

DM1 : Optique et quantique

Le travail en groupe est fortement encouragé, vous pouvez rendre une copie par groupe de 2 ou 3. Attention, tous les membres du groupe doivent avoir fait tout le DM ! Il ne s'agit pas de partager le travail.

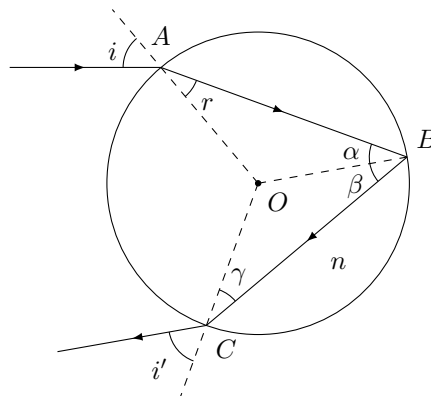
Exercice 1 : L'ARC-EN-CIEL

L'objectif de ce problème est d'expliquer comment se forme un arc-en-ciel lorsque la pluie et le soleil sont simultanément présents.

1 Premier arc-en-ciel

- Énoncer les lois de Descartes relatives à la réflexion et à la réfraction entre deux milieux homogène isotropes d'indices n_1 et n_2 .
- Qu'est-ce que le phénomène de réflexion totale ? Calculer l'angle d'incidence limite au-delà duquel il y a réflexion totale lorsque les deux milieux sont l'eau d'indice 1.33 et l'air d'indice 1.

Un arc-en-ciel se produit lorsque les rayons du soleil sont réfléchis par des gouttes d'eau sphériques en suspension dans l'air. Le schéma suivant représente le trajet suivi par un rayon lumineux qui subit une seule réflexion à l'intérieur de la goutte d'eau.



- Donner la relation entre l'angle de réfraction r à l'intérieur de la goutte, i et n .
- Le rayon subit en B une réflexion sur l'interface eau-air. Cette réflexion peut-elle être totale ?
- Montrer que $\alpha = \beta = \gamma = r$, et en déduire que $i' = i$.
- Montrer que la déviation D subie par le rayon entre l'entrée et la sortie de la goutte est $D = \pi + 2i - 4r$.

Les rayons du soleil arrivant parallèlement les uns aux autres, ils éclairent parallèlement toute la goutte et couvrent donc tous les angles d'incidence entre 0 et $\frac{\pi}{2}$. Un rayon arrivant sur la goutte avec un angle d'incidence nul subira une déviation de 180° . Nous allons montrer qu'il existe un angle de déviation minimum D_m .

- L'angle de réfraction r est une fonction de l'angle d'incidence i . En dérivant l'équation obtenue à la question 3, montrer que

$$\frac{dr}{di} = r'(i) = \frac{\cos i}{n \cos r(i)}$$

- Donner l'expression de $r(i)$.
- L'angle de déviation minimum D_m est atteint pour un angle d'incidence i_m tel que $\frac{dD(i)}{di}(i_m) = 0$. Montrer que :

$$\frac{dD}{di}(i_m) = 0 \Leftrightarrow \frac{\cos i_m}{n \cos \left(\arcsin \frac{\sin i_m}{n} \right)} = \frac{1}{2}$$

- En utilisant l'égalité $\cos(\arcsin x) = \sqrt{1 - x^2}$, montrer que l'on obtient

$$\cos^2 i_m = \frac{n^2 - 1}{3}$$

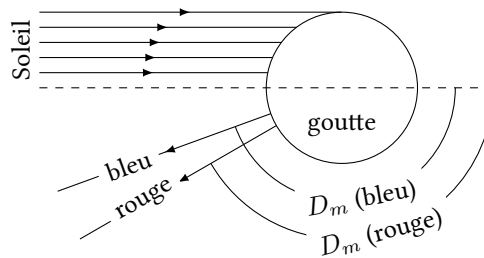
- En déduire que la déviation minimale est donnée par la formule :

$$D_m = D(i_m) = 2 \arccos \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}} - 4 \arcsin \sqrt{\frac{4 - n^2}{3n^2}} + \pi$$

12. Calculer la valeur numérique de D_m .

On supposera dans la suite que la majeure partie de l'intensité renvoyée par la goutte d'eau l'est dans la direction D_m , il y a accumulation de la lumière dans cette direction.

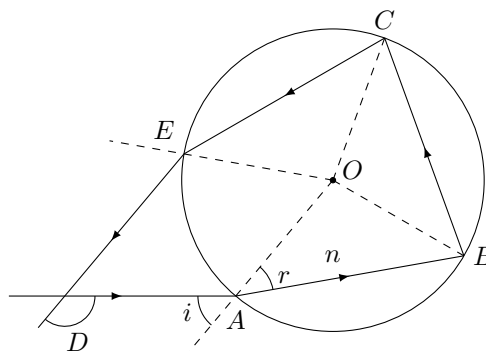
En réalité, l'indice de l'eau augmente avec la longueur d'onde λ , donc la déviation minimale de la lumière diminue avec λ . Sur le schéma ci-dessous on représente une goutte d'eau sur laquelle arrive les rayons du Soleil ainsi que les rayons extrêmes réfléchis pour de la lumière rouge et de la lumière bleue.



13. En vous appuyant sur cette représentation et sur un schéma aussi clair que possible, indiquer dans quelle direction un observateur doit regarder pour voir un arc-en-ciel, expliquer sa forme d'arc de cercle, et la présence de la couleur rouge à l'extérieur de l'arc. (on pourra indiquer quelles sont les gouttes d'eau qui pourront renvoyer de la lumière rouge vers l'observateur et quelles sont celles qui lui renvoient de la couleur bleue)

2 Deuxième arc-en-ciel

Un rayon entrant dans une goutte d'eau peut y subir deux réflexions avant d'en sortir, on obtient le trajet représenté sur le schéma suivant :



14. Montrer que la déviation D de ces rayons est donnée par la relation

$$D = 2\pi + 2i - 6r = 2i - 6r \quad (1)$$

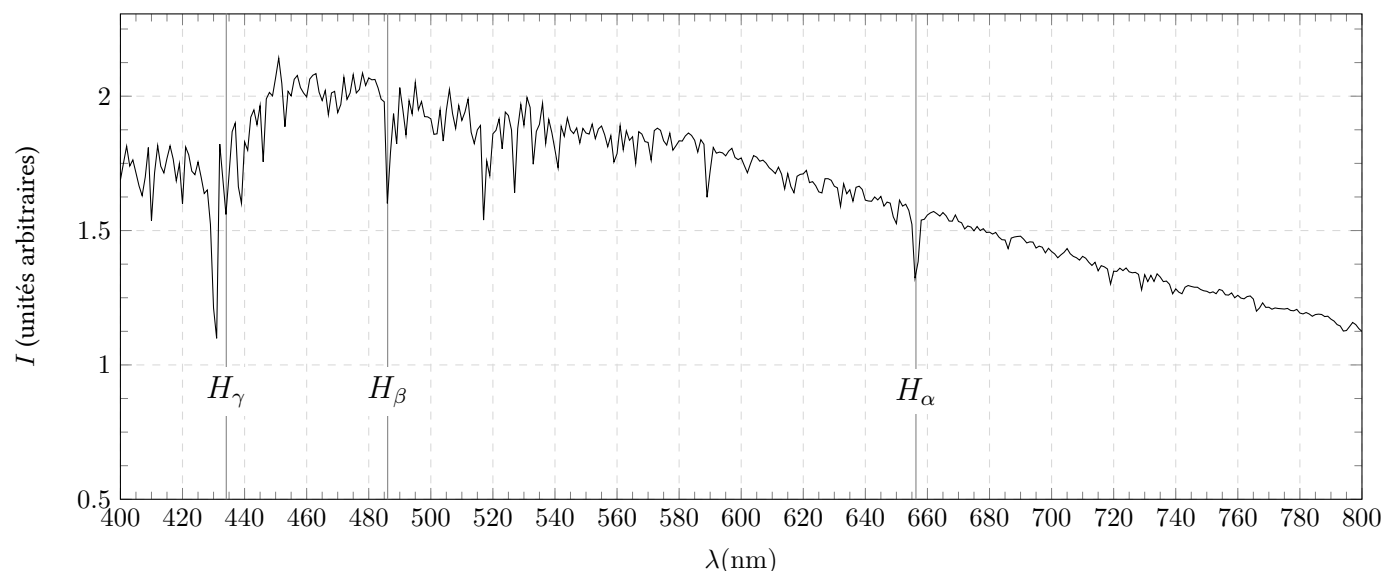
15. On peut montrer que cette fois il existe un angle de déviation maximum $D_M < D_m$ avec $D_M(\text{rouge}) > D_M(\text{bleu})$. Expliquer en vous appuyant sur un schéma pourquoi cela conduit à l'apparition d'un second arc-en-ciel au dessus du premier dont l'ordre des couleurs est inversé par rapport au premier.
16. Expliquer pourquoi ce second arc-en-ciel est moins lumineux que le premier.
17. Expliquer en vous appuyant éventuellement sur un schéma l'existence de la *bande sombre d'Alexandre*, une bande moins lumineuse située entre les deux arcs-en-ciel.

Exercice 2 : SPECTRE SOLAIRE

Un atome d'hydrogène est constitué d'un seul électron autour d'un noyau constitué d'un proton. Les orbites permises pour l'électron ont des énergies :

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad n \in \mathbb{N}^*$$

Où $E_1 = -13,6 \text{ eV}$ est l'énergie du niveau de plus basse énergie de l'atome d'hydrogène.



Le graphique ci-dessus représente la partie visible du spectre solaire reçu au dessus de l'atmosphère terrestre. Théoriquement, ce spectre devrait être lisse, mais on remarque que pour certaines fréquences il présente des *creux*. Ces *creux* correspondent à l'absorption par son atmosphère, de la lumière émise par le Soleil.

Sur le graphique on a indiqué la position de trois raies correspondant à l'absorption par les atomes d'hydrogène (H_α , H_β et H_γ).

1. Représenter les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sur un axe.
2. Donner les valeurs des énergies en Joules puis en eV des photons correspondant aux trois raies de l'hydrogène H_α , H_β et H_γ .
3. Montrer que la longueur d'onde λ d'un photon est reliée à son énergie E par :

$$\lambda = \frac{hc}{E} \quad (2)$$

4. Montrez que la longueur d'onde λ dans le vide d'un photon émis par un atome d'hydrogène lors d'une transition d'un niveau d'énergie E_n vers un niveau d'énergie $E_{n'}$ peut se mettre sous la forme :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Exprimez R en fonction de h , c et E_1 . R s'appelle la constante de Rydberg. Donnez la valeur numérique de R .

5. Quelle est la longueur d'onde maximale d'un photon émis lors d'une transition vers le niveau E_1 ? Dans quelle gamme spectrale se trouve-t-il ?
6. Quelle est la longueur d'onde minimale d'un photon émis lors d'une transition vers le niveau E_3 ? Dans quelle gamme spectrale se trouve-t-il ?
7. En déduire que seules les transitions vers le niveau E_2 peuvent produire des photons visibles.
8. Déterminer à quelles transitions correspondent les raies H_α , H_β et H_γ .

On donne : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

Fin du sujet
