

Approfondissement

Lumière : propagation, spectres et réfraction

Réflexion totale et fibre optique, méthode de Rømer, mirage, arc-en-ciel, loi de Wien, incertitudes

6 exercices · niveau ●●● · durée conseillée : 2 h 30 · calculatrice autorisée

Exercice 1 Réflexion totale et fibre optique (hors programme — pour aller plus loin) ●●●

Une fibre optique est faite d'un cœur en verre d'indice $n_c = 1,50$ entouré d'une gaine d'indice $n_g = 1,45$ (figure 1); la lumière y progresse par réflexions successives sur le dioptré cœur-gaine.

■ **DONNÉES** $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ • indices : air 1,00, eau 1,33, verre 1,50, diamant 2,42 • si $n_1 > n_2$, l'angle de réfraction atteint 90° pour l'**angle limite** i_ℓ ; au-delà, plus de rayon réfracté : **réflexion totale** (hors programme)

- 1.1 Justifier que l'angle limite vérifie $\sin i_\ell = n_2/n_1$, puis calculer i_ℓ pour les dioptrés eau-air, verre-air et diamant-air. Pourquoi un diamant taillé « brille »-t-il autant ?
- 1.2 Calculer l'angle limite i_ℓ pour le dioptré cœur-gaine de la fibre. Le rayon de la figure 1 arrive sur la gaine sous l'angle $i = 78^\circ$: est-il guidé ? Justifier.
- 1.3 Un rayon entre par la face d'entrée de la fibre (perpendiculaire à l'axe) sous l'angle α : montrer que l'angle sous lequel il atteint ensuite la gaine vaut $90^\circ - r$, où r est l'angle de réfraction à l'entrée. En déduire la plus grande valeur de α pour laquelle la lumière reste guidée, et dire ce qui se passe si on incline davantage le faisceau.

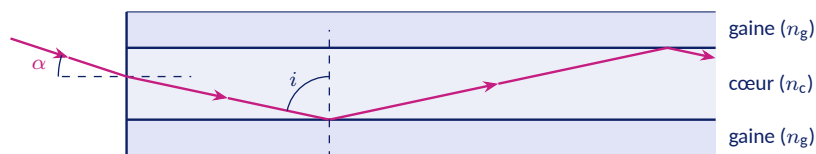


Figure 1 — Guidage de la lumière dans une fibre optique (coupe longitudinale)

Exercice 2 La méthode de Rømer (1676) ●●●

Io, satellite de Jupiter, disparaît régulièrement derrière la planète : ces éclipses se répètent toutes les 42,5 h. En 1676, l'astronome Ole Rømer remarque que, lorsque la Terre s'éloigne de Jupiter, les éclipses observées prennent du retard sur l'horaire prévu ; ce retard se cumule pendant six mois, durée au bout de laquelle la Terre est passée du point de son orbite le plus proche de Jupiter au point le plus éloigné. Le diamètre de l'orbite terrestre vaut $3,0 \times 10^{11}$ m.

■ **DONNÉES** $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

- 2.1 Expliquer l'origine du retard : pourquoi une éclipse est-elle observée plus tard lorsque la Terre s'est éloignée de Jupiter ?
- 2.2 Le retard cumulé au bout des six mois vaut 16 min 40 s. En déduire une valeur de la vitesse de la lumière.
- 2.3 Rømer avait estimé ce retard à 22 min. Quelle valeur de c en déduit-on ? Calculer l'écart relatif avec la valeur admise aujourd'hui.
- 2.4 Entre deux éclipses consécutives, la Terre s'éloigne de Jupiter d'au plus $4,6 \times 10^9$ m. Estimer le retard correspondant et expliquer pourquoi Rømer devait cumuler les observations sur six mois.

Exercice 3 Le mirage de la route chaude



Au-dessus d'une route surchauffée, l'air est d'autant plus chaud — donc d'autant moins dense et d'indice d'autant plus faible — qu'on est proche du sol. On modélise cette situation par quatre couches horizontales d'indices *volontairement exagérés* : 1,40, 1,30, 1,20 et 1,10 de haut en bas (figure 2). Un rayon venu du ciel entre dans la couche supérieure avec un angle $i_1 = 55^\circ$ par rapport à la verticale.

■ **DONNÉES** $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ • si $n_1 > n_2$, l'angle de réfraction atteint 90° pour l'angle limite i_ℓ ; au-delà, plus de rayon réfracté : **réflexion totale** (hors programme)

- 3.1 Calculer l'angle du rayon dans la couche d'indice 1,30, puis dans celle d'indice 1,20. Arrondir au centième de degré.
- 3.2 Montrer que le passage dans la couche d'indice 1,10 est impossible. Que devient alors le rayon ?
- 3.3 Expliquer pourquoi l'automobiliste croit voir une flaque d'eau sur la route. Dans l'air réel, l'indice varie continûment : la trajectoire du rayon est-elle une ligne brisée ou une courbe ? Justifier.

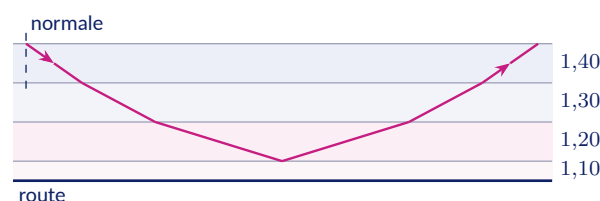


Figure 2 — Trajet modélisé du rayon ($i_1 = 55^\circ$ dans la couche du haut)

Exercice 4 L'arc-en-ciel (hors programme — pour aller plus loin)



Un rayon de Soleil entre dans une goutte d'eau sphérique avec un angle d'incidence $i = 60^\circ$, se réfracte (angle r), se réfléchit une fois sur la face interne de la goutte, puis ressort en se réfractant de nouveau. On admet que la déviation totale du rayon vaut $D = 180^\circ + 2i - 4r$ et que l'indice de l'eau dépend de la couleur : $n = 1,331$ pour le rouge, $n = 1,344$ pour le violet.

■ **DONNÉES** $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ • indice de l'air : 1,00

- 4.1 Calculer l'angle r pour le rouge, puis pour le violet. Arrondir au centième de degré.
- 4.2 Calculer la déviation D pour chaque couleur, puis l'angle $180^\circ - D$ entre le rayon qui ressort de la goutte et la direction de la lumière incidente.
- 4.3 L'observateur, dos au Soleil, voit le rouge et le violet dans deux directions différentes : laquelle apparaît le plus haut dans le ciel ? Justifier. Un arc secondaire, plus pâle, correspond à deux réflexions internes : proposer une raison pour laquelle il est moins lumineux.

Exercice 5 La loi de Wien (hors programme — pour aller plus loin)



Le spectre continu émis par un corps chaud de température T (en kelvins) est le plus intense pour une longueur d'onde $\lambda_{\max}$ donnée par la loi de Wien : $\lambda_{\max} \times T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$.

- 5.1 Calculer $\lambda_{\max}$ pour le filament d'une ampoule à incandescence ($T = 2\,500 \text{ K}$), pour Bételgeuse ($T = 3\,500 \text{ K}$), pour le Soleil ($T = 5\,800 \text{ K}$) et pour Rigel ($T = 11\,000 \text{ K}$). Exprimer les résultats en nanomètres.
- 5.2 Pour chacun de ces corps, indiquer si $\lambda_{\max}$ appartient au visible, à l'infrarouge ou à l'ultraviolet. Les résultats sont-ils cohérents avec les couleurs observées ?
- 5.3 Une ampoule à incandescence est un très mauvais éclairage : moins de 10 % de l'énergie consommée part en lumière visible. Expliquer ce fait à l'aide de la première question, puis estimer la température de surface d'une étoile dont le spectre est le plus intense à 600 nm .

Exercice 6 Combien vaut vraiment cet indice ?



Huit binômes mesurent l'indice de réfraction n d'une plaque de verre à l'aide d'un rapporteur. Ils obtiennent :

binôme	1	2	3	4	5	6	7	8
n	1,48	1,52	1,50	1,49	1,53	1,51	1,47	1,50

- 6.1** Pourquoi les huit résultats diffèrent-ils alors que la plaque est la même ? Citer deux sources de variabilité. Calculer la valeur moyenne $\bar{n}$ de la série, puis son écart-type s à la calculatrice ; vérifier que $s = 0,02$.
- 6.2** L'incertitude-type sur la moyenne vaut $u(\bar{n}) = s/\sqrt{N}$ (N = nombre de mesures) : la calculer et écrire le résultat sous la forme $n = \bar{n} \pm u(\bar{n})$. L'indice tabulé du verre valant 1,50, ce résultat est-il compatible ? Que faudrait-il faire pour diviser par deux $u(\bar{n})$ sans changer le protocole ?