

S1.1 - Bases de l'optique géométrique

L'objectif de ce premier cours d'optique géométrique est l'étude des lois de la réflexion et de la réfraction. Ces propriétés sont utilisées dans des éléments simples que sont les miroirs plans et les lentilles minces dont nous étudierons ensuite les propriétés. Qu'est-ce que la lumière ? Une des premières représentation suggérée par de simples observations est que la lumière est un ensemble de rayons lumineux dont la propagation est, à priori, rectiligne.

Table des matières

1	Indice d'un milieu transparent	1
2	Domaine de validité de l'optique géométrique	2
3	Sources de lumière	3
3.1	Sources à spectre de raies ou de bandes	3
3.2	Sources à spectre continu	3
3.3	Cas particulier du LASER	4
4	Formation d'images et d'objets optiques	4
4.1	Définitions	4
4.2	Notions de stigmatisme et d'aplanétisme	7
5	Réflexion et réfraction	7
5.1	Rayon lumineux	7
5.2	Loi de Snell-Descartes	8
5.3	Réflexion totale	9
5.4	Principe de retour inverse de la lumière	10
6	Miroir plan	11

1 Indice d'un milieu transparent

Définition d'un milieu transparent

Un milieu est dit **transparent** s'il n'absorbe pas la lumière, autrement dit s'il la transmet sans atténuation.

◊ Dans le vide la lumière est une onde électromagnétique se propageant à la vitesse :

$$c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

En notant T sa période et $f = \frac{1}{T}$ sa fréquence, sa longueur d'onde dans le vide, λ_0 , vaut :

$$\lambda_0 = cT = \frac{c}{f}$$

Le module k_0 de son vecteur d'onde peut s'écrire de différente manière, notamment avec la pulsation $\omega = 2\pi f$:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c} \quad \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

◇ Dans un milieu d'indice n , la même onde électromagnétique garde la même fréquence et la même période mais se propage à la vitesse v telle que

$$v = \frac{c}{n}$$

Sa longueur d'onde dans le milieu, λ' , vaut alors :

$$\lambda' = vT = \frac{c}{nf} = \frac{\lambda_0}{n}$$

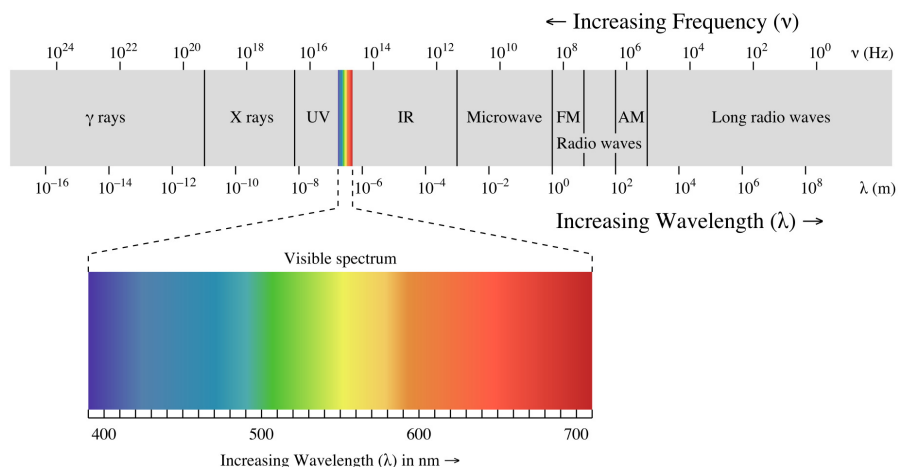
Le module de son vecteur d'onde s'écrit alors :

$$k' = \frac{2\pi}{\lambda'} = n \frac{2\pi f}{c} = n \frac{\omega}{c} = n k_0$$

La lumière visible correspondant aux longueurs d'onde dans le vide

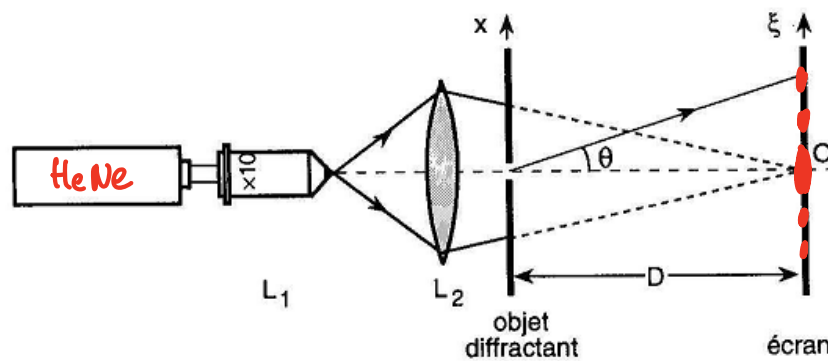
$$400 \text{ nm (violet)} < \lambda < 800 \text{ nm (rouge)}$$

La partie visible ne représente qu'une petite partie du spectre électromagnétique :



2 Domaine de validité de l'optique géométrique

Expérience : L'étude de la diffraction d'un faisceau LASER par une fente de largeur a met en évidence les limites du modèle qui consiste à ne se représenter la lumière issue du LASER de longueur d'onde λ que comme un rayon lumineux. En effet, on ne peut alors expliquer l'allure de la figure de diffraction qui apparaît lorsque la fente devient trop fine.



Dans les expériences d'optique usuelles en TP, avec une pupille de dimension caractéristique a :
Si $a > 10^3 \times \lambda$ le modèle ondulatoire est inutile et les lois de l'optique géométrique sont vérifiées.

3 Sources de lumière

3.1 Sources à spectre de raies ou de bandes

Les sources de lumière basées sur la désexcitation d'atomes émettent un rayonnement composé des plusieurs ondes monochromatiques reparties en paquets de fréquence que l'on note aussi ν et de largeur $\Delta\nu$ tels que : $\frac{\Delta\nu}{\nu} \simeq 10^{-7}$

La décomposition de cette lumière par un prisme ou un réseau donne un ensemble de raies caractéristiques de la composition de la source.



Exemples : néon, lampes spectrales utilisées en TP.

3.2 Sources à spectre continu

Un corps absorbant, dont la température est T , émet un rayonnement électromagnétique dont le spectre est continu.



La longueur d'onde λ_m correspondant au maximum d'émission du corps noir est donné par la loi de Wien :

$$\lambda_m T = 2,987 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}$$

Application : A quelle longueur d'onde correspond le maximum d'émission de la photosphère du soleil dont la température est de 6000 K ? Comparer la valeur trouvée à la longueur d'onde du maximum de sensibilité de l'œil qui est de $0,56 \mu\text{m}$. Commenter.

$$\text{pour le soleil : } \lambda_m = \frac{2,987 \cdot 10^{-3}}{6000} \simeq \frac{3 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^3} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m.} \\ = 500 \text{ nm}$$

3.3 Cas particulier du LASER

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Son fonctionnement basé sur le processus d'émission stimulée permet de générer une seule onde quasi monochromatique telle que $\frac{\Delta\nu}{\nu} \simeq 10^{-10}$



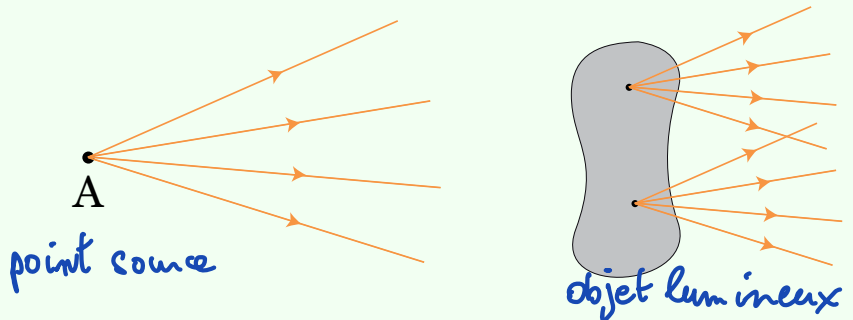
LASER hélium néon utilisé en TP : $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ (rouge).

4 Formation d'images et d'objets optiques

4.1 Définitions

Définition d'un point source

On appelle **point source** un point géométrique d'où émanent des rayons lumineux et **objet lumineux** un ensemble de points sources.



La lumière peut être émise (Soleil, néon, ...), diffusée (mur, papier calque,...), réfléchie (miroir, ...).

Définition d'une image réelle

Les rayons sortant du système optique se dirigent tous vers l'image réelle qui peut être directement vue sur un écran, comme illustré sur la figure 1.

Considérons un système optique (S) susceptible d'obliger tout ou partie des rayons lumineux issus d'un point source ou objet A à se rassembler, à converger en un point A' . Alors A' est appelé **image géométrique réelle** de A .

L'énergie (électromagnétique) transportée dans le faisceau lumineux issu de A est concentrée en A' et peut y être mesurée par une cellule photoélectrique ou peut impressionner un film photographique.

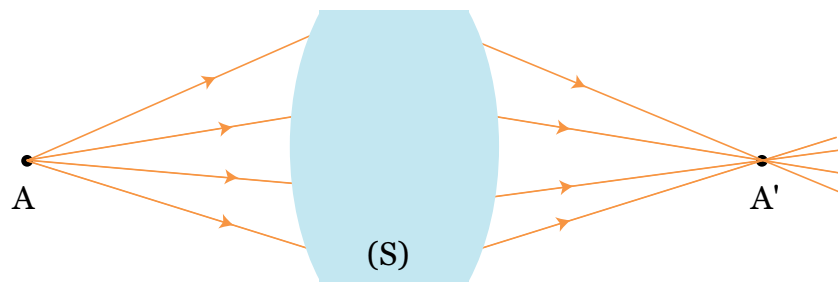


Figure 1 – A' image réelle

Définition d'une image virtuelle

Les rayons sortant du système optique semblent tous provenir de l'image **virtuelle** qui ne peut être mise en évidence directement sur un écran, comme illustré sur la figure 2.

Si les rayons divergent en paraissant provenir d'un point géométrique unique A'' , A'' est appelé **image géométrique virtuelle** de A. Il n'est pas possible de voir cette image sur un écran. Par contre, l'œil sera capable de voir A'' (cas de la loupe ¹) :

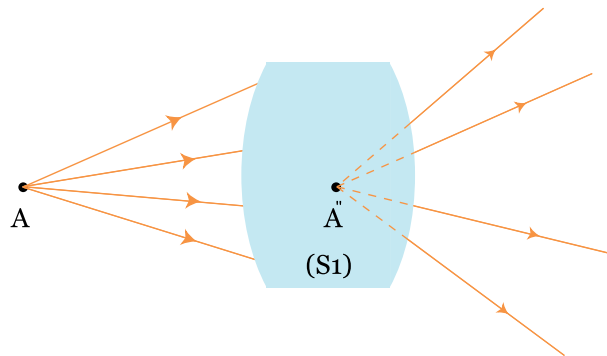


Figure 2 – A'' image virtuelle

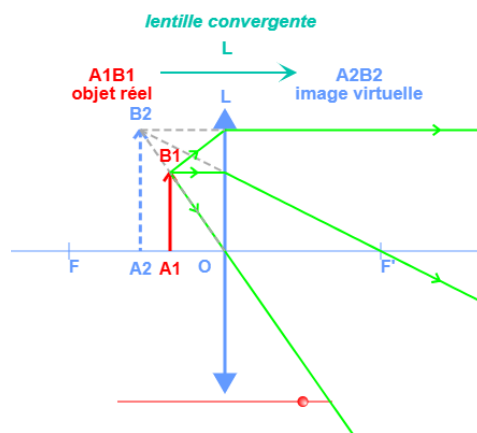


Figure 3 – B2 image virtuelle de B1 dans le cas d'une loupe

1. http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/lentilles/lentille_mince.php

Définition d'un objet réel

Les rayons issus de l'objet réel se dirigent vers le système optique, cet objet peut soit émettre des rayons vers l'œil, soit être directement vu sur un écran.

Un système optique (S') placé respectivement à droite de A' sur la figure 1 ou après (S_1) sur la figure 2 considérera respectivement A' ou A'' comme des **objets réels**.

Travail à effectuer : Placer au crayon (S') sur les deux figures précitées.

Définition d'un objet virtuel

On obtient un objet virtuel si les rayons qui se dirigent vers cet objet virtuel rencontrent d'abord le système optique. Autrement dit, les rayons arrivant sur le système optique se dirigent vers l'objet virtuel qui ne peut être mis en évidence sur un écran car les rayons rencontrent d'abord le système optique.

Ainsi, si A' est formé par (S) au delà de (S') on dira que A' est un **objet virtuel** pour (S') comme sur la figure 5 ci-dessous :

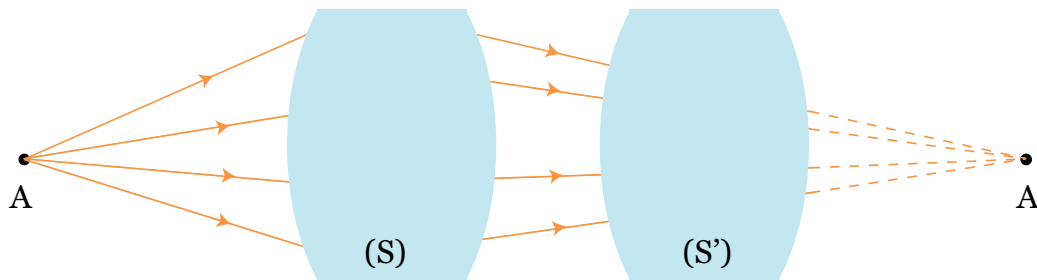


Figure 4 – A' objet virtuel pour (S')

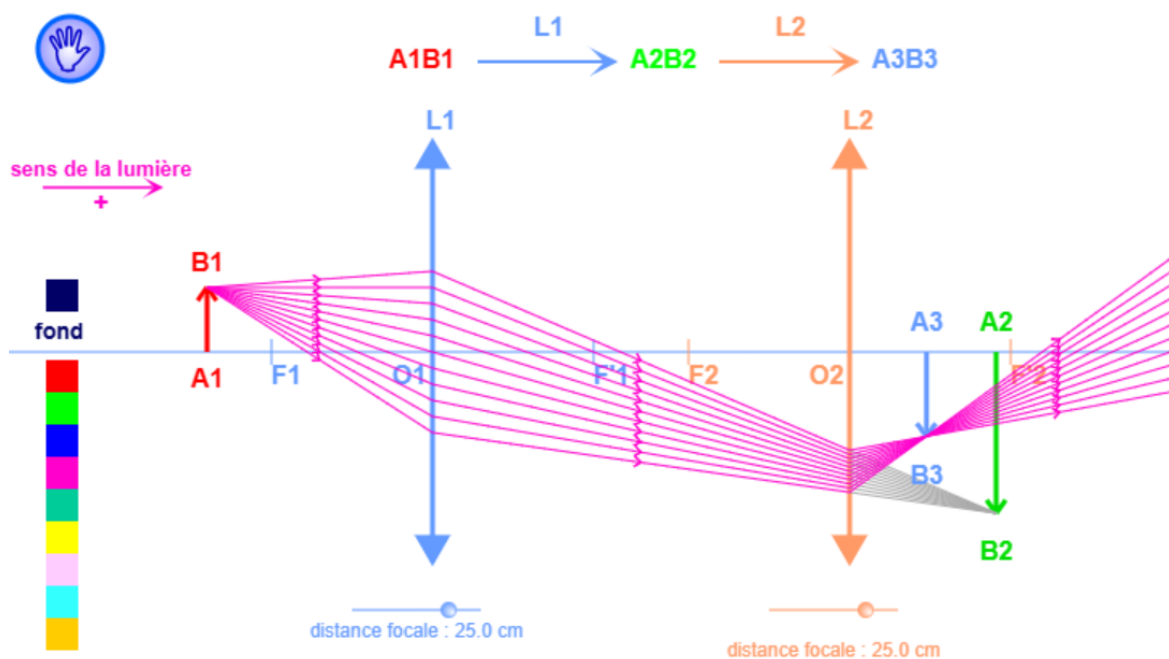
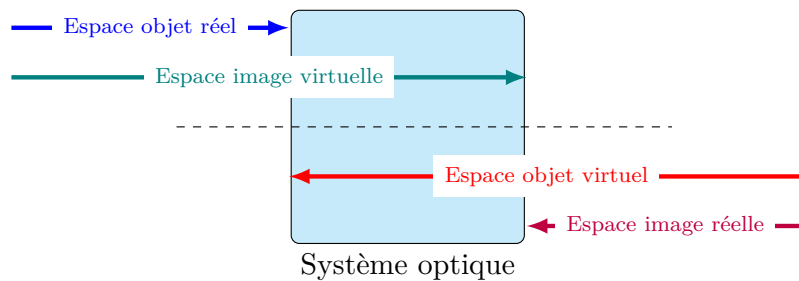


Figure 5 – A_2B_2 est un objet virtuel pour la lentille L_2 qui en donne une image réelle A_3B_3

◇ **Résumé de ces définitions :**



4.2 Notions de stigmatisme et d'aplanétisme

Il n'est pas du tout évident que (S) donne une image A' de chaque point A .

Définition de stigmatisme et aplanétisme

- On dira qu'il y a **stigmatisme rigoureux** si tout rayon passant par un point objet A , réel ou virtuel, passe, après avoir traversé un système optique, par un point image A' . C'est le cas du miroir plan. ^a
- On dira qu'il y a **aplanétisme** si pour un système ayant un axe de symétrie, l'objet AB étant perpendiculaire à l'axe, alors l'image $A'B'$ est aussi perpendiculaire à l'axe de symétrie.

a. http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/miroirs/miroir_plan.php

5 Réflexion et réfraction

5.1 Rayon lumineux

Définition d'un milieu homogène

Un milieu **homogène** est un milieu d'indice de réfraction constant *dans l'espace*.

Définition d'un milieu isotrope

Un milieu **isotrope** possède des **propriétés physiques invariantes en fonction de la direction** de l'espace considérée.

Propriété

Dans un milieu homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite.

Le rayon lumineux est une droite qui ne fait que représenter le trajet rectiligne suivi par la lumière dans un milieu homogène et isotrope.

Dans la limite de l'optique géométrique, un rayon n'affecte pas les autres et deux rayons additionnent leurs intensités.

5.2 Loi de Snell-Descartes

Expérience de cours : Réflexion et réfraction, ou réflexion totale, à l'interface eau-air (compléter le schéma de la figure 6)

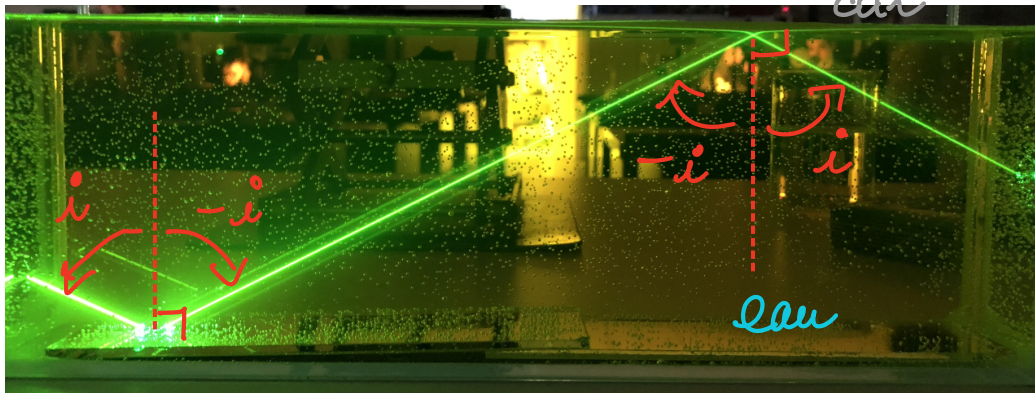
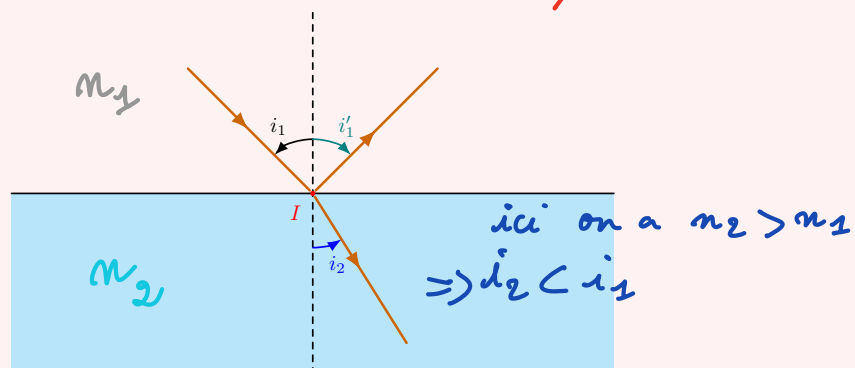


Figure 6 – Réflexion totale sur le dioptre eau-air

Loi de Snell-Descartes

A l'interface de deux milieux d'indices différents n_1 et n_2 , appelée dioptr^a, un rayon lumineux donne généralement naissance à un **rayon réfléchi** et à un **rayon réfracté**, ou transmis, situés dans le **plan d'incidence** (défini par le rayon incident et la normale au dioptr^a en I).



De plus, les relations suivantes sont vérifiées :

$$i'_1 = -i_1 \quad \text{loi de la réflexion} \quad (1)$$

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \quad \text{loi de la réfraction} \quad (2)$$

a. http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptr_plan.php

L'indice n dépend de la longueur d'onde et la formule de Cauchy peut-être utilisée pour la plupart des milieux transparents :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

où A et B sont des constantes.

5.3 Réflexion totale

Expérience de cours : Réflexion totale dans un milieu à gradient d'indice obtenu par diffusion du glycérol d'indice $n_1 = 1,47$ dans l'eau d'indice $n_2 = 1,33$ (compléter le schéma de la figure 7, la photo est sur mon site ²) :

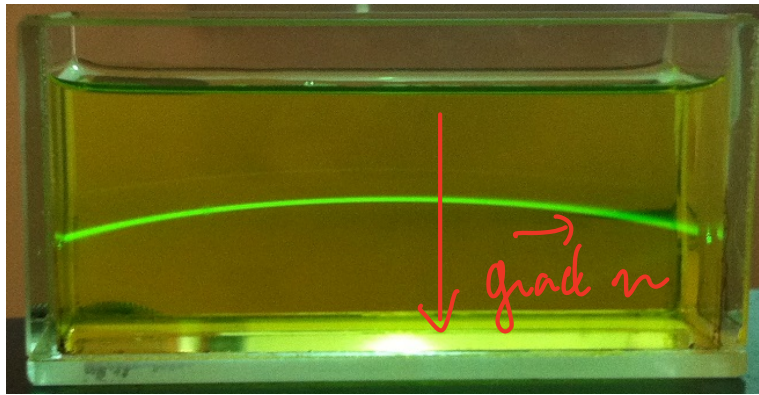


Figure 7 – Mirage inversé : trajectoire courbe de la lumière dans un milieu à gradient d'indice

Cas où il existe toujours un rayon réfracté

Si $n_2 > n_1$ le rayon réfracté se rapproche de la normale et il y a toujours réfraction.

Démonstration : loi de Descartes pour la réfraction :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \quad \text{avec ici } n_2 > n_1.$$

$$\Rightarrow \sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \sin(i_1) \quad \text{avec } \frac{n_1}{n_2} < 1$$

$$\Rightarrow \sin(i_2) < \sin(i_1)$$

$$\Rightarrow i_2 < i_1 \quad \text{car } x \mapsto \sin(x) \text{ est croissante sur } [0; \frac{\pi}{2}].$$

Cas où il n'existe pas toujours un rayon réfracté - Réflexion totale

Par contre, si $n_2 < n_1$ le rayon réfracté s'éloigne de la normale.

On est à la **limite de la réflexion totale** lorsque $i_2 = \frac{\pi}{2}$ qui correspond à un angle d'incidence limite i_L tel que

$$i_L = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Et si $i_1 > i_L$, alors il n'existe plus de rayon réfracté, on dit qu'il y a **réflexion totale** ^a.

^a. http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptre_plan.html

2. <https://physique-informatique-cpge.fr>

Démonstration :

* A la limite de la réflexion totale, on a $i_2 = \frac{\pi}{2}$ rad et alors $i_1 = i_L$ angle d'incidence limite et :

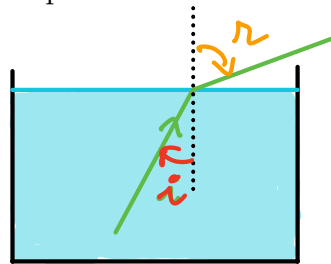
$$n_1 \sin(i_L) = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow i_L = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

* Si $i_1 > i_L = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \Rightarrow \sin(i_1) > \sin(i_L)$

$$\Rightarrow \sin(i_1) > \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 \sin(i_1) > n_2 \Rightarrow n_2 \sin(i_2) > n_2$$

$\Rightarrow \sin(i_2) > 1$: impossible donc i_2 n'existe pas si i_1 existe

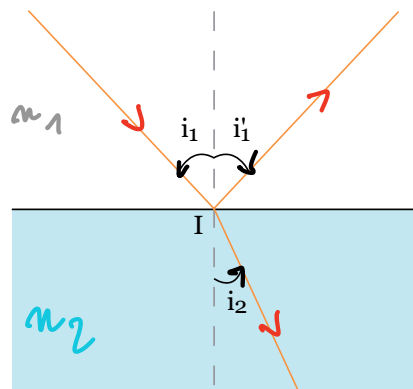
Travail à effectuer : Identifier les deux cas de figure sur les deux schémas ci-dessous à compléter. Retrouver la valeur de i_L dans les cas de la réfraction à l'interface entre l'eau ($n_{\text{eau}} = 1,33$) et l'air ($n_{\text{air}} = 1$) vu en expérience de cours.



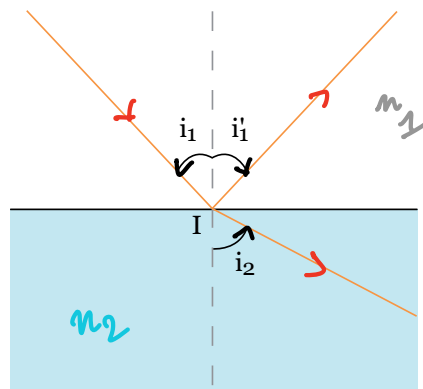
Angle i limite, note i_L , tel que :

$$n_{\text{eau}} \sin(i_L) = n_{\text{air}} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$i_L = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n_{\text{eau}}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1}{1,33}\right) = 49^\circ$$



$n_2 > n_1$



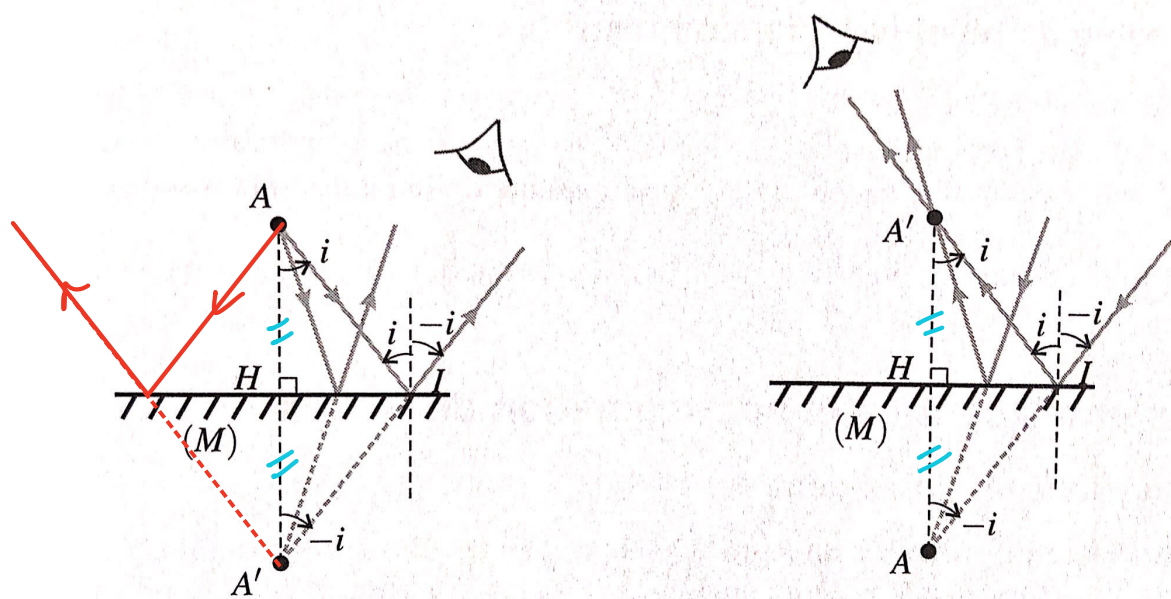
$n_2 < n_1$

5.4 Principe de retour inverse de la lumière

Principe de retour inverse de la lumière

Les lois de Descartes ne font pas intervenir le sens de propagation de la lumière. Un rayon lumineux se propageant dans le milieu n_2 avec un angle d'incidence i_2 est réfracté dans le milieu d'indice n_1 avec un angle de réfraction i_1 tel que $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$. C'est le principe de retour inverse de la lumière.

6 Miroir plan



Propriété

D'après les lois de Descartes sur la réflexion :

- l'image d'un point objet réel A par un miroir est un point image virtuelle A' symétrique de A par rapport au plan du miroir (figure de gauche)
- l'image d'un point objet virtuel A' par un miroir est un point objet réel A symétrique de A' par rapport au plan du miroir (figure de droite)