

TD 1 : Sources lumineuses, modèle de l'optique géométrique

Fonctionnement du TD

Les exercices de travaux dirigés sont à préparer avant chaque séance. Vous passerez au tableau les corriger.

Préparer ne veut pas dire parfaitement réussir chaque exercice, mais y avoir vraiment réfléchi, avoir relevé les points de blocage. Le plus important est que, pendant la correction, vous compreniez vraiment vos erreurs et points de blocage.

Je vous conseille d'ailleurs de ne pas effacer les parties avec des erreurs, mais de bien mettre en évidence à côté « pourquoi ce que j'ai fait est faux » : en révisant (dans quelques jours pour la colle, dans 2 semaines pour le DS, dans 9 mois pour le concours blanc, dans 2 ans pour le concours, ...) vous saurez qu'il faut être vigilant sur ce point et limiterez ainsi le risque refaire l'erreur.

Venir en TD sans avoir cherché les exercices est une perte de temps totale, suivre/prendre une correction sans avoir cherché l'exercice avant ne sert à rien.

N'hésitez pas à poser toutes vos questions, avant, pendant ou après les séances. Pas de question bête, et jamais de jugement.

Des indications sur la difficulté de l'exercice (de ● ● ● à ● ● ●) sont proposées.

- ♥ : Exercice très important.
- 🔧 : Exercice plus calculatoire/technique.
- 📋 : Exercice issu/inspiré d'un concours (écrit ou oral).

PARTIE I

Questions de cours

- Rappeler la valeur numérique approchée de la célérité de la lumière dans le vide.
- Définir un milieu transparent et son indice de réfraction n . Pourquoi vérifie-t-on toujours $n \geq 1$? Rappeler la valeur approchée de l'indice de réfraction de l'air.
- Quelle relation relie la fréquence f d'une radiation monochromatique, sa longueur d'onde dans le milieu λ et sa vitesse de propagation dans le milieu v ? En déduire une relation entre λ et λ_0 , longueur d'onde du rayonnement dans le vide.
La fréquence du rayonnement est-elle modifiée lors d'un changement de milieu ? La couleur ?
- Donner un ordre de grandeur de l'intervalle (en longueur d'onde dans le vide et en fréquence) correspondant au spectre visible.
- Quelles sont les différents types de sources lumineuses pouvant être rencontrées en laboratoire ? Donner quelques caractéristiques du spectre lumineux de chacune d'entre elles.
- Quels sont les deux phénomènes permettant de mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière ?
- Expliquer en quoi consiste l'approximation utilisée dans le cadre de l'optique géométrique. Quel critère quantitatif permet-il de savoir quand utiliser celle-ci ?
- Comment un rayon lumineux se propage-t-il dans un milieu homogène isotrope ?
- Rappeler, en vous appuyant sur un schéma faisant apparaître toutes les notations nécessaires et le vocabulaire associé, les lois de Snell-Descartes.

- Expliquer en quoi consiste le phénomène de réflexion totale.
Est-il observable lorsqu'on passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ou l'inverse ?
Démontrer rigoureusement la condition de réflexion totale.

PARTIE II

Application directe du cours

- Que se passe-t-il quand un rayon incident arrive selon la normale ?
- Un rayon incident ($i = 30^\circ$) passe de l'air vers un milieu transparent d'indice inconnu n . L'angle de réfraction est mesuré et vaut $r = 20^\circ$. Quel est l'indice n du milieu inconnu ?
- Un rayon lumineux passe de l'air à l'eau ($n_e = 1,33$) .
 - Déterminer l'angle de réfraction pour un angle d'incidence de 30° .
 - Déterminer l'angle d'incidence pour un angle de réfraction de 30° .
- Comparer les angles d'incidence et de réfraction dans les deux situations suivantes :
 - Le rayon passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice $n_2 < n_1$ (milieu moins réfringent).
 - Le rayon passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice $n_2 > n_1$ (milieu plus réfringent).
- Un laser à une longueur d'onde $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ dans le vide. Quelle est sa fréquence ? Sa couleur ?
Quelle est sa longueur d'onde dans l'eau ($n = 1,33$) ? Sa fréquence ? Sa couleur ?
- Déterminer si on peut appliquer les lois de l'optique géométrique dans les cas suivants :
 - un faisceau lumineux se propage à l'intérieur de l'objectif d'un téléphone portable
 - un laser rouge rencontre un cheveu
 - un rayonnement micro-onde dans un four micro-onde.

PARTIE III

Exercices

Exercice 1 : Lampe au fond de la piscine



On positionne une lampe au fond d'une piscine de profondeur $h = 2,0 \text{ m}$. Ses deux autres dimensions sont supposées suffisamment grandes. On prendra $n = 1,33$ pour l'indice optique de l'eau et $n_0 = 1$ pour l'air.

- Cette source émet dans toutes les directions de l'espace, représenter différents rayons qui parviennent sur le dioptre eau/air. Que peut-il s'y produire ?
- Décrire quantitativement la zone de la surface à travers laquelle, les rayons lumineux issus de la lampe peuvent passer.

Exercice 2 : L'éclat de diamant



L'éclat du diamant est lié à sa capacité à piéger la lumière qui pénètre à l'intérieur. La forme du diamant permet aussi de renforcer son éclat. Données : $n_{\text{diamant}} = 2,4$; $n_{\text{verre}} = 1,7$; $n_{\text{eau}} = 1,33$

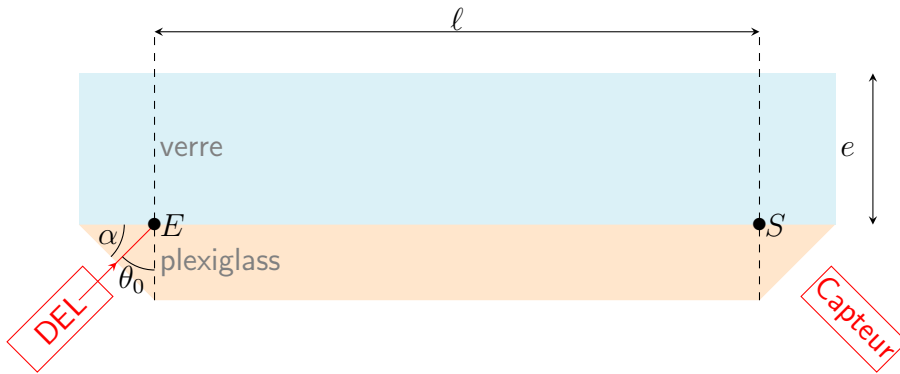
- Justifier que la lumière pénètre dans le diamant
- Calculer i_ℓ , l'angle limite d'incidence de la lumière dans le diamant, au-delà duquel la lumière est totalement réfléchie à l'intérieur du diamant. Commenter.

Du verre est taillé à la manière d'un diamant, pour fabriquer des bijoux à bas coût.

- Calculer l'angle de réflexion totale verre/air. Comparer au cas du diamant.
- Lorsqu'on plonge le faux diamant dans l'eau, il perd son éclat. Justifier.

Exercice 3 : Détection de pluie sur un pare-brise

La plupart des véhicules modernes sont équipés de détecteur de luminosité et de détecteur de pluie permettant à l'électronique de contrôle du véhicule de déclencher l'allumage des feux ou le système d'essuie-glace du pare-brise automatiquement. On présente ici le principe d'un système de détection de pluie.



Sur la face intérieure du pare-brise, une LED projette un faisceau lumineux qui voyage ensuite dans l'épaisseur du verre jusqu'à un capteur qui mesure l'intensité de la lumière qu'il reçoit.

La LED éclaire en incidence normale une pièce réalisée en plexiglas d'indice optique $n_p = 1,50$, la lumière arrive alors selon un angle d'incidence i_1 sur l'interface plexiglas-verre, l'indice optique du verre est pris égal à $n_v = 1,55$. L'indice optique de l'eau est $n_e = 1,33$ et l'indice optique de l'air est $n_a = 1,00$. L'épaisseur du pare-brise qu'on supposera localement plat, est notée $e = 1,00$ cm et on note $L = 8,45$ cm la distance qui sépare l'entrée dans le verre de la sortie.

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

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.

On estime que pour l'interface verre-eau et dans les conditions de l'expérience, le coefficient de réflexion en puissance est égale à $r = 0,62$ (ce qui signifie que l'intensité lumineuse du rayon réfléchi vaut 62 % de l'intensité lumineuse du rayon incident).

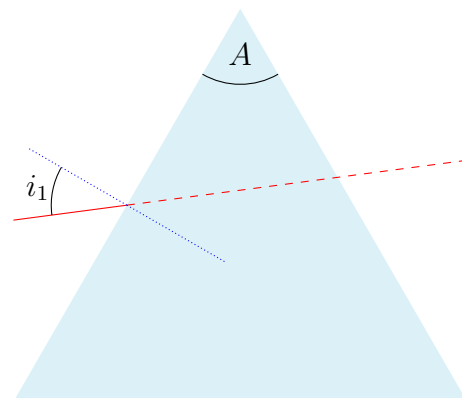
7. Combien de dioptries verre-eau le faisceau a-t-il rencontré ? Estimer la fraction du pare-brise qui est couverte d'eau.

Exercice 4 : Prisme

On considère un prisme droit en verre d'indice $n = 1.5$.

Un rayon de lumière monochromatique arrive sous incidence i_1 sur la face d'entrée du prisme.

On appelle déviation D l'angle entre la direction d'incidence du rayon et la direction de sortie du prisme du rayon.



1. Donner les relations du prisme liant les angles d'incidence et de réfraction i_1, r_1, i_2 et r_2 du rayon lorsqu'il traverse les deux dioptries du prisme (les angles i sont extérieurs au prisme et les angles r sont intérieurs au prisme).
2. A quelle condition sur r_2 le rayon émerge-t-il de la face de sortie du prisme ?
3. Donner l'angle d'incidence limite $i_{1,\text{lim}}$ permettant la traversée du prisme. On donne $A = 60^\circ$.
4. Calculer la déviation D en fonction de i_1, i_2 et A .

On peut montrer que lorsque l'angle d'incidence varie, la déviation passe par un minimum D_m .

On a $\frac{dD}{di_1} = 1 - \frac{\cos(r_2) \cos(i_1)}{\cos(i_2) \cos(r_1)}$

Le minimum de déviation correspond au cas symétrique où $i_1 = i_2$ et $r_1 = r_2$.

5. Déterminer l'expression de l'indice du prisme en fonction de D_m et A . Quel est l'intérêt de cette relation ?
6. On éclaire le prisme avec une lampe à vapeur de mercure, pour laquelle on a mesuré la déviation minimale et obtenu les valeurs de n suivantes :

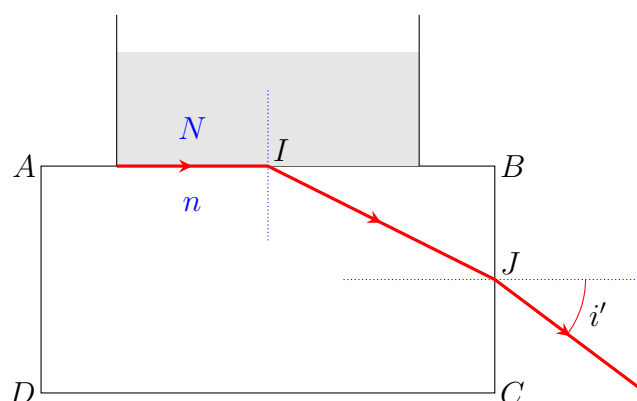
$\lambda(\mu\text{m})$	0.4007	0.4358	0.4916	0.5461	0.5770
n	1.803	1.791	1.774	1.762	1.757

Montrer que ces mesures sont cohérentes avec la loi de Cauchy et exprimer ses coefficients numériques A et B .

On donne la loi de Cauchy : $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$

Exercice 5 : Réfractomètre d'Abbe

Un rayon lumineux provenant d'un milieu d'indice inconnu N tombe sous incidence rasante sur un prisme d'indice $n > N$. Il émerge en faisant un angle i' avec la normale à la face BC. Le prisme est tel que l'angle $\widehat{B}$ est droit.



1. A quelle condition sur n et N un rayon lumineux peut-il émerger de la face BC ?
2. On suppose la condition ci-dessus vérifiée et on mesure $i' = 15^\circ$. Exprimer N en fonction de n et i' . Sachant que $n = 1.732$, calculer N .

Exercice 6 : Traversée d'une lame à faces parallèles

Sur la face supérieure d'une lame de verre formée de deux dioptries plans parallèles, d'épaisseur $e = 8,0 \text{ cm}$, d'indice $n_2 = 1,5$, plongée dans l'air (dont on supposera l'indice égal à 1), arrive un pinceau lumineux sous l'incidence $\theta = 60^\circ$.

1. Quel est l'angle de la transmission de la lame ?
2. Quel est l'angle d'émergence de la lame ? Commenter le résultat.
3. Quelle est la déviation angulaire totale du rayon ?
4. Exprimer et calculer la déviation latérale d du faisceau en fonction de e , des angles d'incidence et d'émergence sur la face supérieure. Commenter le résultat.
5. A partir de la relation obtenue à la question précédente, montrer que la déviation latérale peut se mettre sous la forme :

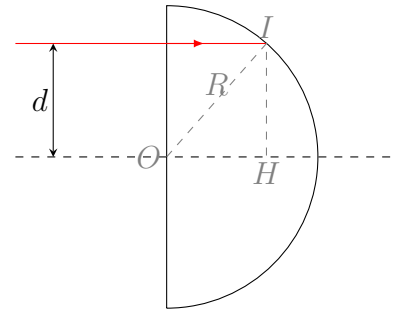
$$d = e \sin(\theta_{i1}) \left(1 - \frac{n_1 \cos(\theta_{i1})}{n_2 \cos(\theta_{r1})} \right)$$

Exercice 7 : Trajet d'un rayon dans une demi-boule



On s'intéresse au trajet de rayons lumineux se propageant dans une demi-boule de centre O et de rayon R , d'indice optique n plongée dans l'air.

Le rayon arrive normalement à la face plane de la demi-boule, il est alors distant de d par rapport à l'axe optique. On note I le point d'incidence sur la partie sphérique, i l'angle d'incidence en I et r l'angle de réfraction en I .



Le rayon émergent, lorsqu'il existe, coupe l'axe optique en A .

1. Pourquoi peut-il se produire le phénomène de réflexion totale en I ? Établir l'inégalité que doit vérifier l'angle d'incidence i pour qu'il y ait réflexion totale en I .
2. Établir l'expression de l'angle d'incidence i en fonction de d et R .
3. En déduire l'expression de la distance d_{lim} à l'axe optique pour qu'il y ait réflexion totale en I . Se produit-elle lorsque $d > d_{\text{lim}}$? ou lorsque $d < d_{\text{lim}}$?

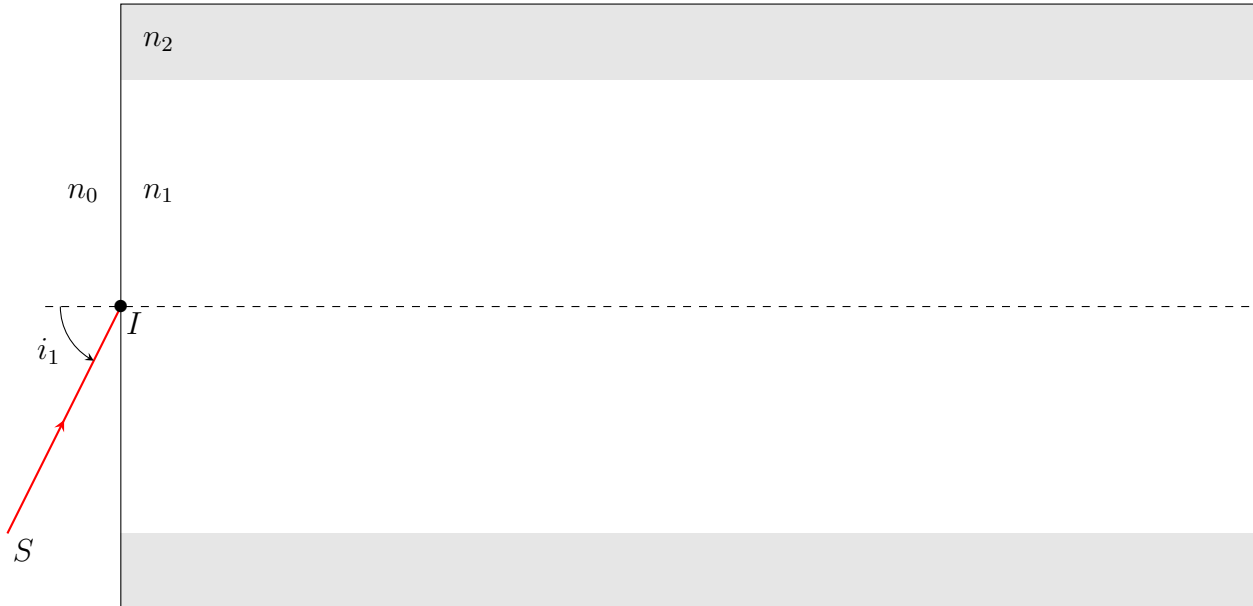
On considère dans la suite que $d < d_{\text{lim}}$. La suite est un peu plus calculatoire et nécessite de manipuler (un peu) la trigonométrie. Aidez-vous d'un grand schéma que vous complétez clairement.

4. Montrer que la distance OA s'exprime en fonction de R , i et r par : $OA = R \left(\cos(i) + \frac{\sin(i)}{\tan(r - i)} \right)$.
5. En déduire la position limite F' du point A lorsque d est très petit. On donnera l'expression en fonction de R et n .

Exercice 8 : Fibre à saut d'indice



On étudie la propagation de la lumière dans une fibre à saut d'indice.



1. Le plan d'incidence d'un rayon SI se propageant dans l'air et tombant sur la fibre est le plan de la figure ci dessus.
 - (a) Reproduire la figure en complétant le trajet du rayon lumineux. On notera r_I l'angle de réfraction en I , J le point d'incidence entre le cœur et la gaine, i_J , i'_J et r_J les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction en J .
 - (b) Appliquer la seconde loi de Descartes en I et J .
 - (c) Quel phénomène doit-être réalisé pour que la propagation se fasse uniquement dans le cœur?
 - (d) Donner la condition sur i_J pour le réaliser.
 - (e) Relier r_I à i_J et en déduire la condition sur r_I .

- (f) On notera i_A l'angle limite de i_I (angle d'acceptance) pour lequel il y a propagation dans le cœur uniquement.

Établir que la condition sur $\sin(i_I)$ peut s'écrire $\sin(i_A) = n_1 \sqrt{2\Delta}$

Faire l'application numérique.

On donne $n_1 = 1.5$ et $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = 10^{-2}$

2. Une impulsion lumineuse très brève arrive à $t=0$, au point I sous la forme d'un faisceau conique convergent de demi-angle au sommet $i_I < i_A$.
- (a) Calculer le temps de propagation t_0 du rayon central pour lequel $i_I = 0$
 - (b) Calculer le temps de propagation t_{max} du rayon extrême du cône pour lequel $i_I = i_A$.
 - (c) Exprimer et calculer le retard intermodal . $AN : L = 10 \text{ m}$.