

# Chapitre 1 : Notions élémentaires d'optique géométrique

## Prérequis

- peu de choses à part mathématiques niveau collège et lycée

## Mots-clés

lumière, longueur d'onde, indice optique, milieu TLHI, spectre, diffraction, rayon lumineux, réfraction, réflexion, lois de Snell-Descartes, réflexion totale, fibre optique

Sir Isaac Newton's little Reflector.



## LES SAVOIRS ET LES SAVOIR-FAIRE

### A Qu'est-ce que la lumière?



#### CAPACITÉS EXIGIBLES

- ✱ Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur

#### A.1 Onde ou particule ?

1. Pourquoi parle-t-on de dualité onde-corpuscule pour la lumière ?
2. S'intéresse-t-on ici plutôt au comportement ondulatoire ou plutôt corpusculaire ?

#### A.2 Couleurs et fréquences optiques

3. Pour une onde monochromatique dans le domaine du visible, qu'est-ce qui définit la couleur de cette onde ?
4. Donner un ordre de grandeur de la fréquence optique dans le domaine du visible.

#### A.3 Vitesse de propagation et indice optique

5. Préciser ce qu'est un milieu transparent linéaire homogène isotrope (TLHI). Donner des exemples de tels milieux.
6. Définir l'indice optique  $n$  d'un milieu TLHI. Donner une valeur de la célérité de la lumière dans le vide  $c$ .
7. Pour un milieu quelconque, l'indice optique est-il plus grand ou plus petit que 1 ? Justifier.
8. Qu'est-ce qu'un milieu dispersif ? L'air, l'eau, le verre sont-ils dispersifs ?

#### A.4 Longueurs d'onde

9. Pour une onde sinusoïdale (ou monochromatique), définir la longueur d'onde dans le vide et dans un milieu quelconque.
10. Dans le vide ou l'air semblable au vide d'un point de vue optique, donner un ordre de grandeur de la longueur d'onde aux limites du domaine du visible.



## B Sources lumineuses



### CAPACITÉS EXIGIBLES

- ★ Caractériser une source lumineuse par son spectre

#### B.1 Spectres des sources lumineuses usuelles

11. Donner l'allure de l'éclairement spectral perçu par un capteur soumis à un rayonnement thermique.
12. Pourquoi le spectre d'une lampe spectrale est-il discontinu ?
13. Pourquoi dit-on que l'étude d'un spectre lumineux peut permettre d'identifier des éléments chimiques ?
14. Que dire du spectre d'un laser ?

#### B.2 Notions de source ponctuelle et source étendue

15. Préciser à quelle condition une source étendue peut être considérée comme une source ponctuelle.
16. On supposera souvent les sources *monochromatiques*. Comment procéder en pratique ? En quoi est-ce malgré tout une approximation ?

## C Qu'est-ce que l'optique géométrique ?



### CAPACITÉS EXIGIBLES

- ★ Définir le modèle de l'optique géométrique
- ★ Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique
- ★ Établir la condition de réflexion totale
- ★ Fibre optique : établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice

#### C.1 Notion de rayon lumineux

17. Qu'est-ce que le «modèle» du rayon lumineux ? Quel est le cadre de validité de ce modèle ?

#### C.2 Principes de l'optique géométrique

18. Quels sont les principes de l'optique géométrique ?

#### C.3 Lois de Snell-Descartes

19. En illustrant à l'aide d'un schéma, donner la définition d'un dioptré, rayons incident, réfléchi et réfracté, point d'incidence, normale au dioptré, plan d'incidence, angles d'incidence, de réflexion et de réfraction.
20. Préciser comment doivent être orientés les angles.
21. Énoncer les lois de Snell-Descartes pour la réflexion et pour la réfraction.
22. Expliquer comment évolue l'angle de réfraction avec l'angle d'incidence.
23. Lorsqu'un rayon franchit un dioptré et passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent, comment évolue l'angle par rapport à la normale ? Justifier.  
Même question si on inverse les deux milieux.
24. Expliquer ce qu'est le phénomène de réflexion totale et dans quelles conditions il peut avoir lieu. On établira l'expression de l'angle d'incidence limite de réflexion totale.



# ACTIVITÉS DE COURS

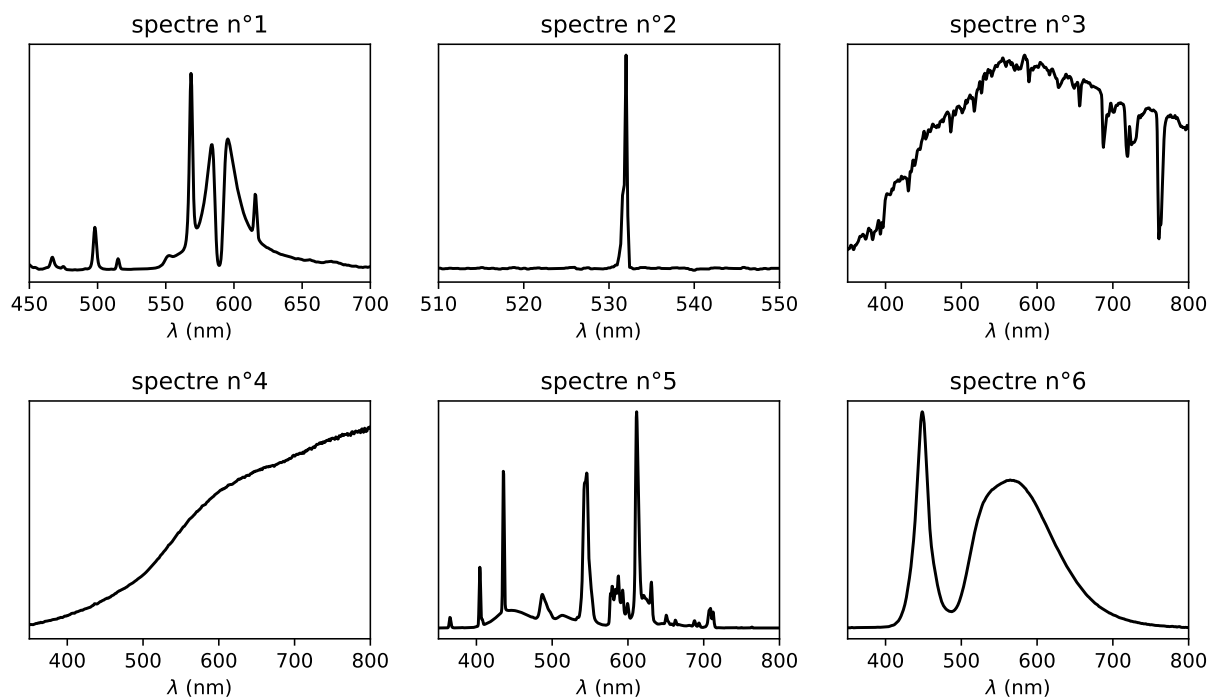
## 1 Caractériser une source lumineuse par son spectre

Le spectre d'une source lumineuse permet de caractériser celle-ci. Il est donc important de savoir interpréter un spectre.

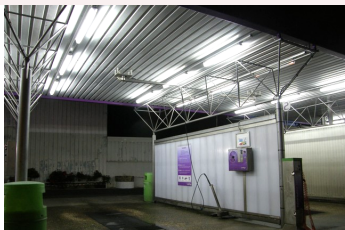
En astronomie par exemple, l'analyse des spectres d'étoiles est un outil crucial, notamment pour caractériser la température de surface de cette étoile, la composition chimique de son atmosphère stellaire, la composition chimique de l'atmosphère d'une planète ou exoplanète, etc.

D'une manière générale, l'analyse de spectres lumineux est un outil crucial en sciences physiques et chimiques.

Voici différents spectres :



À chaque source lumineuse ci-dessous, associer le spectre correspondant ci-dessus :

|                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| source (a), spectre n° ....<br>                                                                    | source (b), spectre n° ....<br>                                             | source (c), spectre n° ....<br>                                                           |
| source (d), spectre n° ....<br> <p><i>Tubes fluorescents contenant de la vapeur de mercure</i></p> | source (e), spectre n° ....<br> <p><i>Ampoule phosphorescente à LED</i></p> | source (f), spectre n° ....<br> <p><i>Éclairage public à base d'ampoule au sodium</i></p> |



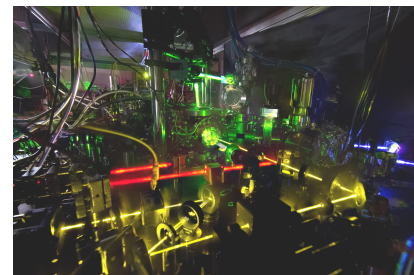
2

**Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur**

Une couleur donnée est spécifiée par une certaine valeur de la fréquence optique  $f$  de l'onde électromagnétique correspondante et qui reste constante même si le milieu de propagation change au cours du trajet de l'onde. À cette valeur de  $f$ , correspond une valeur de la longueur d'onde  $\lambda_{\text{vide}} = \frac{c}{f}$  si cette onde se propageait dans le vide. En pratique, c'est plutôt cette correspondance entre  $\lambda_{\text{vide}}$  et la couleur que l'on exploite. C'est pourquoi il faut connaître le tableau de correspondance donné le cours.

D'après [www.nist.gov](http://www.nist.gov) :

*One of NIST's ytterbium lattice atomic clocks NIST physicists combined two of these experimental clocks to make the world's most stable single atomic clock. The image is a stacked composite of about 10 photos in which an index card was positioned in front of the lasers to reveal the laser beam paths.*



Credit: N. Phillips/NIST

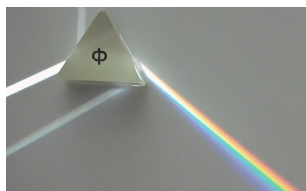
Associer à chaque faisceau laser sa longueur d'onde : 400 nm, 550 nm, 580 nm, 760 nm

3

**Exploiter les lois de Snell-Descartes**

Les phénomènes de réflexion et de réfraction permettent de dévier le trajet de la lumière. Les lois de Snell-Descartes permettent de décrire ces phénomènes et donc d'expliquer certaines observations. On exploite aussi ces lois pour réaliser des applications concrètes et utiles.

1. On éclaire un prisme en verre par un faisceau de lumière blanche. Interpréter ce qui est observé sur la photographie ci-dessous.



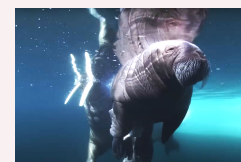
2. Interpréter l'expérience ci-dessous.



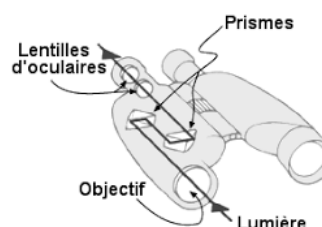
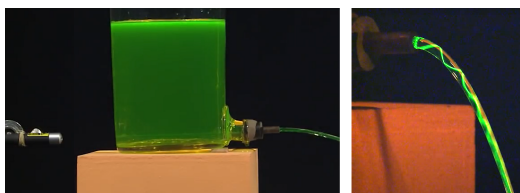
4

**Exploiter la condition de réflexion totale**

Il est important de bien connaître la condition permettant d'observer une réflexion totale : ce phénomène permet des applications concrètes et intéressantes comme le prisme à réflexion totale, la fibre optique, la réfractométrie, etc.



1. Interpréter l'expérience de la *fontaine lumineuse* ci-dessous (un faisceau laser se propageant dans un filet d'eau coulant).
2. Le verre est d'indice 1,5 environ. Des prismes à  $45^\circ$  en verre sont utilisés dans des jumelles. Expliquer leur intérêt.





## Étude de la fibre optique à saut d'indice

Ce qui caractérise entre autres une fibre optique à saut d'indice, c'est son **cône d'acceptance** et sa **dispersion intermodale**.

- Plus le cône d'acceptance est petit, moins on peut faire se propager de l'énergie lumineuse au sein de la fibre.
- Plus la dispersion intermodale est grande, plus le débit de la fibre sera faible.

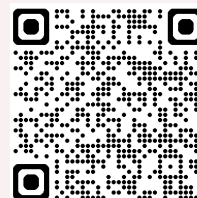
On cherche dans cette activité à exprimer ces deux grandeurs et expliquer ces affirmations.

Avant de traiter l'exercice ci-dessous, consulter préalablement l'animation suivante afin de mieux saisir le rôle physique joué par ces deux grandeurs :



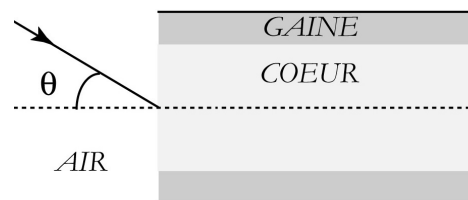
[phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/dioptres/fibre\\_optique.php](http://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.php)

Cliquer sur le graphique pour modifier les valeurs d'indices de la gaine et du cœur, constater ainsi que le cône d'acceptance est plus ou moins étroit.



Puis, cliquer sur IMPULSION dans l'animation proposée et observer que plus le cône d'acceptance est grand, plus l'écart temporel entre les instants «d'arrivée» au bout de la fibre du rayon le plus oblique et du rayon horizontal est important.

Une fibre optique est fabriquée à base de verres ou de plastiques supposés transparents et isotropes. La fibre à saut d'indice est constituée d'un cœur cylindrique homogène d'indice  $n_1$  et d'axe  $Oz$ , et d'une gaine cylindrique d'indice  $n_2$  entourant le cœur et de même axe. Dans la pratique,  $n_1$  et  $n_2$  ont des valeurs très proches. Suivant la conception de la fibre, le diamètre du cœur peut varier de 10 à 60  $\mu\text{m}$  et le diamètre extérieur de la gaine peut atteindre 125  $\mu\text{m}$ .



1. Pourquoi peut-on expliquer la propagation de l'onde lumineuse en termes de rayon lumineux au sein de la fibre ?
2. Comment doit-on choisir  $n_1$  et  $n_2$  pour guider la lumière dans la fibre, sans perte d'énergie au cours du parcours ?  
Montrer par ailleurs que  $\theta$ , angle d'incidence du rayon à l'entrée de la fibre, doit vérifier  $\theta < \theta_{lim}$  où  $\sin \theta_{lim} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ .

Le cône de lumière d'angle  $\theta_{lim}$  à son sommet et éclairant la fibre est appelé **cône d'acceptance**.

3. On introduit l'écart relatif des indices  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ . Comment s'exprime  $n_2$  en fonction de  $n_1$  et  $\Delta$  ?  
Calculer alors  $\theta_{lim}$  avec  $n_1 = 1,5$  et  $\Delta = 1,0 \cdot 10^{-2}$ .
4. On appelle **dispersion intermodale**  $\tau_{im}$  la différence de temps de parcours entre deux impulsions lumineuses émises au même instant, l'une correspondant à un angle d'entrée  $\theta = 0$  et l'autre émise à la limite du cône d'acceptance. Notons  $L = 10$  m la longueur de la fibre. Montrer que :

$$\tau_{im} = \frac{n_1 L}{c} \left( \frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$$

Effectuer l'application numérique.

5. En transmission numérique, on communique à intervalles de temps  $T$  réguliers des éléments binaires (présence ou absence d'intensité lumineuse = bit 1 ou 0). Que vaut le débit maximal en bit par seconde (b/s) de la fibre étudiée ?

Les débits maximaux que l'on peut obtenir avec des câbles ethernet (constitués de câbles métalliques torsadés) et le wifi sont les suivants (pour une distance ou une longueur de câble de 10 m) :

- Wifi : de 54Mb/s jusqu'à 2Gb/s
- Fast Ethernet : 10-100Mb/s
- Ethernet Gigabit ou 10G : 1Gb/s ou 10Gb/s

Comparer ces débits à celui de la fibre optique.



## EXERCICES

 DIFFICULTÉ DE L'EXERCICE (ANALYSE, «TECHNICITÉ», ...)

 DURÉE DE L'EXERCICE

## COMPÉTENCES TRAVAILLÉES

| Exercices |   |   |   |   |   |
|-----------|---|---|---|---|---|
| 1         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| •         | • | • | • | • | • |
| •         |   | • | • |   |   |

Exploiter les lois de Snell-Descartes

Exploiter le phénomène de réflexion totale

## Exercice 1

## Éclat d'un diamant



Le diamant possède un indice optique élevé,  $n_d = 2,4$ . Pour comparaison, un verre peut être caractérisé par un indice  $n_v$  au mieux égal à 1,7.



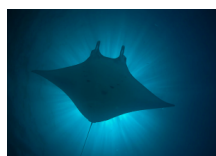
- Pour un rayon incident dans le diamant sur un dioptre diamant-air, déterminer l'angle de réflexion totale. Expliquer ce qui confère au diamant son éclat.
- Afin de produire un faux diamant à bas coût, du verre est taillé de la même manière qu'un diamant.
  - Quel est l'angle de réflexion totale ?
  - Pourquoi le faux diamant perd-t-il nettement de son éclat lorsqu'il est immergé dans l'eau (d'indice  $n_e = 1,33$ ) ?

## Exercice 2

## Halo dans l'eau



En pleine journée, un plongeur photographe a pris quelques photos d'animaux marins ainsi que de son bateau, «vue de dessous». Expliquer pourquoi il apparaît un halo lumineux circulaire à l'arrière-plan.

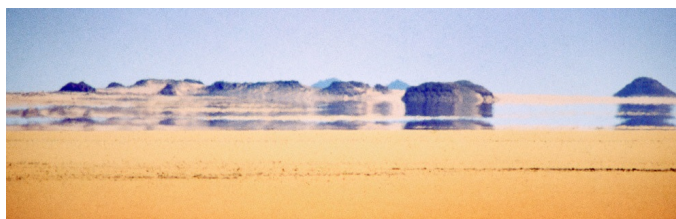


## Exercice 3

## Mirages



- Par une chaude journée d'été, on a souvent l'impression d'observer une flaque d'eau au bout d'une longue route. Ou bien en plein désert, il semble qu'une grande étendue d'eau soit située au loin.



Proposer une interprétation de ce phénomène, sachant que l'indice d'un gaz est une fonction croissante de sa densité et que la densité d'un gaz diminue quand sa température augmente.

- Que dire dans le cas ci-contre ?



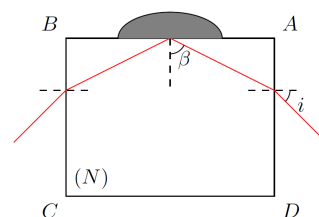


## Exercice 4

## Mesure d'indice par réfractométrie



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  $i_\ell$  pour lequel la goutte apparaît lumineuse.



1. Expliquer soigneusement pourquoi la goutte est lumineuse lorsque  $i \geq i_\ell$ . Préciser l'expression de  $i_\ell$ .
2. Proposer alors un protocole pour mesurer l'indice de réfraction  $n$ .
3. Montrer que ce réfractomètre peut mesurer des indices  $n$  compris entre deux valeurs à déterminer.
4. Si on avait le choix sur la nature du verre constituant le cube, vaudrait-il mieux prendre un indice important ou un indice faible ?

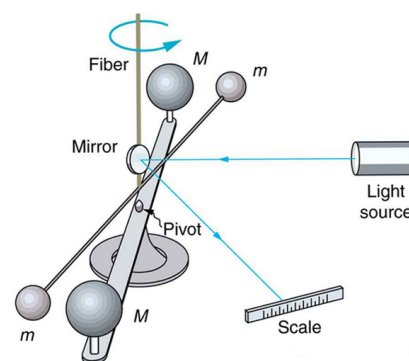
## Exercice 5

## Expérience de Cavendish



Dans l'expérience de Cavendish illustrée ci-contre et permettant de vérifier la loi de l'attraction gravitationnelle, une tige comportant deux masses  $m$  à ses extrémités est suspendue en son milieu à un fil de torsion (*fiber*) et peut ainsi être amenée à pivoter sous l'effet de l'approche de deux autres masses  $M$  fixes. Pour mener à bien cette expérience, il faut pouvoir mesurer le déplacement angulaire de la tige. On s'intéresse alors à la déviation du faisceau laser réfléchi par un miroir solidaire de la tige. Lorsque les masses  $M$  sont disposées à proximité des masses  $m$  de la tige, on observe que le spot laser se déplace d'une distance  $\ell$  le long de la règle (*scale*).

De quel angle  $\theta$  a alors tourné la tige ?



## Exercice 6

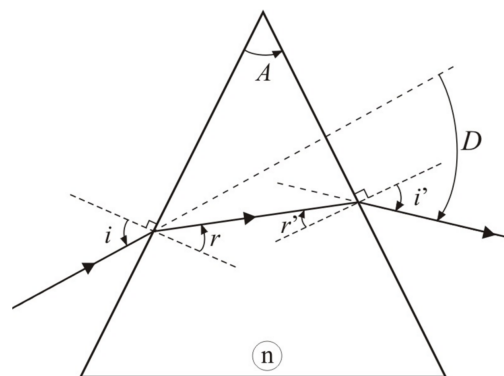
## Déviation par un prisme



On considère un prisme d'angle  $A = 60^\circ$  constitué d'un verre d'indice  $n$ . On appelle déviation (notée  $D$ ) l'angle entre le rayon transmis par le prisme et le rayon incident.

1. Montrer que  $A = r + r'$ .
  2. Établir la relation :  $D = i + i' - A$ .
- Puisque  $i'$  dépend de  $i$ , la déviation  $D$  est seulement fonction de  $i$ . Lorsque  $i$  varie, la déviation  $D$  présente une valeur minimale, notée  $D_m$  dans la suite.
3. Montrer qu'au minimum de déviation les angles  $i$  et  $i'$  sont égaux.
  4. Établir la relation  $n \sin\left(\frac{A}{2}\right) = \sin\left(\frac{A + D_m}{2}\right)$ .

À quoi ce résultat peut-il servir ?



## RÉSOLUTION DE PROBLÈME

## Exercice 7

## Pêcheur inuit



Un pêcheur inuit muni de son harpon a creusé un trou dans la glace et est à l'affût du passage d'un poisson à pêcher.

Le poisson nage à une profondeur fixe et se dirige vers le pêcheur.

À quelle distance le poisson doit-il rester du trou pour ne pas être vu ?





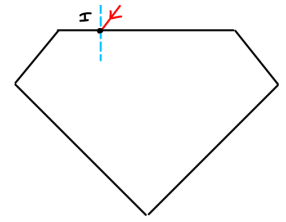
## Aides et éléments de correction

## Exercice 1

Par «angle de réflexion totale», il faut comprendre «angle d'incidence limite».

Imaginer un rayon lumineux incident rentrant par la face du dessus du diamant. Envisager des phénomènes de réflexion totale ayant lieu au sein du diamant.

L'éclat du diamant signifie que la lumière émerge du diamant (par la même face d'entrée que ci-contre par exemple) est intense, ce qui éblouit les convives aux soirées de l'ambassadeur...



## Exercice 2

Faire un schéma en représentant la caméra du plongeur pointant vers le dioptré eau-air. Représenter les rayons (provenant du ciel bleu et émis par les molécules de l'atmosphère par diffusion de la lumière du Soleil) pouvant atteindre l'objectif de la caméra. Montrer ainsi que la caméra ne peut que collecter des rayons (dans le milieu eau) contenus dans un cône de lumière dont on déterminera l'angle au sommet (tant qu'à faire). Faire le lien avec les photographies présentées dans l'énoncé.

## Exercice 3

1. D'après l'énoncé, comment évolue l'indice  $n$  avec l'altitude  $z$ ? (axe vertical  $Oz$  orienté vers le haut)  
Autrement dit,  $n(z)$  est-elle une fonction croissante ou décroissante de  $z$ ?

Puis, modéliser (càd, «se représenter») l'air comme une superposition de différentes couches (ou strates) comme ci-contre. Envisager la possibilité d'une réflexion totale en traçant un rayon lumineux provenant du ciel, orienté initialement vers le sol de manière un peu oblique, et traversant les différentes strates (comment ce rayon est-il dévié après être passé à la strate suivante? ...)



2. Même raisonnement mais en inversant le sens d'évolution de la température en fonction de l'altitude ...s

## Exercice 4

1. Si la goutte est lumineuse, cela signifie qu'il n'y a pas réflexion totale au point d'incidence entre le verre et la goutte : des rayons réfractés éclairent la goutte et celle-ci rediffuse ensuite cette lumière. Exploiter alors la condition de non-réflexion totale en ce point.

## Exercice 5

Faire un schéma représentant le miroir, le rayon incident et le rayon dévié par le miroir **avant rotation**. Faire de même **à la fin de la rotation**. En déduire l'angle de déplacement angulaire du faisceau laser en fonction de  $\theta$ . On pourra ensuite considérer que la longueur  $\ell$  correspond à la longueur d'un arc de cercle ...

## Exercice 6

1. Que dire de la somme des angles d'un triangle de manière générale? ... S'intéresser alors au triangle  $AIJ$  où  $I$  et  $J$  sont respectivement les points d'incidences à l'entrée du prisme et à la sortie du prisme.
2. Il y a deux points d'incidences  $I$  et  $J$ , il y a donc deux angles de déviations  $D_I$  et  $D_J$  successifs. Exprimer  $D_I$  en fonction de  $i$  et  $r$ . Exprimer  $D_J$  en fonction de  $i'$  et  $r'$ . Exploiter alors le résultat précédent pour exprimer la déviation totale  $D$ .
3. Invoquer la symétrie du prisme et le principe du retour inverse de la lumière. Tenter un raisonnement par l'absurde...
4. Exploiter les relations déjà démontrées ainsi que la loi de la réfraction.

## Résolution de problème

## Exercice 7

Poser des notations telles que dans le schéma ci-contre. On pourra proposer des valeurs pour  $h$ ,  $H$  et  $L$ .

Quel critère doit vérifier  $\ell$  vis-à-vis de  $\ell_c$  ( $c$  comme «critique»...) afin que le poisson ne soit pas visible par le pêcheur?

Il suffira par la suite chercher à exprimer  $\ell_c$  en fonction des indices optiques et de  $h$ ,  $H$ , et  $L$  (penser à des triangles rectangles, loi de la réfraction, théorème de Pythagore, relation fondamentale de la trigonométrie).

Effectuer l'application numérique.

$$\text{Résultat littéral attendu : } \ell_c = \frac{n_a h L}{\sqrt{n_e^2 (H^2 + L^2) - n_a^2 L^2}}$$

