

JEAN-PAUL BELLIER, CHRISTOPHE BOULOY, DANIEL GUÉANT

EXPÉRIENCES **DE PHYSIQUE**

**OPTIQUE, MÉCANIQUE,
ONDES, FLUIDES**
CAPES/CAPLP/AGRÉGATION

5^e édition

DUNOD

Conception de maquette de couverture : Hokus Pokus Création

Mise en page : Lumina Datamatics

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris 2020

11 Rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-080962-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.



Table des matières

| | | |
|----------|---|-----|
| 1 | Réfraction de la lumière | 1 |
| | 1. Rappels théoriques | 1 |
| | 2. Matériel | 5 |
| | 3. Réfraction de la lumière | 5 |
| | 4. Étude de la lentille demi-boule sur le tableau magnétique | 9 |
| | 5. Applications | 11 |
| 2 | Lentilles. Œil et Vision | 21 |
| | 1. Rappels théoriques | 21 |
| | 2. Œil et vision | 30 |
| | 3. Focométrie : mesure de distances focales | 34 |
| | 4. Mise en évidence des défauts des lentilles | 40 |
| | 5. Modèle de l'œil | 44 |
| 3 | Instruments d'optique | 64 |
| | 1. Le microscope | 64 |
| | 2. Le télescope | 73 |
| | 3. La lunette astronomique | 84 |
| | 4. L'appareil Photographique | 88 |
| 4 | Spectroscopie et couleurs | 113 |
| | 1. Rappels théoriques | 113 |
| | 2. Spectres d'émission : expériences qualitatives | 118 |
| | 3. Expériences quantitatives : mesure d'une longueur d'onde | 121 |
| | 4. Spectres d'absorption | 123 |
| | 5. Lumière blanche et synthèse additive | 123 |
| | 6. Visualisations de spectres à l'aide d'un spectrophotomètre | 125 |
| | 7. Couleurs des objets. Synthèse soustractive | 127 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 5 | Propagation libre et guidée de la lumière | 141 |
| | 1. Rappels théoriques | 141 |
| | 2. Étude expérimentale | 151 |
| 6 | Optique ondulatoire : interférences et diffraction | 168 |
| | 1. Interférences lumineuses : Rappels | 168 |
| | 2. Diffraction | 183 |
| | 3. Étude expérimentale | 187 |
| 7 | Optique ondulatoire : polarisation et dualité onde-corpuscule | 206 |
| | 1. Polarisation de la lumière | 206 |
| | 2. Dualité onde corpuscule : Expérience de Hertz | 223 |
| | 3. Mesure de la constante de Planck | 227 |
| 8 | Stockage optique, image numérique, capteur CCD | 231 |
| | 1. Données numériques | 231 |
| | 2. Le principe du stockage optique sur CD | 232 |
| | 3. Images numériques | 235 |
| | 4. Formation d'une image numérique couleur | 240 |
| 9 | Cinématique et dynamique newtonienne | 255 |
| | 1. Généralités | 255 |
| | 2. Les trois lois de Newton | 258 |
| | 3. Relativité du mouvement | 263 |
| | 4. Mouvements dans des champs de forces uniformes | 265 |
| | 5. Simulation informatique | 273 |
| 10 | Conservation et non conservation de l'énergie mécanique | 284 |
| | 1. Introduction | 284 |
| | 2. Frottements solides | 285 |
| | 3. Frottement fluide | 289 |
| | 4. Cas de conservation de l'énergie mécanique | 295 |
| | 5. Cas de non conservation de l'énergie mécanique | 299 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 11 | Études statique et dynamique d'un solide mobile autour d'un axe fixe | 316 |
| | 1. Rappels théoriques | 316 |
| | 2. Vérification expérimentale du théorème des moments | 321 |
| | 3. Étude dynamique | 324 |
| 12 | Oscillateurs en mécanique | 339 |
| | 1. Rappels théoriques | 339 |
| | 2. Oscillateurs harmoniques | 349 |
| | 3. Oscillations libres amorties d'une masse suspendue à un ressort | 354 |
| | 4. Oscillateur paramétrique | 356 |
| | 5. Oscillateur forcé : resonance en mécanique et en acoustique | 357 |
| | 6. Oscillations forcées d'une barre d'aluminium | 361 |
| | 7. Oscillateurs couplés | 363 |
| 13 | Ondes mécaniques et électriques | 384 |
| | 1. Ondes sur une corde vibrante | 384 |
| | 2. Ondes à la surface de l'eau | 389 |
| | 3. Ondes acoustiques | 392 |
| | 4. Onde électrique dans un câble coaxial | 414 |
| | 5. Simulation de la propagation d'une onde progressive | 421 |
| 14 | Statique et dynamique des fluides | 437 |
| | 1. Rappels théoriques | 437 |
| | 2. Pression exercée par un fluide en équilibre | 446 |
| | 3. La poussée d'Archimède | 449 |
| | 4. Tension superficielle | 451 |
| | 5. Vérification de la loi de Boyle-Mariotte | 453 |
| | 6. Expériences de dynamique des fluides | 456 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 15 | Présentation des interfaces et logiciels | 466 |
| 1. | Carte Microcontrôleur Arduino Uno | 466 |
| 2. | Audacity | 468 |
| 3. | Regressi | 469 |
| 4. | Python | 471 |
| 5. | Paint | 471 |

Avant-Propos

Cet ouvrage s'adresse principalement aux candidats des concours de recrutement de l'éducation nationale : CAPES, Agrégation et CAPLP et de l'enseignement privé : CAFEP, CAFEP-CAPLP. Les collègues en poste peuvent aussi l'utiliser, de nombreuses expériences pouvant être mises à profit lors de cours ou de TP. De même les étudiants des masters scientifiques et de classes préparatoires peuvent y trouver un intérêt certain. Cette édition a été profondément remaniée, pour tenir compte de l'évolution des programmes et des concours. Certains contenus ont été fortement modifiés, en particulier au niveau des propositions d'expériences. Conformément aux instructions officielles concernant les programmes de l'enseignement scientifique, de nombreuses expériences proposées font appel à l'utilisation d'outils numériques variés : logiciels de simulation, microcontrôleur, langage de programmation, logiciels tableurs, etc.

Les programmes complets proposés dans cet ouvrage sont disponibles au téléchargement sur le site de l'éditeur : www.dunod.com, sur la page de l'ouvrage.

Cet ouvrage regroupe les thèmes concernant l'optique, la mécanique, les ondes et la mécanique des fluides.

Un second des mêmes auteurs est consacré à l'électricité, l'électromagnétisme, l'électronique et aux transferts thermiques.

Nous n'avons pas voulu suivre un programme précis de concours, ceux-ci évoluant avec le temps, mais avons choisi les principaux thèmes que tout étudiant devrait maîtriser pour se présenter aux concours.

Les nombreux rappels théoriques et exercices traités pour chacun des thèmes abordés devraient constituer une base de travail aussi bien pour la préparation des épreuves de physique des concours que dans le cadre des études. En effet, nous avons essayé de présenter, autour d'un thème expérimental, d'une part les notions indispensables à connaître et d'autre part des exercices s'y rapportant.

Chaque chapitre donne la priorité au domaine expérimental en vue d'aider le candidat à préparer la difficile épreuve orale des concours où intervient la présentation d'expériences. Les manipulations décrites dans cet ouvrage, avec un mode opératoire détaillé, font le plus souvent appel au matériel « standard » que l'on trouve dans les établissements d'enseignement secondaire.

Chaque thème de cet ouvrage répond très largement aux exigences de l'intitulé d'un sujet d'une épreuve orale. Ces intitulés étant généralement assez ouverts, diverses approches sont possibles pour aborder une expérience le jour de l'épreuve ; au candidat de faire des choix judicieux parmi celles proposées pour bâtir de façon cohérente son exposé tout en respectant le niveau de classe imposé par son sujet et en justifiant ses choix dans le cadre d'une pratique professionnelle. Attention, tout expérimentateur sait qu'une manipulation d'apparence simpliste peut révéler de mauvaises surprises lors de sa réalisation,

aussi toutes les expériences décrites dans cet ouvrage doivent être travaillées durant la préparation à l'épreuve du concours.

Il nous semble important de citer quelques phrases extraites du rapport du jury du CAPES Externe 2019 :

« Le jury sait bien que, à la différence de leurs compétences scientifiques, en physique et en chimie, les compétences pédagogiques (devant élèves) des candidats sont en cours de construction. Il ne s'attend donc pas à ce qu'ils les maîtrisent comme un professeur chevronné, mais qu'ils soient conscients des exigences du métier de professeur dans ce domaine et démontrent leur maîtrise de ces compétences à un niveau modéré ainsi que leur aptitude à progresser. Toutefois, ceci n'est possible qu'à condition de posséder un socle suffisant en termes de maîtrise disciplinaire, or celui-ci est de plus en plus fragile, voire inacceptable, chez un nombre croissant de candidats. De plus, les constats effectués lors de la précédente session concernant l'épreuve de mise en situation professionnelle sont confirmés pour cette session. Le nombre de candidats montrant un manque patent de connaissances et de compétences en matière expérimentale continue d'augmenter. »

Nous souhaitons que cet ouvrage puisse aider :

- Les candidats dans la préparation aux concours à acquérir un socle suffisant en termes de maîtrise disciplinaire et des connaissances et des compétences en matière expérimentale ;
- Les étudiants dans l'acquisition des savoirs disciplinaires indispensables au sortir d'un master ;
- Les collègues dans leur pratique professionnelle quotidienne.

Les auteurs

Réfraction de la lumière

1 Rappels théoriques

1.1 Généralités

L'approximation de l'optique géométrique consiste à supposer que, dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite suivant les rayons lumineux.

La célérité de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage.

Chaque milieu transparent est caractérisé par un indice absolu $n = \frac{C}{v}$ où C représente

la célérité de la lumière dans le vide et v la célérité de la lumière dans le milieu considéré. On peut remarquer que n est sans dimension et est toujours supérieur à 1.

Exemples

- | | |
|----------------------------------|---|
| • indice du vide $n = 1$ | Célérité de la lumière $v = C$ |
| • indice de l'air $n = 1,000293$ | Célérité de la lumière $v \approx C$ |
| • indice de l'eau $n = 1,33$ | Célérité de la lumière $v \approx 0,75 C$ |
| • indice du verre $n = 1,5$ | Célérité de la lumière $v \approx 0,66 C$ |

REMARQUE l'indice dépend de la longueur d'onde, c'est le phénomène de dispersion. Plus la longueur d'onde est grande plus l'indice de la substance, pour cette radiation, est faible. (Règle de Cauchy : $n \approx A + B/\lambda^2$)

Une surface séparant deux milieux d'indice différent est appelée dioptre.

Par convention les angles sont définis par rapport à la normale au dioptre et sont orientés de la normale vers le rayon lumineux.

La déviation que subit un rayon lumineux, à la traversée d'un dioptre est l'angle qui existe entre le prolongement du rayon incident et le rayon émergent.

Le chemin optique entre deux points AB est, pour un milieu homogène d'indice n , la grandeur $L_{AB} = n.AB$.

1.2 Lois de Descartes

La démonstration des lois de Descartes repose sur le principe de Fermat. Ce principe dit que le trajet effectivement suivi par la lumière du point A au point B est celui pour lequel le chemin optique est extrémal.

a) Réflexion et réfraction

Le rayon réfracté et le rayon réfléchi sont dans le plan d'incidence.

Les angles de réflexion et d'incidence sont tels que $i_1 = i'$.

Les angles de réfraction et d'incidence sont tels que $n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$.

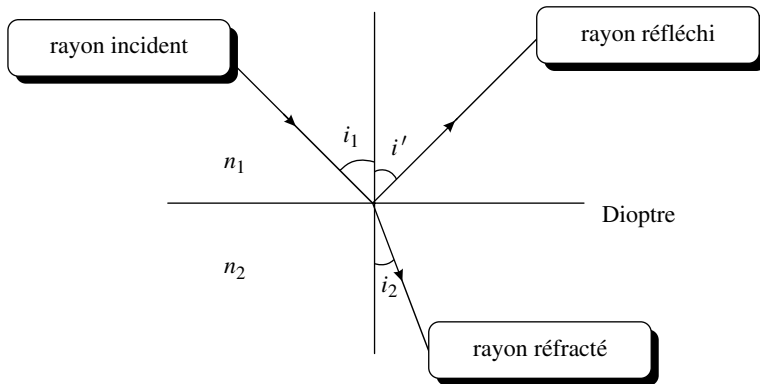


Figure 1.1

b) Interprétations

- **Si $n_1 < n_2$**

Pour que la loi de la réfraction $n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$ soit vérifiée, il faut que $i_2 < i_1$. On dit que le rayon réfracté se « rapproche » de la normale. C'est le cas de la transition air/verre.

Si l'angle d'incidence augmente, l'angle réfracté augmente lui aussi, tout en lui restant inférieur. Lorsque $i_1 = \pi/2$ (incidence rasante), i_2 est alors égal à λ angle de **réfraction limite**, ($\sin(\lambda) = n_1/n_2$).

- **Si $n_1 > n_2$**

Le rayon réfracté « s'éloigne » de la normale, c'est le cas de la transition verre/air.

Si l'angle d'incidence augmente, l'angle réfracté augmente lui aussi tout en lui restant supérieur. Lorsque $i_1 = \lambda$, i_2 est alors égal à $\pi/2$. Pour $i_1 \geq \lambda$, il n'y a plus de rayon transmis, la surface de séparation se comporte comme un miroir : c'est la **réflexion totale**, ($\sin(\lambda) = n_2/n_1$).

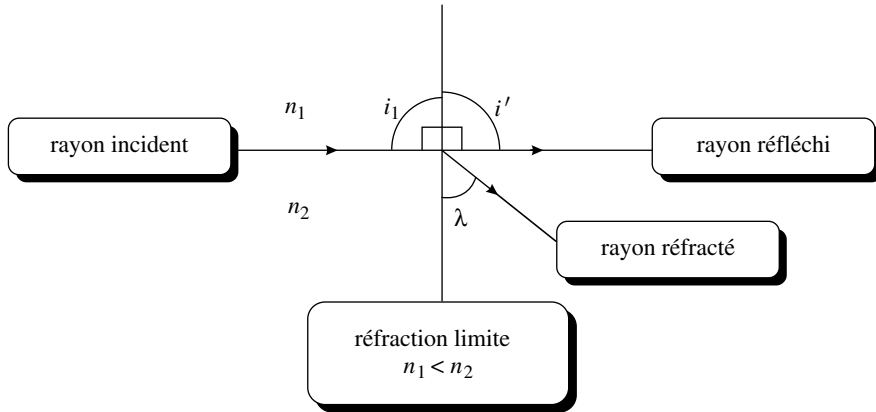


Figure 1.2

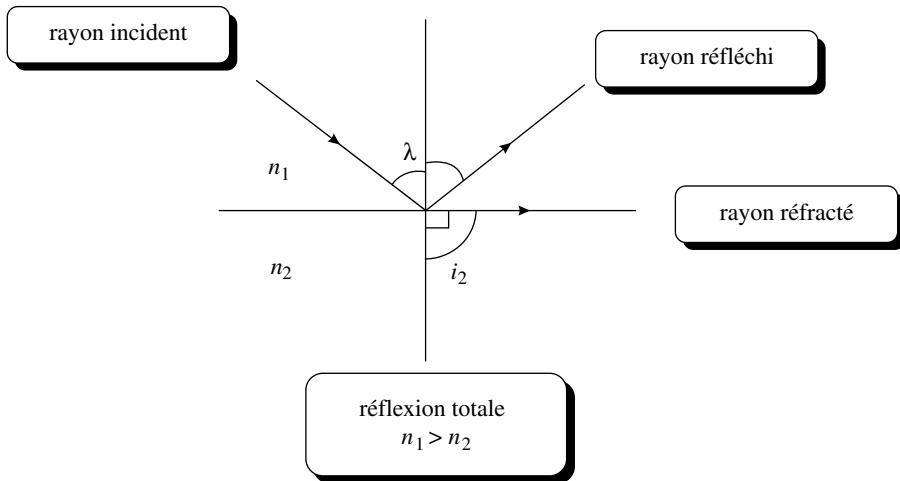


Figure 1.3

Le phénomène de réflexion totale est utilisé dans les fibres optiques à saut d'indice.

1.3 Application à l'étude du prisme

D est appelé angle de déviation. C'est l'angle entre le faisceau incident et le faisceau émergent. On démontre les formules du prisme suivantes :

- $A = r + r'$ ($\pi - A + r + r' = \pi$)
- $D = i + i' - A$ ($i - r + i' - r' + \pi - D = \pi$)
- $\sin(i) = n \sin(r)$
- $n \sin(r') = \sin(i')$

Cherchons pour quelle valeur de l'angle d'incidence i on obtient une déviation D extrême-

male (qui est en fait minimale). Ceci revient à déterminer $\left(\frac{dD}{di}\right)_{i=i_0} = 0$.

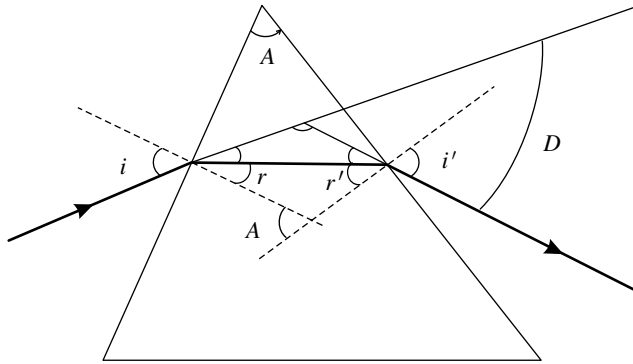


Figure 1.4

En dérivant par rapport à i ces quatre formules, on obtient $\frac{dD}{di} = 1 - \frac{\cos(i)\cos(r')}{\cos(i')\cos(r)}$ et on doit avoir $\frac{dD}{di} = 0$ pour avoir un minimum de déviation.

En élevant au carré et en exprimant le tout en fonction de n , $\sin(r)$ et $\sin(r')$, on aboutit à la relation : $(1 - n^2)(\sin^2(r) - \sin^2(r')) = 0$.

On en déduit que $r = r' = A/2$ et donc $i = i' = i_0 = (D_m + A)/2$. Ce qui nous permet d'écrire

la relation suivante : $\sin\left(\frac{D_m + A}{2}\right) = n \cdot \sin\left(\frac{A}{2}\right)$. On peut ainsi accéder à l'indice du

prisme par la mesure de D_m et A .

Condition d'émergence du rayon incident : Pour ne pas être en réflexion totale sur le dioptre de sortie il faut que $r' < \lambda$. Or $r + r' = A$ et donc $r' = A - r$ d'où $A - r < \lambda$ soit $A - \lambda < r$ ce qui implique que $\sin i > n \cdot \sin(A - \lambda)$. Donc $i_{\min} = \arcsin(n \cdot \sin(A - \lambda))$.

• **Exemple**

• Pour un Plexiglas d'indice 1,5, d'angle au sommet $A = 45^\circ$ on trouve :

• $\lambda = \arcsin(1/1,5) \approx 41,8^\circ$ et $i_{\min} = 4,8$.

La formule $i_{\min} = \arcsin(n \cdot \sin(A - \lambda))$ n'est valable que si $n \cdot \sin(A - \lambda) \leq 1$ ceci implique que $A \leq \arcsin(1/n) + \lambda$ donc $A \leq 2\lambda$. Pour qu'un rayon puisse émerger, il faut que l'angle du prisme soit inférieur à deux fois l'angle de réflexion totale. Dans le cas d'un prisme en Plexiglas d'indice $n = 1,5$ on trouve $A \leq 83,8^\circ$. Donc si on attaque sur l'angle droit d'un prisme en Plexiglas il n'y a pas de rayon émergent ; on parle alors de prisme à réflexion totale.

1.4 Application à l'étude d'une lame à faces parallèles

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

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

$$\Rightarrow i = i'$$

Le rayon émergent est parallèle au rayon incident. Le rayon lumineux subit une simple translation latérale d .

$$d = HB \text{ avec } HB = AB \cdot \sin(i - r) \text{ et } AB = \frac{e}{\cos(r)}, \text{ ce qui conduit à } d = e \cdot \frac{\sin(i - r)}{\cos(r)}.$$

Pour une incidence donnée, d augmente avec l'épaisseur e de la lame et avec son indice n .

Pour une lame donnée, d augmente avec l'incidence.

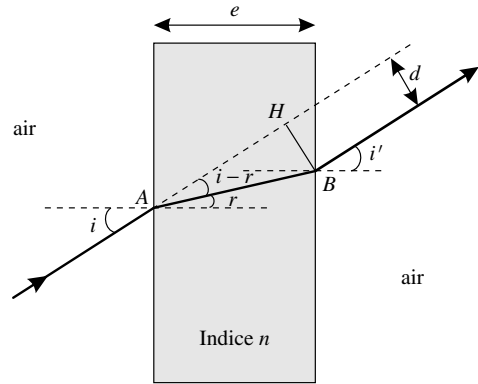


Figure 1.5

2 Matériel

Pour la plupart des expériences décrites dans les paragraphes suivants, on pourra utiliser l'ensemble optique géométrique Phywe (coffret Haftoptik, réf. : 08270.88) comprenant un tableau vertical ; une lampe halogène adhésive ; des diaphragmes à 1, 2, 3 ou 5 fentes, des composants en verre acrylique (prisme, demi-cylindre, etc.) et un disque optique gradué en degrés.

Dans certaines expériences, pour ne pas être gêné par le phénomène de dispersion, on peut remplacer la lampe halogène adhésive et les diaphragmes à 1, 2, 3 ou 5 fentes par un générateur adhésif « laser » permettant de générer 1, 3 ou 5 faisceaux plans.

3 Réfraction de la lumière

3.1 Par un demi-cylindre : vérification des lois de Descartes

a) Première manipulation : étude la transition air/Plexiglas

Placer la source de lumière munie d'un diaphragme à une fente (ou un faisceau laser) de telle sorte que le rayon soit confondu avec la ligne du 0 degré du disque optique.

Placer le demi-cylindre dans le centre du disque optique perpendiculairement au rayon. On constate alors qu'il n'y a aucune déviation.

Tourner alors le demi-cylindre de 10° en 10° et noter les angles incidents et réfractés afin de compléter le tableau suivant :

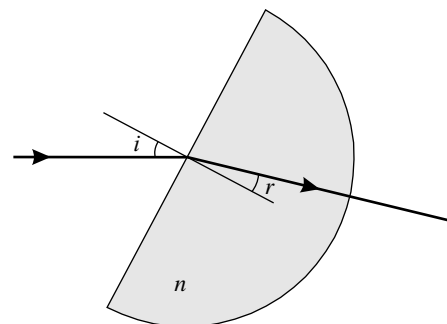


Figure 1.6

| i | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| r | | | | | | | | | |
| sin(i) | | | | | | | | | |
| sin(r) | | | | | | | | | |
| sin(i)/sin(r) | | | | | | | | | |

Calculer la valeur moyenne des $\frac{\sin(i)}{\sin(r)}$. Faire un calcul d'incertitude et conclure.

b) Deuxième manipulation : étude la transition Plexiglas/air

On utilise le même montage, mais le demi-cylindre est retourné : le fait d'attaquer le dioptre sphérique avec un rayon sous une incidence nulle conduit à ne pas avoir de réfraction sur ce dioptre et donc de ne pas avoir de déviation.

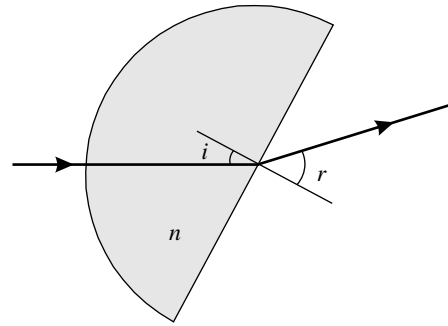


Figure 1.7

Suivre le même mode opératoire que précédemment ; observer également le rayon réfléchi.

Noter avec précision le rayon incident limite pour lequel le rayon réfracté disparaît et déterminer ainsi l'angle de réfraction limite λ .

En déduire l'indice de réfraction du Plexiglas, $n = \frac{1}{\sin(\lambda)}$.

3.2 Par un prisme : vérification des formules du prisme

a) Tracé du graphe $D = f(i)$

Placer la source lumineuse munie d'une fente (ou un faisceau laser) sur le panneau métallique.

Placer l'arête du prisme en la faisant coïncider avec l'axe du disque optique gradué.

Positionner le tout suivant la figure ci-dessous.

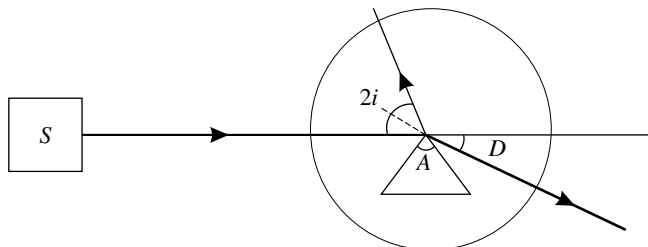


Figure 1.8

Mesures : la figure montre comment on mesure $2i$ (réflexion sur la face d'entrée) et D . Faire varier les angles en déplaçant le prisme par rapport au centre du disque tout en gardant la source et le disque fixes.

Montrer que pour avoir un rayon transmis il faut que l'angle d'incidence i soit supérieur à $i_{\text{lim}} = \arcsin(n \cdot \sin(A - \lambda))$ où A représente l'angle au sommet du prisme et λ l'angle de réflexion totale.

Tracer le graphe $D = f(i)$.

REMARQUE Sur le schéma, on trace la marche du rayon incident dans le milieu du prisme pour bien visualiser les différents angles alors que l'on réalise l'expérience en attaquant le prisme sur la pointe. La marche des rayons est bien évidemment la même par contre il est plus aisé de mesurer la déviation si le rayon transmis semble passer par le centre O du rapporteur comme les rayons incident et réfléchi.

b) Exploitation du graphe $D = f(i)$

- Calculer l'indice de réfraction à partir du minimum de déviation :
$$n = \frac{\sin\left(\frac{D_m + A}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}$$
;
- Proposer un encadrement de la valeur de n ;
- Justifier le fait que la déviation n'est pas définie si $i < i_{\text{lim}}$.

À une certaine valeur D de la déviation, correspondent deux incidences i_1 et i_2 , ce qui donne le couple de points du graphe ayant pour coordonnées (i_1, D) et (i_2, D) . Tracer le segment reliant ces deux points du graphe et réitérer ce tracé pour d'autres valeurs de D . Vérifier que les milieux des segments tracés précédemment se trouvent sur une droite dont l'ordonnée à l'origine est égale à l'opposé de l'angle A du prisme utilisé.

Justification (figure 1.9) :

La déviation est $D = i + i' - A$ (cf. § 1.3)

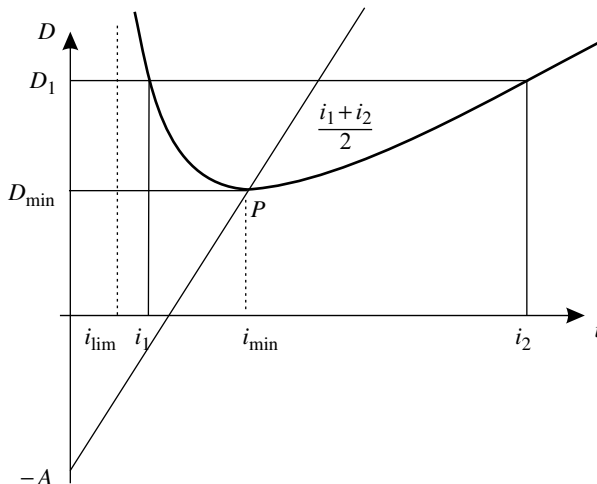


Figure 1.9

Si $i = i_1$ provoque la déviation D_1 alors le principe du retour inverse de la lumière impose que $i' = i_2$, donc $D_1 = i_1 + i_2 - A$. La droite D a pour équation $D = a \times i + b$. Le point P appartient à la droite donc $D_1 = a \times \left(\frac{i_1 + i_2}{2} \right) + b$. Par identification on trouve $a = 2$ et $b = -A$.

c) Influence de la longueur d'onde : dispersion de la lumière blanche

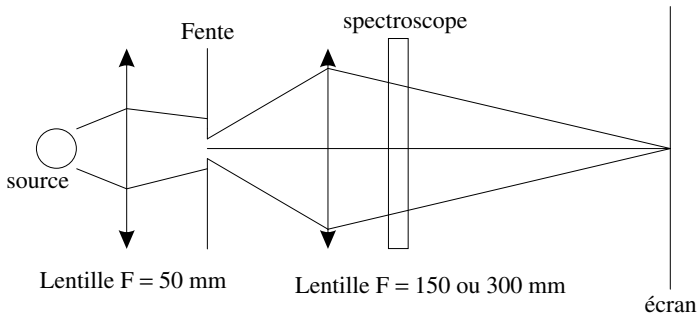


Figure 1.10

Sur un banc d'optique, on utilisera une lampe 6 V, 30 W munie de son condenseur (par exemple, Leybold : réf. 450 60 et réf. 460 20). S'assurer que le filament est parallèle à la fente source. Placer après le condenseur la lentille de projection à une distance légèrement supérieure à sa focale.

Modifier la position de la lampe par rapport au condenseur pour concentrer la lumière sur la lentille de projection.

Placer la fente contre le condenseur et modifier légèrement la position de la lentille de projection pour obtenir une image nette de la fente sur l'écran.

Placer le spectroscopie, c'est dire le prisme derrière la lentille de projection. Si le spectre est courbe aux extrémités supérieures et inférieures, réduire la hauteur de la fente par un diaphragme.

Observations : Mettre en évidence l'existence du minimum de déviation, déplacer éventuellement la lentille de façon à avoir une image bien nette sur le mur latéral où se trouve le spectre de la lumière blanche. Montrer que les radiations violettes sont plus déviées que les rouges, ce qui s'explique facilement.

En effet $\lambda_{\text{rouge}} > \lambda_{\text{violet}}$ et comme $n = A + B/\lambda^2$ on a $n_{\text{rouge}} < n_{\text{violet}}$. De plus,

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

et sachant que la fonction sinus est une fonction croissante sur $[0 ; \pi/2]$; on a bien

$$D_{m_{\text{Rouge}}} < D_{m_{\text{Violet}}}$$

3.3 Par une lame à faces parallèles. Translation d'un rayon lumineux

Placer la source lumineuse munie d'une fente sur le panneau métallique.

Placer la lame à faces parallèles (par exemple trapèze du coffret Haftoptik de chez Phywe) en la faisant coïncider avec l'axe du disque optique gradué.

Positionner le tout suivant la figure ci-dessous.

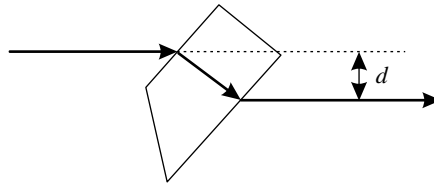


Figure 1.11

Mesurer l'angle d'incidence i à l'aide du disque gradué et d à l'aide d'une règle graduée et comparer d à la valeur théorique :

$$d = e \cdot \frac{\sin(i - r)}{\cos(r)}$$

e désigne l'épaisseur de la lame à faces parallèles.

r peut être déterminé par mesure ou par application de la relation $\sin(i) = n \cdot \sin(r)$.

4 Étude de la lentille demi-boule sur le tableau magnétique

4.1 Un peu de théorie

On part de la relation de conjugaison du dioptré sphérique qui peut s'écrire :

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

En considérant la lentille demi-boule comme l'association de deux dioptrés (un plan et un sphérique) on va établir la relation de conjugaison avec origine au centre (Fig. 1.12).

Soit A' l'image intermédiaire de A par le dioptré plan et A_1 l'image finale de A' par le dioptré sphérique.

Pour le dioptré plan le rayon de courbure est infini donc $\frac{1}{OA} = \frac{n}{OA'}$.

Pour le dioptré sphérique $\frac{n}{SA'} - \frac{1}{SA_1} = \frac{n - 1}{SO}$.

En combinant ces deux relations, pour éliminer l'image intermédiaire, on obtient :

$$\frac{n}{OS(n - 1) + nSA} - \frac{1}{SA_1} = \frac{n - 1}{SO}$$

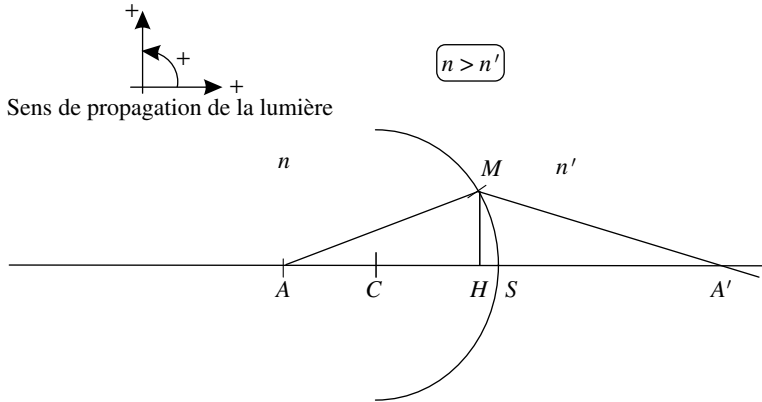


Figure 1.12

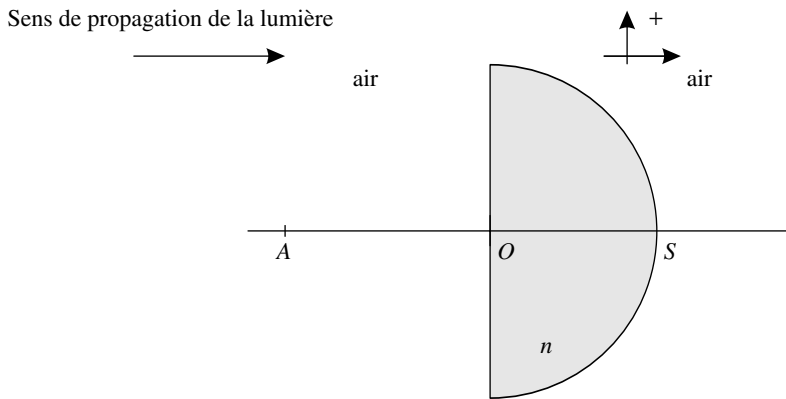


Figure 1.13

Position des foyers :

α) On attaque la lentille dans le sens positif (par le dioptré plan)

Foyer principal image : on a $\overline{SA} = -\infty$ et $A_1 = F'$ donc $\overline{SF'} = \frac{\overline{OS}}{n-1}$ en remarquant que $\overline{SF'} = \overline{SO} + \overline{OF'}$ et en posant que $\overline{OS} = R$ il vient :

$\overline{OF'} = \frac{R \cdot n}{n-1} > 0$ la lentille est bien convergente.

Foyer principal objet : on a $\overline{SA_1} = \infty$ et $A = F$ donc, après calculs, $\overline{SF} = \overline{OS} \cdot \frac{(1-n)^2 + n}{n \cdot (1-n)}$

en remarquant que $\overline{SF} = \overline{SO} + \overline{OF}$ et en posant que $\overline{OS} = R$, il vient :

$\overline{OF} = \frac{R}{n \cdot (1-n)} < 0$ la lentille est bien convergente.

β) On attaque la lentille dans le sens négatif (par le dioptré sphérique)

Il faut changer F en F' et réciproquement ainsi que R en $-R$ (principe du retour inverse de la lumière). Il vient :

Foyer principal image : $\overline{OF'} = \frac{R}{n \cdot (n - 1)} > 0$ la lentille est bien convergente.

Foyer principal objet : $\overline{OF} = \frac{R \cdot n}{1 - n} < 0$ la lentille est bien convergente.

4.2 Passons à la pratique

Dans notre étude $n = 1,5$ et $R = 9$ cm. Donc en attaquant la lentille avec un faisceau parallèle sur la face plane, on trouve théoriquement $\overline{OF'_p} = 27$ cm et par la face la plus bombée on trouve $\overline{OF'_B} = 12$ cm. Vérifier ces deux mesures sur le tableau magnétique et expliquer qu'il est logique de trouver $\overline{OF'_p} > \overline{OF'_B}$ car la lumière incidente dans le second cas subit deux réfractions au lieu d'une. Montrer de même que la distance séparant les foyers paraxiaux des foyers marginaux est plus faible lorsque l'on attaque la lentille par la face la plus bombée plutôt que par la face plane ce qui justifie l'utilisation optimale des lentilles dans la formation d'une image.

5 Applications

5.1 La mesure d'un indice de réfraction

Plusieurs expériences décrites précédemment ont permis d'aboutir à la détermination d'un indice de réfraction. En chimie, un appareil est souvent utilisé pour effectuer la mesure de l'indice de réfraction d'un liquide : le réfractomètre d'Abbe ou de Pulfrich. Le principe de ces réfractomètres est décrit ci-dessous.

On dépose une goutte de la substance d'indice n à déterminer sur un prisme d'angle A ($A = 90^\circ$ pour le réfractomètre de Pulfrich, $A = 60^\circ$ pour celui de Abbe) et d'indice élevé n_p (de l'ordre de 1,7). Un rayon lumineux monochromatique arrive, sous incidence rasante, au travers de la substance sur le prisme et ressort avec l'angle d'émergence limite i_3 .

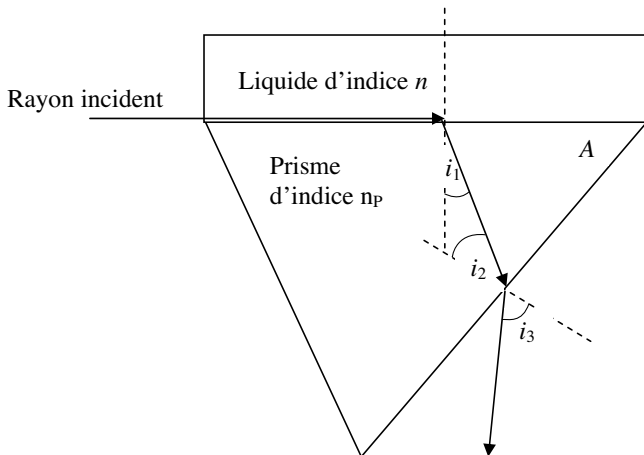


Figure 1.14

Les lois de la réfraction et les relations géométriques liées au prisme conduisent à :

$n = n_p \cdot \sin(i_1)$, $n_p \cdot \sin(i_2) = \sin(i_3)$ et $i_2 = A - i_1$ d'où $\sin(i_3) = n_p \cdot \sin(A - \arcsin(\sin(i_3)/n_p))$ soit $n = n_p \cdot \sin(A - \arcsin(\sin(i_3)/n_p))$. Ainsi connaissant A et n_p , la mesure expérimentale de i_3 permet la détermination de n .

REMARQUE Il est évident qu'on doit avoir $n < n_p$ d'où le choix d'un prisme ayant un indice élevé.

5.2 Détecteur de niveau d'eau à prisme

Sur le tableau magnétique réaliser l'expérience suivante à l'aide d'un prisme d'indice n et d'angle au sommet $A = 90^\circ$.

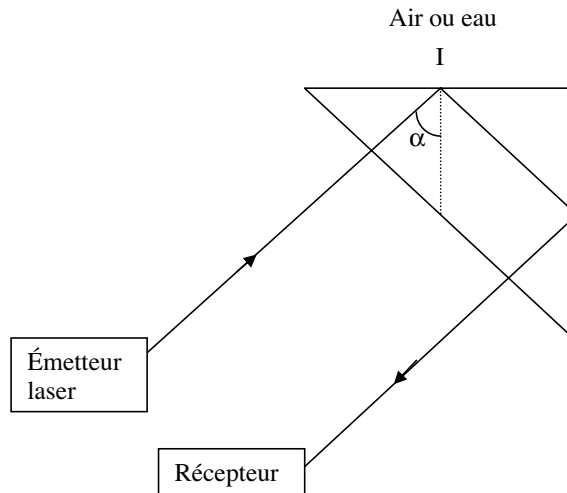


Figure 1.15

Le détecteur d'éclairement (virtuel dans notre exemple) enregistre un signal lorsque le prisme est dans l'air car nous sommes en réflexion totale sur le dioptre Plexiglas/air. En effet l'angle d'incidence α est de 45° alors que l'angle de réflexion totale est de 42° (cf. § 3.1.b). Plaçons un mouchoir en papier sec au niveau du point I, rien ne se passe : nous sommes toujours en réflexion totale. Si on imbibe le mouchoir avec de l'eau on constate que l'amplitude du rayon transmis au détecteur chute brutalement car les conditions de réflexion totale ne sont plus remplies. En effet dans le cas du dioptre Plexiglas/eau, l'angle de réflexion totale est de $\arcsin(1,33/1,5) = 62,5^\circ$ et ici le rayon incident arrive sur le dioptre avec un angle inférieur (45°). Ce dispositif est utilisé pour contrôler le niveau de remplissage dans des réservoirs, mais aussi pour détecter la pluie sur le pare-brise et déclencher la mise en marche automatique des essuie-glaces.

5.3 Les fibres optiques

Il existe deux types de fibres optiques : à saut d'indice et à gradient d'indice.

a) Les fibres optiques à saut d'indice

Une fibre optique à saut d'indice est constituée de deux milieux d'indice de réfraction très voisins.

Au centre de la fibre, le cœur a un indice n_C très légèrement supérieur à celui de la partie périphérique (gaine) d'indice n_G . La fibre est extérieurement enrobée d'une protection opaque.

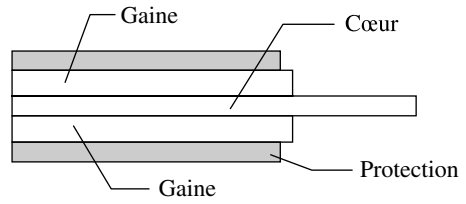


Figure 1.16

Les deux indices étant très voisins, l'angle de réfraction limité λ est voisin de 80° . Un rayon se propageant dans le cœur subit une réflexion totale quand il atteint le dioptré cœur - gaine. Il est ainsi guidé de proche en proche dans le cœur de la fibre par une succession de réflexions totales.

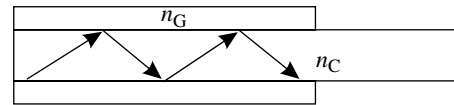


Figure 1.17

Expérience de principe : éclairer un bloc incurvé de Plexiglas (par exemple du coffret Haftoptik de chez Phywe ou un tube en Plexiglas en forme de spirale (par exemple distribué par Leybold, Réf. : 464 20) à l'aide d'un laser et observer la trajectoire du rayon (conduction de la lumière par réflexions totales successives).

b) Les fibres à gradient d'indice

Dans ce type de fibre optique, l'indice varie continûment de façon décroissante du centre de la fibre vers la périphérie

Afin d'illustrer ce deuxième type de fibre, réaliser l'expérience suivante (tirée de M. HENRY et R. JOUANISSON, *La lumière du laser - Guide d'expériences*, ed. Masson, 1987, p.54.).

Verser dans une cuve (par exemple la cuve adhésive du coffret Haftoptik (Phywe)) 2 cm d'une solution de thiosulfate de sodium (fixateur photo non dilué). Ajouter ensuite **très doucement** 2 cm d'eau (en faisant couler celle-ci le long des parois de la cuve).

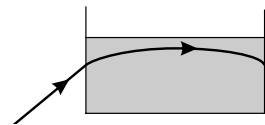


Figure 1.18

Les deux liquides sont certes miscibles mais le mélange ne s'homogénéise que très lentement. On dispose ainsi d'un gradient d'indice utilisable durant une heure environ. Faire traverser le mélange par un rayon laser et observer la trajectoire incurvée de ce dernier.

En éclairant la cuve avec une incidence conforme au schéma ci-contre, on illustre ainsi la conduction de la lumière dans une fibre optique à gradient d'indice.

N.B. : L'expérience précédente peut aussi illustrer le phénomène des mirages.



Exercices

1.1 CAPES

Énoncé

Première Partie : l'arc-en-ciel

A. Modélisation optique

I. Étude géométrique

L'étude de l'arc-en-ciel commence par le calcul de la déviation de la lumière – supposée ici monochromatique – dans une goutte d'eau sphérique.

Le document n° 1 (à rendre complété avec la copie) indique la coupe d'une goutte d'eau et dans le plan méridien le rayon incident S .

I.1. Rappeler les lois de Snell - Descartes pour la réflexion puis la réfraction pour deux milieux d'indices absolus respectifs n_1 et n_2 .

I.2. À l'aide des figures I.a et I.b, donner l'expression de l'angle de déviation D , en fonction de i pour la réflexion, et en fonction de i_1 , i_2 , n_1 et n_2 pour la réfraction.

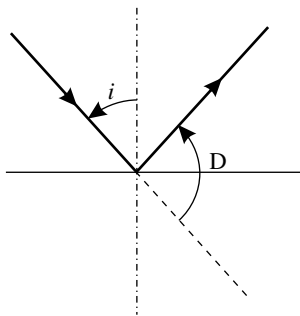


Figure I.a

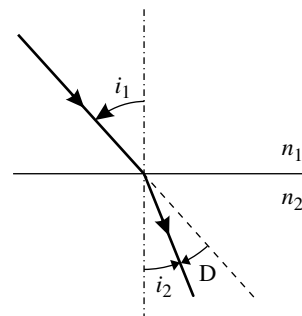


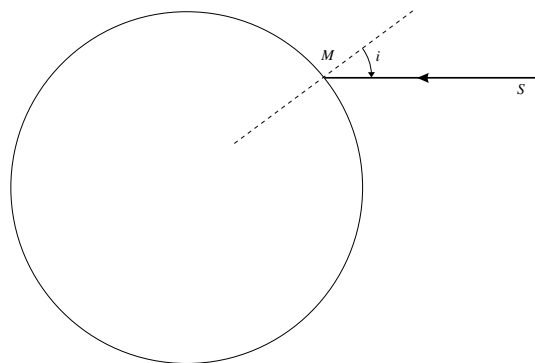
Figure I.b

I.3.a. On trace, dans cette question, à la surface du dioptre sphérique, pour le rayon incident S , le rayon réfracté R_1 dans la goutte d'eau.

Compléter le document n°1 (le rayon réfléchi en M ne sera pas tracé.)

I.3.b. Le rayon R_1 arrive en N à la surface interne du dioptre. Compléter le document n°1 et commenter brièvement.

I.3.c. Déterminer la déviation D pour le rayon sorti de la goutte après avoir subi une réflexion interne. On exprimera D en fonction de i et de n .



Document n° 1

I.3.d. Montrer que la déviation D passe par un extremum D_m pour une valeur i_m de i . Montrer que D_m est un minimum dans le cas où $n = 4/3$.

Calculer D_m pour $n = 4/3$.

La hauteur d'incidence est la distance qui sépare le rayon incident d'un axe parallèle passant par le centre de la goutte (on pourrait l'appeler également par analogie paramètre d'impact). Calculer la hauteur d'incidence en fonction du rayon de la goutte au minimum de déviation.

Le modèle de l'arc-en-ciel est introduit à partir du concept de goutte d'eau sphérique de rayon R et d'indice n , recevant des rayons lumineux provenant du Soleil supposé ponctuel et à l'infini. Le rayon lumineux pénètre dans la goutte, y subit une réflexion interne et en ressort.

I.4. Étude qualitative

I.4.a. Pourquoi observe-t-on toujours un cercle ou un arc de cercle ? On s'aidera du schéma de situation ci-dessous pour se rendre compte de la symétrie du phénomène.

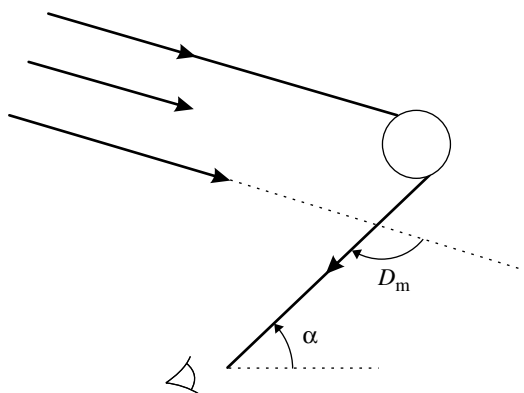


Figure II

I.4.b. Pourquoi l'observation du phénomène est-elle difficile ou impossible à midi ?

I.4.c. Deux observateurs distants de quelques mètres voient-ils la même image du phénomène ?

I.5. Imaginer un dispositif simple à monter au lycée (en laboratoire) pour sensibiliser les élèves au phénomène.

II. Étude de la dispersion

On travaille en lumière blanche dans la partie A.II.

II.1. Quelle est l'étendue du spectre visible dans le domaine des longueurs d'onde ?

II.2. Pourquoi observe-t-on des couleurs dans l'arc-en-ciel ?

II.3. Montrer que la déviation minimale croît avec l'indice n de la goutte et estimer la variation de la déviation ΔD pour une variation d'indice $\Delta n = 0,01$. On peut considérer que l'incidence i correspondant à la déviation minimale est sensiblement constante pour l'ensemble du spectre visible.

Exercices

II.4. En posant $n = A + B/\lambda^2$, A et B étant positifs, indiquer, du violet ou du rouge, la couleur qui est la plus déviée. Pour cela, on calculera les variations de α , où α est l'inclinaison des rayons issus du sommet de l'arc pour l'observateur terrestre.

II.5. Imaginer un dispositif simple à monter au lycée (au laboratoire ou en plein air) pour présenter un phénomène analogue.

Corrigé succinct

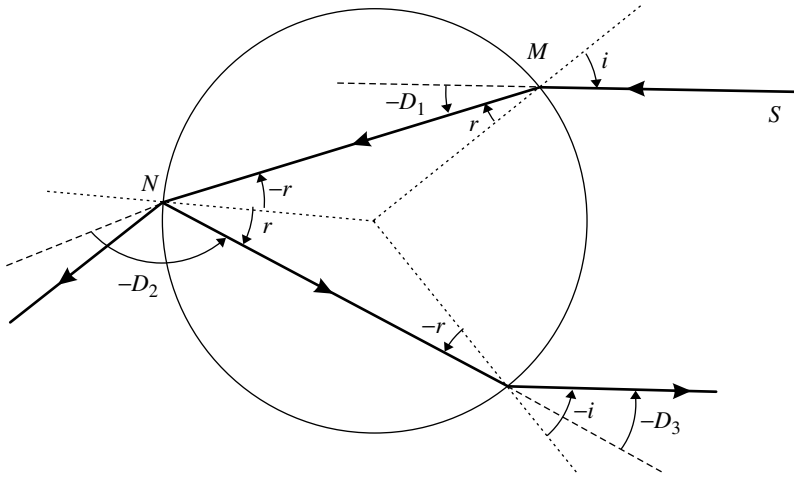
I.1. Réflexion : les rayons incident et réfléchi sont dans un même plan, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Réfraction : les rayons incident et réfracté sont dans un même plan ;

$$n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2).$$

I.2. Les angles sont orientés, le choix du sens de i définit un sens positif. Pour la réflexion, on a $D - (-r) + i = \pi$, soit $D = \pi - 2i$. Pour la réfraction $i_1 = i_2 - (-D)$ soit $D = i_1 - i_2$.

I.3. a, b, c) À l'intérieur de la goutte tous les angles valent r avec $\sin(i) = n \cdot \sin(r)$. En N, une partie de la lumière se réfléchit et une autre est réfractée. L'angle d'émergence du rayon est i .



On a : $D1 = i - r$, $D2 = \pi - 2r$, $D3 = i - r$ et $D = D1 + D2 + D3$. D'où $D = \pi + 2i - 4r$ avec $\sin(i) = n \cdot \sin(r)$. En définitive :

$$D = \pi + 2i - 4 \cdot \arcsin\left(\frac{\sin(i)}{n}\right).$$

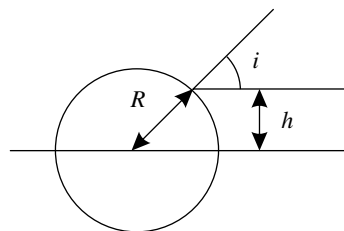
I.3.d) Calculons dD/di : $\frac{dD}{di} = 2 - 4 \times \frac{\cos(i)}{n} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2(i)}{n^2}}}$ (($\arcsin(x)$)' = $\frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$) D passe

par un extremum si $\frac{dD}{di} = 0$, soit $n^2 - \sin^2(im) = 4 \times \cos^2(im)$, d'où $\cos^2(i_m) = \frac{n^2 - 1}{3}$.

L'angle i_m est compris entre 0 et $\pi/2$, sur cet intervalle il n'y a qu'un seul extremum. Pour $i = 0$ et $n = 4/3$, $dD/di = -1$, la dérivée de la fonction de la déviation est négative, celle-ci passe donc par un minimum.

L'application numérique conduit à $i_m \approx 59^\circ$ et $D_m \approx 138^\circ$.

On a : $\sin(i) = h/R$ soit $h = R \cdot \sin(i)$. Pour $i = i_m$, on obtient $h = 0,86 \cdot R$



1.4.a) Au minimum de déviation tous les rayons arrivant sous une incidence voisine de i_m vont subir la même déviation D_m , il y a donc concentration de la lumière dans cette direction. Le schéma de la figure II de l'énoncé montre que l'observateur reçoit la lumière des gouttes qu'il voit sous l'angle α , le phénomène est de révolution autour de l'axe observateur-soleil, les gouttes forment un cercle interrompu par le sol.

1.4.b) La même figure indique clairement que pour observer un arc-en-ciel il faut avoir le soleil « dans le dos » ce qui est impossible à midi.

1.4.c) Si les observateurs sont assez proches on peut admettre que l'angle α est le même, les deux observateurs voient la même image du phénomène.

1.5. On peut éclairer à l'aide d'un faisceau parallèle de lumière blanche une boule de verre.

II.1. Le spectre visible est compris entre $0,4 \mu\text{m}$ et $0,8 \mu\text{m}$.

II.2. Le minimum de déviation est fonction de l'indice, celui-ci est fonction de la longueur d'onde donc en lumière non monochromatique (cas de la lumière blanche) on observera plusieurs arcs de cercle concentriques.

II.3. Calculons dD_m/dn .
$$\frac{dD_m}{dn} = 4 \cdot \frac{\sin(i_m)}{n^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2(i_m)}{n^2}}}$$
 or on se trouve au minimum

de déviation donc $\cos^2(i_m) = \frac{n^2 - 1}{3}$ soit $\sin^2(i_m) = \frac{4 - n^2}{3}$. On obtient alors :

$$\frac{dD_m}{dn} = \frac{2}{n} \cdot \sqrt{\frac{4 - n^2}{n^2 - 1}}$$
 Pour $1 < n < 2$, cette dérivée est positive, la déviation minimale croît

donc avec l'indice n de la goutte.

Pour $n = 4/3$ et $\Delta n = 0,01$, on obtient $\Delta D_m = 0,025 \text{ rad} = 1,4^\circ$.

II.4. Si $n = A + \frac{B}{\lambda^2}$, l'indice diminue quand la longueur d'onde augmente donc la déviation minimale décroît du violet au rouge.

Si k est l'angle que font les rayons issus du soleil avec une horizontale, on a $\alpha = \pi - k - D_m$. Du violet au rouge D_m diminue donc α augmente, le violet est à l'intérieur de l'arc-en-ciel et le rouge à l'extérieur.

II.5. Il suffit d'observer un jet d'eau le dos au soleil.

Exercices

1.2 Concours communs polytechniques PC

Énoncé

1.2. Réfraction

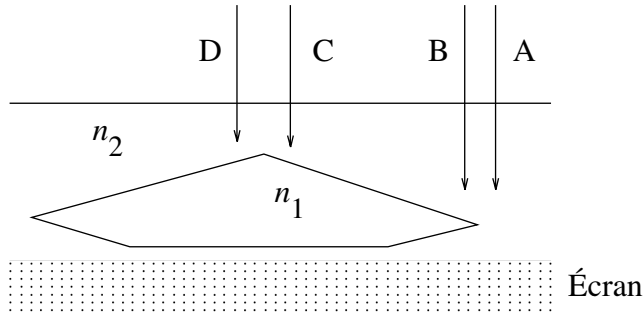


Figure I.2

Un solide transparent d'indice de réfraction n_1 , est plongé dans un liquide transparent d'indice de réfraction n_2 (Figure I.2). Un faisceau lumineux, en incidence normale, vient éclairer le solide, et après la traversée de celui-ci, illumine un écran situé sous le solide.

1.2.1 En reproduisant fidèlement la figure ci-dessus, tracer l'allure du prolongement des rayons réfractés issus de A, B, C et D, jusqu'à l'écran, dans le cas où l'indice de réfraction n_1 est supérieur à n_2 , puis dans le cas où l'indice de réfraction n_1 est inférieur à n_2 . On ne tiendra pas compte des rayons réfléchis.

En déduire les zones de plus forte et de plus faible intensité lumineuse sur l'écran.

1.3. Application

Un collectionneur de gemmes possède trois petites pierres transparentes et incolores : une **moissanite**, un **zircon** et un morceau de **verre** à fort indice (flint), ainsi qu'un flacon d'iodure de méthylène liquide. Les propriétés physiques de ces quatre substances sont résumées dans le tableau ci-dessous :

| Substance | Masse volumique (kg.m^{-3}) | Indice de réfraction |
|---------------------|--|----------------------|
| Zircon | 4 690 | 1,95 |
| Moissanite | 3 210 | 2,70 |
| Verre flint | 3 740 | 1,64 |
| Iodure de méthylène | 3 330 | 1,75 |

Les trois pierres ont été interverties, si bien que leur propriétaire doit conduire une série d'expériences pour les reconnaître.

1.3.1. L'immersion des trois pierres dans l'iodure de méthylène, permet de reconnaître immédiatement l'une des trois pierres. Laquelle ?

1.3.2.

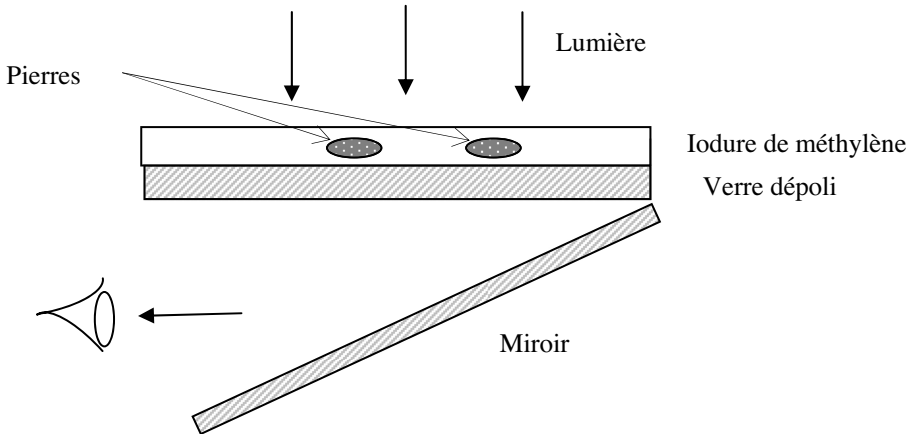
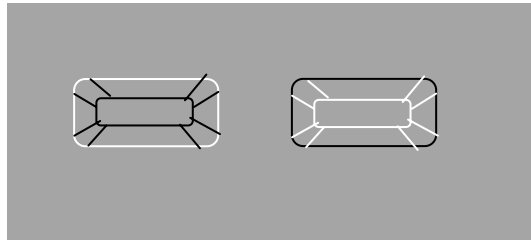


Figure I.3

Les deux pierres restantes sont posées sur un morceau de verre dépoli, recouvertes d'iodure de méthylène, puis éclairées depuis le haut. Un miroir incliné situé sous le verre dépoli permet d'observer le verre dépoli par en dessous (Figure I.3). La pierre numéro 1 est entourée d'un contour brillant, et ses arêtes vives sont sombres. La pierre numéro 2 est entourée d'un contour sombre, et les arêtes paraissent brillantes (Figure I.4). Identifier les pierres numéro 1 et numéro 2.

Pierre n°1
Contour clair,
Arêtes sombres



Pierre n°2
Contour sombre,
Arêtes claires

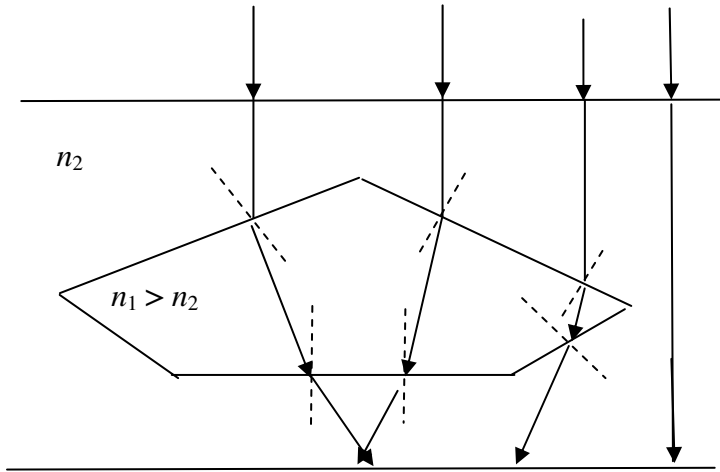
Figure I.4

Corrigé succinct

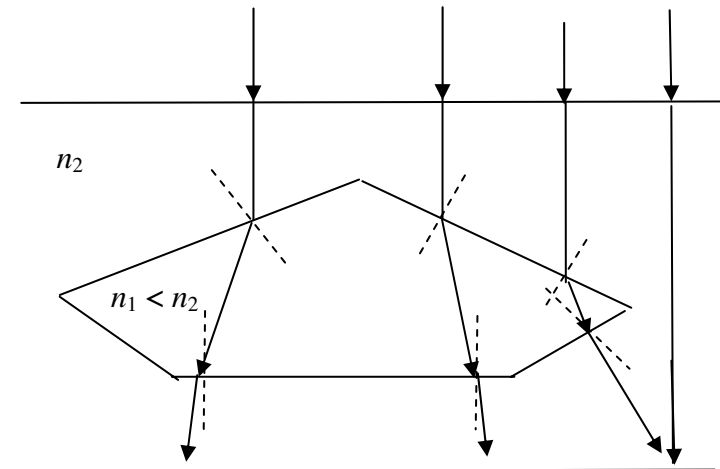
1.2.1. Si $n_1 > n_2$, le rayon réfracté se rapproche de la normale lors du passage du milieu 2 au milieu 1 et s'en écarte à la sortie.

Les rayons incidents proches d'une arête vont, sur l'écran, se rapprocher de la verticale de l'arête et la zone correspondante sera claire. Les rayons incidents proches des bords vont, sur l'écran, s'éloigner de la verticale et la zone correspondante sera sombre.

Exercices



Si $n_1 < n_2$, le rayon réfracté s'éloigne de la normale lors du passage du milieu 2 au milieu 1 et s'en rapproche à la sortie.



Les rayons incidents proches d'une arête vont, sur l'écran, s'éloigner de la verticale de l'arête et la zone correspondante sera sombre. Les rayons incidents proches des bords vont, sur l'écran, se rapprocher de la verticale et la zone correspondante sera claire.

1.3.1. La masse volumique de la moissanite est plus faible que celle de l'iodure de méthylène, elle va donc flotter contrairement aux deux autres pierres.

1.3.2. La pierre n° 1 a un contour clair et des arêtes sombres, d'après la question précédente on a $n_{\text{pierre}} < n_{\text{iodure}}$. Le tableau indique qu'il s'agit du verre flint. L'autre pierre est donc le zircon (arêtes claires et bords sombres, $n_{\text{pierre}} > n_{\text{iodure}}$).