

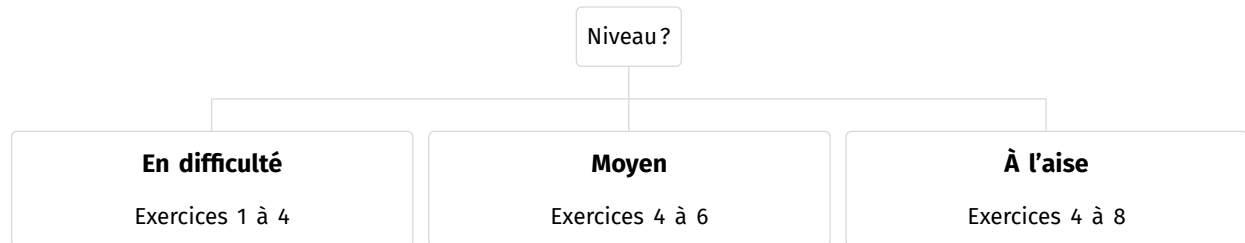


TD 01 | Optique

Introduction à l'optique géométrique



Difficulté croissante au long de la fiche. Consigne : rédiger au propre, faire figurer les unités à chaque étape.



Exercices complémentaires disponibles dans le cahier d'entraînement : **8.1 à 8.12.**



QR vers le cahier

Exercice 1 : longueur d'onde

Savoir-faire

- déterminer la longueur d'onde dans un milieu ;
- lien longueur d'onde et couleur ;

Difficulté : ● ○ ○

L'indice de l'eau étant de 1,33 et celui du verre étant de 1,46, calculer :

- 1 la célérité de l'onde dans ces deux milieux ;
- 2 la longueur d'onde du rayonnement émis par un laser hélium-néon, de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$, dans ces deux milieux. Quelle est la couleur du laser dans chacun des milieux ?

Corrigé

- 3 L'indice est défini par $n = c/v$, d'où $v = c/n$:

$$v_{\text{eau}} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,33} \simeq 2,26 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad v_{\text{verre}} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,46} \simeq 2,05 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

- 4 La fréquence ν est imposée par la source et se conserve à la traversée d'un dioptre :

$$\nu = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$\lambda_{\text{eau}} = \frac{632,8 \text{ nm}}{1,33} \simeq 476 \text{ nm} \quad \lambda_{\text{verre}} = \frac{632,8 \text{ nm}}{1,46} \simeq 433 \text{ nm}$$

La couleur est associée à la **fréquence**, ici inchangée ($\nu = 4,74 \times 10^{14} \text{ Hz}$) : le laser reste **rouge** dans les deux milieux.



Savoir

Il serait trompeur de conclure « bleu » à partir de $\lambda = 476 \text{ nm}$: cette valeur ne correspond au bleu que pour une propagation *dans le vide*.

Exercice 2 : changement de milieu (1/2)

Savoir-faire

- ⚙️ utiliser la relation de *Snell-Descartes* ;
- ⚙️ déterminer un angle limite ;
- ⚙️ identifier un cas de réflexion totale.

Difficulté : ● ○ ○

On considère un rayon lumineux passant de l'air d'indice $n_1 = 1,0$ vers un verre d'indice $n_2 = 1,5$.

- 1 Que vaut l'angle de réfraction pour un angle d'incidence de 30° ?
- 2 Existe-t-il un angle de réfraction limite ? Un angle d'incidence limite ? Calculer leurs valeurs.
- 3 Représenter sur un schéma la zone où la lumière peut se propager.

Corrigé

- 4 Loi de *Snell-Descartes* pour la réfraction : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$, d'où

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 = \frac{1,0}{1,5} \sin(30^\circ) = \frac{0,50}{1,5} \simeq 0,33 \quad \Rightarrow \quad i_2 \simeq 19^\circ$$

Le rayon se rapproche de la normale, ce qui est cohérent avec le passage vers le milieu le plus réfringent ($n_2 > n_1$).

- 5 Comme $n_2 > n_1$, le rapport $n_1/n_2 < 1$: l'équation $\sin i_2 = (n_1/n_2) \sin i_1$ admet toujours une solution. Il n'y a donc **pas de réflexion totale** dans ce sens de propagation, mais il existe un **angle de réfraction limite**, atteint pour l'incidence rasante $i_1 \rightarrow 90^\circ$:

$$\sin i_2^{\text{lim}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1,0}{1,5} \quad \Rightarrow \quad i_2^{\text{lim}} \simeq 42^\circ$$

Tous les rayons venant de l'air sont donc réfractés dans un cône de demi-angle au sommet 42° : aucun rayon ne se propage dans le verre au-delà de cette valeur.

Exercice 3 : changement de milieu (2/2)

Savoir-faire

- ⚙️ utiliser la relation de *Snell-Descartes* ;
- ⚙️ déterminer un angle limite ;
- ⚙️ identifier un cas de réflexion totale.

Difficulté : ● ○ ○



On considère un rayon lumineux passant d'un verre d'indice $n_1 = 1,5$ vers l'air d'indice $n_2 = 1,0$.

- 1 Que vaut l'angle de réfraction pour un angle d'incidence de 30° ?
- 2 Existe-t-il un angle de réfraction limite ? Un angle d'incidence limite ? Calculer leurs valeurs.
- 3 Représenter sur un schéma la zone où la lumière peut se propager.

Corrigé

- 4 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$, d'où $\sin i_2 = \frac{1,5}{1,0} \sin(30^\circ) = 0,75$, soit $i_2 \simeq 49^\circ$. Le rayon s'écarte de la normale ($n_2 < n_1$).

- 5 Pas d'angle de réfraction limite : i_2 peut atteindre 90° . En revanche il existe un **angle d'incidence limite** au-delà duquel il y a **réflexion totale** :

$$\sin i_1^{\text{lim}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,0}{1,5} \quad \Rightarrow \quad i_1^{\text{lim}} \simeq 42^\circ$$

Pour $i_1 > 42^\circ$, aucun rayon ne sort dans l'air (principe de la fibre optique).

Exercice 4 : propagation d'une onde

Savoir-faire

Difficulté : ● ○ ○

- relation longueur d'onde, période, fréquence et vitesse ;
- spectre visible ;

- 1 Rappeler à quel intervalle de longueurs d'onde dans le vide correspond la lumière visible. Quel est l'intervalle correspondant en fréquence ?
- 2 Quelle est la période d'une onde monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$ (raie jaune du sodium) ?
- 3 On considère un faisceau laser rouge, sa longueur d'onde dans le vide valant $\lambda_1 = 632 \text{ nm}$. Le faisceau pénètre dans l'eau d'indice $n = 1,3$. Que deviennent la période et la longueur d'onde de l'onde lumineuse ? Quelle est la couleur du faisceau laser dans l'eau ?
- 4 Déterminer la vitesse de propagation de la lumière dans le diamant d'indice $n = 2,4$.

Corrigé

- 5 Le visible s'étend de 400 nm (violet) à 800 nm (rouge). Avec $v = c/\lambda_0$:

$$\nu_{\text{max}} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{400 \times 10^{-9} \text{ m}} = 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz} \quad \nu_{\text{min}} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{800 \times 10^{-9} \text{ m}} = 3,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Soit $\nu \in [3,8 \times 10^{14} \text{ Hz}; 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}]$ (attention : l'ordre est inversé, λ_0 et ν varient en sens contraire).

- 6

$$T = \frac{\lambda_0}{c} = \frac{589 \times 10^{-9} \text{ m}}{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}} \simeq 2,0 \times 10^{-15} \text{ s} = 2,0 \text{ fs}$$

- 7 La période est imposée par la source : elle est **inchangée**, $T = \lambda_1/c \simeq 2,1 \text{ fs}$. La longueur d'onde, elle,





2026-2027

est divisée par l'indice optique :

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{n} = \frac{632 \text{ nm}}{1,3} \simeq 4,9 \times 10^2 \text{ nm}$$

La couleur est liée à la fréquence, donc le laser reste **rouge** : la valeur 490 nm ne correspondrait au bleu-vert que dans le vide.

8

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2,4} = 1,25 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

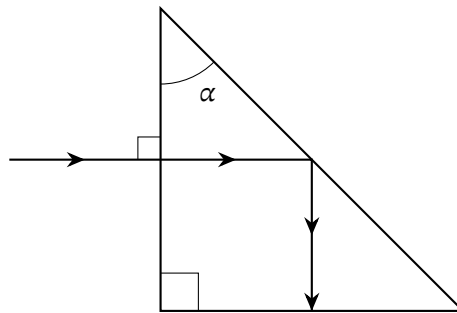
Exercice 5 : prisme

Savoir-faire

- ⚙️ déterminer un angle limite ;
- ⚙️ identifier une réflexion totale ;

Difficulté : ● ○ ○

On souhaite que le trajet des rayons lumineux dans un prisme à $\alpha = 45^\circ$ soit celui reproduit dans la figure ci-dessous. Le prisme, d'indice n , est placé dans l'air d'indice $n_a = 1,00 < n$.



- 1 Expliquer pourquoi le rayon n'est pas dévié à l'entrée du prisme.
- 2 Que vaut l'angle d'incidence sur l'hypoténuse ?
- 3 À quelle condition sur l'indice du prisme la réflexion totale est-elle possible ? Commenter.

Corrigé

- 4 Le rayon incident est horizontal et la face d'entrée est verticale : le rayon arrive donc **normalement** à cette face ($i_1 = 0$). La loi de *Snell-Descartes* $n_a \sin i_1 = n \sin i_2$ donne alors $\sin i_2 = 0$, soit $i_2 = 0$:

Savoir

Un rayon en incidence normale traverse un dioptre sans déviation, quels que soient les indices. Il en va de même à la sortie par la face horizontale.

- 5 La normale à l'hypoténuse fait un angle de 45° avec l'horizontale (l'hypoténuse est inclinée à 45°).





Le rayon se propageant horizontalement dans le verre, l'angle d'incidence sur l'hypoténuse vaut

$$i = 45^\circ$$

On retrouve ce résultat par la géométrie du triangle : le rayon est parallèle à la base, et l'angle au sommet est $\alpha = 45^\circ$.

- 6 On passe du verre vers l'air ($n > n_a$) : il y a réflexion totale si l'angle d'incidence dépasse l'angle limite i_{lim} défini par $\sin i_{\text{lim}} = n_a/n$. La condition $i > i_{\text{lim}}$ s'écrit donc

$$\sin(45^\circ) > \frac{n_a}{n} \quad \Leftrightarrow \quad n > \frac{n_a}{\sin(45^\circ)} = n_a \sqrt{2} \simeq 1,41$$

Commentaire : les verres courants ont un indice $n \simeq 1,5 > 1,41$, la condition est donc satisfaite sans difficulté. Ce prisme à 45° réalise ainsi un miroir à 90° par réflexion totale, sans dépôt métallique : la réflexion est intégrale (pas de perte d'intensité) et ne se ternit pas avec le temps. C'est le principe des prismes de renvoi utilisés dans les jumelles, les périscopes et les appareils photo reflex.

Exercice 6 : fibre optique

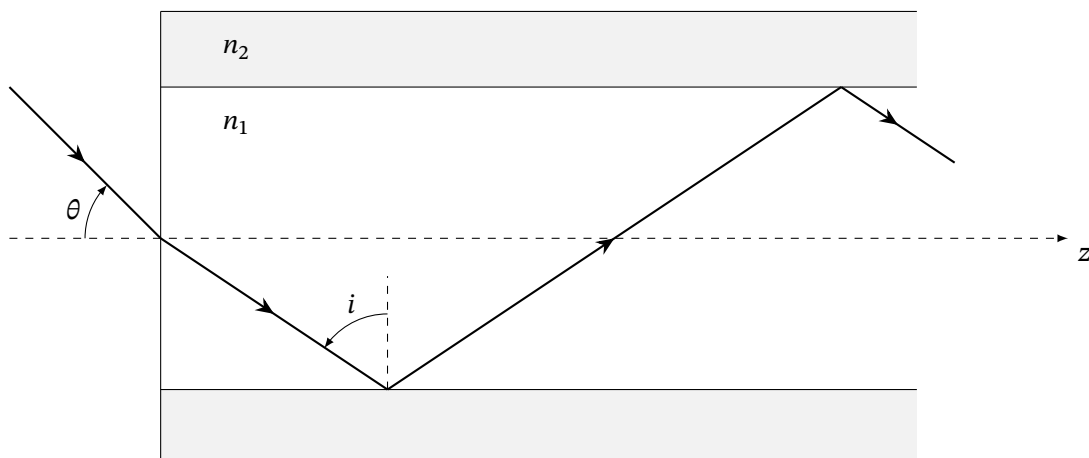
Savoir-faire

- déterminer un angle limite ;
- identifier une réflexion totale ;

Difficulté : ● ● ○

Source : J.P. Perez

Une fibre optique cylindrique se compose de deux milieux coaxiaux transparents, homogènes et isotropes de telle sorte que l'indice optique du cœur n_1 soit supérieur à l'indice optique de la gaine n_2 .



- 1 Montrer que le rayon ne peut se propager dans la fibre que si l'angle d'incidence i est supérieur à un angle i_0 que l'on exprimera en fonction de n_1 et n_2 .
- 2 La face d'entrée de la fibre est plane et normale à Oz . Soit θ l'angle que fait, dans l'air d'indice $n_a = 1,0$, le rayon avec la normale à la face d'entrée. Déterminer, en fonction de n_1 et n_2 l'angle d'acceptance θ_0 correspondant à i_0 .





3 Calculer θ_0 et i_0 pour $n_1 = 1,5$ et $n_2/n_1 = 0,99$.

Corrigé

4 À l'interface cœur/gaine, le rayon passe du milieu le plus réfringent vers le moins réfringent ($n_1 > n_2$) : il peut y avoir réflexion totale. La loi de *Snell-Descartes* $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ n'admet pas de solution pour r dès que $\sin i > n_2/n_1$. Le rayon reste donc confiné dans le cœur (guidage) si

$$i > i_0 \quad \text{avec} \quad \boxed{\sin i_0 = \frac{n_2}{n_1}}$$

Si $i < i_0$, une partie de l'énergie est réfractée dans la gaine à chaque rebond et le rayon est rapidement atténué : il n'est pas guidé.

5 Réfraction à l'entrée : $n_a \sin \theta = n_1 \sin r$, avec r l'angle réfracté compté par rapport à la normale à la face d'entrée, c'est-à-dire par rapport à Oz .

Relation géométrique : la normale à l'interface cœur/gaine est perpendiculaire à Oz , donc i et r sont complémentaires :

$$r + i = \frac{\pi}{2} \quad \Rightarrow \quad \sin r = \cos i$$

La condition de guidage $i > i_0$ équivaut donc à $\cos i < \cos i_0$, soit $\sin \theta < (n_1/n_a) \cos i_0$. L'angle d'acceptance vaut ainsi

$$n_a \sin \theta_0 = n_1 \cos i_0 = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 i_0} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

$$\boxed{\sin \theta_0 = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_a}}$$

Tout rayon entrant avec $\theta < \theta_0$ est guidé ; les autres sont perdus dans la gaine.

Méthode

Attention à l'orientation. Quand θ diminue, i augmente.

6 $\sin i_0 = 0,99 \Rightarrow i_0 \simeq 82^\circ$: le guidage n'est assuré que pour des rayons très rasants sur l'interface.

$$\sin \theta_0 = n_1 \sqrt{1 - 0,99^2} = 1,5 \times 0,141 \simeq 0,21 \quad \Rightarrow \quad \theta_0 \simeq 12^\circ$$

Exercice 7 : réfractomètre d'Abbe

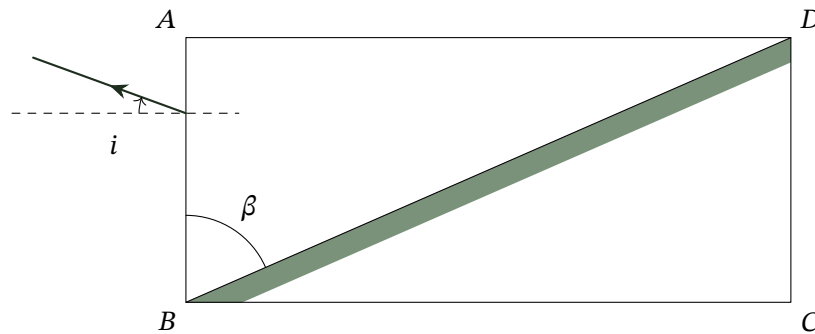
Savoir-faire

- ☛ identifier une réflexion totale ;
- ☛ déterminer des angles limites ;

Difficulté : ● ● ●

Source : J.P. Perez, E.

Thibierge



Un réfractomètre d'Abbe est un appareil servant à mesurer des indices optiques, très utilisé notamment à des fins de caractérisation rapide d'échantillons. Ce réfractomètre est composé de deux prismes identiques, d'indice $n_0 = 1,732$, à base en forme de triangle rectangle. L'angle au sommet β vaut 60° . Entre ces prismes est intercalé un film de liquide d'indice n que l'on cherche à déterminer. Pour ce faire, le réfractomètre est éclairé par la face de gauche par un rayon d'angle d'incidence i réglable.

- 1 Si le rayon sort par la face de droite, quelle sera sa direction ? Répondre par un argument physique sans calcul, éventuellement à confirmer (ou deviner !) par un schéma propre.
- 2 Expliquer comment la mesure de l'angle d'incidence pour laquelle le rayon transmis ne sort plus par la face de droite mais par la face supérieure permet d'en déduire la valeur de l'indice du liquide.
- 3 Que vaut cet indice si l'angle d'incidence critique vaut $18,0^\circ$?
- 4 Quelles sont les limites d'utilisation du dispositif ?

Corrigé

Exercice 8 : détecteur de pluie

Savoir-faire

- identifier une réflexion totale ;
- déterminer des angles limites ;

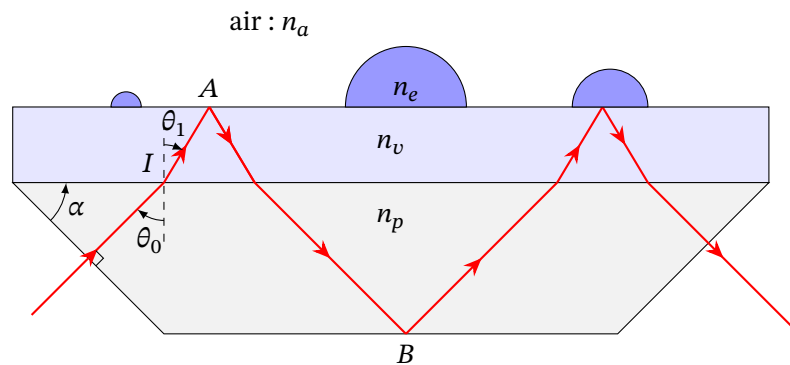
Difficulté : ● ● ●

Source : A. Lafrique, E.

Thibierge

Cet exercice propose de s'intéresser à un modèle simplifié du système de détection automatique de pluie qui commande la mise en route des essuies-glaces d'une voiture.





De plus en plus fréquent pour finalement devenir un équipement généralisé sur presque toutes les gammes de véhicules, le système d'essuie-glace automatique est aujourd'hui un accessoire banal. Cependant, si la grande majorité des gens a compris que cet ensemble était composé d'un capteur couplé à de l'électronique, peu de monde sait réellement comment le capteur fonctionne. Voici l'explication d'un des procédés les plus utilisés.

Comme indiqué sur le schéma, un bloc de plexiglas biseauté situé à l'intérieur du bloc rétroviseur est collé au verre du pare-brise. Une diode électroluminescente (DEL) envoie un pinceau lumineux infrarouge en incidence normale sur le biseau.

Un capteur lumineux mesure en permanence l'intensité de la lumière en sortie de la pièce biseautée : plus il y a d'eau sur la vitre, plus elle est faible. Le capteur de pluie pilote ainsi l'essuie-glace en fonction de la quantité d'eau détectée et sélectionne automatiquement la vitesse de balayage la plus efficace.

Données :

- angle du biseau : $\alpha = 50^\circ$;
- indices optiques :
 - plexiglas $n_p = 1,50$;
 - verre du pare-brise $n_v = 1,55$;
 - eau $n_e = 1,33$.

- 1 Pourquoi utilise-t-on un rayonnement infrarouge ?
- 2 Montrer qu'à l'interface entre le plexiglas et le verre $\theta_0 = \alpha$.
- 3 En déduire la valeur de θ_1 . Commenter.

On suppose pour toute la suite que la différence d'indice entre le plexiglas et le verre est suffisamment faible pour pouvoir négliger tous les phénomènes de réflexion et réfraction à cette interface. En particulier, l'angle d'incidence en A est égal à θ_0 .

- 4 En l'absence de pluie, existe-t-il un rayon réfracté au point A ou au point C ? Justifier.
- 5 En présence de gouttes de pluie sur le pare-brise, placées comme sur la figure, existe-t-il un rayon réfracté au point C ? Justifier.
- 6 Expliquer pourquoi, plus il y aura de gouttes sur le pare-brise, moins l'intensité lumineuse reçue par le capteur sera importante.



📄 Corrigé

🕒 Éléments de réponse

1. $\lambda = 476$ et 433 nm
2. Pas de réflexion totale. Angle limite $\alpha = 42^\circ$.
3. Réflexion totale. Angle limite $\alpha = 42^\circ$.
4. $4,9 \times 10^2$ nm et $1,25 \times 10^8$ m s⁻¹
5. $n > n_a \sqrt{2}$