

Optique géométrique

L'optique géométrique a pour objet la détermination des **rayons lumineux** dans les instruments d'optiques : systèmes de mesure, télescopes, caméras, etc. Les notions vues dans ce chapitre permettront d'apprendre à construire des **images optiques** (par tracés géométriques) pour étudier ces instruments.

1. Production et propagation de la lumière

1.1. La lumière : onde ou corpuscules ?

L'une des plus grandes énigmes que les scientifiques ont eu à résoudre concernant la lumière est la compréhension de sa nature. Deux points s'opposent (en apparence) :

- Point de vue corpusculaire (discontinuiste) : la lumière est un **flux de particules** séparées par du vide
- Point de vue ondulatoire (continuiste) : la lumière est une **onde** qui remplit tout l'espace

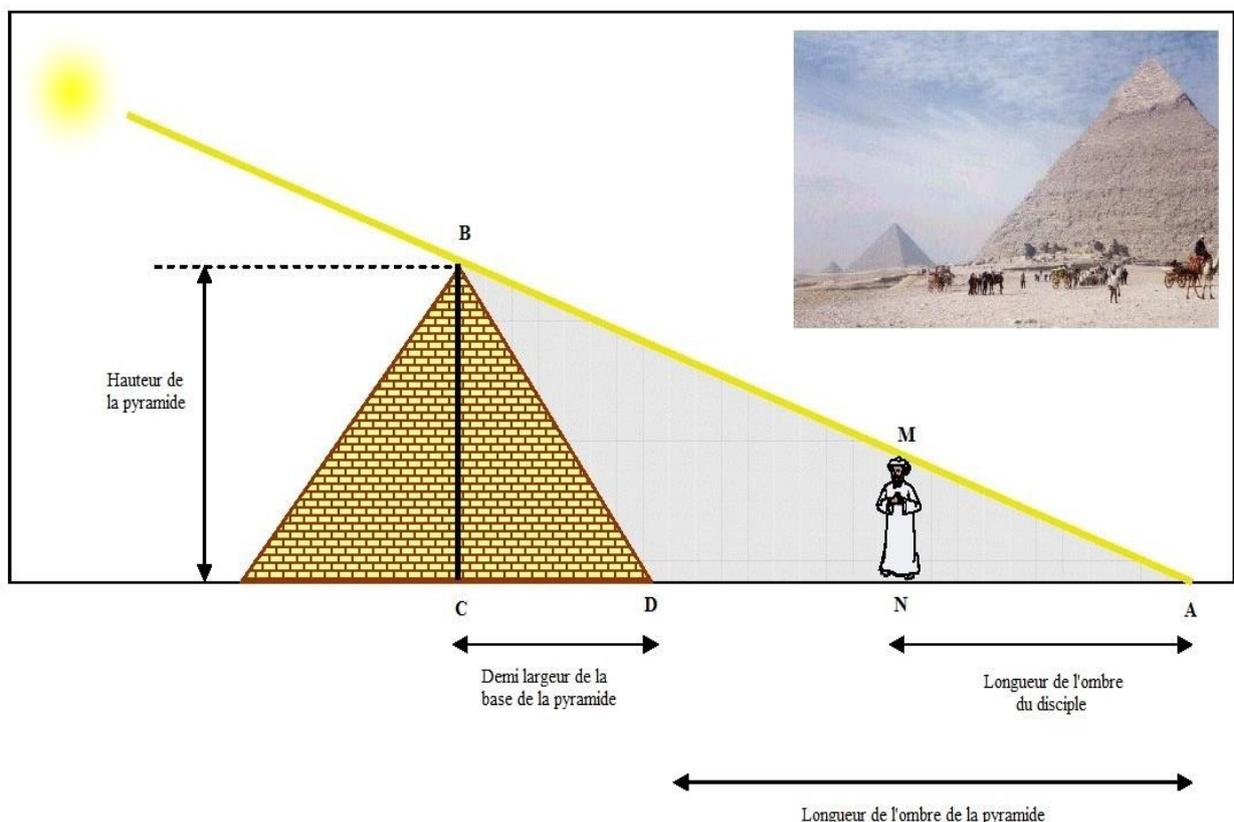
1.2. Le point de vue corpusculaire : la base de l'optique géométrique

C'est la première conception qui a prévalu. Les atomistes grecs (Leucippe, Démocrite) considèrent par exemple que l'Univers est constitué d'innombrables unités indivisibles agitées de continuels mouvements et se déplaçant dans un vide absolu : les atomes. Ceux-ci, lors de ces déplacements, se rencontrent au hasard, s'unissent et forment des connexions. C'est ainsi qu'ils expliquent les sensations : vision, ouïe, olfaction, etc.

Cette théorie permet d'expliquer de nombreux faits, et permet de nombreuses applications :

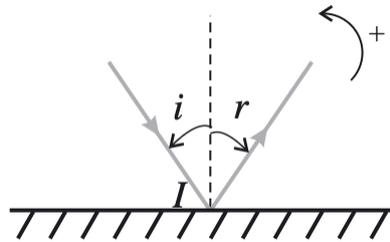
- Propagation de la lumière **en ligne droite**

Les particules ont des trajectoires rectilignes. Chacune de ces trajectoires est appelée **rayon lumineux**. Cela permet de comprendre la formation des ombres. Thalès l'utilise pour déterminer la taille des pyramides.



- Phénomène de **réflexion** spéculaire (miroir)

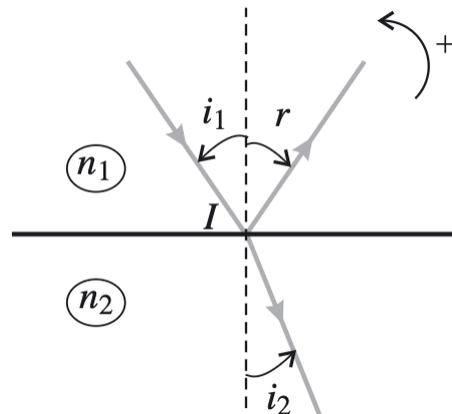
Si la lumière se reflète sur une surface réfléchissante (miroir, étendue d'eau) c'est que les particules rebondissent. L'angle incident et l'angle de réflexion sont les mêmes !



- Cela aurait été utilisé par Archimède lors du siège de Syracuse : utilisation de miroirs ardents pour brûler les voiles des bateaux ennemis. **L'optique devient géométrisable**, d'où le nom d'optique géométrique !
- Phénomène de **réfraction** : déviation des rayons lumineux lorsqu'ils changent de milieu

Depuis longtemps, les matelots avaient remarqué que les rames plongées dans l'eau semblaient brisées comme si elles remontaient à la surface. Mais les Grecs parviennent mal à comprendre ce phénomène qu'ils assimilent à une illusion.

Les connaissances à ce sujet évoluent nettement en Terre d'Islam. Ibn Sahl (940-1000) est amené à ne plus considérer, comme on le faisait avant, l'angle entre le rayon incident et le rayon réfracté (l'angle de déviation), mais ce que nous appelons l'angle de réfraction (entre le rayon réfracté et la **normale** à la surface de séparation des deux milieux). Il représente graphiquement le rapport constant que font ce que nous appelons les sinus des angles d'incidence et de réfraction dans le cas d'une réfraction air-verre.



- Pouvoir grossissant des lentilles sphériques (convexes)

Le grand savant arabe Alhazen (965-1039) a énormément fait progresser l'optique. Il a développé de nombreux instruments et a découvert le pouvoir grossissant des **lentilles sphériques**.

Alhazen affirme également, et démontre, que le trajet de la lumière se fait de l'objet (source) vers l'œil. La preuve : lorsque nous regardons le Soleil la lumière blesse nos yeux et fait souffrir. Comment une lumière allant de l'œil à l'objet pourrait produire ces effets, cette douleur ? C'est impossible.

À RETENIR

- La lumière se propage en lignes droites à partir d'une source. Ces lignes droites sont appelées **rayons lumineux**.
- Lorsqu'un rayon lumineux arrive sur un système optique quelconque (voire un simple objet) on parle de **rayon incident**.
- La **réflexion** est un phénomène de surface : c'est la réémission d'une lumière incidente par une surface réfléchissante (la lumière réémise est appelée **lumière réfléchie**). Le rayon réémis est appelé **rayon réfléchi**.
- La **réfraction** est la déviation d'un rayon lumineux lorsqu'il franchit la surface de séparation de deux milieux transparents différents. Le rayon se propageant dans le second milieu est appelé **rayon réfracté**.
- On appelle **dioptre** la surface de séparation de deux milieux transparents.
- En optique géométrique, **les angles se mesurent par rapport à la normale**, c'est-à-dire la droite perpendiculaire au dioptre au niveau du point d'incidence : pour les phénomènes cités précédemment on parle d'angle d'incidence, d'angle de réflexion et d'angle de réfraction.

La mathématisation des phénomènes de réflexion et de réfraction aura lieu vers le 17^e siècle avec les lois de Descartes. Mais avant de les aborder nous avons besoin d'autres notions ...

1.3. Point de vue ondulatoire : les choses se compliquent !

Dès le Moyen Age on constate plusieurs faits qui ne peuvent pas être expliqués par la simple théorie corpusculaire et ses rayons lumineux :

- Les ombres ne sont généralement pas nettes : pourquoi ?
- Comment expliquer les phénomènes faisant apparaître différentes couleurs à partir de la lumière blanche : arc en ciel par exemple ...
- Pourquoi deux faisceaux de lumière qui se croisent ne se dévient pas ?

Ces anomalies, d'abord considérées comme des illusions par les corpuscularistes, deviendront de plus en plus persistantes. Les principales d'entre elles sont les phénomènes d'**interférences** et de **diffraction**. Des savants comme Christian Huygens (1629-1695), Augustin Fresnel (1788-1827) et James Clerk Maxwell (1831-1879) développent un nouveau point de vue permettant plus facilement d'en rendre compte : le point de vue ondulatoire.

Et si, au lieu de particules matérielles qui se déplacent dans le vide, la lumière était une onde ? Une source de lumière serait un peu comme l'endroit où on a jeté un caillou dans l'eau (on parle d'impulsion), à partir duquel des petites vagues se propagent sous forme de cercles qui progressent du centre vers la périphérie.

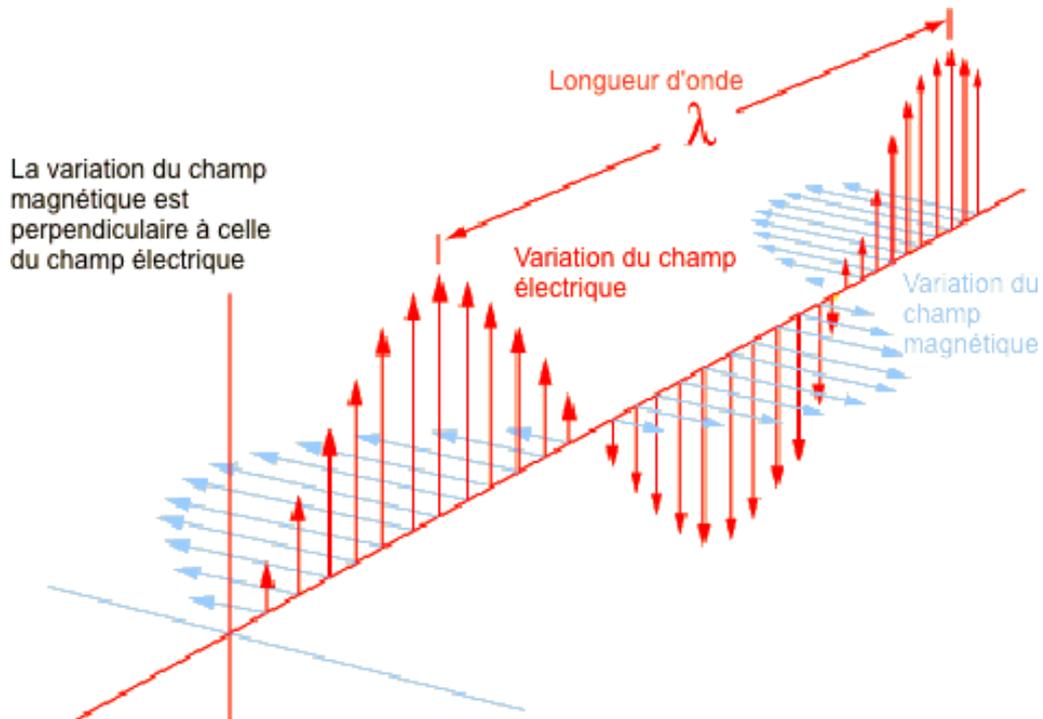
Si un bouchon flotte à la surface, il s'élève ou descend au passage de l'onde sans être entraîné par elle : la matière ne se déplace pas du centre vers la périphérie mais uniquement suivant un mouvement vertical. L'onde est donc une impulsion qui se propage par l'intermédiaire de la matière, **mais pas le mouvement de la matière**.

DEFINITION

Une onde est la propagation d'une perturbation dans un milieu **sans transport de matière**. Seule de l'**énergie** est transportée, à partir d'une source dans toutes les directions qui lui sont offertes.

Certaines ondes comme les ondes mécaniques (les vagues formées par l'eau) ou acoustiques (qui sont des ondes de pression) ont besoin d'un **milieu matériel** pour se propager.

Les ondes électromagnétiques, dont la lumière fait partie, **se propagent même en l'absence de milieu matériel**. La lumière qui nous vient du Soleil parvient jusqu'à nous donc se propage dans le vide.



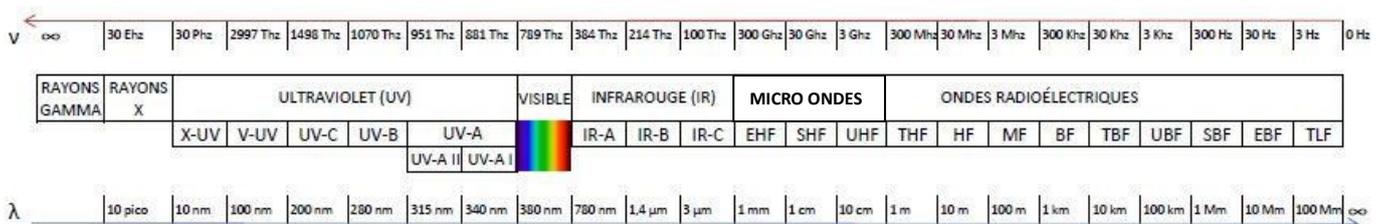
Représentation d'une onde électromagnétique

À RETENIR

Une onde est caractérisée par :

- une **période temporelle T** (en s), à laquelle on associe une fréquence $\nu = 1/T$ (en Hz) ;
- une **période spatiale λ** (en m , mais les unités les plus fréquentes sont le nm et le μm).

On distingue plusieurs types de rayonnements électromagnétiques selon le domaine de longueur d'onde :



Sur le graphique précédent, les rayonnements les plus énergétiques sont placés à gauche du visible (fréquences élevées) : rayons UV, rayons X, rayons gamma. En raison de leur haute énergie, ces rayonnements sont particulièrement dangereux. Heureusement, ils sont en grande partie filtrés par l'atmosphère terrestre.

1.4. Quel est le « bon » point de vue ? Ni l'un ni l'autre ...

Les théories corpusculaires et ondulatoires de la lumière se sont longtemps opposées au cours de l'histoire. Nous avons vu que la théorie ondulatoire a pris le dessus au moment où les phénomènes d'interférences et de diffraction ne pouvaient plus être ignorés ... cependant, la théorie corpusculaire est revenue en force à la fin du XIXe siècle et au XXe siècle avec la physique quantique : on découvre alors que l'énergie est quantifiée, qu'elle ne peut s'absorber que par paquets : les photons dans le cas de l'énergie électromagnétique.

En 1924, Louis de Broglie a l'intuition et développe avec succès le principe de dualité onde-corpuscule : la lumière présente à la fois un caractère ondulatoire et corpusculaire. Une idée qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 1929.

2. Production et propagation de la lumière

2.1. Sources de lumière

Selon qu'elles produisent leur lumière elles-mêmes, ou qu'elles diffusent une lumière incidente, on distingue deux types de sources :

DEFINITION

Une **source primaire** est une source produisant sa propre lumière. Exemples : le soleil, une lampe torche, une flamme, un laser, un écran de télévision, une diode électroluminescente (LED).

Une **source secondaire** est une source qui diffuse, dans toutes les directions de l'espace, la lumière d'une source primaire. Exemples : la lune, un écran de cinéma (en fait, la plupart des objets !).

Que signifie produire de la lumière ? En réalité, rien n'est créé à partir de rien. Une source primaire est un objet qui convertit une forme quelconque d'énergie en énergie lumineuse. On parlera plus généralement d'**énergie rayonnante** pour désigner tout le spectre électromagnétique (dont la lumière n'est qu'une partie). Il existe plusieurs modes de production de la lumière dont voici quelques exemples :

- Incandescence : énergie thermique → énergie rayonnante (ex : bougie)
- Chimioluminescence : énergie chimique → énergie rayonnante (ex : lucioles)
- Électroluminescence : énergie électrique → énergie rayonnante (ex : lampes à décharge, laser)

ATTENTION

Ne pas confondre **diffusion** et **réflexion**. La réflexion se fait dans une direction donnée de l'espace alors que la diffusion se fait dans toutes les directions.

On parle également de *réflexion spéculaire* et de *réflexion diffuse*.

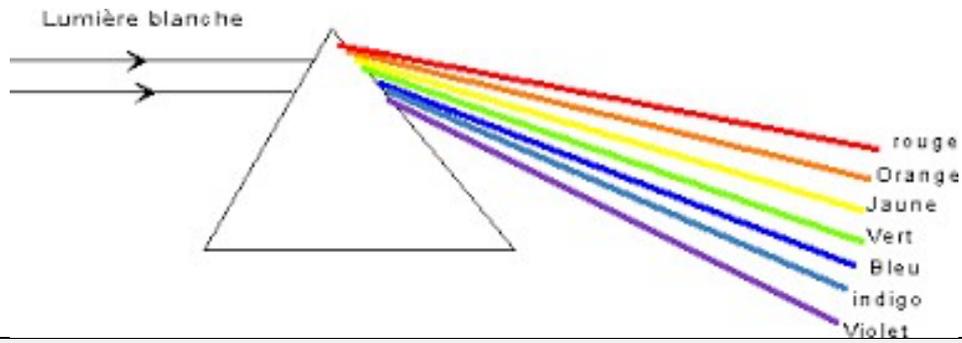
En réalité la lumière émise par une source est la superposition d'ondes électromagnétiques de différentes longueurs d'onde. Elle est rarement « pure » comme l'est le rayonnement du laser, dit monochromatique.

DEFINITION

Un rayonnement est dit **monochromatique** lorsqu'il correspond à une onde sinusoïdale de longueur d'onde bien déterminée.

La lumière blanche par exemple, n'est pas pure comme le pensaient les anciens ... Elle est la superposition de l'ensemble des longueurs d'ondes du visible, **comprises entre 400 et 800 nm**.

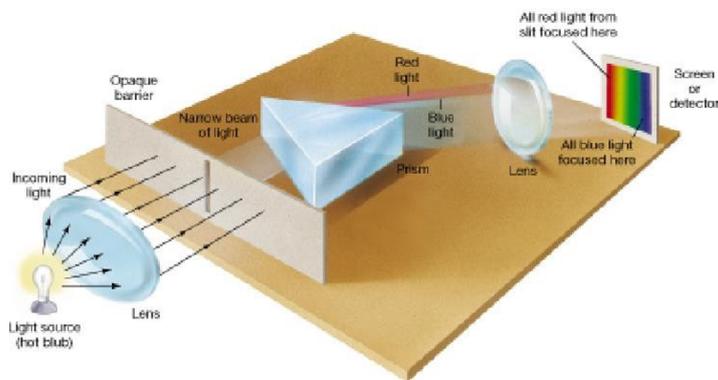
La célèbre expérience du prisme d'Isaac Newton a permis de démontrer cela en obtenant le spectre d'émission d'une lumière blanche à l'aide d'un prisme. Il existe en réalité 6 couleurs dominantes dans le visible : violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge. Pour obtenir un chiffre « magique » (les 7 jours de la semaine, les 7 péchés capitaux, etc.) Newton a ajouté le mystérieux indigo.



DEFINITION

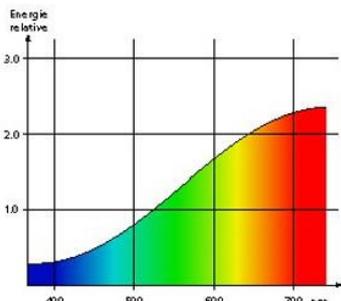
La **dispersion** d'une lumière composée (ex : lumière blanche) consiste à séparer les rayonnements monochromatiques qui la constituent. Dans le cas de la dispersion de la lumière d'une source, on obtient son **spectre d'émission**.

Pour obtenir un spectre il faut disposer d'un **système dispersif** comme un prisme ou un réseau.

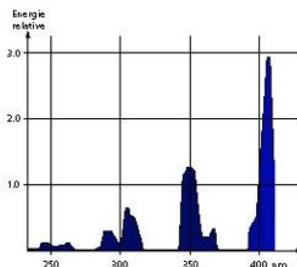


Un spectroscopie à prisme

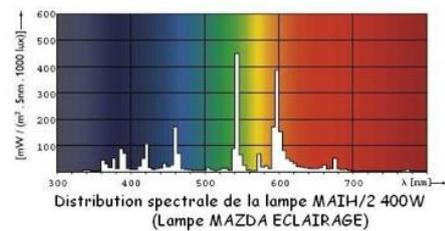
Exemples de spectres :



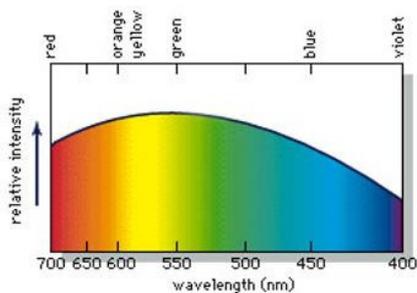
Lampe à incandescence



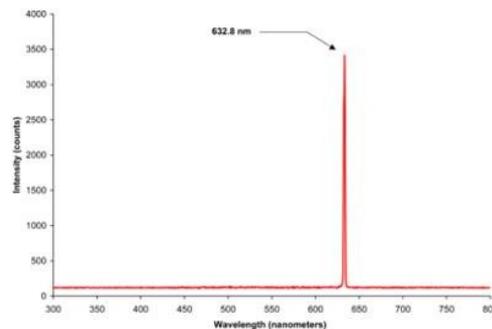
Lampe à vapeur de mercure



Lampe à vapeur de sodium



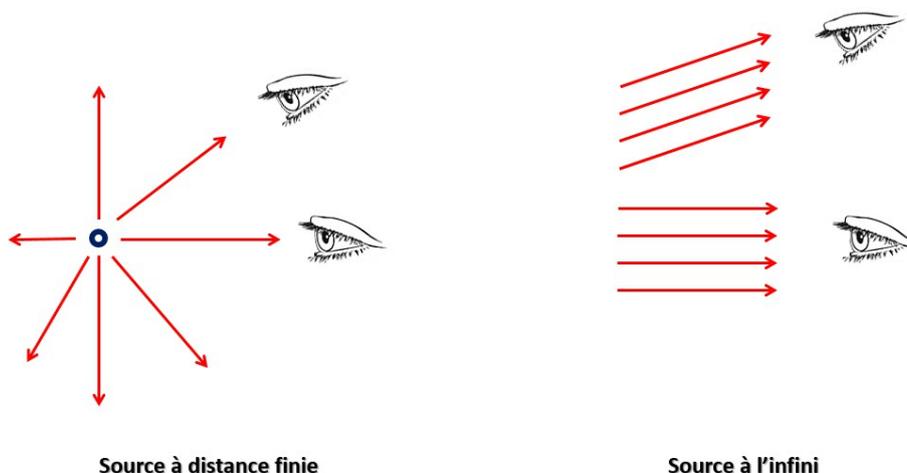
Rayonnement solaire



Laser

En optique géométrique nous utiliserons un modèle de source, fictif donc, appelé **source ponctuelle monochromatique** :

- La source n'a pas d'étendue : c'est un point.
- Elle émet dans une seule longueur d'onde : elle est monochromatique



REMARQUE IMPORTANTE

A l'infini, la taille et la position d'un objet sont uniquement définis par des **angles**.

2.2. Propagation de la lumière dans le vide et les milieux transparents : quelles sont les différences ?

Lorsqu'on parle de la propagation d'une onde on ne parle pas de vitesse (en principe réservé au déplacement de matière) mais de **célérité**. L'unité reste cependant la même : le $m \cdot s^{-1}$. C'est dans le vide que la lumière se propage le plus vite :

$$c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La lumière peut également se propager dans un milieu transparent, comme le verre ou l'eau. Dans ce cas **sa célérité est plus petite que dans le vide**. Pour pouvoir étudier un tel milieu on considèrera deux hypothèses simplificatrices :

- Ce milieu est homogène : ses propriétés sont les mêmes **en tout point** de l'espace (il n'est pas composé de plusieurs matériaux).
- Ce milieu est isotrope : les propriétés ne dépendent pas **de la direction** (par exemple, le bois est un matériau anisotrope : ses propriétés mécaniques dépendent de la direction, en particulier celle des fibres qui le composent).

Quand le milieu est bien homogène et isotrope, on peut définir une grandeur qui le caractérise, appelée **indice de réfraction**, qui permet de calculer la célérité de la lumière dans celui-ci :

DEFINITION

L'**indice de réfraction** n caractérise un milieu transparent, homogène et isotrope. La célérité c de la lumière dans ce milieu est alors donnée par l'expression :

$$c = \frac{c_0}{n}$$

n est donc une grandeur sans dimension forcément supérieure à 1.

Quelques valeurs d'indices de réfraction :

Matériau	Indice de réfraction n
Vide	1,000 000 0
Air	1,000 29
Eau	1,33
Éthanol	1,36
Verre	1,4-1,6
Diamant	2,42

Lien entre célérité et longueur d'onde

Les périodes spatiale et temporelle d'une onde sont liées par la célérité :

$$c = \frac{\lambda}{T}$$
$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$$

REMARQUE IMPORTANTE

La fréquence d'un rayonnement demeure constante quel que soit le milieu traversé. Par conséquent, lorsque la lumière change de milieu, sa longueur d'onde change également. Par exemple, si la lumière passe du vide à un milieu d'indice n, la longueur d'onde devient :

$$\lambda' = c' \cdot T = \frac{c}{n} \cdot T = \frac{c \cdot T}{n} = \frac{\lambda}{n}$$

3. Principes de l'optique géométrique

3.1. Approximation de l'optique géométrique

Pour pouvoir appliquer les lois de la géométrie à la lumière, nous avons vu qu'il était fondamental que l'on puisse parler de rayon lumineux et donc se placer dans les conditions du modèle corpusculaire. Pour cela, il faut éviter que la lumière ne manifeste ses caractéristiques ondulatoires par des phénomènes de diffraction ou d'interférences.

Pour cela il faut éviter les **petits objets** (ouvertures, obstacles), susceptibles de diffracter la lumière. Petit signifie dont la taille est de l'ordre de grandeur (ou inférieure) à la longueur d'onde du rayonnement.

Approximation de l'optique géométrique

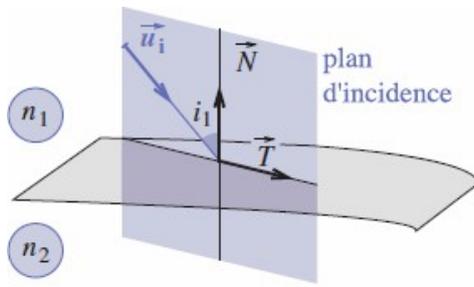
L'optique géométrique (donc l'étude géométrique des rayons lumineux) n'est valable que **lorsque les dimensions du système sont grandes devant la longueur d'onde du rayonnement.**

(on supposera qu'ici grand signifie au moins 10 fois plus grand)

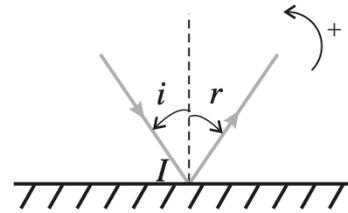
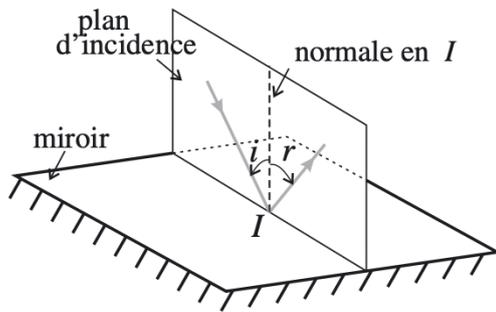
3.2. Réflexion et réfraction. Lois de Descartes

Revenons aux phénomènes de réflexion et de réfraction, déjà entrevus plus haut. Revenons également au XVIIe siècle, moment où Descartes fait franchir un grand pas à l'optique géométrique en rendant possible sa mathématisation.

Soit un rayon lumineux (rayon incident) arrivant à un dioptre (interface entre deux milieux d'indices différents). Localement cette surface est assimilée à un plan (plan tangent). Le **plan d'incidence** est le plan contenant le rayon lumineux incident et le vecteur normal. Les lois de Descartes déterminent la direction des rayons réfléchis et réfractés par ce dioptre. Elles précisent aussi que la fréquence de l'onde réfractée et celle de l'onde réfléchie sont identiques à celle de l'onde incidente.

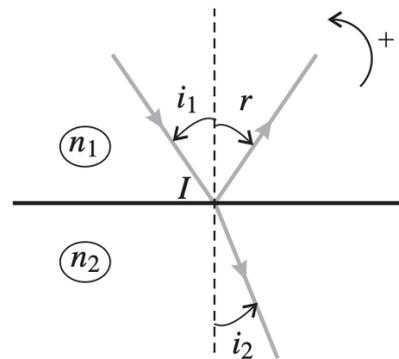
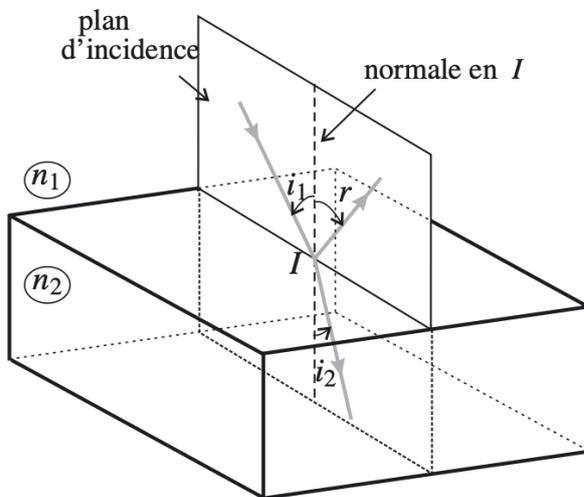


LOIS DE LA REFLEXION



- Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence
- L'angle de réflexion r est égal à l'angle d'incidence i (en valeur absolue) : $r = -i$

LOIS DE LA REFRACTION



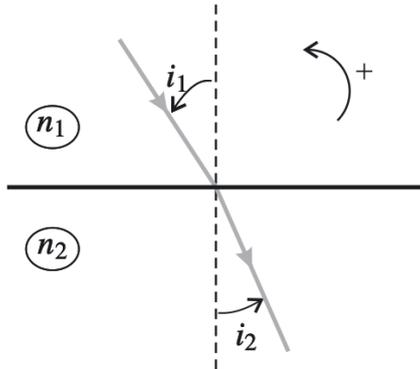
- Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence.
- L'angle d'incidence i_1 et l'angle de réfraction i_2 sont liés par la relation :

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$

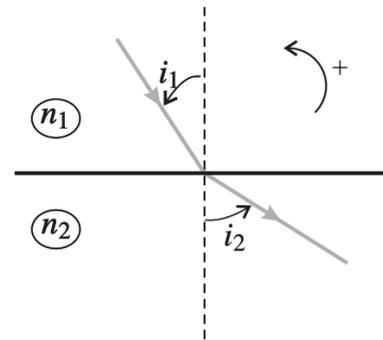
Réflexion totale

Le sens de cette déviation du rayon transmis dépend de l'ordre des indices de deux milieux :

- Si deuxième milieu est plus réfringent que le premier, c'est-à-dire si $n_2 > n_1$, le rayon réfracté se rapproche de la normale.
- Si le deuxième milieu est moins réfringent que le premier, soit si $n_2 < n_1$, le rayon réfracté s'écarte de la normale



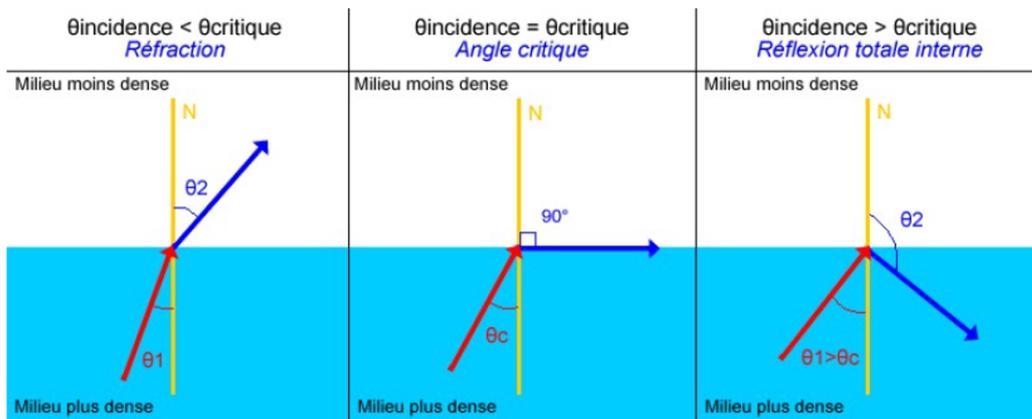
Réfraction avec un milieu (2) plus réfringent.



Réfraction avec un milieu (2) moins réfringent.

CONSEQUENCE IMPORTANTE

Lors d'une réflexion dans un milieu moins réfringent, il existe un angle d'incidence à partir duquel la réfraction n'est plus possible : seul le phénomène de réflexion se produit, on parle alors de **réflexion totale**.



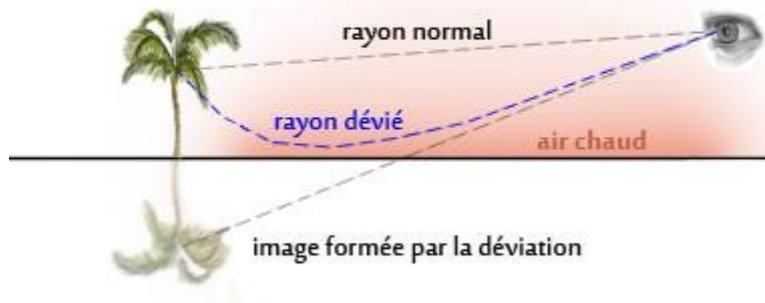
A VOUS DE JOUER

Déterminer l'angle critique θ_c en fonction des indices n_1 et n_2 .

Le phénomène de réflexion totale permet par exemple d'expliquer le phénomène de **mirage**. L'indice de réfraction, en effet, dépend de la température : **plus T est élevée plus n est petit**. Lorsque le sol est très chaud, il s'établit un gradient (disons un dégradé) d'indice de réfraction : n diminue lorsqu'on s'approche du sol. Les rayons s'éloignent donc de la normale jusqu'à atteindre l'angle critique de réflexion totale ce qui donne l'illusion d'un reflet.

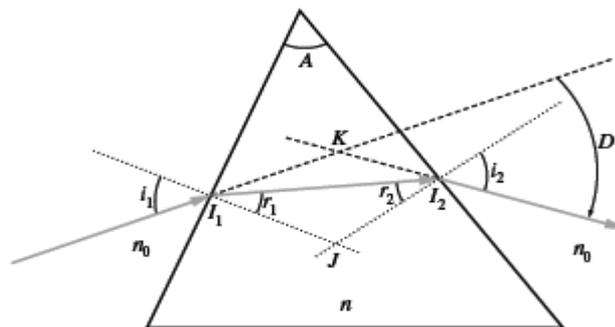


Mirage chaud (inférieur)



3.3. Le fonctionnement du prisme

Revenons à l'expérience de dispersion de la lumière par un prisme. Nous sommes maintenant en mesure de l'expliquer. Les lois de Descartes permettent parfaitement de prévoir le chemin suivi par une lumière monochromatique dans un prisme :



A RETENIR

En réalité l'indice de réfraction d'un matériau est variable selon la longueur d'onde du rayonnement.

Ainsi, chaque rayonnement monochromatique « voit » un indice différent et sera donc dévié différemment dans le matériau.

Voici par exemple les valeurs de l'indice de réfraction du verre pour différentes longueurs d'onde :

Couleur	Longueur d'onde λ dans le vide (nm)	Indice de réfraction n
Rouge	660	1,520
Orange	610	1,522
Jaune	580	1,523
Vert	550	1,526
Bleu	470	1,531
Violet	410	1,538

A VOUS DE JOUER

Dans le cas de la lumière blanche, tracer le trajet de chacune des 6 couleurs dans le prisme.
Expliquer rapidement le principe de la dispersion de la lumière par un prisme.

3.4. L'objet et ses images

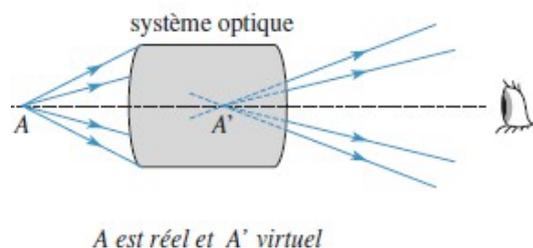
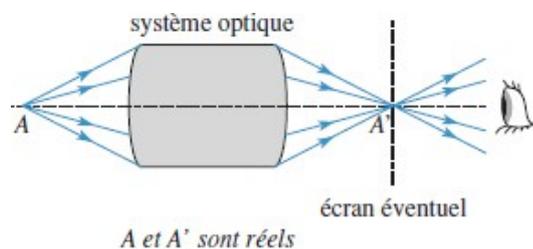
L'objet est la chose que l'on cherche à observer : une étoile (avec une lunette astronomique), une personne que l'on veut photographier, etc.

L'image est ce que l'on voit, soit directement avec nos yeux, soit par l'intermédiaire d'un système optique (lunette astronomique, appareil photo, etc.). Il y a en réalité plusieurs types d'images :

DEFINITIONS

Image réelle : les rayons issus du système optique convergent en un point. **L'image réelle est visible par projection sur un écran**, ou peut être enregistrée sur un support numérique (photo-capteur).

Image virtuelle : les rayons sortant du système optique semblent tous provenir d'une image (si on les prolonge en amont du système optique). **L'image virtuelle peut être vue directement de nos yeux** : c'est ce qu'on voit avec des lunettes par exemple !



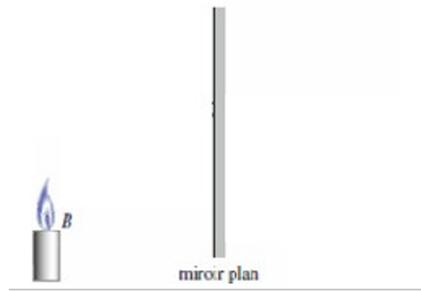
Remarque : on aurait tendance à penser qu'un objet est forcément réel. En réalité, nous verrons en étudiant des systèmes optiques qu'il est possible dans certains cas de créer des objets virtuels.

3.5. Exemple du miroir plan : notre première construction d'image

Prenons le cas concret d'un miroir plan. Comment construire l'image d'un point à travers un miroir ? Lorsque nous nous voyons dans un miroir notre image semble être située derrière le miroir. On peut même dire que notre image est notre symétrique par rapport au plan du miroir.

A VOUS DE JOUER

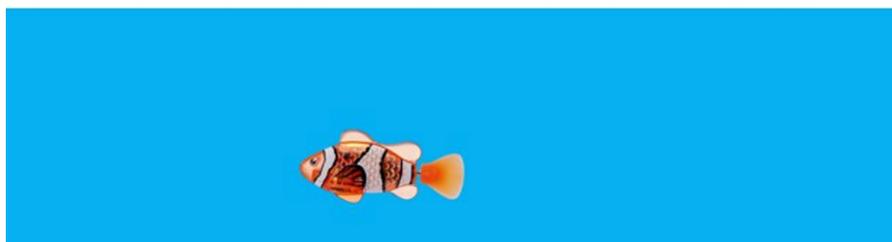
En utilisant judicieusement les lois de Descartes, montrer que l'image B' de B par le miroir est son symétrique par rapport au plan du miroir. Cette image est-elle réelle ou virtuelle ?



3.6. Exemple du dioptre plan : un poisson dans l'eau ...

A VOUS DE JOUER

Où se trouve l'image du poisson ? Est-elle réelle ou virtuelle ?



4. Les lentilles minces

4.1. Qu'est-ce qu'une lentille ?

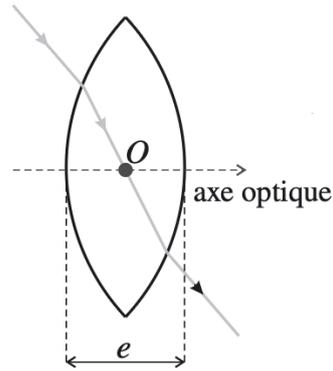
Selon leur nature (matériau) et leur forme, les propriétés des lentilles sont multiples, ce qui en fait les « briques » de construction des appareils optiques.

DEFINITIONS

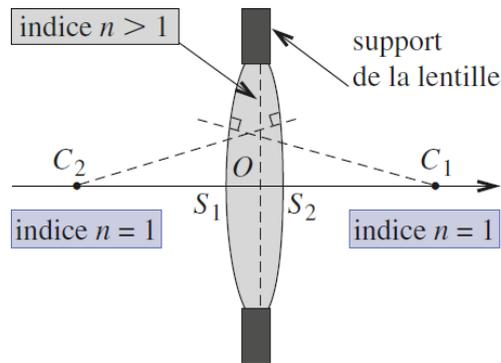
Lentille : système réfractant constitué de deux dioptries dont l'un au moins est sphérique. Nous n'étudierons que les lentilles constituées par un matériau homogène (verre, plastique) donc caractérisé par un indice de réfraction n constant (il existe cependant des lentilles à indice de réfraction variable).

Lentille mince : Lentille dont l'épaisseur est négligeable par rapport aux rayons des deux faces. Ce sont celles que nous étudierons dans ce cours.

De par leur géométrie sphérique, les lentilles sont des **systèmes centrés** : il existe donc un axe de symétrie de révolution que l'on appelle **axe optique**. Un rayon lumineux confondu avec l'axe optique ne sera ainsi pas dévié :

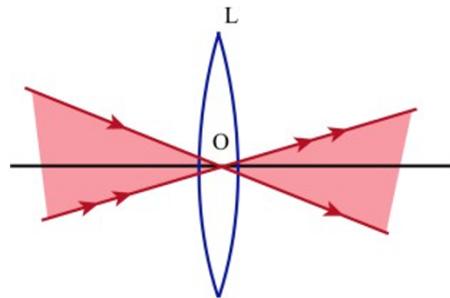


Par ailleurs, les lentilles possèdent deux **sommets** S_1 et S_2 correspondant aux intersections de l'axe optique avec les dioptries.



CONSEQUENCE IMPORTANTE

Dans le cas des lentilles minces, les sommets S_1 et S_2 sont confondus en un point noté O et appelé **centre optique**.

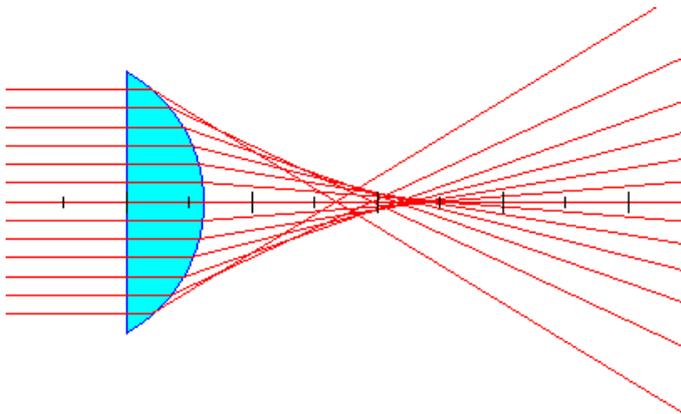


On peut montrer par symétrie la propriété suivante, très importante :

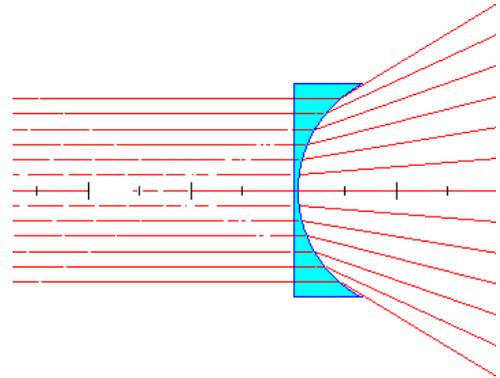
Un rayon lumineux passant par le centre optique O d'une lentille mince n'est pas dévié.

Il existe deux types de lentilles minces, selon leurs propriétés géométriques :

- Lentilles **convergentes** : rapprochent les rayons lumineux de l'axe optique.
- Lentilles **divergentes** : éloignent les rayons lumineux de l'axe optique



Lentille plan convexe convergente



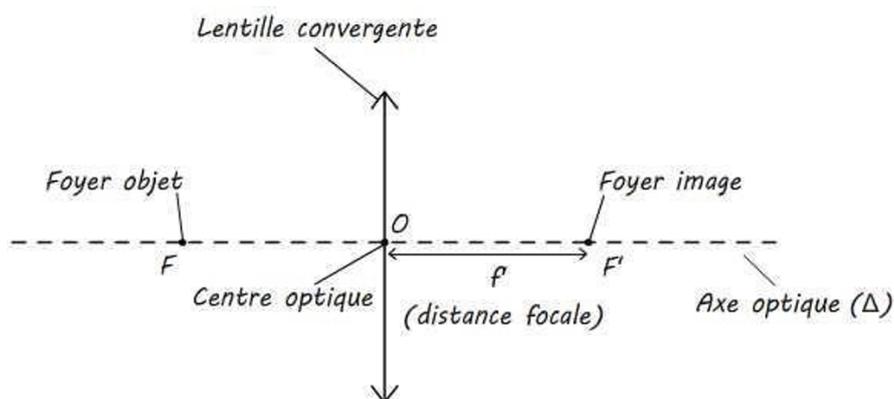
Lentille plan concave divergente

4.2. Lentilles convergentes

Les ménisques des lentilles convergentes sont généralement **convexes** (voir tableau ci-dessous), de manière que si on applique les lois de Descartes on trouve que le rayon émergent de la lentille (rayon réfracté) est **rapproché** de l'axe par rapport au rayon incident.

Lentilles à bords minces		
		
biconvexe	plan convexe	ménisque convergent

Schématisation d'une lentille mince convergente :



Lorsqu'un point est situé sur le **foyer principal objet F** , son image se situe à l'infini sur l'axe optique.

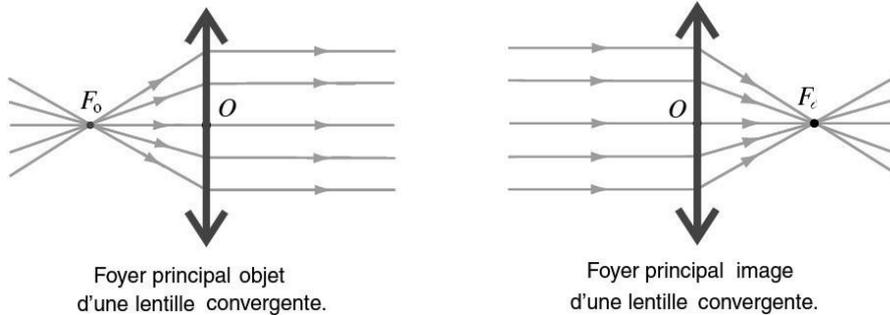
Le **foyer principal image F'** est l'image d'un point repoussé à l'infini sur l'axe optique.

On appelle **distance focale image f'** de la lentille la mesure algébrique $\overline{OF'}$. Dans le cas des lentilles convergentes cette grandeur est **positive**.

Vergence : les fabricants de lentilles indiquent généralement plutôt la **vergence V** , qui est l'inverse de la distance focale. Cette grandeur est intéressante car elle traduit la capacité de la lentille à dévier les rayons lumineux (plus la vergence est grande, plus les rayons sont déviés) :

$$V = \frac{1}{f'}$$

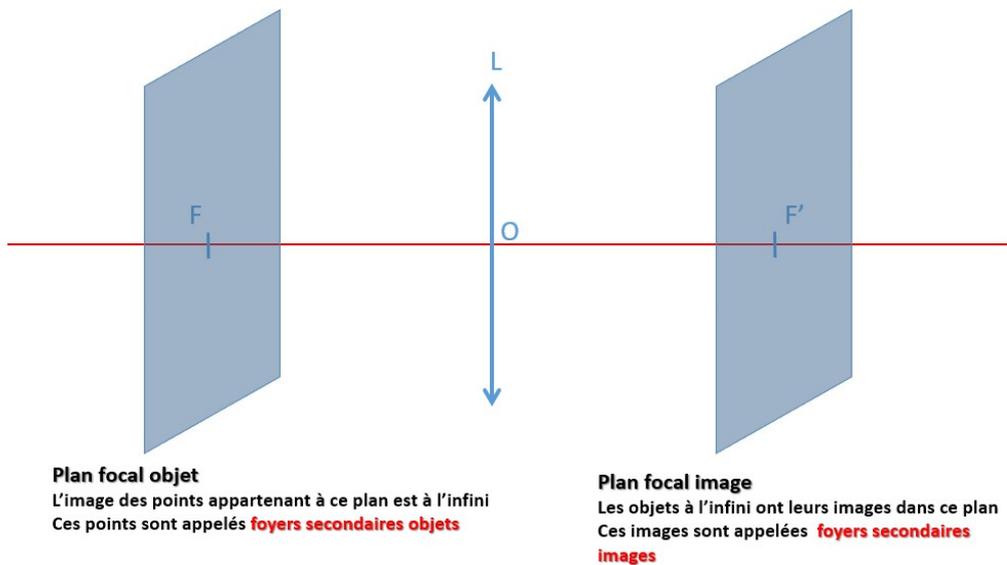
La vergence se mesure en dioptries ($1 \text{ } \delta = 1 \text{ m}^{-1}$). **Dans le cas des lentilles convergentes, la vergence est positive.**



Dans le cas des lentilles convergentes les foyers sont réels : les rayons lumineux se croisent effectivement en ces points.

Notion de plan focal

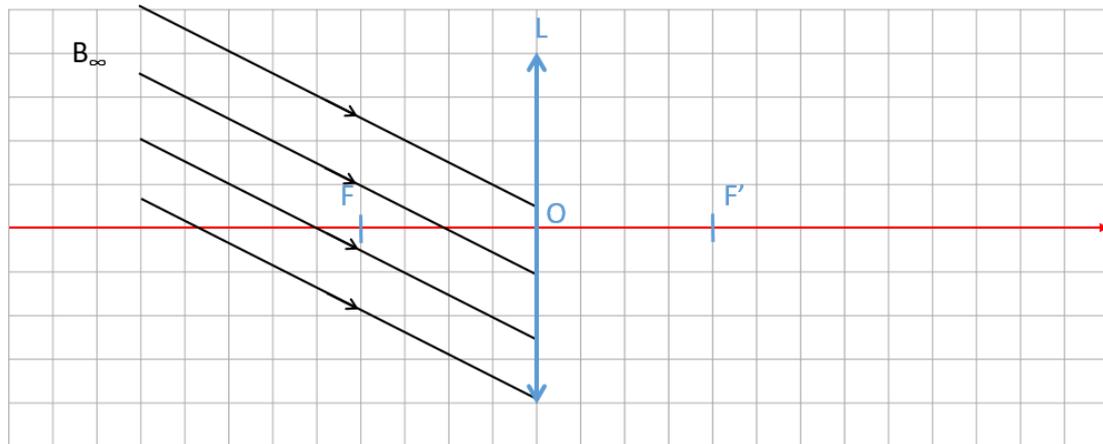
Question : et si un objet se situe à l'infini mais pas sur l'axe où se trouve l'image ? Dans le **plan focal image**, c'est-à-dire le plan orthogonal à l'axe optique passant par le point focal image F' . De la même manière on peut définir un **plan focal objet** : pour tout objet situé dans ce plan l'image se trouvera renvoyé à l'infini (pas forcément sur l'axe optique donc).



Tout point appartenant à un plan focal, hormis le foyer principal, est appelé **foyer secondaire** :

- Foyer secondaire objet : appartient donc au plan focal objet. Son image est à l'infini.
- Foyer secondaire image : appartient au plan focal image. Lieu des images d'objets à l'infini

A VOUS DE JOUER



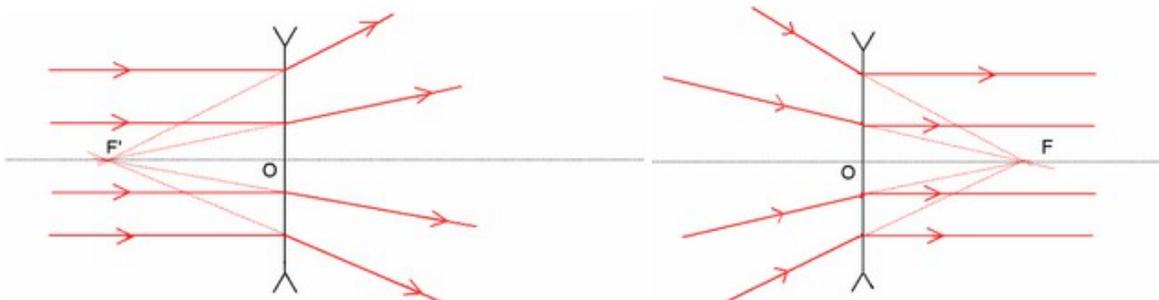
Déterminer l'image de B par la lentille L. Comment peut-on nommer cette image ?

4.3. Lentilles divergentes

Les ménisques des lentilles divergentes sont généralement **concaves** (voir tableau ci-dessous), de manière que si on applique les lois de Descartes on trouve que le rayon émergent de la lentille (rayon réfracté) est **éloigné** de l'axe par rapport au rayon incident.

Lentilles à bords épais		
biconcave	plan concave	ménisque divergent

Schématisation d'une lentille mince divergente :



Ce qui change par rapport aux lentilles convergentes :

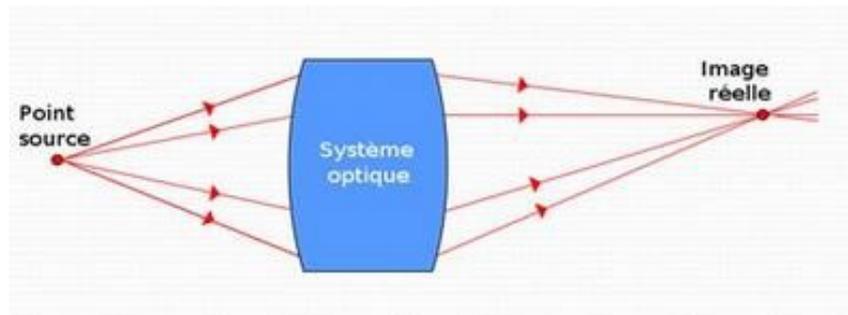
- Les rayons sont éloignés de l'axe optique.
- Les foyers sont virtuels : on voit que les rayons ne se coupent pas effectivement en ces points mais **convergent vers ces points**.
- La distance focale est définie de la même manière que pour les lentilles convergentes : $f' = \overline{OF'}$

On constate donc que pour une lentille divergente **f' est négative**. Par conséquent la vergence est également négative.

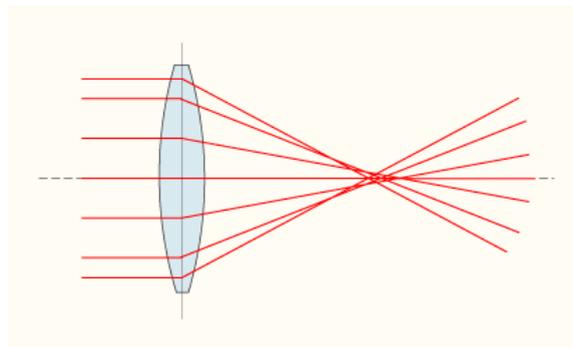
4.4. Stigmatisme. Aplanétisme. Conditions de Gauss.

Stigmatisme

En réalité, il n'y a pas de raison qu'un faisceau lumineux issu d'un point converge vers un autre point ! Plusieurs conditions doivent être réunies pour que cela soit possible ... Dans ce cas, on dit que le système est **stigmatique**.

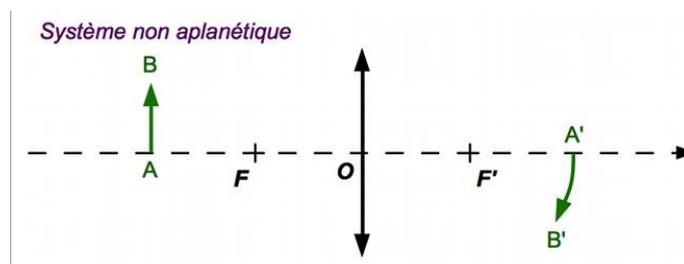
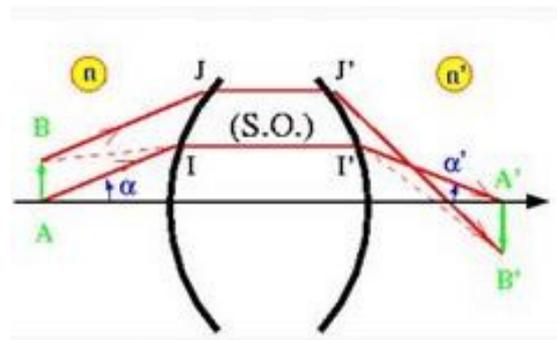


Lorsque les faisceaux ne convergent pas tout à fait en un point, cela conduit à des images floues. On parle de stigmatisme non rigoureux :



Aplanétisme

Un système est aplanétique si un objet plan et perpendiculaire à l'axe optique a une image plane et perpendiculaire à l'axe optique.



CONDITIONS DE GAUSS

Les conditions de Gauss, ou l'approximation de Gauss, sont obtenues lorsque les rayons lumineux possèdent un angle d'incidence très faible par rapport à l'axe optique, et en sont peu éloignés. Ils sont dits paraxiaux.

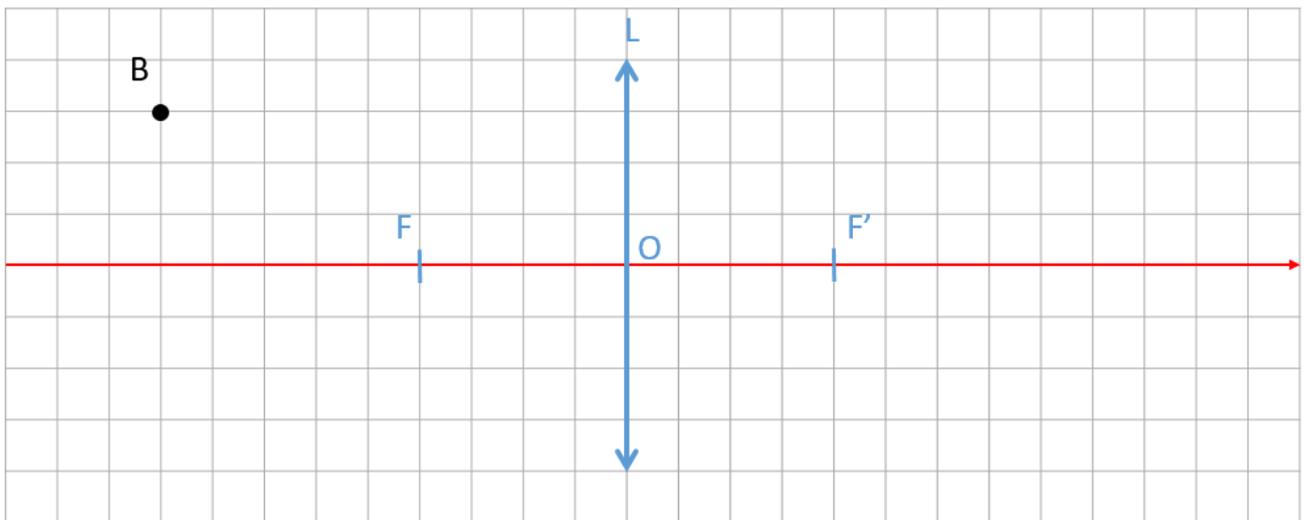
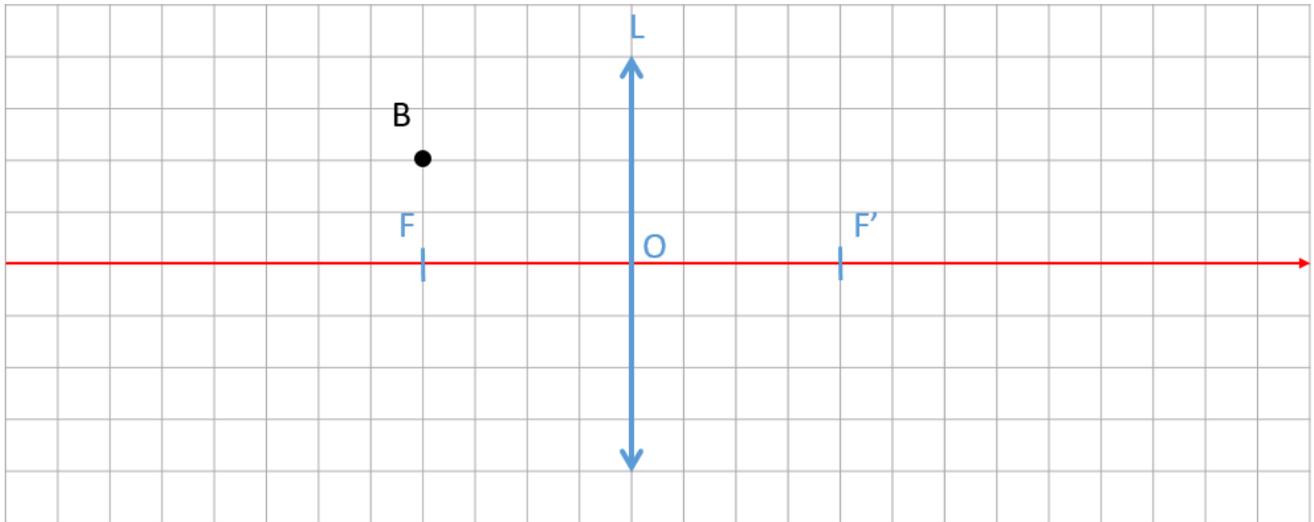
Dans ces conditions, les conditions de stigmatisme et d'aplanétisme sont en général respectées. Pour les obtenir, il suffit en général de placer un fort diaphragme en entrée du système.

4.5. Méthode de construction des images

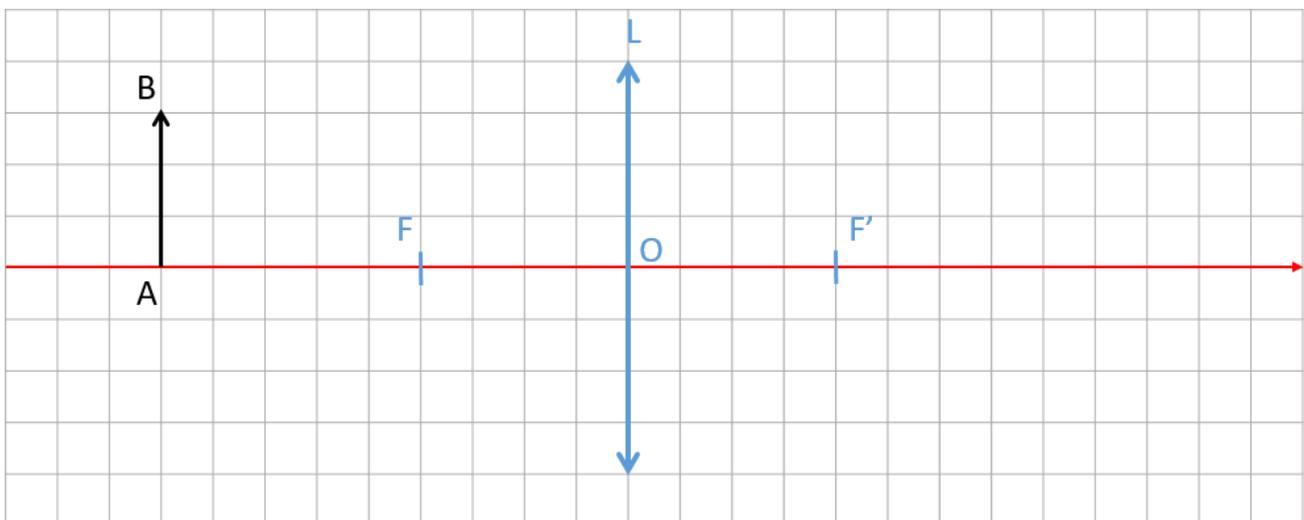
Cas des lentilles convergentes

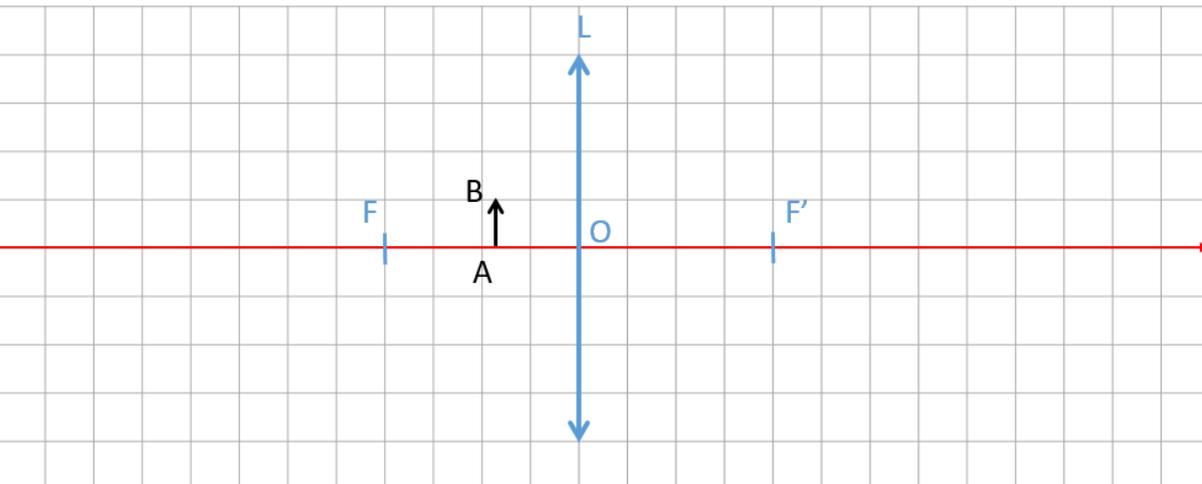
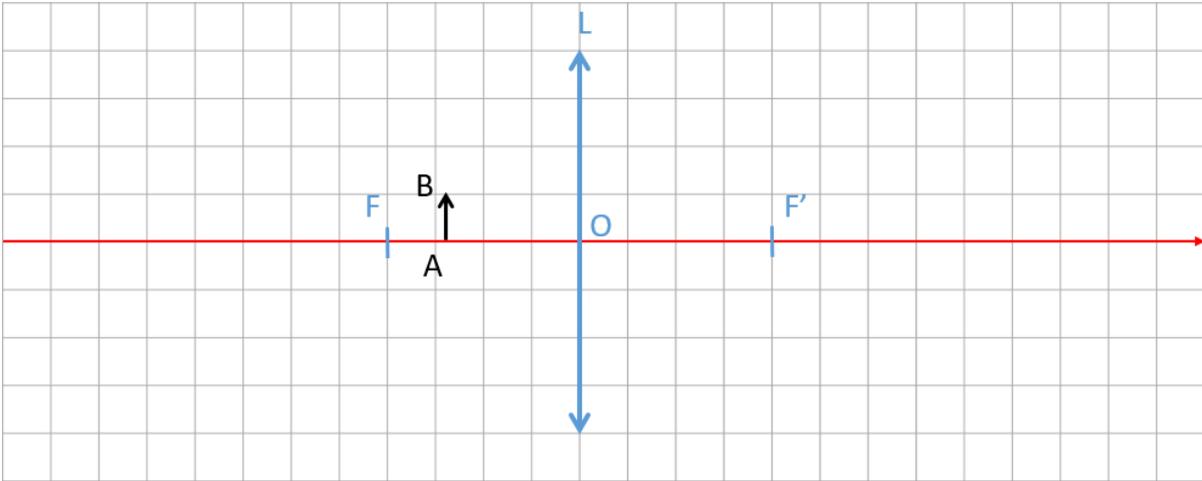
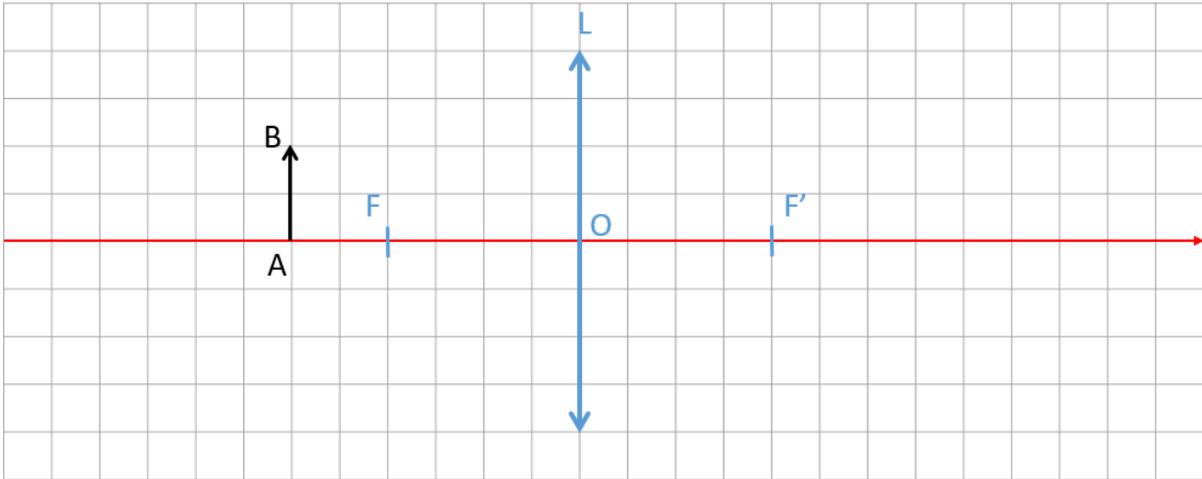
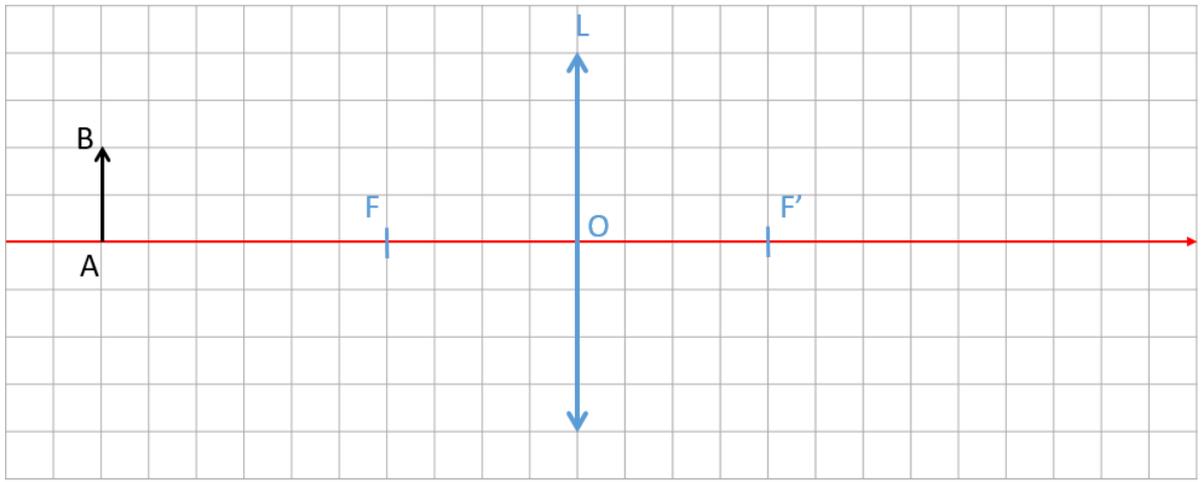
A VOUS DE JOUER

Construire B' , l'image de B par la lentille F . Expliquer la démarche. Dans chaque cas préciser si l'image est réelle ou virtuelle.



Déterminer l'image de l'objet AB , donc l'image A' de A , en justifiant la démarche. Dans chaque cas préciser si l'image est réelle ou virtuelle.

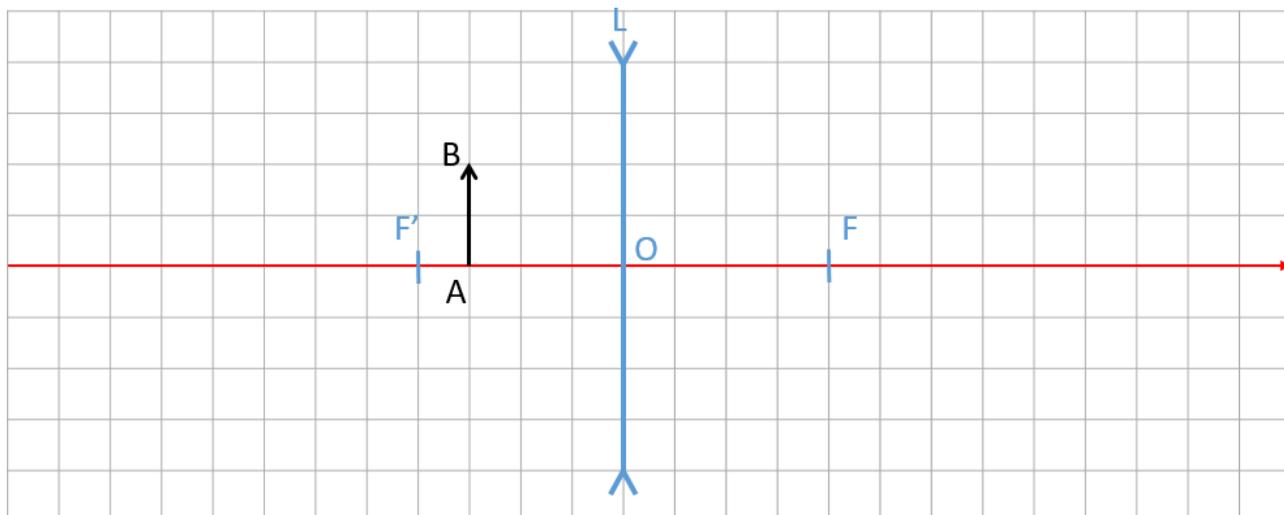
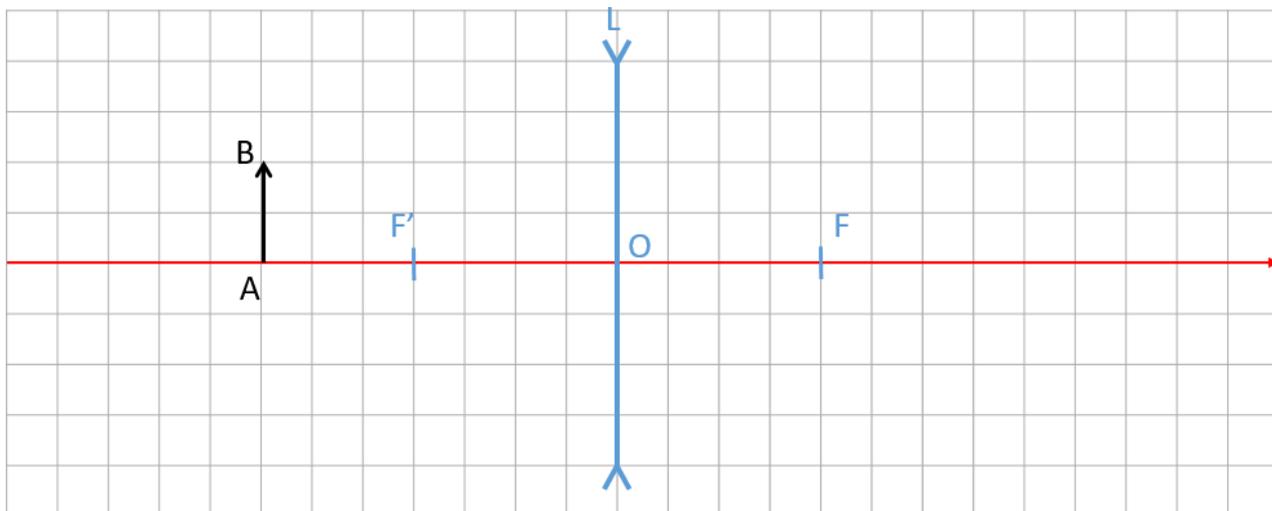




Cas des lentilles divergentes

A VOUS DE JOUER

Déterminer l'image de l'objet AB, en justifiant la démarche. Dans chaque cas préciser si l'image est réelle ou virtuelle



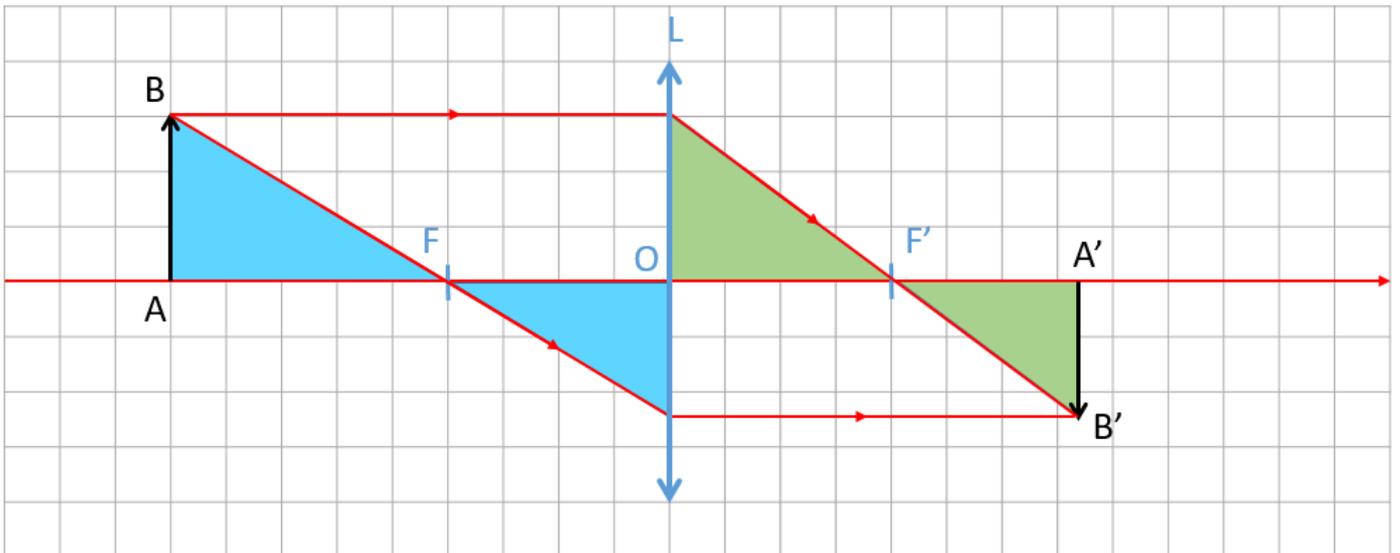
4.6. Approche mathématique : les relations de conjugaison

Lorsque A' est l'image de A par une lentille, on dit que **A et A' sont conjugués**. Des formules, dites relations de conjugaison (ou formules de conjugaison) permettent de déterminer les positions relatives de A et A' . Il existe deux formules de conjugaison utilisant des origines différentes :

- Formule de Newton : origine aux foyers.
- Formule de Descartes : origine au centre de la lentille.

Formule de Newton

Cette formule peut s'établir en remarquant que la construction de l'image $A'B'$ de AB fait intervenir des triangles rectangles dont les angles sont les mêmes : on parle de triangles semblables.



En écrivant l'égalité des tangentes pour les deux paires de triangles semblables nous obtenons :

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{B'A'}}{\overline{F'A'}}$$

et

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{B'A'}}{\overline{OF}}$$

ou encore

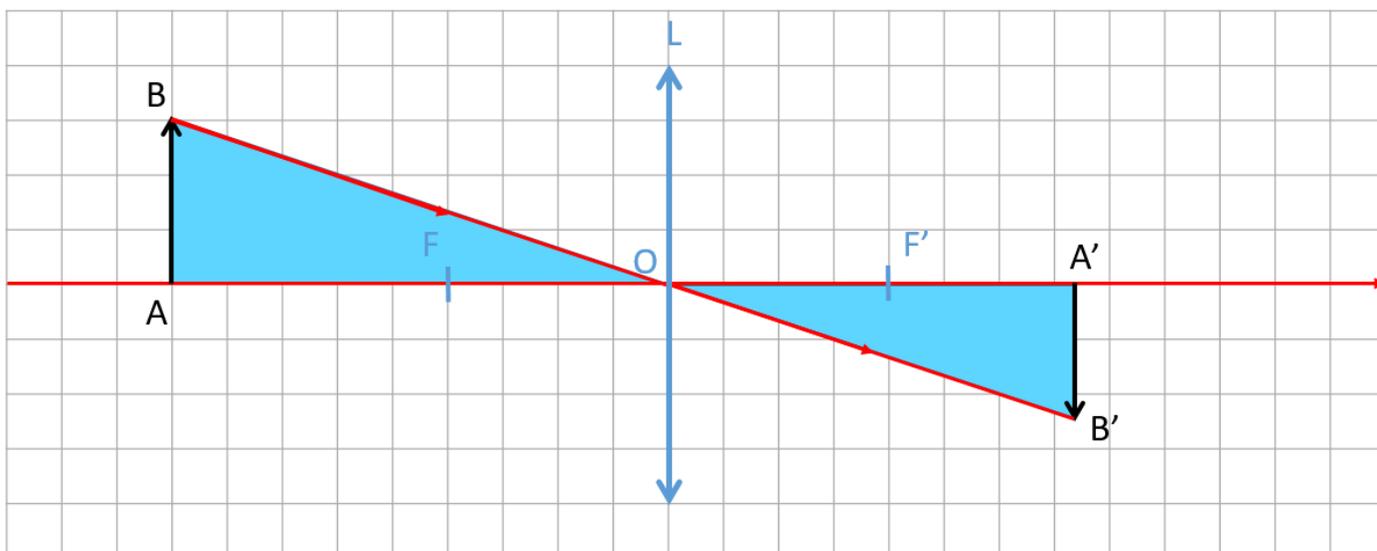
$$\frac{\overline{AB}}{\overline{B'A'}} = \frac{\overline{OF'}}{\overline{F'A'}} = \frac{\overline{FA}}{\overline{OF}}$$

Nous obtenons ainsi la formule de Newton :

$$\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = \overline{OF} \cdot \overline{OF'} = -f'^2$$

Formule de Descartes

Le rayon passant par le centre optique fait également apparaître des triangles semblables (ABO et A'B'O) et permet d'écrire des formules de conjugaison avec l'origine en O :



$$\frac{\overline{AB}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OA'}}$$

On utilise les relations obtenues précédemment pour éliminer \overline{AB} et $\overline{A'B'}$:

$$\overline{OF'} \cdot \overline{OA'} = -\overline{OA} \cdot \overline{F'A'}$$

On réécrit $\overline{F'A'}$ de manière à faire apparaître le centre O dans son expression :

$$\overline{F'A'} = \overline{F'O} + \overline{OA'} = \overline{OA'} - \overline{OF'}$$

En injectant cette expression dans la précédente on obtient :

$$\overline{OF'} \cdot \overline{OA'} = -\overline{OA'} \cdot \overline{OA} + \overline{OF'} \cdot \overline{OA}$$

On obtient alors la formule de Descartes :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{1}{f'} = V$$

Par définition le grandissement est :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

On peut lier le grandissement γ aux positions \overline{OA} et $\overline{OA'}$ de l'objet et de son image en appliquant la relation de Thalès :

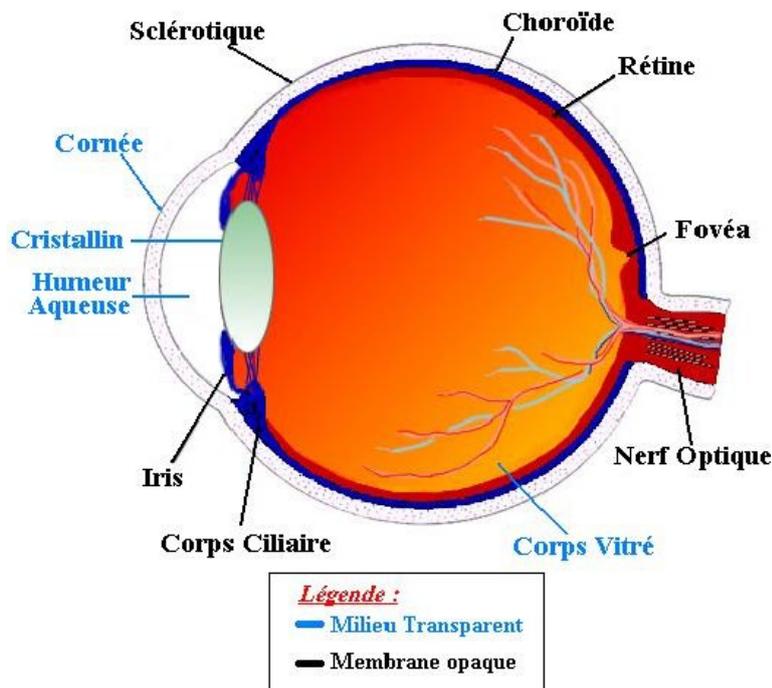
$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

La signification physique du grandissement γ est la suivante :

- si $|\gamma| > 1$ l'image est plus grande que l'objet, si $|\gamma| < 1$ l'image est plus petite que l'objet ;
- si $\gamma > 0$ l'image est droite, c'est-à-dire de même sens que l'objet, si $\gamma < 0$ l'image est renversée par rapport à l'objet.

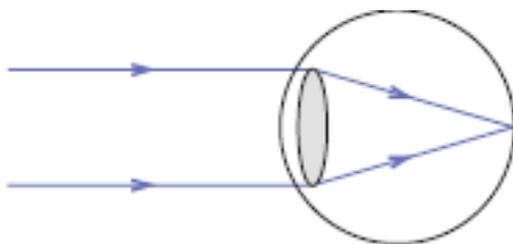
5. L'œil

5.1. Anatomie de l'œil

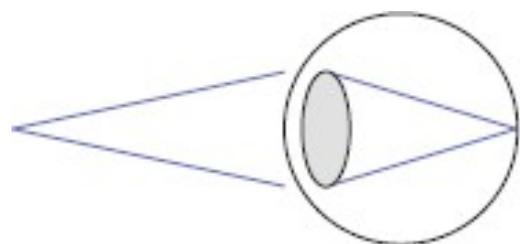


L'œil est un récepteur sensoriel dont le rôle est de convertir l'énergie lumineuse en activité neuronale : l'influx nerveux est un signal de nature électrique, interprétable par le cerveau. Il y a donc conversion d'énergie rayonnante en énergie électrique.

- La rétine est le siège de cette conversion énergétique : elle constitue l'équivalent de l'écran ou du capteur.
- Le cristallin est assimilable à une lentille convergente de vergence variable de manière à toujours former une image sur la rétine (distance cristallin-rétine fixe).
- La pupille joue le rôle de diaphragme en limitant l'intensité lumineuse pénétrant dans l'œil.



Œil au repos : objet à l'infini, vergence minimale



Œil accommodant : le cristallin est bombé pour augmenter la vergence

L'**accommodation** est l'action d'adapter la vergence du cristallin (grâce au muscle ciliaire) pour voir net l'objet regardé.

5.2. Caractéristiques de l'œil

Champ angulaire

Le champ de l'œil est très important (40° à 50°). Cependant, la zone de perception des détails fins correspond à une image formée sur la fovéa, au voisinage de l'axe optique. Elle est donc très réduite (1°).

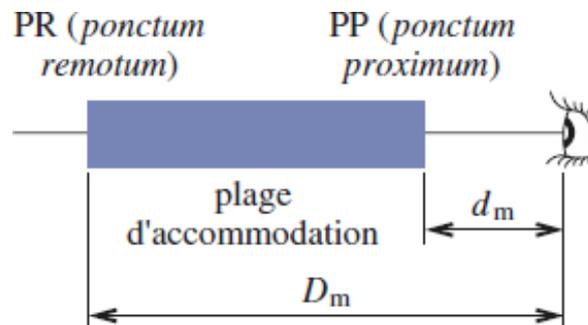
Résolution

L'œil ne peut séparer deux objets que si leurs images sur la rétine sont suffisamment éloignées pour se former sur des récepteurs (cônes et bâtonnets) différents. Il est caractérisé par son pouvoir séparateur angulaire de l'ordre d'une minute d'arc ($1' = 1/60^\circ = 0,017^\circ$) lorsque les conditions d'éclairage sont bonnes.

Plage d'accommodation

L'œil ne voit l'image nette que si celle-ci se forme sur la rétine :

- La distance maximale de l'objet est appelée **punctum remotum** PR. Pour un œil normal cette distance correspond à l'infini.
- La distance minimale est appelée **punctum proximum** PP. Pour un œil normal cette distance est de 25 cm.



Plage d'accommodation = domaine de vision nette d'un œil Pour l'œil normal, PR est l'infini et PP est à 25 cm