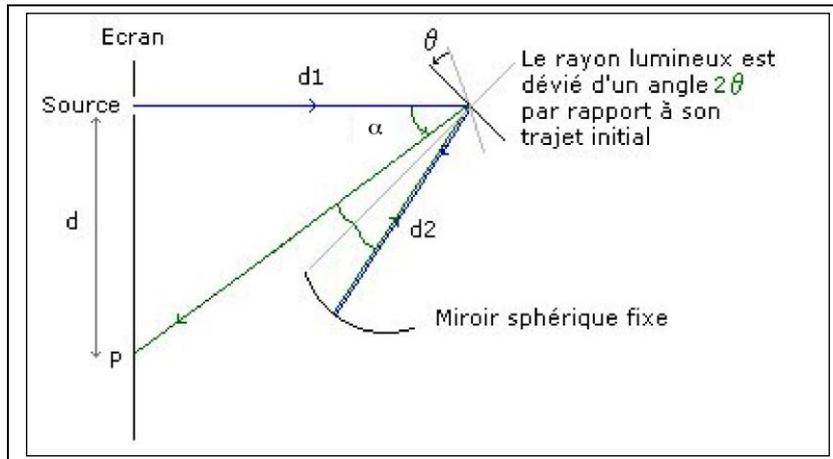
Foucault cherchait à montrer que la lumière se propageait plus lentement dans l'eau que dans l'air. Pour cela, il avait inventé un dispositif à miroir tournant permettant d'envoyer la lumière soit selon un trajet dans l'air, soit selon un trajet dans l'eau. Un miroir sphérique placé en bout du trajet permettait de renvoyer la lumière vers l'observateur. L'image qui en découle était décalée d'une façon qui dépendait de la vitesse de rotation du miroir plan. En effet, durant le temps que met la lumière pour faire l'aller-retour sur le miroir sphérique, le miroir tournant a changé sensiblement de position.



D'après la première loi de Snell-Descartes, tout le long de son parcours, le faisceau lumineux va rester dans un plan. Le miroir sphérique est caractérisé par le rayon  $R$  de la sphère qui le porte et le centre  $C$  de ce miroir. Le miroir sphérique fixe est placé de telle manière que le centre  $C$  de la sphère coïncide avec le centre  $I$  du miroir plan. En conséquence, tout rayon issu de  $I$  se réfléchissant sur le miroir sphérique repassera par le point  $I$ .



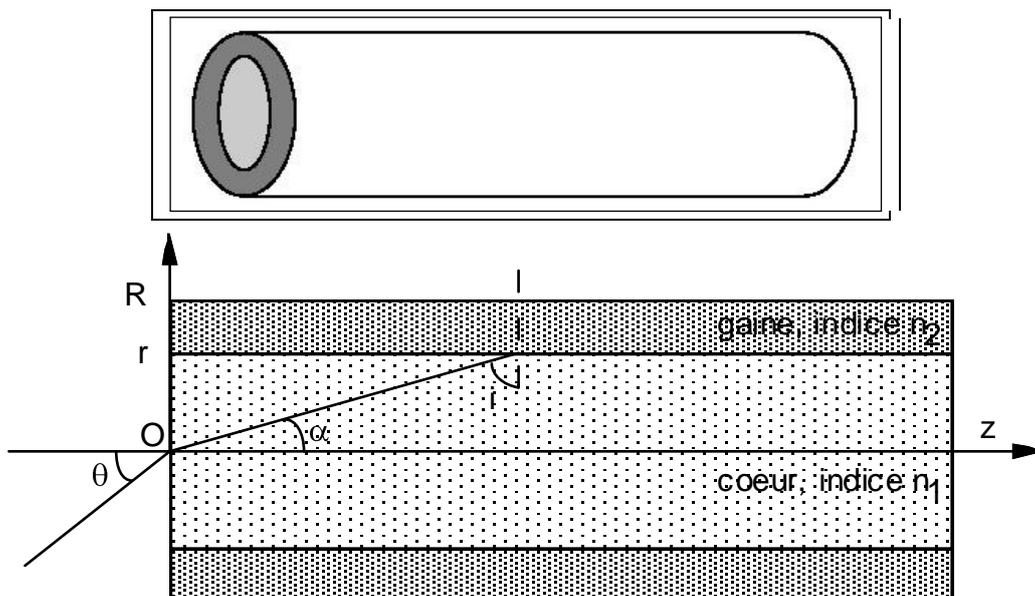
- a) Montrer que si le miroir tourne d'un angle  $\theta$ , l'image a tourné d'un angle  $\alpha$  autour de l'axe de rotation du miroir plan avec  $\alpha = 2\theta$ .



- b) De quel angle  $\Delta\theta$  a-t-on tourné le miroir plan pendant le temps  $\Delta t$  mis par la lumière pour effectuer le trajet aller-retour entre le miroir plan et le miroir sphérique ? On exprimera  $\Delta\theta$  en fonction de la vitesse angulaire  $\omega$  de rotation du miroir plan, de la vitesse de la lumière,  $c$  et du rayon  $R$  du miroir sphérique.
- c) En déduire l'expression de la vitesse de la lumière dans le milieu en fonction de  $\omega$ ,  $\Delta\theta$  et  $R$
- d) Dans l'expérience de Foucault effectuée dans l'air, le miroir sphérique était de rayon  $R = 5\text{m}$ , la vitesse angulaire du miroir plan était de  $\omega = 300 \text{ tr.s}^{-1}$  et la déviation de l'image était de 26 secondes d'arc. En déduire une estimation de la valeur de la vitesse de la lumière dans l'air.

La méthode de Foucault a permis également de déterminer la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau et de montrer qu'elle était plus faible que dans l'air :  $c_{\text{eau}} = 225400 \text{ km.s}^{-1}$ . A l'époque, deux théories s'affrontaient : l'une, corpusculaire, affirmait que la vitesse de la lumière était plus élevée dans l'eau que dans l'air, l'autre affirmait l'inverse sur la base d'un modèle ondulatoire.

### 1.7 Fibre optique à saut d'indice



On considère une fibre optique de section cylindrique placée dans l'air. Cette fibre de rayon  $R$  et de longueur  $L$  est constituée de deux cylindres concentriques, un cœur de rayon  $r$  et d'indice  $n_1$  entouré d'une gaine d'indice  $n_2$ .

- a) Quelle inégalité sur  $n_1$  et  $n_2$  doit être vérifiée pour qu'il puisse y avoir réflexion totale à l'interface cœur/gaine ? Dans la suite, nous supposons que cette condition est toujours vérifiée.
- b) On considère un rayon lumineux arrivant sur le cœur de la fibre au point O sous un angle d'incidence  $\theta$ . Ecrire les relations reliant les différents angles du schéma ci-dessus à chacune des interfaces air/cœur et cœur/gaine.
- c) Pour quelles valeurs de  $\theta$ , le rayon entrant dans la fibre se propage-t-il le long de cette fibre par réflexion totale à l'interface cœur/gaine ?
- d) Calculer numériquement la valeur extrême de  $\theta$ ,  $\theta_0$  pour que le rayon se propage dans la fibre. On donne  $n_1 = 1,5$  et  $n_2 = 1,49$ .
- e) Supposons que le faisceau à l'entrée de la fibre ait une certaine ouverture angulaire  $\theta_1 > \theta_0$ . Ceci signifie que le faisceau comprend tous les angles de valeur comprise entre 0 et  $\theta_1 > \theta_0$ . Représenter le trajet suivi dans la fibre par différents rayons de ce faisceau.
- f) Quel rayon de ce faisceau effectue le trajet le plus court entre l'entrée et la sortie de la fibre? Que vaut la distance qu'il parcourt? En déduire son temps de parcours entre l'entrée et la sortie de la fibre, noté  $\tau_{min}$ .
- g) Quel rayon de ce faisceau effectue le trajet le plus long entre l'entrée et la sortie de la fibre? Que vaut la distance qu'il parcourt? En déduire son temps de parcours entre l'entrée et la sortie de la fibre, noté  $\tau_{max}$ .
- h) En prenant  $L = 10$  km et les valeurs de  $n_1$  et  $n_2$  précédentes, calculer numériquement  $\Delta\tau = \tau_{max} - \tau_{min}$ . Que représente cette quantité?

## Pour aller plus loin

### 1.8 Retour sur le minimum de déviation du prisme (\*)

On cherche à établir la condition de déviation minimale d'un prisme donnée à l'exercice B.1.2.

Exprimer la dérivée  $dD/di$  afin de trouver l'extremum  $D_m$  de  $D$  en fonction de  $i$  (on admettra que cet extremum est un minimum). Montrer que ce minimum correspond bien à la condition sur les angles énoncés en B.1.2.a):

$$\cos i' \cos r = \cos i \cos r'$$

## 1.9 Le principe de Fermat et le problème du sauveteur (\*)

Le principe de Fermat établi en 1658 par Pierre de Fermat s'énonce de la manière suivante :

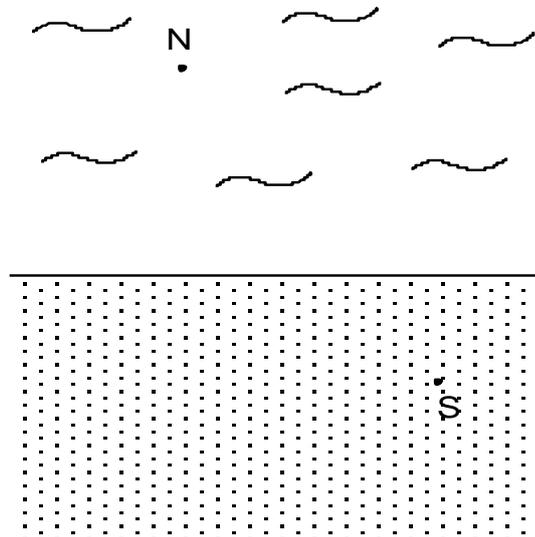
« Pour aller d'un point à un autre, la lumière suit, parmi toutes les trajectoires possibles, celle dont le temps de parcours est extrémal. »

À partir de ce principe on montre que la lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène, et on peut aussi démontrer les lois de la réflexion et de la réfraction.

Ici, on se propose de faire une analogie mécanique du principe de Fermat.

Un sauveteur (S) situé sur une plage aperçoit un nageur (N) en difficulté dans l'eau. Il se porte à son secours, et souhaite bien sûr mettre le minimum de temps pour atteindre le nageur. Quel chemin doit-il alors suivre, sachant qu'il nage moins vite qu'il ne court sur la plage ?

On modélise cette situation réaliste par un front de mer rectiligne en supposant que le sauveteur court et nage à vitesses  $v_s$  et  $v_e$  constantes respectivement.



- Montrer par un raisonnement qualitatif que la ligne droite SN n'est pas le "meilleur chemin".
- Compléter le schéma ci-dessus en positionnant le point H sur le front de mer que le sauveteur atteindrait s'il courait perpendiculairement à celui-ci. Placer, de même, le point K sur le front de mer dans le cas où le sauveteur nagerait perpendiculairement au front de mer.
- Montrer, de nouveau par un raisonnement qualitatif, que ces deux trajets SHN et SKN ne sont pas les meilleurs.
- Placer un point I sur la berge, représentant le point où le sauveteur arrive dans l'eau de façon "satisfaisante".
- Écrire l'expression de la durée  $t$  mis par le sauveteur pour aller ainsi de S à N en fonction de  $x = HI$ . On notera  $L = HK$ ,  $d_s = HS$  et  $d_e = KN$ .
- Comment écririez-vous, mathématiquement, le fait que cette durée  $t$  soit minimale?
- Montrer que la relation ainsi obtenue peut s'écrire sous une forme analogue à la loi de réfraction de l'optique géométrique.

## EXERCICES DU CHAPITRE 2 :

### Assimilation du cours

#### 2.1 Couleurs de drapeaux

On considère les couleurs suivantes : rouge, vert, bleu, magenta, jaune, cyan.

On observe des drapeaux à trois bandes verticales, par exemple :

France = bleu-blanc-rouge

Italie = vert-blanc-rouge

Roumanie/Tchad = bleu-jaune-rouge

Mali = vert-jaune-rouge

Belgique = noir-jaune-rouge

- 1) donner la couleur de ces drapeaux vus au travers d'un filtre rouge
- 2) donner la couleur de ces drapeaux éclairés par une lumière rouge
- 3) donner la couleur de ces drapeaux vus à travers un filtre jaune

#### 2.2. Couleurs d'un perroquet

Vous avez trois couleurs de peinture (magenta, jaune et cyan), et vous voulez peindre le perroquet ci-contre (sa tête est rouge, son aile jaune, sa queue verte, la partie haute de son corps est cyan, et la partie basse bleue. Son bec et ses pieds sont noirs.) L'œuvre sera vue sous une illumination consistant en un faisceau rouge, un faisceau bleu, et un faisceau vert mélangés.



- a) Comment faire ?
- b) Vous avez toutes les couleurs de peinture possibles à votre disponibilité, mais vous n'avez qu'une lumière jaune pour éclairer votre œuvre. Est-il possible d'observer le perroquet avec la même coloration ? Expliquez.

#### 2.3. Potion magique

Astérix se demande si les Romains n'essayeraient pas de l'empoisonner et demande au druide Panoramix de faire une analyse spectrale de sa potion magique. Les techniques de mesure du druide donnent l'énergie de la transition électronique, et non la longueur d'onde. En particulier, il mesure, entre autres, des énergies de transition de:

$2,67 \pm 0,03 \text{ eV}$  ;  $2,01 \pm 0,03 \text{ eV}$ ,

Ils ont en leur possession de vieux tableaux des Grecs qui listent (entre autres) les longueurs d'onde suivantes pour l'oxygène et pour le lithium:

Oxygène	Longueur d'onde (nm)	Lithium	Longueur d'onde (nm)
	464,9		460,3
	615,7		610,4
	777,2		670,7
	844,6		812,6

a) Est-on en train d'essayer d'empoisonner Astérix ?

b) Une mesure subséquente donne des énergies de transition supplémentaires:  $1,60 \pm 0,03 \text{ eV}$ , et  $1,47 \pm 0,03 \text{ eV}$ .

Ces données changent-elles votre réponse ?

## Application du cours

### 2.4. Dispersion par un prisme

Reprendre les résultats déjà obtenus dans l'exercice 1.5 du chapitre 1.

1) En reprenant l'expression de l'angle de déviation  $D$ , montrer que  $D$  ne dépend que de l'angle d'incidence  $i$ , de l'indice de réfraction  $n$  et de l'angle au sommet  $A$ .

D'après la séance de cours, la déviation dépend également de la fréquence : ce paramètre est donc "caché" dans  $i$ ,  $n$  ou  $A$ . En se référant à l'expérience réalisée en cours, en déduire que l'indice de réfraction dépend de la fréquence.

2) On donne l'indice du verre ordinaire pour différentes longueurs d'onde dans le vide:

Couleur	$\lambda$ (nm)	Indice $n$
UV proche	361	1.539
bleu sombre	434	1.528
bleu-vert	486	1.523
jaune	589	1.517
rouge	656	1.514
rouge sombre	768	1.511

Calculer l'angle de déviation minimum pour ces différentes couleurs, dans le cas d'un prisme d'angle au sommet  $60^\circ$ . Quel est l'ordre des couleurs en sortie du prisme ?

3) On éclaire le prisme par un faisceau incident parallèle de lumière blanche. En supposant que l'on est au minimum de déviation pour le jaune, calculer la déviation des autres rayons.

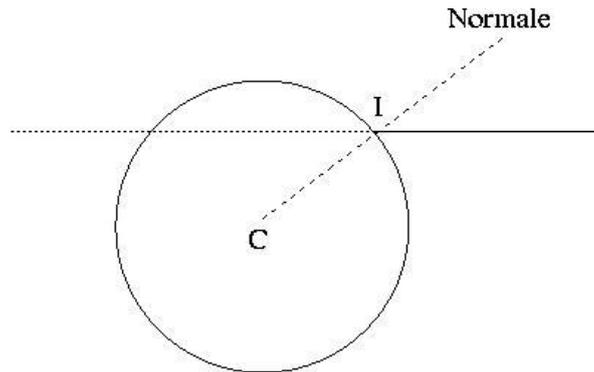
## Problèmes

### 2.5. Arc-en-ciel

Pour modéliser un arc-en-ciel, nous allons décrire la réfraction et la réflexion de la lumière dans une seule goutte d'eau assimilée à une sphère transparente d'indice optique  $n$ .

1) Trajet d'un rayon

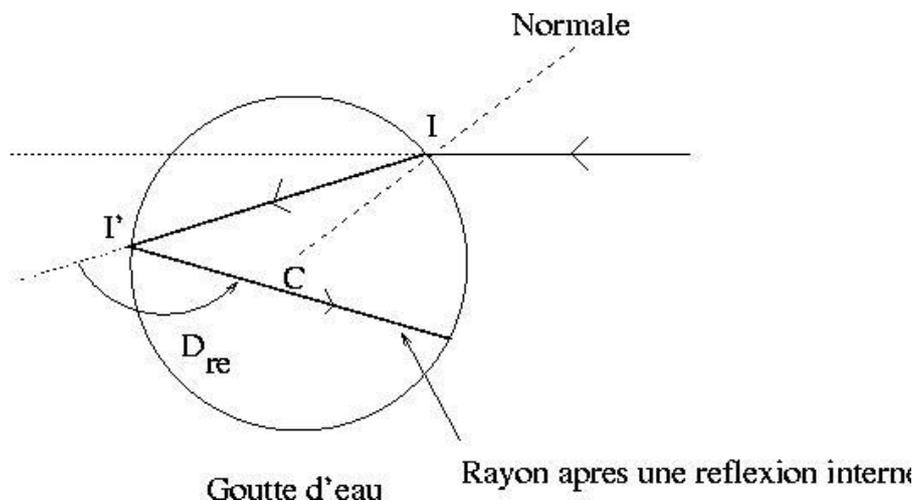
a) Un rayon lumineux pénètre dans une goutte d'eau en un point I, formant un angle  $i$  avec la normale à la surface en I. Représenter sur la figure 1 le rayon incident et le rayon réfracté ainsi que l'angle  $r$  que fait le rayon réfracté avec la normale en I.



Goutte d'eau

b) Indiquer sur la figure 1 la déviation  $D_{ra}$  d'un rayon lumineux se réfractant à l'entrée de la goutte d'eau, définie comme l'angle entre le rayon réfracté et le prolongement du rayon incident. Calculer  $D_{ra}$  en fonction des angles  $i$  et  $r$ .

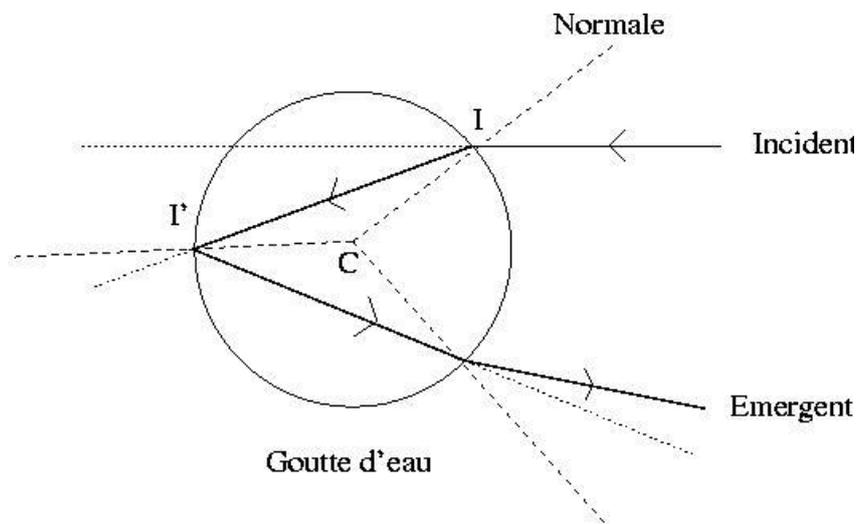
c) Le rayon traverse la goutte pour atteindre la surface opposée en I'. Exprimer l'angle  $r'$  que forme ce rayon avec la normale à la surface en I'. Exprimer en fonction de  $r$  la déviation  $D_{re}$  subie par le rayon pour une réflexion à l'intérieur de la goutte d'eau (voir figure 2)



Goutte d'eau

Rayon après une réflexion interne

d) Le rayon ressort de la goutte en étant réfracté une nouvelle fois à sa surface (figure 3). Montrer que la déviation  $D$  du rayon ressortant de la goutte par rapport à la direction du rayon incident vaut  $D = 2i + \pi - 4r$ .



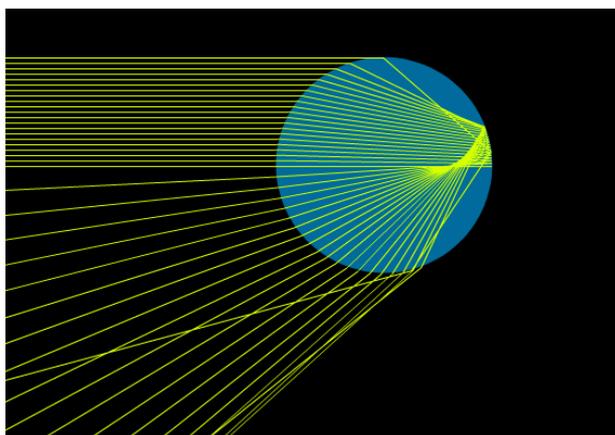
## 2) Trajet de l'ensemble de la lumière qui éclaire la goutte

Bien entendu, la lumière qui arrive sur la goutte ne se limite pas à un seul rayon. Il faut donc comprendre ce qu'il advient d'un faisceau parallèle large (la lumière provenant du Soleil).

a) Calculer la dérivée  $dD/di$  en fonction de  $dr/di$ . Montrer, en utilisant la loi de la réfraction, que l'angle  $D$  passe par un extremum  $D_m$  (on admettra qu'il s'agit d'un minimum) pour une valeur  $i_m$  de l'angle d'incidence vérifiant la relation  $\sin^2 i_m = (4 - n^2)/3$ . Calculer numériquement  $i_m$  et  $D_m$  pour  $n=1,33$ .

Remarque : comment vérifier simplement qu'il s'agit bien d'un minimum (et non d'un maximum) de déviation?

b) A l'aide du résultat de la question précédente, expliquer pourquoi la lumière renvoyée par la goutte se situe dans un "cône arrière" limité, comme illustré par la figure ci-dessous.



## 3) Dispersion des couleurs

Vous avez pu observer expérimentalement (cf expérience vue en cours) que ce cône arrière est blanc, sauf au bord où il est coloré.

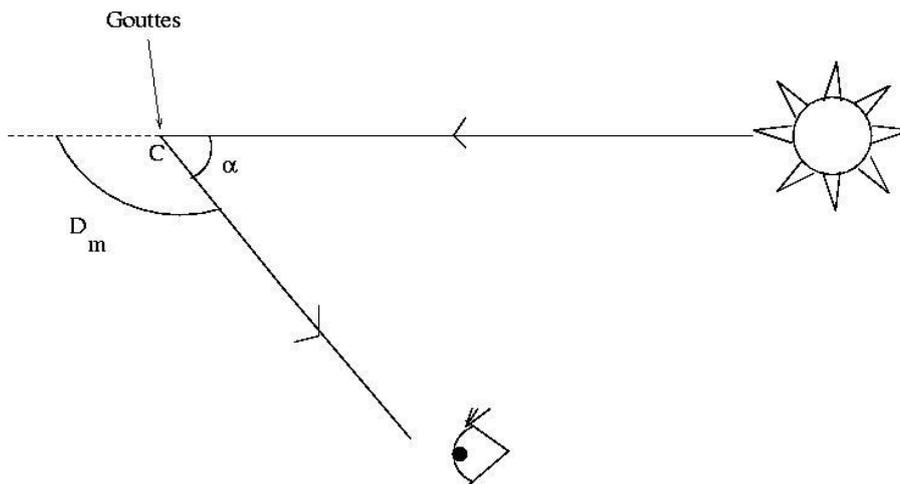
a) Expliquer pourquoi on ne voit les couleurs qu'au bord

b) On donne ci-dessous la valeur de l'indice de l'eau pour différentes fréquences (on donne en fait les longueurs d'onde dans le vide correspondantes)

	Violet	Bleu	Jaune	Rouge
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,434	0,486	0,589	0,656
$n$	1,3404	1,3372	1,3330	1,3312

On définit l'angle  $\alpha = \pi - D$ . Calculer  $\alpha$  pour les couleurs ci-dessus. Vérifier qu'on retrouve bien l'ordre des couleurs observé sur l'écran lors de l'expérience.

c) Arc observé à l'œil, provenant de nombreuses gouttes



**Géométrie :** Un observateur placé en O (figure ci-dessus) tourne le dos au soleil. Les rayons issus du soleil sont considérés parallèles entre eux et se propagent suivant la direction Soleil – Observateur. Expliquer pourquoi seules les gouttes d'eau vues par l'observateur sous l'angle  $\alpha = 180 - D_m$  correspondent à l'arc-en-ciel observé. Quelle est la symétrie de cet arc-en-ciel (justifier) ? Quel est l'axe de symétrie ?

**Couleurs :** quel est l'ordre des couleurs observé à l'œil ?

**Remarque :** l'arc décrit ici est le plus lumineux (*arc primaire*). Quand le phénomène est suffisamment lumineux, on arrive parfois à distinguer un *arc secondaire* nettement moins intense, à des valeurs d'angle plus élevées, et dont la séquence des couleurs est inversée par rapport à l'arc primaire. Cet arc secondaire s'interprète en considérant non pas une mais deux réflexions des rayons lumineux à l'intérieur de la goutte d'eau.

## EXERCICES DU CHAPITRE 3 :

### Assimilation du cours

#### 3.1 Stigmatisme et conditions de Gauss.

Le but de cet exercice est de tester la modélisation d'un miroir sphérique dans les conditions de Gauss. Pour le faire, il est nécessaire d'avoir un compas ou un rapporteur.

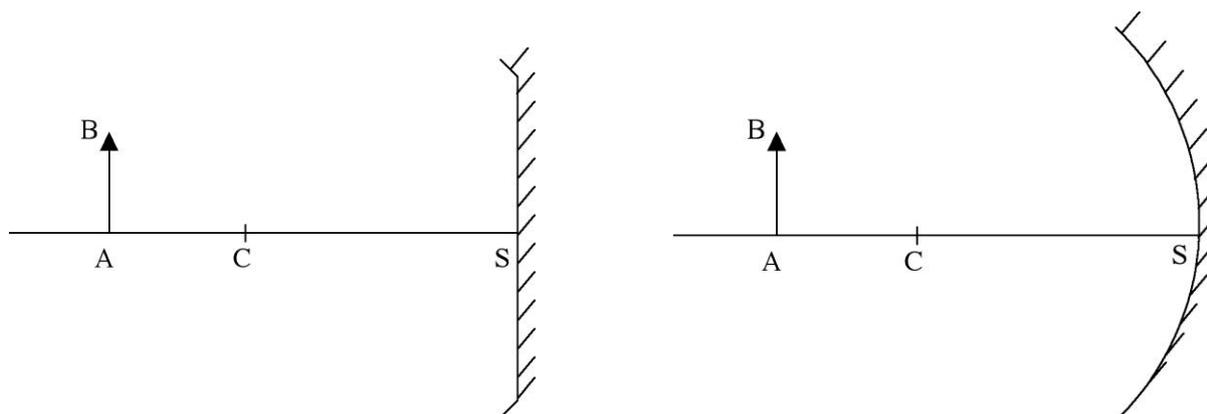
On prendra un miroir sphérique concave de rayon de courbure 4 cm. On placera un objet réel AB perpendiculairement à l'axe optique du miroir, à la position telle que  $AC = +2\text{cm}$ .

1) La hauteur de AB est de 1.5 cm. Réaliser deux constructions de l'image de AB (voir les figures ci-dessous) :

a) La construction utilisant la modélisation du miroir dans les conditions de Gauss (figure de gauche ci-dessous)

b) La "vraie" construction sans utiliser cette modélisation (figure de droite ci-dessous)

2) Recommencer les deux constructions précédentes après avoir diminué de moitié la taille de l'objet, et conclure.



#### 3.2 Constructions de l'image d'un objet réel par des miroirs sphériques concaves ou convexes.

1) On rappelle la relation de conjugaison avec origine au sommet pour un miroir sphérique de centre C et de sommet S utilisé dans les conditions de Gauss :  $\frac{1}{SA'} + \frac{1}{SA} = \frac{2}{SC}$ . Retrouver rapidement la position des foyers objet et image.

2) Réaliser les constructions géométriques nécessaires pour trouver l'image d'un objet réel AB (perpendiculaire à l'axe optique du miroir) par un miroir concave de rayon donné utilisé dans les conditions de Gauss dans les cas suivants :

- AB à gauche de C
- A confondu avec C
- AB entre C et F
- A confondu avec F
- AB entre F et S

On peut éventuellement réaliser toutes les constructions sur une seule figure, en attribuant le

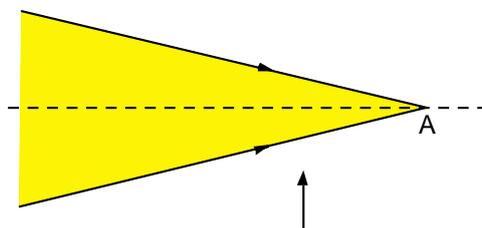
même numéro à la position de l'objet et à celle de l'image lui correspondant.

a) Dans chaque cas, donner la nature de l'image (réelle ou virtuelle, droite ou inversée, plus grande ou plus petite que l'objet). Donner, le cas échéant, les applications correspondantes.

b) Retrouver la condition sur la nature réelle ou virtuelle de l'image en utilisant la relation de conjugaison.

3) Mêmes questions pour un miroir convexe de même rayon de courbure (en valeur absolue) que le miroir concave précédent, en plaçant l'objet réel AB à différents endroits. Vérifier le résultat obtenu à l'aide de la relation de conjugaison. Quelles sont les applications des miroirs convexes?

### 3.3 Objets/images réel(le)s/virtuel(le)s avec un miroir plan.



On considère un faisceau convergent en un point A provenant d'un système optique précédent, non représenté. A est donc l'image d'un point objet (non représenté) par ce système optique.

1) De quelle nature est l'image A?

2) On intercale un miroir plan à l'endroit marqué d'une flèche.

a) A est maintenant un objet pour ce miroir plan. De quelle nature est cet objet?

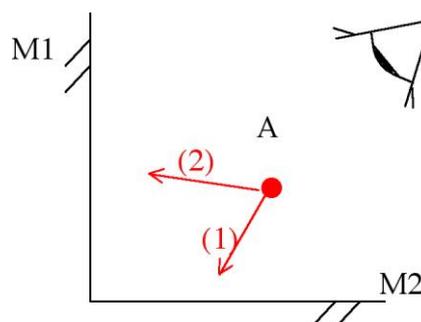
b) Le miroir est perpendiculaire à l'axe en pointillés. Réaliser la construction géométrique afin de trouver l'image A' de A par le miroir plan. De quelle nature est-elle?

c) Le miroir est incliné à  $45^\circ$  par rapport à l'axe en pointillés. Répondre aux mêmes questions qu'en b)

### 3.4 Deux miroirs.

On considère un ensemble de 2 miroirs plans M1 et M2 formant un angle droit (schéma ci-dessous).

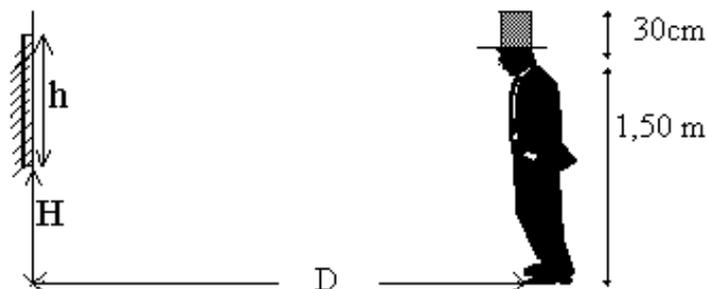
Un petit objet lumineux A est placé dans l'angle formé par les miroirs.



- 1) Combien l'objet A a-t-il d'images ? Combien d'images un observateur peut-il en apercevoir ?
- 2) Placer avec précision les images du point A.
- 3) Représenter les trajets des rayons lumineux (1) et (2) dans le système.
- 4) Compléter le schéma en faisant apparaître les faisceaux de lumière arrivant dans l'œil de l'observateur et les images qu'il peut alors voir.
- 5) On reprend le même schéma en ajoutant un axe Ox le long de M2 et un axe Oy le long de M1
  - a) Soit un rayon lumineux L qui vient frapper le miroir M2. Les composantes dans le plan (Oxy) du vecteur unitaire colinéaire et de même sens que le rayon sont  $L_x$  et  $L_y$ . Donner les composantes de ce vecteur après réflexion dans le miroir M2.
  - b) Soit un rayon lumineux K qui vient frapper le miroir M1. Les composantes du vecteur unitaire colinéaire et de même sens que le rayon sont  $K_x$  et  $K_y$ . Donner les composantes de ce vecteur après réflexion dans le miroir M1.
  - c) Que se passe-t-il si le rayon K après avoir été réfléchi par M1 vient frapper M2 ?

### Application du cours

#### 3.5 Champ d'un miroir plan ou convexe



Une personne est placée à une distance  $D$  d'un miroir plan. Avec son chapeau, elle mesure 1,80 m, ses yeux étant à 1,50 m du sol.

Le champ d'un miroir est la région de l'espace vue par un observateur à travers un miroir.

- 1.a) Déterminer graphiquement le champ du miroir pour que cette personne se voie entièrement dans le miroir. En déduire à quelle hauteur  $H$  du sol doit être le miroir, et quelle doit être sa hauteur  $h$ .
  - b) Tracer entre le miroir et le personnage les rayons lumineux extrêmes vers le haut et vers le bas vus par le personnage. Indiquer sur le dessin l'angle d'ouverture entre ces rayons.
  - c) Tracer les rayons extrêmes *arrivant sur le miroir* et vus par le personnage. Quel est l'angle qu'ils forment ?
2. On remplace le miroir plan par un miroir convexe de rayon  $R$  et de même taille que le miroir plan précédent. Prendre pour axe optique de ce miroir l'axe horizontal passant par le centre du miroir plan de la question précédente.

Tracer les rayons extrêmes arrivant sur le miroir et vus par le personnage. Quel est l'angle qu'ils forment ? L'indiquer sur le dessin, et le comparer qualitativement avec l'angle obtenu

précédemment avec un miroir plan. Conclure sur le champ d'un miroir convexe par rapport à celui d'un miroir plan.

### 3.6 Où le pêcheur voit-il le poisson?

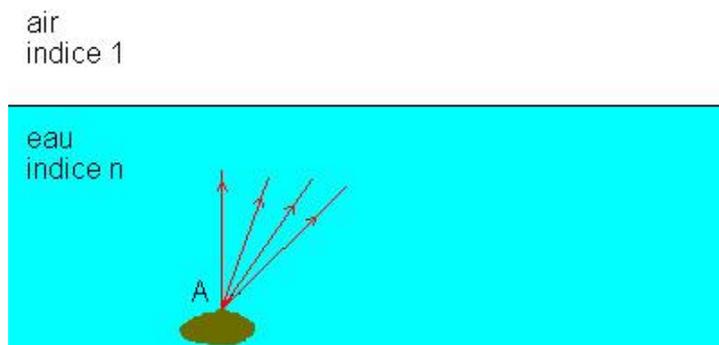
Le but de cet exercice est d'interpréter l'expérience 6 du chapitre 3 du poly de cours/TP. **Il nécessite l'usage d'un rapporteur.**

Le schéma ci-dessous représente un point objet A (un point d'un poisson par exemple) dans de l'eau d'indice  $n = 1,33$ . Au-dessus, on trouve de l'air d'indice 1 (milieu dans lequel se trouve le pêcheur).

1) Un point-objet a-t-il une image par un dioptre plan?

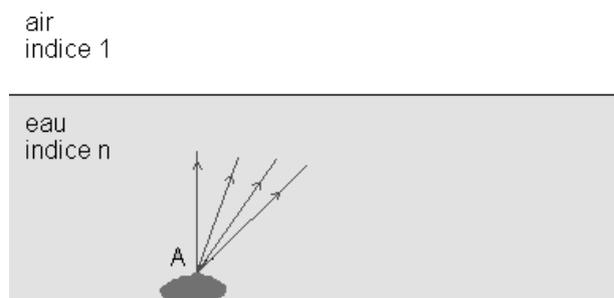
Tracer plusieurs rayons issus de A, ainsi que leur devenir après traversée du dioptre : réaliser ces tracés précisément, avec les valeurs numériques des angles (utiliser un rapporteur). Tracer alors les prolongements arrière des rayons situés dans l'air.

Semblent-ils tous provenir d'un même point ? Peut-on parler d'image géométrique du point A ? Que peut-on dire sur le stigmatisme du dioptre plan ?



2) Pourquoi voit-on néanmoins une image (nette)?

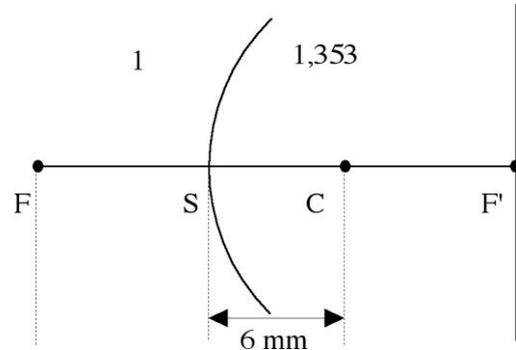
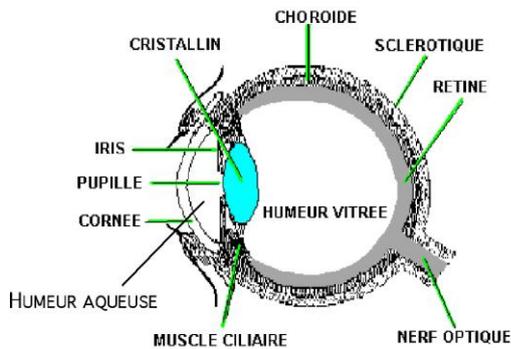
Reprendre la construction ci-dessus en ne considérant que les rayons pouvant atteindre l'œil de l'observateur. Quelle conclusion en tirez-vous ? L'« image » dépend-elle de la position de l'observateur ?



3) On se place dans le cas particulier où le pêcheur regarde le poisson quasiment à la verticale de celui-ci. A quelle profondeur apparente lui apparaît-il par rapport à sa profondeur réelle? Faire l'A. N.

## Problème

### 3.7 Modélisation de l'œil par un dioptre sphérique



#### **œil réduit**

L'œil est constitué de plusieurs milieux transparents permettant à la lumière d'atteindre la rétine : cornée, humeur aqueuse, cristallin et humeur vitrée. Ces milieux ont des indices voisins de celui de l'eau.

La modélisation de l'œil la plus simple consiste alors à considérer l'ensemble comme un seul milieu d'indice moyen égal à 1,35. On parle du modèle de "l'œil réduit".

L'œil est alors équivalent à un seul dioptre sphérique qui sépare l'air d'un milieu d'indice  $n' = 1,35$ . Le rayon de courbure est alors celui de la cornée égal à 6 mm.

#### 1. Distances focales

a) Etablir l'expression des distances focales  $\overline{SF}$  et  $\overline{SF'}$  du dioptre sphérique, distances définies à partir du sommet S du dioptre, en fonction des données  $n, n'$  et  $\overline{SC}$ .

b) Dans le cas de l'œil réduit qui nous intéresse ici, calculer les valeurs numériques des distances focales  $\overline{SF}$  et  $\overline{SF'}$  (cette distance focale image correspond à la valeur de la profondeur de l'œil).

On vérifiera que, pour un dioptre sphérique, les segments FS et CF' sont symétriques par rapport au milieu du segment SC, et que  $-\frac{\overline{SF'}}{\overline{SF}} = \frac{n'}{n}$

2. Dans quelles conditions la relation de conjugaison pour un dioptre sphérique est-elle valable ?

La pupille constitue un diaphragme qui limite, à l'entrée de l'œil, le faisceau de rayons utiles à la formation de l'image finale sur la rétine. La pupille a en moyenne un rayon de 2 mm. Quand on observe un objet à l'infini, on peut considérer qu'un rayon incident parallèle à l'axe optique et situé à une distance de 2 mm de cet axe, arrive au point F'. Faire un schéma, et en déduire l'angle moyen sous lequel on voit un objet à l'infini pour justifier a posteriori que l'on est dans les bonnes conditions.

3 – On suppose maintenant que l'objet AB que l'on regarde n'est plus à l'infini, mais s'est rapproché de l'œil. Le point A se trouve à une distance de 25 cm du sommet S.

a) Où se trouverait l'image A' correspondante ? Qu'en conclure ?

b) En fait, l'œil accommode : sous l'action des muscles auxquels il est attaché, le cristallin se déforme. Justifier qualitativement pourquoi, si l'on veut voir nettement l'image d'un objet qui se rapproche de l'œil, le cristallin doit être plus convergent.

c) Dans le modèle d'œil réduit que nous prenons ici en considération, l'accommodation se traduit par un déplacement du centre de courbure, noté maintenant  $C'$ , le sommet S du dioptré et la rétine demeurant fixes. Déterminer la valeur du nouveau rayon de courbure  $\overline{SC'}$  qui permet que l'image de l'objet A' soit de nouveau sur la rétine.

### **Pour aller plus loin**

#### **3.8 Image de la Lune par un télescope**

Les grands télescopes sont munis d'un collecteur concave, de forme sphérique ou parabolique. Ils sont utilisés pour réaliser des images d'objets lointains. Nous prenons ici comme exemple d'objet la Lune, dont le point inférieur A est sur l'axe et le point supérieur B au-dessus de l'axe avec un angle d'inclinaison  $\alpha$ . Les points A et B sont tous deux considérés pratiquement à l'infini.

Que peut-on dire sur les rayons reçus par le télescope issus du point A? Même question pour ceux issus du point B. En déduire l'image A' de A et l'image B' de B par construction géométrique. Où est l'image A'B' de la Lune? Exprimer sa taille en fonction de la distance focale du télescope et de l'angle  $\alpha$

Pour un télescope de focale 1 m, la taille de l'image obtenue est de 1 cm environ. En déduire l'angle sous lequel on voit la Lune.

## EXERCICES DU CHAPITRE 4 :

### Assimilation du cours

#### 4.1 Image d'une diapositive sur un écran par une lentille convergente

On s'intéresse à la situation où une lentille convergente donne sur un écran l'image d'un objet lumineux (diapositive, par exemple).

##### I. Introduction

- Qualifier l'objet et l'image.
- Faire un schéma de la situation en utilisant le modèle des lentilles minces.

##### II. Étude qualitative

On note  $D$  la distance de l'objet à l'écran,  $f'$  la distance focale de la lentille.

- Montrer par un raisonnement qualitatif qu'il existe une valeur minimale  $D_{\min}$  de  $D$  en deçà de laquelle on ne peut plus obtenir l'image de l'objet et ce, quelle que soit la position de la lentille. Quelle est cette valeur ?
- Montrer, en raisonnant sur le schéma précédent, que si la distance objet-écran est fixée et telle que  $D > D_{\min}$ , il existe 2 positions possibles pour la lentille permettant d'obtenir l'image de l'objet.

##### III. Étude analytique

O désignant le centre optique et A le point de l'objet sur l'axe, on pose  $\overline{OA} = x$ .

- Montrer que les positions de l'objet et de l'écran sont alors telles que  $x^2 + Dx + Df' = 0$
- Déduire de cette relation l'expression de la distance minimale  $D_{\min}$ .
- En déduire également que, lorsque  $D > D_{\min}$  est fixée, il existe bien 2 positions de la lentille. Préciser lesquelles.

#### 4.2 Image d'un objet virtuel par une lentille convergente ou divergente (complément du cours)

*Penser à représenter l'objet virtuel en pointillés sur vos constructions...*

##### I. Image d'un objet virtuel par une lentille convergente

- Construire géométriquement l'image d'un objet virtuel par une lentille convergente. De quelle nature est cette image? Existe-t-il plusieurs cas possibles suivant la position de l'objet virtuel?
- Retrouver le résultat précédent en utilisant la relation de conjugaison.

**II. Image d'un objet virtuel par une lentille divergente :** répondre aux mêmes questions pour une lentille divergente

### 4.3 Accommodation de l'œil

On modélise ici l'œil comme une lentille mince convergente de distance focale au repos

$$f' = 22 \text{ mm.}$$

L'œil regarde un objet situé à son punctum proximum.

- Si l'œil n'accommode pas : réaliser la construction géométrique afin de trouver la position de l'image. Commenter le résultat.
- Si l'œil accommode : réaliser la construction géométrique correspondante.
- Calculer la variation relative de la distance focale entre les deux cas extrêmes (œil n'accommodant pas, et œil regardant un objet au punctum proximum). Faire l'A. N.

## Application du cours

### 4.4 Correction d'un œil myope

Un œil myope est représenté par une lentille mince convergente  $L_2$  de distance focale au repos  $f'_2 = 2 \text{ cm}$ . Elle est trop courte d'une distance de 2 mm pour que l'image d'un objet à l'infini se forme sur la rétine. Pour corriger l'œil, on place un verre correcteur constitué d'une lentille mince  $L_1$  de distance focale  $f'_1$ .

- Le verre correcteur est un verre de lunettes placé 1 cm en avant de l'œil. Donner la valeur de  $f'_1$ .
- Le verre correcteur est une lentille accolée à l'œil. Donner la valeur de  $f'_1$ .

### 4.5 Système de deux lentilles minces accolées

On considère deux lentilles minces accolées  $L_1$  (de distance focale  $f'_1$ ) et  $L_2$  (de distance focale  $f'_2$ ). Montrer que la distance focale de la lentille équivalente est donnée par :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2}$$

### 4.6 Association de deux lentilles minces convergentes

On effectue une image réelle A"B" d'un objet réel AB à l'aide d'une première lentille convergente  $L_1$ . Réaliser la construction géométrique correspondante.

On cherche maintenant à voir ce qu'on obtient lorsqu'on met une deuxième lentille convergente  $L_2$  à la suite de  $L_1$ , en fonction de la position de  $L_2$ . On appellera A'B' l'image finale obtenue par le système des deux lentilles. Comment doit-on placer  $L_2$  pour que l'image finale soit (attention, le sens est défini par rapport à celui de AB):

- réelle droite?
- réelle inversée?
- virtuelle inversée?

Réaliser les constructions correspondant à chaque cas, et préciser de quelle nature est l'objet A"B" pour la lentille  $L_2$ .

## Problème

### 4.7 Téléobjectif (suite de la partie cours)

1) Reprendre le principe du téléobjectif vu en cours-TP et faire le schéma correspondant (si on a toutes les données nécessaires, on peut faire un schéma à l'échelle). Ce schéma doit comporter:

- l'objet AB et la lentille  $L_0$  (convergente) qui forment un objet à l'infini pour les éléments suivants du montage.
- Intercaler  $L_1$  (convergente) et trouver l'image qu'elle forme de l'objet à l'infini, notée  $A_1B_1$ .
- Ajouter  $L_2$  (divergente) à la suite de  $L_1$ .  $A_1B_1$  est pour elle un objet. Sachant qu'on veut qu'elle en forme une image réelle, comment doit-elle être placée? De quelle nature est l'objet  $A_1B_1$  pour  $L_2$ ? Ajouter  $L_2$  sur le schéma, et former l'image  $A_2B_2$  de  $A_1B_1$ .

2) Déterminer par le calcul la position et la taille de l'image  $A_2B_2$ . Comparer aux valeurs expérimentales.

## Pour aller plus loin

### 4.8 Pouvoir séparateur de l'oeil

Dans la pratique, on sait qu'on peut distinguer l'épaisseur d'un cheveu : on dit que le *pouvoir séparateur de l'oeil* correspond à l'épaisseur d'un cheveu. En fait, le pouvoir séparateur de l'œil est un *angle* : par définition, c'est l'angle le plus petit sous lequel on arrive à distinguer deux points.

On se propose de retrouver ce résultat dans le cadre du modèle où l'œil, de profondeur 22 mm, est assimilé à une lentille convergente.

Quand on veut distinguer deux points extrêmes d'un objet AB dans les meilleures conditions possibles, on place spontanément cet objet au punctum proximum (PP), qui, pour un œil normal, se situe à environ 25 cm de l'œil. On considère alors que pour pouvoir séparer les images de deux points A et B, il faut que ces images  $A'$  et  $B'$  impressionnent deux cônes séparés par au moins un cône intermédiaire. Les cônes qui tapissent la rétine ont un diamètre d'environ 4 microns.

1 - Faire un schéma montrant la situation (objet AB situé au PP, œil assimilable à une lentille convergente, image  $A'B'$  supposée formée sur la rétine).

2 - Quelle doit être la distance minimale qui sépare les deux points images  $A'$  et  $B'$  ? En déduire l'angle sous lequel est vu l'objet AB.

3 - Quelle est la distance qui sépare les deux points objets A et B ? Comparer la valeur obtenue à celle de l'épaisseur d'un cheveu.

## INDEX

*Les numéros indiqués renvoient aux numéros des pages*

Aberration : 93  
Absorption : 57, 58, 62, 67  
Aplanétique : 80, 95  
Axe optique : 79-82, 88, 90, 105, 108, 109, 140, 142, 144  
Bâtonnet : 61, 67, 114  
Centre optique : 103-104, 146  
Chambre noire : 124  
Champ : 123-124, 142-143  
Conditions de Gauss : 80, 82, 93, 95, 102-103, 125, 140  
Cône : 61, 63, 67, 114, 148  
Corps noir : 55, 67  
Couleur : 44-47, 58-61, 64, 67, 135  
Déviation : 27, 33-36, 47, 51, 130-133, 136-138, 159  
Diffraction : 10, 29, 52, 67  
Diffusion : 29, 59, 73  
Dioptre : 20, 22, 34, 39, 48, 86, 102, 125  
Dioptre plan : 22, 29, 33, 86-87, 143  
Dioptre sphérique : 21, 86, 88, 90-92, 95, 103-104, 114, 125, 144-145  
Dispersion : 14, 33, 46-51, 53, 136, 138, 151-153, 158  
Distance focale : 82-84, 103-108, 112, 114, 118, 120-125, 144-147  
Effet photoélectrique : 15, 18  
Emission (spontanée, stimulée) : 56, 65  
Fibre optique : 30, 32, 66, 132-133  
Foyer objet : 83, 91-92, 104, 110-111, 124, 125  
Foyer image : 82-83, 91-92, 103, 108, 124-125, 161  
Grandissement : 110, 119-121, 123, 125  
Grossissement : 123  
Homogène (milieu) : 10, 14-15, 20, 28, 33, 134  
Image : 72

Image optique : 72, 74, 95  
Image réelle : 75-76, 95, 107-109, 113, 123, 147-148  
Image virtuelle : 75, 95, 108, 123  
Incident (rayon, plan, point) : 16, 20, 35, 108  
Indice optique : 14, 38-39  
Interférences : 10, 61  
Isotrope (milieu) : 14, 15, 20  
Lentille : 100, 102  
Lentille mince : 102, 104  
Longueur d'onde : 12, 14, 27, 29, 39, 46, 55-57, 59, 62, 67, 129, 135  
Lunette astronomique : 10, 100, 124  
Microscope : 10, 100, 123-124  
Miroir concave : 79, 81-82, 83, 93, 140-141  
Miroir convexe : 81-83, 141-143  
Miroir plan : 16, 77-80, 93, 95, 131-132, 141-143  
Miroir sphérique : 77, 79-84, 90, 92, 95, 131-132, 140  
Monochromatique : 12, 13, 33, 46, 51  
Objet : 72-74, 110  
Objet réel : 76, 95, 108-112, 140-141  
Objet virtuel : 76, 95, 141  
Optique géométrique : 10, 30, 72  
Photon : 15, 18, 56, 65  
Plan focal : 93, 105, 123  
Plane (onde) : 13-14, 27-28  
Prisme : 10, 31, 33-35, 39, 44-51, 53, 58, 67, 130-131, 133, 136  
Propagation rectiligne : 10, 37  
Punctum remotum, punctum proximum : 114, 116, 147-148  
Rayon de courbure : 79, 82, 88  
Rayon lumineux : 15, 20  
Réflexion : 10, 16, 20-23, 28, 39, 81, 129, 134, 137, 139, 142  
Réflexion totale : 16, 27, 30-31, 33, 133  
Réfraction : 10, 16, 19-24, 26-27, 29, 34, 39, 45, 89-90, 102, 129, 130, 134, 137-138, 159  
Réfringence : 21  
Relation de conjugaison : 82-83, 90-91, 95, 102-103, 105, 107, 109, 125, 140-141, 144, 146  
Réseau : 52, 53, 67  
Source primaire, source secondaire : 73, 59

Snell-Descartes (lois de) : 20-24, 26, 34, 39, 78, 86, 102, 131

Spectre (de raies, continu, discret) : 18, 52-54, 56-59, 67

Spectroscopie : 51, 56, 67

Sphérique (onde) : 13, 28

Stigmatisme (rigoureux, approché) : 73-75, 78, 80, 86, 91, 95, 101, 140, 143

Surface d'onde : 12-13

Système optique : 33, 73, 75-76, 80, 83, 95

Système optique centré : 80, 83

Téléobjectif : 119-121, 148

Télescope : 84, 93, 123-124, 145

Transparent (milieu) : 10, 14, 15, 20, 59

## BIBLIOGRAPHIE :

### Ouvrages :

- *Physique*, E. Hecht (voir les chapitres d'optique), ed. De Boeck Université (1999)
- *Optique*, E. Hecht, ed. Pearson Education (2005)
- *Cours de physique, Optique*, J-P Parisot, P. Segonds et S. Le Boiteux, ed. Dunod (2003)
- *Optique, fondements et applications*, J-P Pérez, ed. Masson (1994)
- *Optique*, G. Bruhat, ed. Dunod (2004)
- *Lumières, Une introduction aux phénomènes optiques*, P. Léna et A. Blanchard, ed. InterEditions (1990)
- *Optique*, collection H-Prépa, ed. Hachette (1995)
- *Les instruments d'optique*, L. Dettwiller, ed. Ellipses (1997)

### Sites Internet :

- <http://www.wikipedia.fr/>
- <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/mnuopgeo.html>
- <http://formation.etud.u-psud.fr/pcsm/physique/optigeo/index.htm>

et bien d'autres que vous trouverez par vous-mêmes...

### Cours interactif en ligne pour le Phys102 :

<http://formation.u-psud.fr> (entrer votre identifiant et votre mot de passe)

---

**Téléchargez ce polycopié en pdf (et en couleurs !) à l'adresse donnée par votre enseignant.**