

Modéliser la lumière

Exercices

Exercice 1 : Couleur d'un laser

[◆◆◆]

Considérons un faisceau issu d'une diode laser de longueur d'onde 520 nm .

1 - Éclairons une feuille avec cette diode laser : de quelle couleur est la tâche observée ?

Le faisceau laser est ensuite envoyé dans un morceau de plexiglas d'indice optique 1,51.

2 - Calculer la longueur d'onde dans le plexiglas. À quelle couleur cela correspond-t-il ? Expliquer.

Exercice 2 : Poussé par le Soleil ?

[◆◆◆]

1 - Le flux lumineux solaire reçu sur Terre vaut $\phi = 1 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. En déduire le flux de photons ϕ_{ph} correspondant, c'est-à-dire le nombre de photons arrivant par mètre carré par seconde.

2 - Ces photons sont absorbés par un homme dos au Soleil. Quelle quantité de mouvement reçoit-il en une seconde ?

3 - À quelle force cela équivaut-il ? Commenter la valeur numérique obtenue.

Donnée : On rappelle que la variation de quantité de mouvement Δp d'un système qui subit une force constante F pendant une durée Δt est donnée par le principe fondamental de la dynamique, aussi appelé seconde loi de Newton,

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = F.$$

Exercice 3 : Cône de réfraction

[◆◆◆]

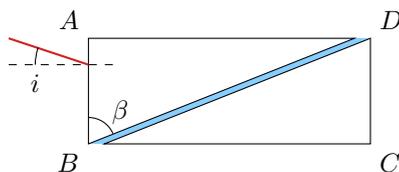
Considérons une interface entre de l'air et de l'eau, d'indices optiques respectifs 1,00 et 1,33.

1 - La lumière vient d'une source placée dans l'air. Dans quel intervalle angulaire se trouve le rayon réfracté dans l'eau lorsque l'angle d'incidence prend toutes les valeurs possibles ? Le représenter sur un schéma.

2 - Même question lorsque la source est située dans l'eau. Répondre sans aucun calcul.

Exercice 4 : Réfractomètre d'Abbe

[◆◆◆]



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 AB par un rayon d'angle d'incidence i réglable.

1 - Si le rayon sort par la face CD , 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 CD mais par la face AD 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 ?

Annale de concours

Exercice 5 : Détecteur de pluie sur un pare-brise

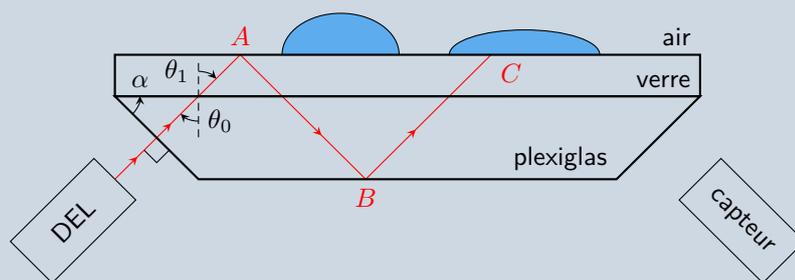
[inspiré oral CCP, ♦♦♦]

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.

Document 1 : Principe de fonctionnement d'un détecteur de pluie

Adapté du site <http://www.fiches-auto.fr>.

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 plexiglas \rightarrow 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-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-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.

Modéliser la lumière

Exercices

Exercice 1 : Couleur d'un laser

- 1 Une longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 520 \text{ nm}$ correspond à de la **lumière verte**.
- 2 Connaissant la longueur d'onde dans le vide λ_0 , on en déduit celle dans le plexiglas,

$$\lambda_p = \frac{\lambda_0}{n} = 346 \text{ nm}$$

Si cette longueur d'onde était donnée dans le vide, **elle ferait partie du domaine ultra-violet ...** mais l'expérience montre qu'une telle longueur d'onde dans le plexiglas correspond à du vert. L'erreur vient du fait que **ce sont les longueurs d'ondes dans le vide qui ont une signification bien connue en termes de couleur**, et pas les longueurs d'ondes dans un milieu.

Exercice 2 : Poussé par le Soleil ?

- 1 En ordre de grandeur, un photon issu du soleil a pour longueur d'onde $\lambda \sim 600 \text{ nm}$, et donc une énergie

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Le flux de photons reçu sur Terre vaut donc $\phi_{\text{ph}} = \phi/\varepsilon$ soit

$$\phi_{\text{ph}} = \frac{\phi \lambda}{hc} = 3 \cdot 10^{21} \text{ photons/m}^2/\text{s}.$$

- 2 Considérons que la surface du dos d'un être humain est de l'ordre de 1 m^2 . En une seconde, il absorbe donc $N = \phi_{\text{ph}} \Delta t = 3 \cdot 10^{21}$ photons. Chacun de ses photons est porteur d'une quantité de mouvement $p_1 = h/\lambda$ d'après la relation de Planck-Einstein. Au total, la variation de quantité de mouvement de l'homme est de

$$\Delta p = N p_1 = \frac{\phi \Delta t}{c} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

- 3 La force équivalente vaut

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\phi}{c} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ N}.$$

C'est une valeur extrêmement faible : si cette personne pèse 70 kg , son poids est de 700 N !

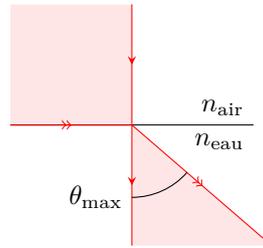
Dans certaines expériences « faites pour », cette force, appelée pression de rayonnement, peut cependant avoir des effets. En particulier, elle est couramment utilisée dans les laboratoires de biologie pour manipuler des cellules ou des virus. La source lumineuse est alors un laser puissant.

Exercice 3 : Cône de réfraction

- 1 L'angle d'émergence θ_t est donné par la seconde loi de la réfraction,

$$\sin \theta_t = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}} \sin \theta_i.$$

Par conséquent, il varie entre 0° en incidence normale et $\theta_{\text{max}} = \arcsin \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}} = 48,8^\circ$ en incidence rasante.



2 Le cône de réfraction lorsque la source est située dans l'eau se déduit de la question précédente grâce au principe de retour inverse de la lumière : **lorsque l'angle d'incidence est compris entre 0 et θ_{\max} , l'angle d'émergence balaie un intervalle allant de 0° à 90°.**

En revanche, aucun rayon émis dans l'air ne peut émerger dans l'eau avec un angle d'émergence supérieur à θ_{\max} . Réciproquement, le principe du retour inverse impose qu'**aucun rayon émis dans l'eau arrivant sur le dioptre avec un angle d'incidence supérieur à θ_{\max} ne peut émerger dans l'air : il y a alors réflexion totale.**

Ce n'est donc pas un hasard si l'angle θ_{\max} , trouvé en tant qu'angle d'émergence, est donné par une relation analogue à celle définissant un angle limite de réflexion totale.

Exercice 4 : Réfractomètre d'Abbe

1 Compte tenu des symétries du dispositif, le principe du retour inverse de la lumière garantit que si le rayon sort du réfractomètre par la face CD alors **l'angle d'émergence vaut i** . En effet,

- ▷ à l'interface AB , la seconde loi de Snell-Descartes donne l'angle d'émergence dans le prisme, noté i_1 ;
- ▷ la géométrie du prisme donne l'angle d'incidence sur la première interface BD , noté i_2 ;
- ▷ sur cette interface, la seconde loi de Snell-Descartes donne l'angle d'émergence dans le liquide, noté i_3 ;
- ▷ comme les deux interfaces BD sont parallèles, alors l'angle d'incidence sur la deuxième interface BD vaut nécessairement i_3 ;
- ▷ la même loi de Descartes que précédemment permet d'en déduire que l'angle d'émergence dans le prisme vaut alors forcément i_2 ;
- ▷ les deux prismes étant identiques, l'angle d'incidence sur l'interface CD est alors nécessairement i_1 ;
- ▷ et par conséquent, la même loi de Descartes qu'à l'interface AB indique que l'angle d'émergence dans l'air par la face CD vaut i .

2 Si le rayon transmis sort par la face AD , c'est qu'il a subi une réflexion totale. Cette réflexion totale ne peut avoir eu lieu qu'à l'interface BD dans le sens prisme \rightarrow liquide, à condition que $n < n_0$. En effet, si elle avait lieu dans le sens liquide \rightarrow prisme le faisceau serait guidé dans le liquide le long de l'interstice entre les deux prismes. Comme l'angle critique de réflexion totale dépend du rapport des indices des deux milieux, ici n_0 et n , il est possible d'en déduire la valeur de n .

3 Commençons par introduire les notations sur le schéma figure 1.

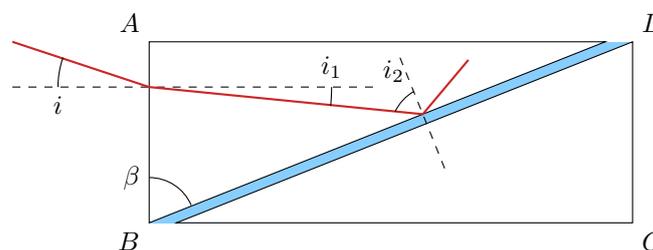


Figure 1 – Réfractomètre d'Abbe.

À la limite de la réflexion totale,

$$i_2 = \arcsin \frac{n}{n_0}$$

Une relation de somme des angles permet d'en déduire i_1 , puisque

$$\beta + \left(\frac{\pi}{2} - i_1\right) + \left(\frac{\pi}{2} - i_2\right) = \pi \quad \text{d'où} \quad i_1 = \beta - i_2$$

Enfin, la seconde loi de Descartes exprimée à l'interface AB donne

$$1 \times \sin i = n_0 \sin i_1 \quad \text{soit} \quad \sin i = n_0 \sin \left(\beta - \arcsin \frac{n}{n_0}\right)$$

Remonter à n demande d'inverser cette relation, soit

$$n = n_0 \sin \left(\beta - \arcsin \frac{\sin i}{n_0} \right) = 1,32$$

4 Une première limitation évidente est qu'un **réfractomètre d'Abbe ne permet de mesurer que des indices de liquides**, voire de gaz en prenant des précautions pour empêcher les fuites, mais en aucun cas de solides. Par ailleurs, comme il repose sur une réflexion totale, **il faut que l'indice du liquide soit inférieur à celui du verre composant les prismes**.

Annale de concours

Exercice 5 : Détecteur de pluie sur un pare-brise

[inspiré oral CCP]

1 Un rayonnement infrarouge a l'avantage d'être invisible. Utiliser une longueur d'onde visible ferait un peu trop tuning ... et surtout risquerait de gêner la conduite, notamment des autres véhicules.

2 La somme des angles dans le triangle HIJ de la figure 2 est donnée par

$$\alpha + \beta + \frac{\pi}{2} = \pi \quad \text{soit} \quad \alpha + \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) + \frac{\pi}{2} = \pi \quad \text{et} \quad \alpha + \pi - \theta_0 = \pi \quad \text{d'où} \quad \boxed{\theta_0 = \alpha}$$

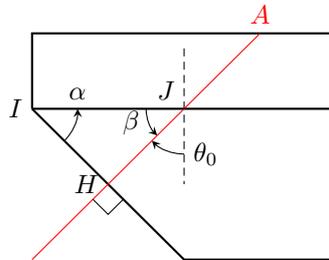


Figure 2 – Détermination de l'angle d'incidence à l'interface plexiglas verre.

⚠⚠⚠ **Attention !** Pour appliquer cette relation connue par cœur il faut que tous les angles soient orientés dans le sens trigonométrique.

Pour retrouver (ou se convaincre) que $\beta = \pi/2 - \theta_0$ on peut tester les cas limites $\theta_0 = 0$ et $\theta_0 = \pi/2$.

3 D'après la seconde loi de Descartes concernant la réfraction,

$$n_p \sin \theta_0 = n_v \sin \theta_1 \quad \text{d'où} \quad \boxed{\theta_1 = \arcsin \left[\frac{n_p}{n_v} \sin \theta_0 \right] = 47,8^\circ .}$$

Pour tester la vraisemblance du résultat, on vérifie que $\theta_1 < \theta_0$ en accord avec le fait que le verre est un peu plus réfringent que le plexiglas.

On constate que la différence entre les deux angles est très faible : comme les indices sont très proches, il n'y a quasiment pas de réfraction.

4 Le verre étant plus réfringent que l'air ($n_v > n_a$), il peut y avoir réflexion totale à l'interface verre \rightarrow air. L'angle d'incidence limite θ_{lim} au delà duquel la réflexion totale a lieu est tel que

$$\theta_{\text{lim}} = \arcsin \frac{n_a}{n_v} = 40,2^\circ .$$

Or l'angle d'incidence du rayon dans le verre en A est égal à $\theta_0 > \theta_{\text{lim}}$. De plus, l'application successive de la loi de la réflexion en A puis en B (on néglige la réfraction à l'interface verre-plexiglas) indique que l'angle d'incidence en C est également θ_0 . Le résultat se généralise donc : **il y a réflexion totale à toutes les interfaces verre \rightarrow air**.

5 En présence de pluie, l'interface extérieure du pare-brise n'est plus verre \rightarrow air mais verre \rightarrow eau. Dans ce cas, l'angle limite donnant lieu à une réflexion totale vaut

$$\theta'_{\text{lim}} = \arcsin \frac{n_e}{n_v} = 59,1^\circ .$$

Cette fois, $\theta_0 < \theta'_{\text{lim}}$, **un rayon est donc transmis vers l'extérieur du pare-brise lorsqu'il est mouillé.**

6 On a raisonné jusqu'ici sur un seul rayon lumineux. En pratique, d'une part la DEL émet un pinceau lumineux, d'autre part celui-ci se réfléchit plusieurs fois sur la face extérieure du pare-brise. Cela permet de tester la présence d'eau sur une surface plus étendue du pare-brise. Plus l'intensité reçue par le photocapteur est faible, plus il y a de « fuites » de lumière à cause de l'eau, et plus les essuies-glace doivent balayer rapidement.

Ne pas oublier que le rayon réfléchi existe toujours, même lorsqu'il y a réfraction. Le capteur reçoit donc toujours une intensité lumineuse non nulle.