

Bases de l'optique

Travaux Dirigés

Exemples de questions de cours

- Donner l'intervalle des longueurs d'onde du domaine du visible. Préciser en particulier l'ordre de grandeur des longueurs d'onde dans le vide pour les couleurs bleu, vert, jaune et rouge.
- Définir l'indice optique d'un milieu transparent.
- Relier longueur d'onde, fréquence, célérité, indice optique.
- Expliquer l'approximation de l'optique géométrique.
- Définir un rayon lumineux et donner ses propriétés dans le cadre de l'optique géométrique.
- Énoncer les lois de Descartes. Tracer les rayons lumineux sur un schéma dans le cas $n_1 > n_2$ et inversement.
- Que se passe-t-il si l'angle d'incidence est nul ?
- Dans quel cas y a-t-il un angle de réfraction limite ? Exprimer l'angle en fonction de n_1 et n_2 .
- Qu'appelle-t-on réflexion totale ? A quelle condition sur n_1 et n_2 peut-on avoir une réflexion totale ? Démontrer l'expression de l'angle d'incidence limite i_{lim} en fonction de n_1 et n_2 au-delà duquel le phénomène apparaît.
- Donner les différentes sources lumineuses et décrire les spectres associés.
- Qu'appelle-t-on une source ponctuelle monochromatique ? Quelle source réelle se rapproche le plus d'une source monochromatique ?
- Établir l'expression de l'angle au sommet du cône d'acceptance d'une fibre optique à saut d'indice.

Savoir-faire

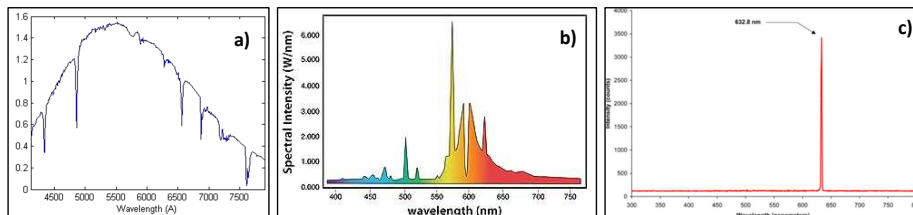
Savoir-faire 1 – Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.

Considérons un faisceau issu d'une diode laser de longueur d'onde 532 nm.

- Q1.** 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 $n = 1,51$.
- Q2.** Calculer la longueur d'onde dans le plexiglas.
- Q3.** À quelle couleur cela correspond-t-il ? Expliquer.

Savoir-faire 2 – Caractériser une source lumineuse par son spectre

- Q1.** Parmi ces trois spectres, lequel est celui d'une étoile, d'un laser, d'une lampe à vapeur de sodium ?
- Q2.** Comment peut-on expliquer les fluctuations du spectre a) ?



Savoir-faire 3 – Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique

En TP d'optique, nous utiliserons des lentilles dont le diamètre typique sera de l'ordre de 5 cm. La longueur des bancs ne dépassera pas 2 m.

- Q1.** Donner la taille angulaire de la tache de diffraction due à un diaphragme de 5 cm. On travaillera dans le visible, avec $\lambda_0 \approx 500$ nm.
- Q2.** En déduire l'élargissement du faisceau au bout de 2 m. Le comparer aux plus petits détails visibles à l'oeil nu (de l'ordre du dixième de millimètre).
- Q3.** Conclure sur la nécessité de prendre en compte la diffraction au laboratoire d'optique.

Savoir-faire 4 – Appliquer les lois de Descartes

Un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 550$ nm passe de l'air à un prisme en verre. L'angle d'incidence vaut $i_1 = 30^\circ$.

- Q1.** Faire un schéma légendé dans le plan d'incidence en précisant si le rayon réfracté se rapproche ou s'écarte de la normale.
- Q2.** Calculer l'angle de réfraction i_2 .
- Q3.** On remplace le verre par un bloc de diamant. L'angle de réfraction vaut alors $i_2' = 12^\circ$. Calculer l'indice de réfraction du diamant.

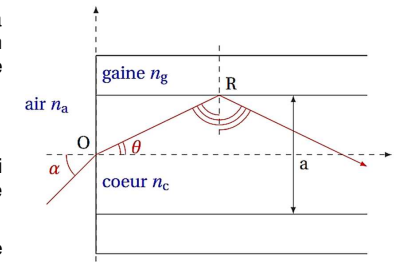
Savoir-faire 5 – Établir les expressions du cône d'acceptance d'une fibre à saut d'indice

Une fibre à saut d'indice est formée d'un cœur cylindrique d'axe OX et de diamètre a , homogène et isotrope d'indice de réfraction n_c , entourée d'une gaine homogène et isotrope d'indice de réfraction $n_g < n_c$. La fibre est limitée à ses extrémités par deux plans perpendiculaires à OX. L'indice de l'air est noté n_a inférieur à n_c et n_g . On étudie la propagation d'un rayonnement monochromatique dans le plan XOY.

- Q1.** Quelle condition doit vérifier l'angle d'incidence i à la surface de séparation cœur-gaine pour qu'un rayon lumineux situé dans le plan XOY se propage en restant confiné dans le cœur ?

On note i_{lim} l'angle d'incidence limite et $\theta_{\text{lim}} = \frac{\pi}{2} - i_{\text{lim}}$.

- Q2.** Montrer que la condition précédente est vérifiée si l'angle d'incidence sur la face d'entrée de la fibre est inférieur à une valeur limite α_{lim} .
- Q3.** Déterminer la valeur de α_{lim} dans le cas d'une fibre optique pour laquelle $n_c = 1,456$, $n_g = 1,410$.



Savoir-faire 6 – Exploiter la formule de Fresnel fournie pour décrire la répartition d'intensité lumineuse

On éclaire deux fentes parallèles, espacées d'une distance a , à l'aide d'un laser de longueur d'onde λ . On cherche à déterminer l'éclairement sur l'écran, distant de D , en un point M quelconque d'abscisse x .

On se place dans le cas où $x \ll D$ et $a \ll D$. Il est alors possible de montrer que la différence de marche au point M entre les deux ondes issues de S_1 et S_2 vaut :

$$\delta(M) = \frac{a \cdot x}{D}$$

- Q1.** En déduire le déphasage $\Delta\phi(M)$ en fonction de a , D , x et λ .
- Q2.** À l'aide de la formule de Fresnel $E(M) = 2 \cdot E_0 \cdot (1 + \cos(\Delta\phi(M)))$, tracer l'éclairement observé sur l'écran. On déterminera l'interfrange i , distance entre deux franges claires.

Exercices incontournables

Exercice 1 : Optique aquatique et fenêtre de Snell

On dispose d'un aquarium et d'un laser. L'indice optique de l'air vaut 1. Celui de l'eau 1,33.

Q1. Le rayon issu du laser arrive avec un angle d'incidence de 50° à la surface de l'eau. Calculer l'angle réfléchi et l'angle réfracté.

Q2. On plonge cette fois-ci le laser dans l'eau (oui, il est étanche). L'angle d'incidence est de 35° . Calculez l'angle réfracté avec lequel émerge le rayon laser. Commentez.



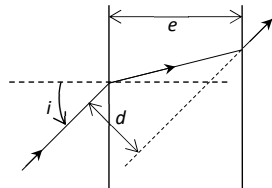
La *fenêtre de Snell* est le phénomène par lequel un spectateur situé à plusieurs mètres sous l'eau et regardant vers la surface ne voit ce qui est au-dessus de la surface qu'à travers un cône de perception de la lumière. La zone située à l'extérieur de cette « *fenêtre* » apparaît au spectateur soit complètement sombre soit réfléchit le décor subaquatique ou la partie inférieure d'objets semi-immergés.

Q3. Comment expliquer ce phénomène ?

Q4. Déterminer l'angle entre les bords du cône de perception et la verticale.

Exercice 2 : Effet d'une vitre sur un rayon lumineux

On considère une lame de verre à faces parallèles, d'épaisseur e , d'indice n , plongée dans l'air d'indice 1. Un rayon incident arrive avec une incidence i .



Q1. Déterminer l'écart d entre le rayon incident et le rayon émergent en fonction de n , e et $\sin(i)$.

Q2. Faire l'application numérique pour $n = 1,5$, $e = 4 \text{ mm}$ et $i = 50^\circ$.

Q3. Quel est l'effet de cette lame sur la vision d'un objet ?

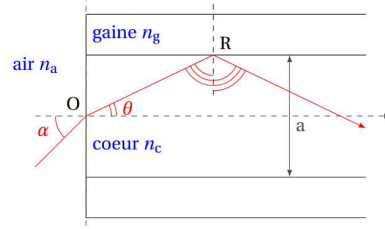
Exercice 3 : Dispersion intermodale d'une fibre optique

On reprend la fibre optique du savoir faire SF5.

On appelle ouverture numérique $ON = n_a \cdot \sin(\alpha_{lm})$.

Q1. Montrer que $ON = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$

On considère maintenant une fibre optique ($n_c = 1,456$, $n_g = 1,410$) de longueur L . Le rayon entre dans la fibre avec un angle d'incidence α variable compris entre 0 et α_{lm} .



Q2. Quel est le rayon qui traverse le plus rapidement la fibre ? Exprimer, en fonction de L , c et n_c , la durée de parcours T_1 de ce rayon.

Q3. Quel est le rayon qui met le plus de temps à traverser la fibre ? Exprimer, en fonction de L , c , n_g et n_c , la durée de parcours T_2 de ce rayon.

Q4. En déduire l'expression de l'intervalle de temps $\delta t = T_2 - T_1$ en fonction de L , c , n_g et n_c . On posera $2\Delta = 1 - \left(\frac{n_g}{n_c}\right)^2$ avec $\Delta \ll 1$. Dans ces conditions, exprimer δt en fonction de L , c , n_c et Δ . Calculer la valeur de δt pour $L = 10 \text{ km}$.

On injecte à l'entrée de la fibre une impulsion lumineuse de durée τ_e formée par un faisceau de rayons ayant un angle d'incidence compris entre 0 et α_{lm} .

Q5. Le codage binaire de l'information consiste à envoyer des impulsions lumineuses, appelées bits, périodiquement avec une fréquence f . En supposant τ_e négligeable devant δt , quelle est la fréquence maximale de transmission $f_{\max}$ qui empêche le recouvrement des impulsions à la sortie de la fibre ?

Q6. En considérant $L_{\max}$ la longueur maximale de fibre optique qui permet d'éviter le phénomène de recouvrement des impulsions, on définit le produit $B = L_{\max} \times f$ comme étant la bande passante de la fibre optique. Exprimer B en fonction de c , n_c et Δ . Expliquer l'intérêt d'introduire cette grandeur. Pour un débit de 100 Mbits par seconde, évaluer et commenter la longueur maximale de fibre optique que l'on peut utiliser pour transmettre le signal.

Exercices d'entraînement

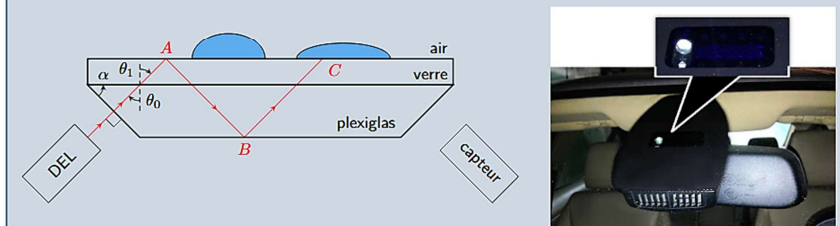
Exercice 4 : Détecteur de pluie sur un pare-brise (d'après www.etienne-thibierge.fr)

Cet exercice propose de s'intéresser à un modèle simplifié du système de détection automatique de pluie qui commande la mise en route des essuie-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 $n_e = 1,33$.

Q1. Pourquoi utilise-t-on un rayonnement infrarouge ?

Q2. Montrer qu'à l'interface plexiglas $\rightarrow$ verre, $\theta_0 = \alpha$.

Q3. 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 .

Q4. En l'absence de pluie, existe-il un rayon réfracté au point A ou au point C ? Justifier.

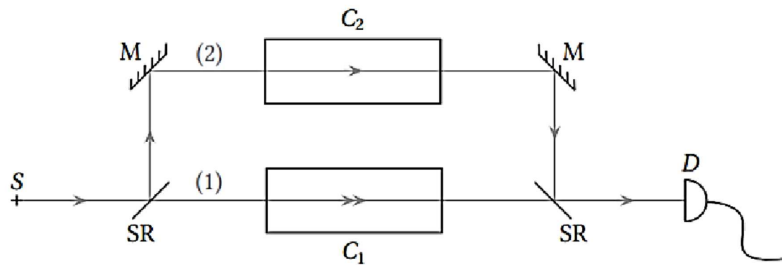
Q5. En présence de gouttes de pluie sur le pare-brise, placées comme sur la figure, existe-il un rayon réfracté au point C ? Justifier.

Q6. Expliquer pourquoi plus il y aura de gouttes sur le pare-brise, moins l'intensité lumineuse reçue par le capteur sera importante.

Exercice 5 : Mesure d'indice optique de l'air

Un laser de longueur d'onde $\lambda = 532 \text{ nm}$ placé en S éclaire une lame séparatrice (SR) qui sépare le faisceau en deux de même intensité I0 (figure ci-dessous). Un des faisceaux suit le trajet (1), il est transmis par la lame et va directement au détecteur (D) en étant transmis par la seconde lame séparatrice. Le deuxième faisceau suit le trajet (2), il est réfléchi par la lame puis est guidé par deux miroirs plans (M) avant d'être réfléchi par une autre lame séparatrice et arrive au détecteur (D). Sur les trajets (1) et (2) sont placées deux cuves C_1 et C_2 , de longueur $\ell = 20,00 \text{ cm}$. L'expérience est réalisée dans l'air d'indice optique n_{air} .

Les cuves sont initialement remplies d'air à pression atmosphérique.



Q1. On constate que l'intensité mesurée par le détecteur est maximale. Que peut-on dire des chemins optiques $(SD)_{1,\text{air}}$ et $(SD)_{2,\text{air}}$ correspondant respectivement aux trajets (1) et (2) ?

Q2. En déduire la valeur modulo λ de la différence de marche $\delta D_{\text{air}} = (SD)_{2,\text{air}} - (SD)_{1,\text{air}}$ entre les deux trajets lorsque les deux cuves sont remplies d'air.

On utilise une pompe pour faire le vide dans la cuve C_1 .

Q3. Exprimer la variation de chemin optique $(SD)_{1,0} - (SD)_{1,\text{air}}$ sur le chemin (1) dû à mise sous vide de C_1 .

L'indice « 0 » indique que la cuve C_1 est vide et l'indice « air » que la cuve C_1 est remplie d'air.

Q4. En déduire l'expression de la différence de marche $\delta D_0 = (SD)_{2,0} - (SD)_{1,0}$ en fonction de δD_{air} et n_{air} .

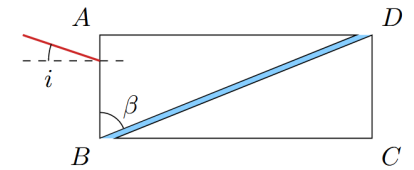
Lorsque la cuve C_1 est considérée comme vide, le détecteur a enregistré le défilement de $N = 102$ maxima d'intensité durant la phase de pompage et détecte une intensité nulle à la fin.

Q5. En déduire une estimation de l'indice optique de l'air.

Exercice 6 : Réfractomètre d'Abbe (difficile)

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.



Q1. 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.

Q2. 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 de en déduire la valeur de l'indice du liquide.

Q3. Que vaut cet indice si l'angle d'incidence critique vaut $18,0^\circ$?

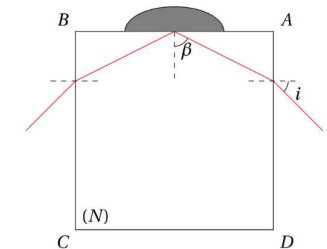
Q4. Quelles sont les limites d'utilisation du dispositif ?

Exercice 7 : Réfractomètre de Pulfrich

On veut mesurer l'indice de réfraction n d'un liquide.

On dépose une goutte de ce liquide sur un cube de verre transparent d'indice $N = 1,50$. On éclaire ce cube par un faisceau lumineux d'incidence i variable sur la face d'entrée AD.

On mesure la valeur de l'angle limite d'incidence i_l pour lequel la goutte apparaît lumineuse.



Q1. Justifier pourquoi, pour $i \geq i_l$, la goutte est si lumineuse.

Q2. Déterminer alors l'indice de réfraction n en fonction de N et i_l .

Q3. Montrer que ce réfractomètre mesure des indices n compris entre deux valeurs à déterminer.

Exercice 8 : Prisme à réflexion totale

On considère un prisme d'angle au sommet $\hat{A} = 90^\circ$. On cherche à dévier un faisceau de 90° avec (c'est un dispositif qu'on trouve dans les jumelles par exemple).

On injecte pour cela le faisceau perpendiculairement à une face, celui-ci se réfléchit sur la base du prisme, puis ressort perpendiculairement à la seconde.

Q1. Calculez l'indice du verre permettant une réflexion totale sur la base du prisme.

Q2. On considère un rayon faisant un angle i avec la normale à la surface d'entrée. Le rayon émergent est-il encore perpendiculaire au rayon incident ?

