

# **LES RECETTES DE SUP**

**MPSI  
PCSI  
PTSI**

**3<sup>e</sup>  
édition**

# **Physique**

- *Des rappels de cours*
- *Des méthodes, illustrées par des exemples précis, pour aider à résoudre les exercices*
- *Des énoncés de sujets du concours*
- *Des corrections détaillées et commentées*

**Julien Barthes**

**ellipses**



collection dirigée par Julien Barthes

# **PHYSIQUE**

**CLASSES PRÉPAS MPSI / PCSI / PTSI**

**3<sup>e</sup> édition**

**conforme aux programmes 2013**

**Julien BARTHES**

Ancien élève de l'École Normale Supérieure (Lyon)  
Professeur agrégé de Sciences physiques en classe préparatoire  
Lycée Gustave Eiffel (Dijon)



## Dans la même collection **Les Recettes de Sup**

- *Mathématiques, MPSI-PCSI-PTSI*, 2<sup>e</sup> éd., Stéphane Flon, 2011, 432 pages.
- *Chimie, MPSI-PCSI-PTSI-BCPST1*, Frédéric Grün, 2008, 272 pages.

## Du bac au supérieur

- *Ingrédients pour la prépa, Maths-Physique-Chimie*, Julien Barthes, Fakhreddine Ghommid, Christophe Hardouin, 2010, 168 pages.

## Dans la collection **Les Recettes du Bac**

### Première S

- *Physique-Chimie, Première S*, 2<sup>e</sup> éd., conforme au nouveau programme, Christophe Hardouin, 2013, 368 pages.
- *Mathématiques, Première S*, 2<sup>e</sup> éd., conforme au nouveau programme, Horst Lottermoser, 2011, 320 pages.
- *SVT, Première S*, Marion Barthes, Anne-Laure Brigardis, Emilie Collomb, François Collomb, Béatrice Ruffie, 2009, 288 pages.

### Terminale S

- *Mathématiques, Terminale S*, programme 2012, Martine Barthes, Horst Lottermoser, 2014, 464 pages.
- *Physique-Chimie, Terminale S*, José Ablancourt, Sylvain Gourdet, Anne Juillard-Condat, David Morel, Franck Roux, Julien Rouzaire, Pascal Visonneau, 2008, 512 pages.
- *SVT, Terminale S*, Marion Barthes, Anne-Laure Brigardis, Émilie Collomb, François Collomb, Béatrice Ruffie, 2008, 336 pages.

ISBN 9782340-002074

© Ellipses Édition Marketing S.A., 2014  
32, rue Bargue 75740 Paris cedex 15



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 une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Avertissement

Selon une enquête d'un magazine féminin, 80% des hommes ne lisent pas le mode d'emploi avant d'utiliser un appareil.

Si je ne m'inquiète pas pour les étudiantes qui devraient donc lire la page suivante, j'espère que les étudiants s'attarderont sur le mode d'emploi de ce livre.

Fort simple et concis, ce mode d'emploi devrait vous permettre une utilisation optimale de cet ouvrage.

# Mode d'emploi

Ce livre possède une table des matières où sont recensées, par chapitre et de manière non exhaustive, les questions les plus fréquentes posées aux étudiants lors des concours. Il y a donc deux façons de l'utiliser.

## Pour les exercices

Si vous butez sur une question d'un exercice, utilisez la table des matières du chapitre concerné. Vous y trouverez répertoriées les questions classiques posées sur ce thème. Si la question qui vous turlupine s'y trouve, il suffit ensuite de se reporter à la page adéquate.

Par exemple l'énoncé d'un exercice comprend la question :

*Déterminer la vitesse limite de chute de ...*

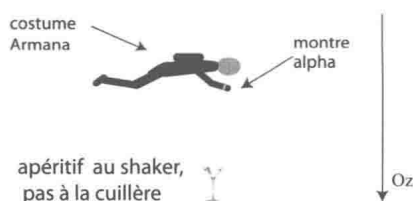
Dans la table des matières, au chapitre 3 *Chute dans le champ de pesanteur*, vous tombez sur :

...  
4 Déterminer une vitesse limite . . . . . 52  
...

Il ne vous reste plus qu'à courir à la page indiquée pour obtenir l'aide attendue. La méthode est toujours accompagnée d'un exemple illustré :

**Méthode : appliquer  $\dot{v} = 0$  dans la 2<sup>e</sup> loi de Newton.**

**Exemple** James Bond saute en parachute. On suppose que le frottement de l'air peut être modélisé par une force de type  $\vec{f} = -\alpha v^2 \vec{v}/|\vec{v}|$ .



Déterminer la vitesse limite  $v_L$  de chute. On notera  $\vec{g}$  l'accélération de la pesanteur.

## Pour comprendre le cours

Le cours du taupin est souvent dense. En vous reportant au chapitre qui vous intéresse, nous espérons qu'une lecture linéaire vous rendra heureux en vous permettant de déceler, derrière le cours, la mise en place d'outils pour résoudre les questions posées aux concours.

---

**Exemple** Vous butez sur tous les premiers exercices de mécanique... c'est que le cours n'est pas assimilé. Précipitez-vous au chapitre

*Mécanique en repère galiléen*

---

Puis, pour chaque question, lisez la

Méthode

et essayez de refaire l'**Exemple** proposé.

Ensuite, ne tombez pas dans les pièges signalés par :

 Mise en garde : Enfin, il ne vous reste plus qu'à parfaire votre gymnastique intellectuelle avec les différents exercices proposés dans

  **Pour s'entraîner :** exercice ...

Je vous souhaite une bonne lecture et une excellente réussite.

L'auteur

# Préambule

RECETTES DE SUP : que se cache-t-il derrière cette expression provocatrice ? Prévenons le lecteur d'entrée, au risque de décevoir ses attentes : ce livre ne consiste pas en une liste de techniques toutes faites, que l'on appliquerait sans se poser de questions. Une telle liste, et l'auteur s'en réjouit, n'existe pas. J'ai pu constater cependant, depuis que j'enseigne, que le cours, auquel je renvoie inlassablement chaque étudiant (en prenant exemple sur ma propre expérience de taupin), ne se comprend ni ne se synthétise si facilement. L'étudiant n'a pas toujours le recul pour dégager, parmi les propositions et notions du cours, celles que l'apprenti physicien qu'il est utilisera le plus en pratique, ni dans quelles circonstances il est pertinent de les utiliser : l'articulation entre cours et exercices ne va pas forcément de soi. L'objectif majeur de ce livre est d'aider l'étudiant à clarifier ses idées dans ce domaine. On se posera donc les questions suivantes tout au long de ce livre :

- Quelles sont les questions fréquemment posées, ou classiques, dans tel ou tel domaine ?
- Quelles sont les résultats et notions du cours qui permettent de résoudre ces questions ?
- Quand privilégier telle méthode sur telle autre ?
- Quelles sont les notions les plus délicates du cours, comment mieux les comprendre ?
- Quels sont les mécanismes cachés dans tel type d'exercice ?
- Quelles sont les erreurs les plus souvent rencontrées, comment les éviter ?

Il s'agit donc ici d'extraire du cours les parties les plus importantes. C'est pourquoi les chapitres de ce livre sont organisés en questions ou problématiques fréquemment rencontrées, et leur lecture n'a d'intérêt que **si l'on a déjà lu et appris le cours correspondant de son professeur**, qui doit demeurer la référence indépassable. D'une part, ce livre ne vise évidemment pas l'exhaustivité, et, d'autre part, il pré-suppose une certaine familiarité avec les notions étudiées (aucune démonstration du cours n'y figure, certains résultats ou formules ne sont pas rappelés). Il ne s'agit pas ici de refaire le cours, ni même de le réduire à un formulaire rassurant, finalement peu utilisable, mais de dégager des notions ou résultats clefs que l'on ne perçoit pas toujours, et de voir comment ils peuvent s'appliquer (ou pas) à des exercices donnés. Ce livre devrait aider l'étudiant, sinon à résoudre les exercices posés en colles, du moins à proposer à l'interrogateur des pistes de recherche sensées (qui n'aboutiront pas forcément), ce qui suffira souvent à le satisfaire. **Il n'est pas conçu pour brider la créativité, mais au contraire pour l'encourager, en consolidant le socle des connaissances de l'étudiant.** Il sera également utile aux étudiants de seconde année, voire aux candidats à un concours d'enseignement, qui auront le recul suffisant pour pleinement tirer parti des remarques et exercices les plus délicats. N'attendez donc pas de recette miracle, et n'oubliez pas : nous serons toujours ravis qu'un étudiant apporte ses épices personnelles, auxquelles nous n'avions pas pensé.

Première partie

Optique



# Chapitre 1

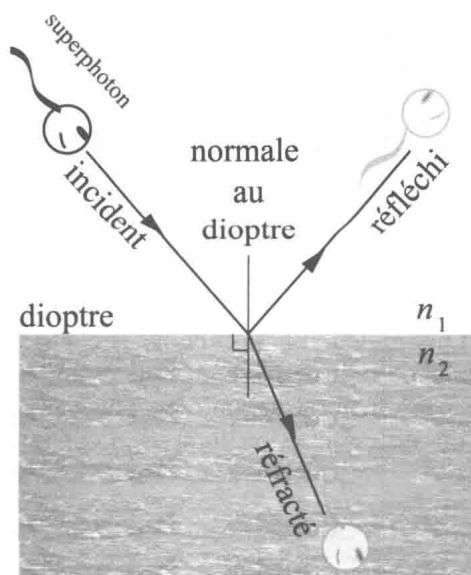
## Les lois de Descartes

### Rappels de cours

#### I Modèle de l'optique géométrique

##### Les rayons lumineux

Dans la plupart des « expériences » d'optique que l'on peut rencontrer dans la vie courante, on s'intéresse aux « rayons lumineux », c'est-à-dire à la « trajectoire » des photons. On les représente simplement à l'aide d'un crayon et d'une règle. En réalité, la lumière possède également une nature ondulatoire dont les effets, comme la diffraction, sont négligés dans ce chapitre.



## Les dioptries

Un **dioptre** est la frontière entre deux milieux d'indice différent. Un rayon frappant un dioptre est à la fois réfracté et réfléchi. L'amplitude lumineuse de chacun des rayons dépend de la longueur d'onde, de l'indice, de l'angle... Sa détermination sort du cadre de première année. Dans les exercices, on ne considérera que le rayon incident et celui qui est transmis ou réfléchi lors de la présence d'un dioptre.

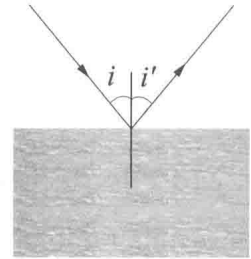
Pour éviter des bourdes malheureuses, les angles utilisés en présence d'un dioptre sont mesurés par rapport à la normale au dioptre. Le rayon incident et cette normale définissent alors le **plan d'incidence**, c'est-à-dire le plan de la feuille que vous utilisez.

## II Lois de Descartes

### Loi de la réflexion

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une surface réfléchissante, le rayon est réfléchi dans ce même plan et l'angle de réflexion vérifie

$$i = i'$$

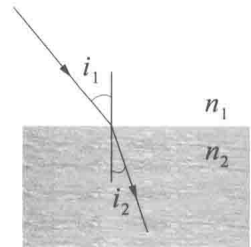


### Loi de la réfraction

Le rayon réfracté appartient au plan d'incidence et les angles des rayons incident et réfracté vérifient

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

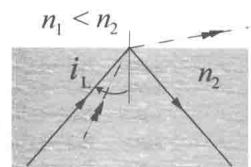
De cette relation, on déduit que le rayon réfracté se rapproche de la normale au dioptre lorsqu'il arrive dans un milieu d'indice plus élevé (plus réfringent). Dans l'exemple ci-contre : on a  $n_2 > n_1$ .



### La réfraction limite

Lorsque l'on passe d'un milieu d'indice faible (milieu moins réfringent) à un milieu d'indice plus fort (milieu plus réfringent), la loi de Descartes de la réfraction n'est plus valide au delà d'un angle dit de « réfraction limite », donné par

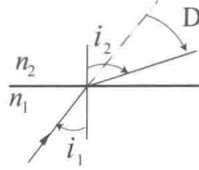
$$\sin i_L = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{avec} \quad n_1 < n_2$$



# 1 Calculer un angle de déviation

## 1.1 En utilisant chaque déviation

**Méthode :** à chaque dioptre, l'angle de déviation vaut  $D = i_2 - i_1$ .  
Sommer les déviations à chaque dioptre

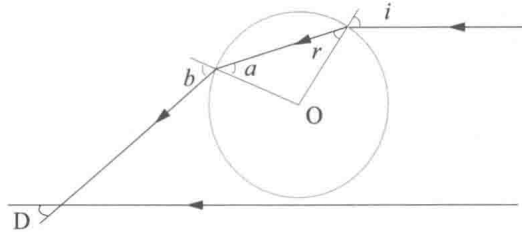


Pour déterminer un angle de déviation, il est possible de sommer toutes les déviations à chaque fois que le rayon lumineux rencontre un dioptre.

*Exemple*

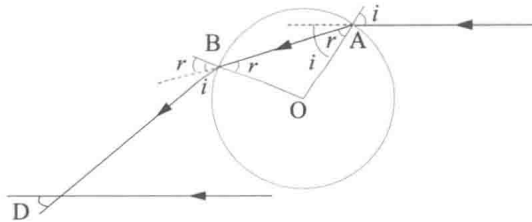
*D'après CCP 05*

On considère un rayon lumineux frappant une goutte d'eau d'indice  $n$  en formant un angle  $i$  par rapport à la normale au dioptre. L'indice de l'air sera pris égal à 1.



Déterminer les angles  $a$  et  $b$  puis l'angle de déviation  $D$ , en fonction de  $i$  et  $r$ .

Le triangle  $OAB$  étant isocèle, les angles  $a$  et  $r$  sont égaux. D'après les relations de Descartes,  $\sin i = n \sin r = \sin b$ . On en déduit que  $b = i$ . Pour l'angle  $D$ , le rayon incident tourne au premier dioptre de  $i - r$  puis au second de  $i - r$ .



La déviation totale vaut donc

$$D = 2i - 2r$$

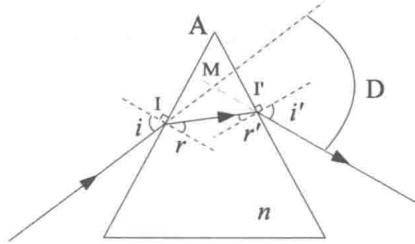
Cette méthode est, de loin, la plus rapide pour obtenir le résultat.

 **Pour s'entraîner :** exercice 1.

## 1.2 En utilisant les propriétés des triangles

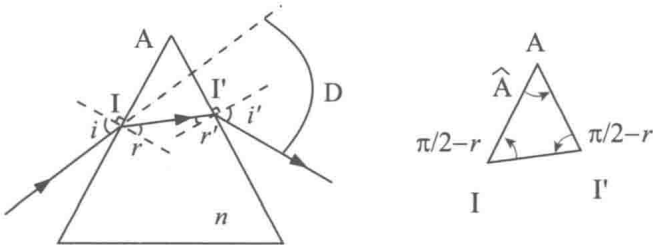
**Méthode :** on utilise la somme des angles d'un triangle (égale à  $\pi$ !). Identifier les angles intérieurs au triangle et utiliser la propriété précédente.

**Exemple** On considère un prisme d'angle au sommet A et d'indice  $n$ . Un rayon frappe le prisme avec un angle d'incidence  $i$  et ressortant par un angle  $i'$ . On note  $r$  et  $r'$  les angles de réfraction à l'intérieur du prisme.



- 1 - Déterminer l'angle de déviation  $D$  du rayon incident en fonction de  $r$ ,  $r'$ ,  $i$  et  $i'$ .
- 2 - Donner l'expression de  $A$  en fonction de  $r$  et  $r'$  et en déduire une expression de  $D$  uniquement en fonction de  $A$ ,  $i$  et  $i'$ .

Notons  $r$  et  $r'$  les angles de réfraction dans le prisme.



Lors du premier dioptré, le rayon tourne de  $i - r$  puis au second de  $i' - r'$ . L'angle de déviation vaut donc

$$D = i - r + i' - r' = i + i' - (r + r')$$

Dans le triangle  $IAI'$  on trouve :  $\pi = A + \pi/2 - r + \pi/2 - r'$ , soit  $A = r + r'$ . Remplaçons les angles  $r$  et  $r'$  dans la valeur de  $D$  :

Ainsi,

$$D = i + i' - A$$

 **Pour s'entraîner :** exercices 4 et 5.

## 2 Déterminer un angle de réfraction limite

**Méthode :** identifier le milieu d'indice le plus élevé (noté  $n_2$ ).

Le rayon subissant une réflexion totale est dans ce milieu.

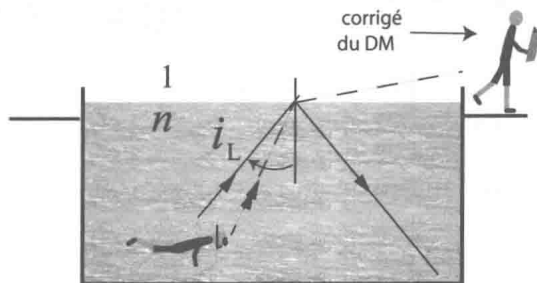
Identifier le milieu d'indice le plus faible. (noté  $n_1$ ).

L'angle de réfraction limite est alors donné par

$$\sin i_L = \frac{n_1}{n_2}$$

Vérifier que  $n_1/n_2 < 1$  !

**Exemple** Le minor de votre promotion est au fond d'une piscine<sup>1</sup> et observe crapuleusement quelque chose à l'extérieur. L'indice de l'eau est noté  $n = 1,33$ , l'indice de l'air sera pris égale à 1.



Déterminer l'angle de réfraction limite pour lequel la surface de l'eau se comporte comme un miroir.

Un rayon lumineux peut être soumis à une réflexion totale s'il est issu de l'eau ( $n = 1,33$ ) vers l'air (indice = 1). Appliquons la relation de Descartes lors de la réflexion totale :

$$n \sin i_L = 1 \quad \text{soit} \quad \sin i_L = 1/n$$

L'indice de l'eau étant supérieur à 1, le sinus est donc bien défini. On obtient ainsi :

Application numérique :  $i_L = \arcsin(1/n) = 48,8^\circ$

 **Mise en garde :** n'oubliez pas que souvent votre calculatrice est définie pour des angles en radians... Vérifiez régulièrement si vous ne voulez pas perdre des points de façon ridicule...

 **Pour s'entraîner :** exercices 1, 2, 3 et 4.

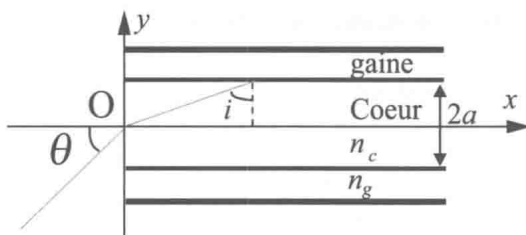
1. Et oui, au fond... il n'est pas si bête...

## Exercices

### Exercice 1

D'après CCP 07

Une fibre à saut d'indice, représentée sur la figure ci-dessous, est formée d'un cœur cylindrique en verre d'axe  $Ox$ , de diamètre  $2a$  et d'indice  $n_c$ , entouré d'une gaine optique d'indice  $n_g$  légèrement inférieur à  $n_c$ . Un rayon situé dans le plan  $Oxy$  entre dans la fibre au point  $O$  avec un angle d'incidence  $\theta$ .



1 - À quelle condition sur  $i$ , angle d'incidence à l'interface cœur/gaine, le rayon reste-t-il confiné à l'intérieur du cœur ?

On note  $i_L$  l'angle d'incidence limite.

Faire un dessin du trajet ultérieur du rayon en faisant apparaître plusieurs réflexions.

2 - Montrer que la condition précédente est vérifiée si l'angle d'incidence  $\theta$  est inférieur à un angle d'incidence  $\theta_L$  tel que  $\sin \theta_L = n_c \cos i_L$ .

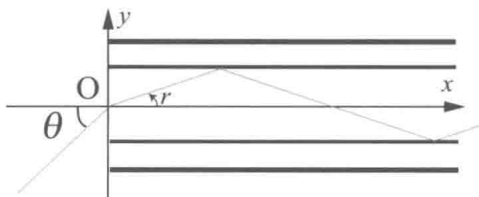
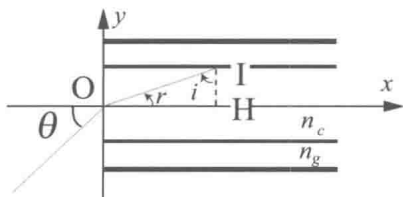
3 - En déduire l'expression de l'ouverture numérique O.N de la fibre définie par  $O.N = \sin \theta_L$  en fonction de  $n_c$  et  $n_g$  uniquement.

4 - Donner la valeur numérique de O.N pour  $n_c = 1,500$  et  $n_g = 1,470$ .



### Solution

1 - Au point  $I$ , le dioptré sépare un milieu plus réfringent (le cœur de la fibre) d'un milieu moins réfringent (la gaine). Il y a donc possibilité de réflexion totale. Plus précisément si l'angle d'incidence  $i$  est tel que  $i > i_L$  angle d'incidence limite défini par la relation  $i_L = \arcsin\left(\frac{n_g}{n_c}\right)$ , il y a réflexion totale et la lumière se propage dans le cœur de la fibre. On obtient le cheminement de la lumière suivant pour une incidence  $\theta$  :



2 - Le triangle (O, H, I) est rectangle en H. La condition précédente impose sachant que  $r = \frac{\pi}{2} - i : r < r_L = \frac{\pi}{2} - i_L$  soit  $\sin r < \cos i_L$  car la fonction  $\sin$  étant strictement croissante sur  $-\left] \frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right[$

soit 
$$n_c \sin r < n_c \cos i_L$$

En appliquant la loi de Snell-Descartes pour la réfraction au point O, on tire que :

$$n_{air} \sin \theta < n_c \cos i_L$$

3 - 
$$\sin \theta < \frac{n_c}{n_{air}} \sqrt{1 - \left( \frac{n_g}{n_c} \right)^2}$$

On en conclut alors que le rayon lumineux restera confiné à l'intérieur du cœur de la fibre si  $\theta < \theta_L$  tel que :

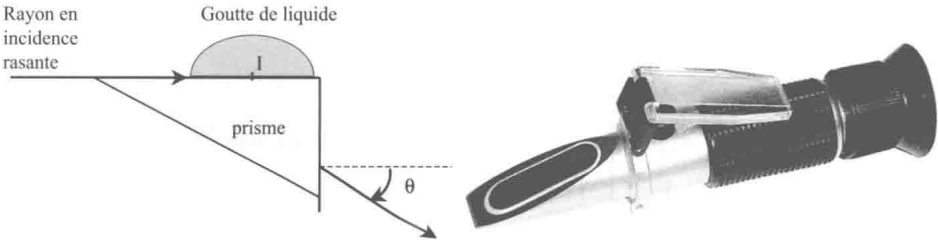
$$O.N = \sin \theta_L = \frac{1}{n_{air}} \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

4 - *Application numérique* :  $O.N = \frac{1}{1,000} \sqrt{1,500^2 - 1,470^2} = 0,2985$



**Exercice 2**

En viticulture, la quantité de sucre dans un raisin peut être déterminer en mesurant l'indice de réfraction d'un liquide par le principe du réfractomètre de Pulfrich. On dépose une goutte de ce liquide sur la face supérieure d'un prisme d'angle au sommet  $90^\circ$ . On éclaire cette goutte en lumière monochromatique en prenant bien soin qu'elle soit éclairée en **incidence rasante**. À l'aide d'un oculaire, on observe derrière l'autre face du prisme.



1 - L'indice de réfraction du verre est  $N = 1,625$ . Dessiner la marche du rayon lumineux rasant se réfractant en I.

2 - On est capable de mesurer l'angle  $\theta$  du rayon émergeant correspondant au rayon d'incidence rasante (voir figure).

Montrer que l'angle  $\theta$  satisfait la relation :

$$\sin \theta = \sqrt{N^2 - n^2}$$

Calculer numériquement  $\theta$ .

3 - Quelle est la valeur minimale de l'indice de réfraction d'un liquide qu'on peut mesurer avec ce réfractomètre ?

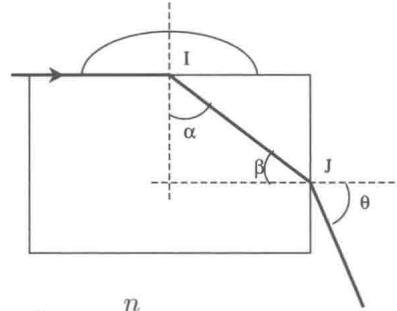


Solution

1 - La configuration étudiée exige que l'eau soit un milieu moins réfringent que le verre soit  $n < N$ .

Dans ce cas, on obtient la marche suivante :

En J, il y a passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent. Ainsi, le rayon réfracté, s'il existe, s'écarte de la normale au dioptre.



2 - La loi de Descartes pour la réfraction appliquée en I conduit à :

$$N \cdot \sin \alpha = n \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) \quad \text{soit} \quad \sin \alpha = \frac{n}{N}$$

et 
$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

donc 
$$\sin \beta = \cos \alpha$$

En appliquant la loi de Descartes pour la réfraction en J, on en déduit :

$$\sin \theta = N \cdot \sin \beta$$

Et comme les angles ont leurs valeurs comprises entre 0 et  $\frac{\pi}{2}$

alors 
$$\sin \theta = N \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = N \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{n}{N} \right)^2}$$

On en déduit

$$\sin \theta = \sqrt{N^2 - n^2}$$

Application numérique :

$$\sin \theta = 0,934$$

3 - La loi de Descartes appliquée en J lors de la réfraction conduit à :

$$N \cdot \sin \beta \leq 1 \quad \text{soit} \quad 0 \leq N \cdot \cos \alpha \leq 1$$

soit 
$$N^2 \cdot (1 - \sin^2 \alpha) \leq 1$$

d'où 
$$N^2 \leq 1 + N^2 \sin^2 \alpha$$

On en déduit alors :

$$n \geq \sqrt{N^2 - 1}$$

Application numérique :

$$n \geq 1,28$$

