

RÉFRACTION ET RÉFLEXION - TP

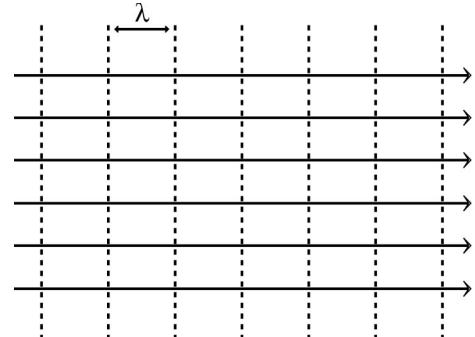
1. Approximation de l'optique géométrique

- La lumière correspond à des ondes électromagnétiques qui, dans le vide, se propagent à la célérité : $c_0 = 299792458 \text{ m.s}^{-1} \approx 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

- On appelle “faisceau parallèle” un faisceau lumineux correspondant à la propagation d'une onde plane.

Dans un tel faisceau, on appelle “surfaces d'onde” les plans (parallèles) où le champ électromagnétique a la même valeur ; ces surfaces sont séparées par la longueur d'onde : $\lambda = cT$ où T est la période d'oscillation de l'onde.

Pour la lumière visible, les longueurs d'onde sont comprises entre 400 nm (violet) et 700 nm (rouge).

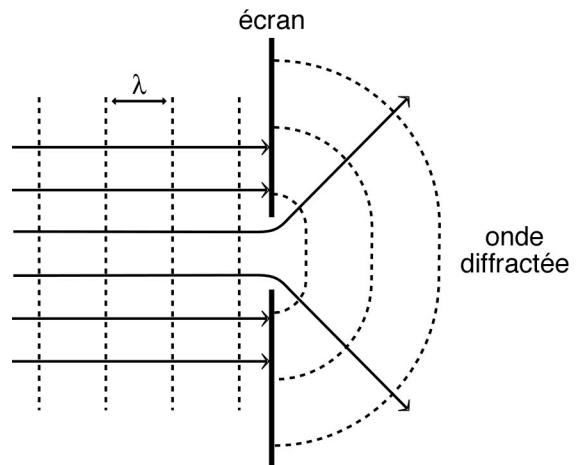


- On appelle “rayons lumineux” les droites (parallèles) de direction perpendiculaire aux surfaces d'onde.

- À cause du caractère ondulatoire de la lumière, il apparaît un effet de diffraction du faisceau lumineux si on essaye de le limiter à une largeur trop petite.

Toutefois, il faut pour cela atteindre un ordre de grandeur comparable à la longueur d'onde ; en pratique, l'effet commence à apparaître au dessous du dixième de millimètre ($\leq 100 \lambda$) et on peut donc obtenir avec diffraction négligeable des “pinceaux lumineux” très fins (de l'ordre de 1 mm) qui visualisent la notion de “rayon” lumineux.

- L'approximation de “l'optique géométrique” correspond à la partie de l'optique qui peut être traitée en ne considérant que des raisonnements sur les “rayons lumineux”, comme s'il s'agissait de pinceaux lumineux infiniment fins (et donc en négligeant les effets tels que la diffraction).

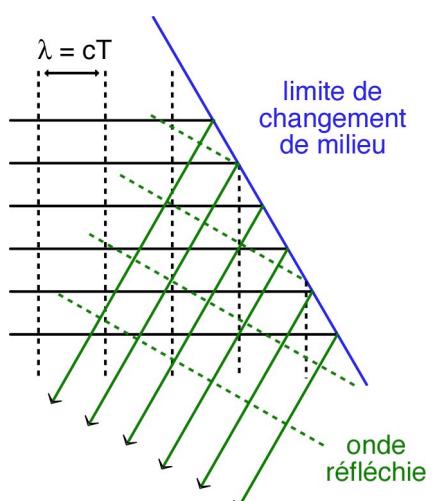


2. Lois de la réflexion

- À la rencontre d'une surface métallique, le champ électromagnétique d'une onde doit vérifier des conditions limites. Par exemple, la projection tangentielle du champ électrique reste nulle, sinon cela provoque “instantanément” un déplacement de charges qui compense ce champ. Cela provoque l'apparition d'une onde réfléchie.

Pour une surface diélectrique, les conditions limites sont différentes, mais dans tous les cas l'interaction avec la surface provoque plus ou moins de réflexion.

La configuration géométrique impose alors des relations entre les rayons incidents et les rayons réfléchis (lois de Snell-Descartes pour la réflexion).



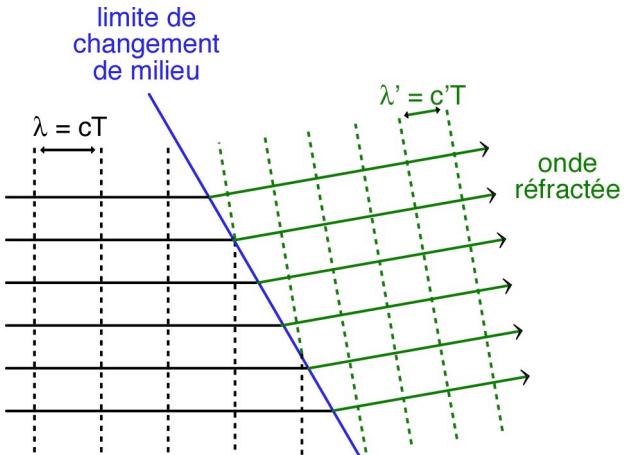
- ◊ chaque rayon réfléchi est dans le “plan d’incidence” qui lui correspond (plan du dessin précédent), défini par le rayon incident et la normale à la surface limite ;
 ◊ dans ce plan, “l’angle d’incidence” (angle du rayon incident avec la normale à la surface limite) et l’angle de réflexion sont “égaux” (opposés si notés algébriquement).

3. Lois de la réfraction

- La vitesse de propagation de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage ; c'est en général une célérité inférieure à celle mesurée dans le vide.

La continuité des ondes lors du changement de milieu impose un changement de direction des surfaces d’onde en accord avec la variation de la longueur d’onde.

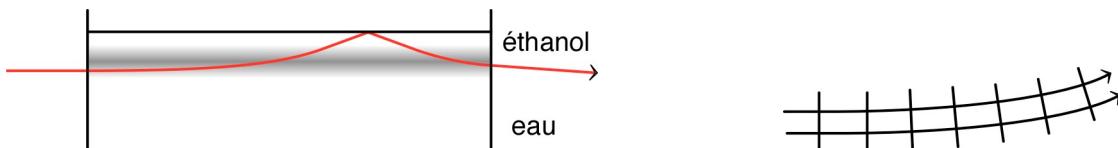
La configuration géométrique impose alors des relations entre les rayons incidents et les rayons réfractés (lois de Snell-Descartes pour la réfraction).



- ◊ chaque rayon réfracté est dans le “plan d’incidence” qui lui correspond (plan du dessin précédent), défini par le rayon incident et la normale à la surface limite ;
 ◊ dans ce plan, “l’angle d’incidence” i (angle du rayon incident avec la normale à la surface limite) et l’angle de réfraction r sont liés par la relation : $n \sin(i) = n' \sin(r)$ où n et n' sont les “indices optiques” des deux milieux de propagation.

◊ remarque : la relation entre les angles correspond en fait à : $\frac{\sin(i)}{\lambda} = \frac{\sin(r)}{\lambda'}$; mais par ailleurs l’indice optique d’un milieu de propagation est défini par : $n = \frac{c_0}{c}$ ($n = 1$ pour le vide ; $n = 1,0003$ pour l’air ; $n \approx 1,5$ pour le verre ; $n \geq 1$ en général...) ; la comparaison des longueurs d’onde conduit alors à la relation de Descartes.

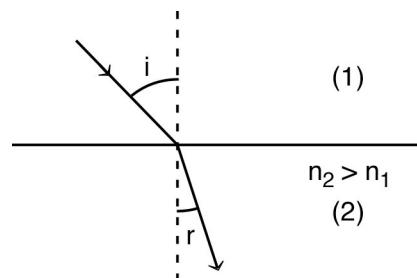
◊ remarque : l’effet de mirage est une sorte de réfraction causée par une variation progressive de l’indice de l’air au ras du sol quand ce dernier est fortement chauffé par l’action du soleil ; on peut observer un effet analogue dans un mélange inhomogène eau-éthanol, et ceci tend à confirmer le caractère ondulatoire de la lumière :



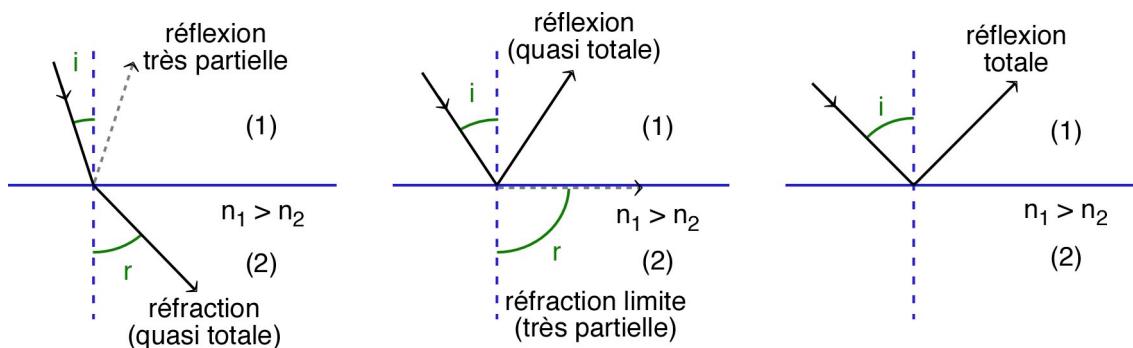
4. Description de l'optique géométrique

- On se limite ici à considérer les relations entre les directions des rayons.

On constate en particulier que lors du passage d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice $n_2 > n_1$, il se produit une diminution de l'angle par rapport à la normale.



Au contraire, si $n_2 < n_1$, la réfraction implique : $\sin(r) = \frac{n_1}{n_2} \sin(i)$. Mais pour $i \rightarrow 90^\circ$ (incidence rasante) alors $\sin(i) \rightarrow 1$ et $\frac{n_1}{n_2} \sin(i) \rightarrow \frac{n_1}{n_2} > 1$ et la relation de Descartes ne peut plus être vérifiée puisque $\sin(r)$ reste inférieur à 1. La réfraction est alors impossible et il y a réflexion totale. Le cas limite (réfraction rasante) correspond à $\sin(r) = \frac{n_1}{n_2} \sin(i) = 1$ quand $\sin(i) = \frac{n_2}{n_1}$:

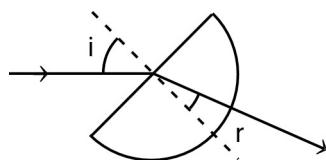


Ce phénomène est appliqué aux prismes des jumelles, aux jets d'eau illuminés, à la fibre optique...

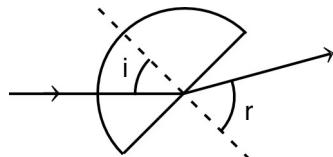
5. Étude expérimentale

- À l'aide d'un collimateur et d'un diaphragme en forme de fente, préparer un faisceau parallèle fin permettant de visualiser un "rayon" lumineux.

En faisant passer ce "rayon" par le centre d'un demi-cylindre (plexiglas ou cuve à eau), vérifier expérimentalement la loi de Descartes pour l'angle de réfraction (effectuer au moins une dizaine de mesures, avec précision, en justifiant pourquoi le rayon incident doit passer par le centre du demi-cylindre).



- Vérifier le retour inverse de la lumière en intervertissant le sens du demi-cylindre et en constatant qu'on obtient les mêmes angles (intervertis).

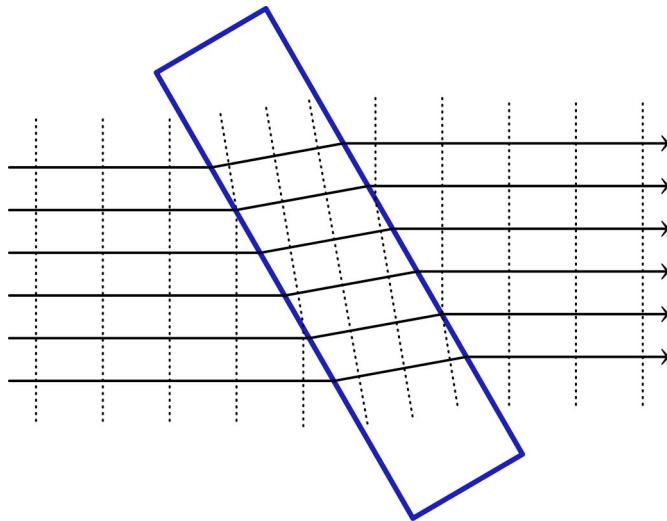


Vérifier expérimentalement l'existence de la réfraction limite et de la réflexion totale.

6. Propriétés des lentilles minces

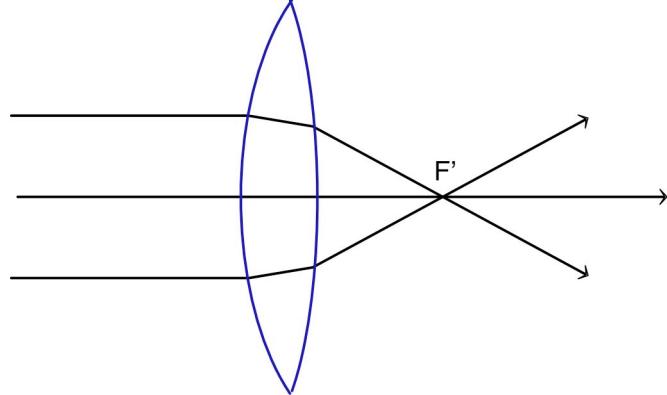
6.1. Double réfraction à la traversée d'une lentille

- Placer devant le collimateur un diaphragme présentant trois fentes : on visualise ainsi trois rayons (initialement parallèles).
- À l'aide d'une lame à faces parallèles, vérifier que les deux réfractions en entrée et en sortie se compensent en première approximation (il y a un "décalage" des rayons, généralement inférieur à l'épaisseur de la lame, mais leur direction est globalement inchangée) :



- Avec un prisme (dont les faces planes ne sont pas parallèles), vérifier que les deux réfractions en entrée et en sortie ne se compensent pas : il y a une déviation globale, qui dépend de l'angle au sommet du prisme, et aussi un peu de l'incidence par rapport au prisme.
- Avec une "lentille cylindrique" (dont les faces sont des portions de cylindres), ou "plan-cylindrique", la déviation n'est pas la même pour tous les rayons puisqu'ils n'ont pas tous le même angle d'incidence.

On constate qu'un rayon qui passe par le "centre" de la lentille n'est pas dévié (par symétrie, l'effet est équivalent à celui d'une lame à faces parallèles) ; en outre, les rayons incidents parallèles convergent tous (approximativement) en un "foyer" :

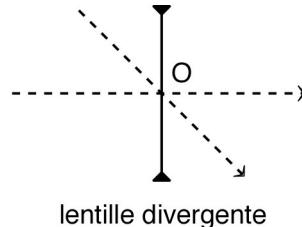
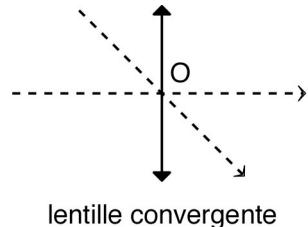


- La distance entre le centre de la lentille et le foyer est appelée "distance focale" de la lentille.

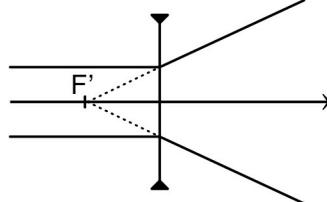
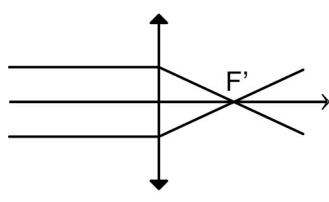
L'inverse de la distance focale est appelé "vergence" de la lentille. La vergence se mesure en dioptries (symbole δ , équivalant à m^{-1}) ; la vergence d'une lentille convergente (à bords minces) est positive et celle d'une lentille divergente (à bords épais) est négative.

6.2. Construction schématique des rayons particuliers

- Pour l'étude des lentilles minces, on peut négliger les "décalages" lors de la traversée et ne tenir compte que des déviations ; on utilise alors des représentations schématiques simplifiées pour représenter les rayons passant par le centre (non déviés) :

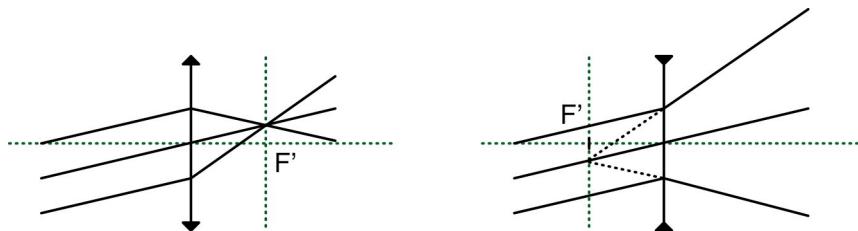


On utilise des schémas analogues pour représenter la convergence de rayons incidents parallèles à l'axe de la lentille :

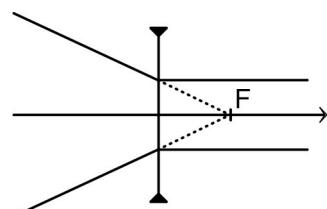
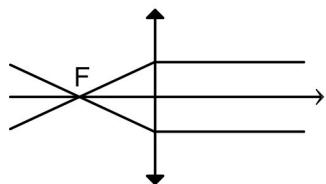


remarque : on appelle "côté objet" celui des rayons incidents et "côté image" celui des rayons réfractés ; pour une lentille divergente, la "convergence" des rayons réfractés est du côté objet (par prolongement des rayons réfractés) et on dit alors que le "foyer image" est virtuel (car il n'est pas du côté image) ; au contraire, le foyer image d'une lentille convergente est un foyer réel.

- Si on considère des rayons incidents parallèles entre eux, mais légèrement inclinés par rapport à l'axe de la lentille, on constate qu'ils convergent en un "foyer secondaire" situé dans le même plan focal passant par F' :



- D'une façon symétrique, il existe un "foyer objet" (virtuel, c'est-à-dire du côté image, pour une lentille divergente) tel que les rayons incidents passant par le foyer objet ressortent parallèles entre eux (et parallèles à l'axe de la lentille dans le cas du foyer objet "principal") :



6.3. Conditions de Gauss

- En réalité, les constructions précédentes sont simplifiées : ce sont des approximations (généralement assez bonnes toutefois, tant qu'on se limite à des lentilles minces)
- En particulier, les rayons passant près des bords de la lentille sont plus déviés ; un faisceau parallèle trop large ne “converge” donc pas exactement au foyer :



De même, les rayons d'un faisceau parallèle très incliné par rapport à l'axe ne convergent pas exactement.

- On appelle “conditions de Gauss” les conditions dans lesquelles il faut utiliser les lentilles pour que les constructions schématiques “idéales” soient une bonne approximation :
 - ◊ rayons passant près du centre de la lentille ;
 - ◊ rayons peu inclinés par rapport à l'axe de la lentille.

◊ remarque : les lentilles ont d'autres défauts ; par exemple, l'indice d'un milieu de propagation dépend un peu de la longueur d'onde de la lumière (et donc de la couleur considérée) ; ainsi la position des foyers n'est pas exactement la même pour toutes les couleurs (ceci donne lieu à des effets d'irisation).

7. Annexe : unités optiques

- La perception par l'œil humain des ondes électromagnétiques dépend de leur longueur d'onde, selon la sensibilité des cellules de la rétine aux différentes couleurs du spectre visible. Cette sensibilité dépend aussi plus ou moins des individus. Pour étalonner certains émetteurs et capteurs d'optique, des unités de référence sont toutefois indispensables.

La puissance transportée par les ondes électromagnétiques lumineuses (flux lumineux) est mesurée en lumens, en posant par principe que l'efficacité lumineuse pour un rayonnement monochromatique de fréquence $\nu = 540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ est $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ (valeurs considérées comme exactes).

◊ remarque : cela correspond à une longueur d'onde $\lambda = 555,1712185 \text{ nm}$ (vert) environ au milieu du spectre visible et au maximum de sensibilité de la rétine.

◊ remarque : depuis mai 2019, l'unité de puissance a une précision relative 10^{-14} , mais l'efficacité théorique normalisée ne peut pas décrire la diversité des sensibilités pour chaque individu.

- L'éclairement est le flux lumineux reçu par unité de surface ; il se mesure en lux (c'est à dire $1x = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$).
- L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par unité d'angle solide ; elle se mesure en candela (c'est à dire $1cd = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$).

◊ remarque : l'origine ancienne de cette unité provient du fait que c'est à peu près l'intensité lumineuse d'une bougie.

RÉFRACTION ET RÉFLEXION - TP

Matériel

Pour chaque groupe (10 groupes)

1 dispositif à lentilles cylindriques (discoptic ?) avec accessoires
1 dispositif d'étude de la réfraction (moitié avec plexiglas, moitié avec cuve à eau)

Au bureau

1 petite cuve transparente en verre (≈ 10 cm de long)

2 supports réglables

1 LASER

éthanol ordinaire (alcool à brûler ?)

1 agitateur en verre (plutôt gros)

1 petit bécher (pour verser)

1 fente réglable sur support (pour diffraction)