

Ch. P3 Optique géométrique

Dans ce chapitre

I. Réflexion et réfraction	2
I.1. Indice de réfraction	2
I.2. Vocabulaire	2
I.3. Lois de SNELL-DESCARTES	3
I.4. Exemple d'interprétation	3
I.5. Réflexion totale	4
I.6. Application : la fibre optique	4
II. Lentilles minces	5
II.1. Éléments caractéristiques d'une lentille convergente	5
II.2. Rayons lumineux particuliers	5
II.3. Image d'un objet par une lentille convergente	6
II.4. Formule de conjugaison	6
II.5. Grandissement	7
II.6. Modélisation de l'œil	7
II.7. Loupe	8
II.7.1. Construction de l'image à travers une loupe	8
II.7.2. Grossissement d'une loupe	8
III. Microscope	10
III.1. Principe du microscope	10
III.2. Grossissement du microscope	10
III.3. Objectif à immersion	11
III.4. Pouvoir séparateur. Résolution.	12
III.5. Indications portées sur un objectif	13
III.6. Intérêt du microscope électronique	13

Introduction : modèle du rayon lumineux

L'optique géométrique s'appuie sur le modèle du rayon lumineux, dont voici les principales caractéristiques :

- dans ce modèle, la lumière se propage **en ligne droite** dans un milieu homogène.
- le rayon lumineux est infiniment fin ; on peut rendre compte des observations par le tracé de **segments** sur un schéma.
- les rayons lumineux n'interagissent pas entre eux.

Ce modèle reste valable tant que la diffraction et les interférences restent limitées, c'est-à-dire tant que les obstacles rencontrés par la lumière sont très grands devant la longueur d'onde.

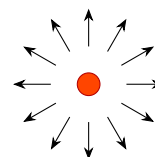


FIG. 1 – On considère qu'une source lumineuse ponctuelle émet une infinité de rayons lumineux dans toutes les directions.

I. Réflexion et réfraction

Les phénomènes de réflexion et de réfraction se produisent quand la lumière arrive sur une **interface** (ou **dioptre**) : une surface séparant deux milieux différents.

I.1. Indice de réfraction

Un milieu transparent est caractérisé par la valeur de son **indice de réfraction** n .

Plus n est élevé, plus le milieu est dit **réfringent**.

air	eau	verres	plexiglas	diamant
$\simeq 1,00$	1,33	$\simeq 1,5 - 1,8$	1,49	2,42

TAB. 1 – Indices de réfraction de quelques milieux.

I.2. Vocabulaire

La lumière rencontre le dioptre au **point incident** I.

lignes :

- dioptre (ou interface) : surface séparant les milieux
- normale : droite perpendiculaire au dioptre, passant par le point incident.

rayons :

- (1) rayon incident
- (3) rayon réfléchi
- (4) rayon réfracté

angles :

- i_1 : angle incident
- i'_1 : angle réfléchi
- i_2 : angle réfracté

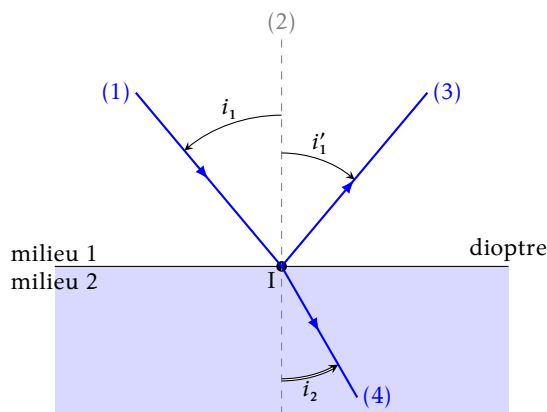


FIG. 2 – Définitions des lignes et angles.

I.3. Lois de Snell-Descartes

Lois de la réflexion

- première loi : le rayon réfléchi est dans le plan du rayon incident.
- deuxième loi : $i' = i$: l'angle réfléchi est égal à l'angle incident.

Lois de la réfraction

- première loi : le rayon réfracté est dans le plan du rayon incident.
- deuxième loi : $n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$

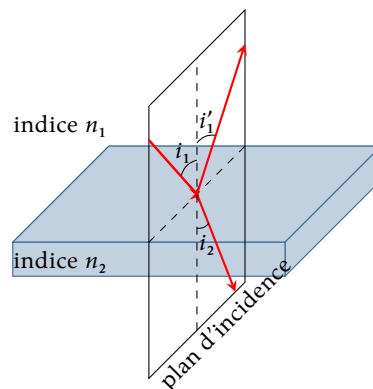


FIG. 3 – Les trois rayons se trouvent dans un même plan, perpendiculaire au dioptre.

La **réfraction** est la **déviation** d'un rayon lumineux, qui se produit en traversant l'interface entre deux milieux transparents d'**indices de réfraction différents**.

- lorsque $i_1 = 0$, $i_2 = 0$: si le rayon incident est **perpendiculaire** au dioptre, il n'y a **pas de déviation** (FIG. 4).
- si $n_2 > n_1$ alors $i_2 < i_1$: plus le milieu est réfringent (n élevé), plus le rayon est proche de la normale.

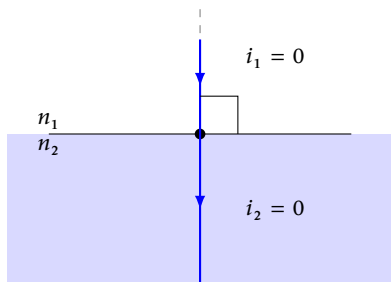


FIG. 4 – Absence de réfraction lorsque $i_1 = 0$.

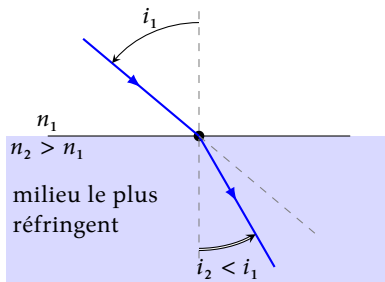


FIG. 5 – Milieu plus réfringent : rayon plus proche de la normale.

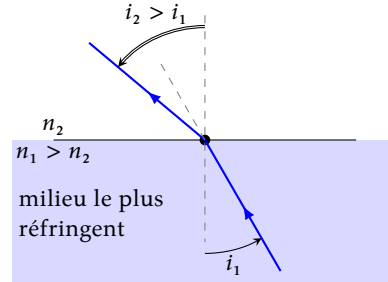


FIG. 6 – Principe du retour inverse de la lumière.

Animation en ligne : <https://www.geogebra.org/m/n9dnvab7>

I.4. Exemple d'interprétation

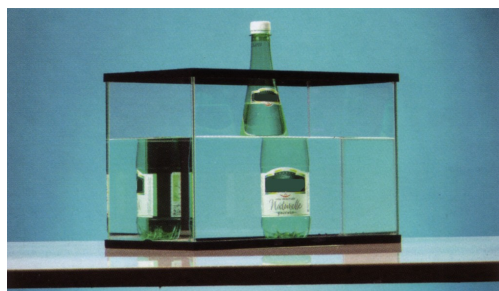


FIG. 7 – Une illusion d'optique classique : l'objet coupé et dédoublé dans l'eau.

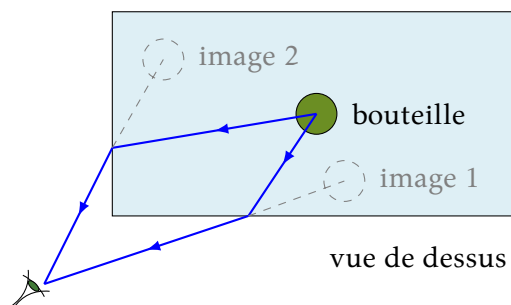


FIG. 8 – Son interprétation : on trace 2 rayons réfractés arrivant à l'œil de l'observateur.

Dans de nombreuses illusions d'optique, le cerveau reçoit les rayons en les interprétant comme non déviés. Il se forme deux images de la bouteille, provenant de deux directions différentes.

I.5. Réflexion totale

La loi de la réfraction indique que, lorsque le rayon passe dans un milieu moins réfringent, l'angle de réfraction est supérieur à l'angle incident.

Par conséquent, si i_1 augmente, on atteint une situation où l'angle de réfraction i_2 vaut 90° . Dans ce cas, le rayon ne ressort pas du milieu 1.

Cette situation se produit pour une valeur seuil de i_1 , appelée « angle limite ».

Réflexion totale

Si le rayon **se dirige vers le milieu le moins réfringent**, et si l'angle d'incidence **dépasse une valeur limite**, alors le rayon réfracté disparaît : c'est la **réflexion totale**.

Animation en ligne :

<https://dgxy.link/reflexiontotale>

En cas de réflexion totale, toute l'énergie lumineuse incidente est transférée dans le rayon réfléchi.

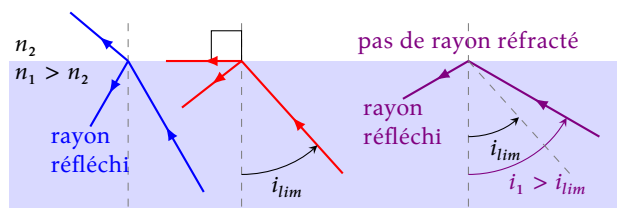


FIG. 9 – Réflexion totale.

Calcul de l'angle limite i_{lim} :

$$n_1 \cdot \sin i_{lim} = n_2 \cdot \sin 90$$

$$\sin i_{lim} = \frac{n_2}{n_1}$$

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

I.6. Application : la fibre optique

La fibre optique permet la propagation de la lumière dans un matériau courbe.

Ses principales applications technologiques sont dans les télécommunications et le domaine médical (fibroscopie, endoscopie). Son principe est basé sur la réflexion totale.

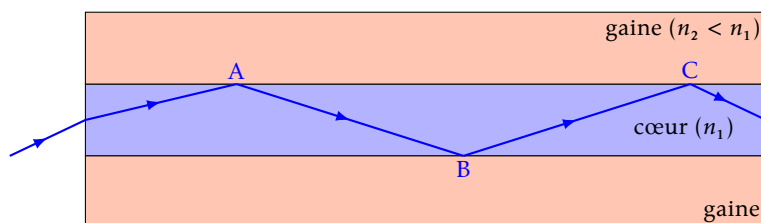


FIG. 10 – Schéma de principe d'une fibre optique, en coupe longitudinale.

La fibre est constituée de deux matériaux transparents : un **cœur** entouré d'une **gaine**, celle-ci ayant un **indice de réfraction plus faible que celui du cœur**.

À chaque arrivée sur l'interface cœur/gaine, les rayons lumineux subissent une réflexion totale qui les maintient à l'intérieur de la fibre. Pour cela, l'angle d'incidence doit rester **supérieur à l'angle limite de la réflexion totale**.



FIG. 11 – Une fibre optique de démonstration.

II. Lentilles minces

II.1. Éléments caractéristiques d'une lentille convergente

Une lentille mince est un disque en matériau transparent, dont au moins l'une des faces est courbe.

Des rayons traversant une lentille subissent deux réfractions (une à l'interface air/lentille, l'autre à l'interface lentille/air, à la sortie), ce qui occasionne une déviation des rayons.

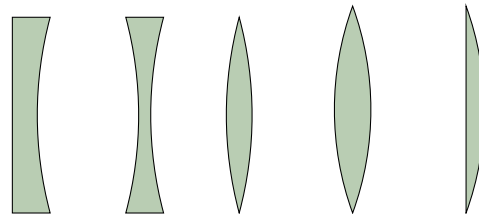


FIG. 12 – Profils de quelques lentilles minces.

Une lentille convergente est toujours symbolisée par une double flèche verticale.

L'**axe optique** est l'axe de symétrie de la lentille. Il passe par le **centre optique** O.

Une lentille convergente possède deux autres points particuliers : ses **foyers** F et F', situés de part et d'autre de la lentille à une distance f : la **distance focale**.

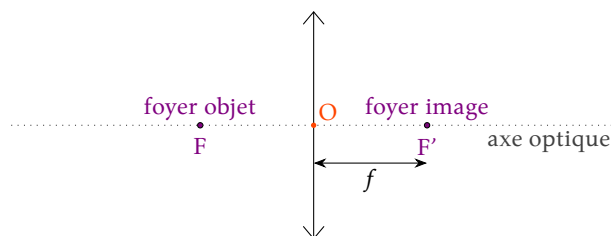


FIG. 13 – Une lentille convergente et ses principaux éléments.

II.2. Rayons lumineux particuliers

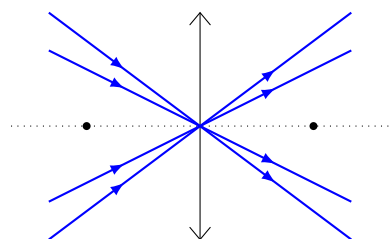


FIG. 14 – Tout rayon passant par l'axe optique n'est pas dévié.

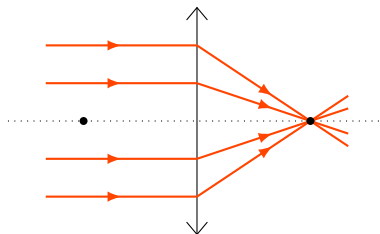


FIG. 15 – Tout rayon arrivant **parallèle à l'axe optique** ressort en **passant par le foyer F'**.

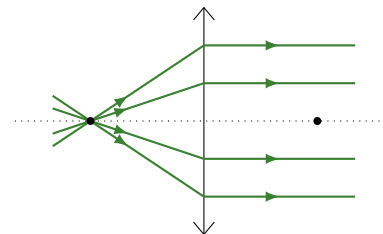


FIG. 16 – Tout rayon étant passé par le foyer F ressort **parallèle à l'axe optique**.

Les rayons issus d'un objet ponctuel **situé à l'infini** arrivent **parallèles entre eux**.

Pour construire l'image de cet objet, à partir d'un rayon quelconque, on peut tracer **deux rayons particuliers parallèles** à ce rayon.

- (1) : rayon quelconque
- (2) : rayon passant par F
- (3) : rayon passant par O

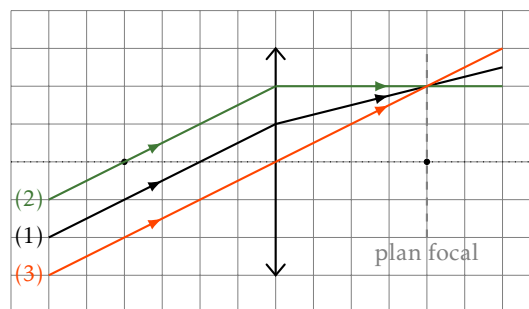


FIG. 17 – Les rayons issus d'un objet **à l'infini** sont parallèles entre eux, et se rejoignent **dans le plan focal image** de la lentille.

II.3. Image d'un objet par une lentille convergente

Pour construire l'image d'un objet AB à travers une lentille, on place un segment AB à une distance donnée de la lentille, le point A étant sur l'axe optique.

On trace alors deux ou trois rayons particuliers issus du point B.

Leur intersection après la lentille donne la position de B', image du point B. L'image A' n'est pas construite, mais déduite (elle est sur l'axe optique, telle que AB et A'B' soient parallèles).

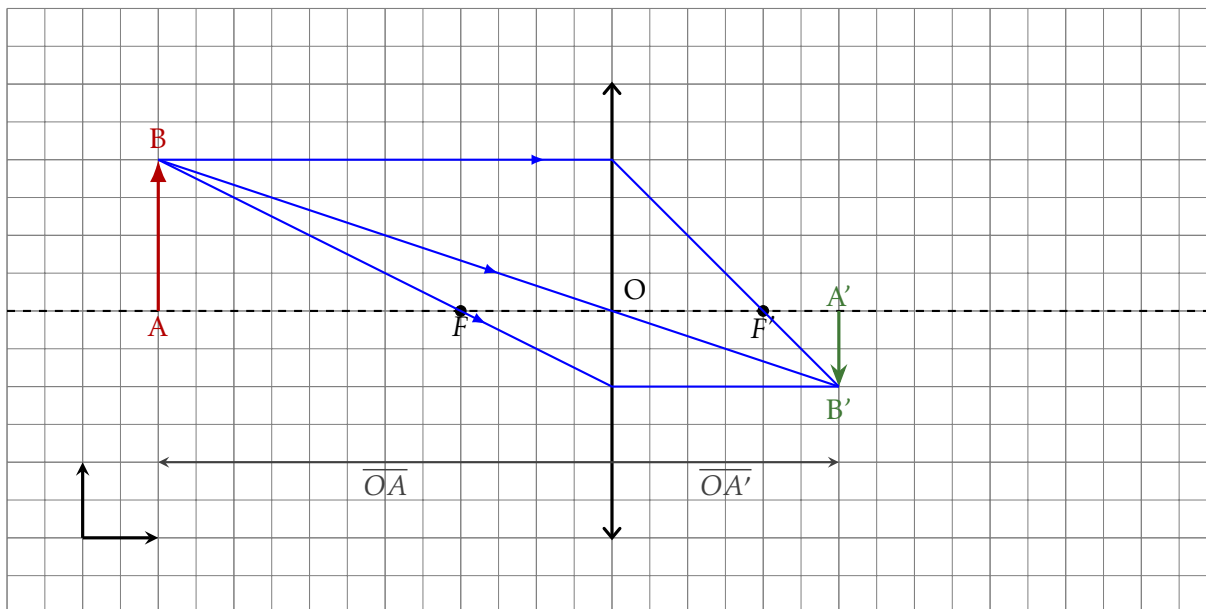


FIG. 18 – Construction de l'image d'un objet AB avec les 3 rayons particuliers.

On constate dans cet exemple que l'image est : 1) plus petite que l'objet 2) inversée.

Il s'agit d'une **image réelle** car formée **après la lentille**. Des rayons se focalisent sur une image réelle ; elle peut être vue soit par l'œil, soit par projection sur un écran.

II.4. Formule de conjugaison

La FIG. 18 indique les distances $\overline{OA}$ (objet - lentille) et $\overline{OA'}$ (lentille - image). Ces distances sont définies **algébriquement**, c'est-à-dire qu'elles peuvent être *positives ou négatives*. Le sens positif des distances est précisé par le repère dans le coin inférieur gauche.

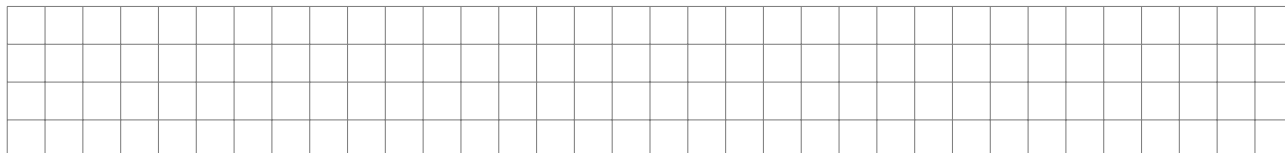
Avec ces conventions, sur la FIG. 18 on a $\overline{OA}$ et $\overline{A'B'}$ négatives ; $\overline{OA'}$ et $\overline{AB}$ positives.

La **formule de conjugaison** relie entre elles ces distances :

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

où $f' = \overline{OF'}$ est la distance focale de la lentille.

Vérification avec la FIG. 18 :



Positions de l'image en fonction de celle de l'objet :

https://phet.colorado.edu/sims/html/geometric-optics/latest/geometric-optics_fr.html

Plus l'**objet** est **loin** de la lentille, plus l'**image** se rapproche du **foyer image F'**.
Plus l'**objet** se **rapproche** du foyer objet F, plus l'**image s'éloigne** (vers l'infini).

II.5. Grandissement

Le **grandissement** γ est défini par : $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ ex. si $\overline{A'B'} = 1 \text{ cm}$ et $\overline{AB} = -2 \text{ cm}$, alors $\gamma = -\frac{1}{2}$

Autrement dit :

- la **valeur absolue** du grandissement sert à comparer les **tailles** de l'image et de l'objet.
- le **signe** du grandissement indique si l'image est dans le même sens (+) ou dans le sens opposé (−) à l'objet.

On peut montrer que le grandissement peut aussi se calculer avec le rapport des distances $\overline{OA'}$ et $\overline{OA}$:

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

II.6. Modélisation de l'œil

La modélisation de l'œil comme une lentille permet d'expliquer l'intérêt de certains instruments optiques, ainsi que certains défauts de la vision.

Les différents tissus (cornée, humeur aqueuse, cristallin, humeur vitrée...) traversés par la lumière sont transparents et présentent des caractéristiques (indices de réfraction, courbure) qui permettent de les voir globalement comme une lentille convergente.

L'image doit se former sur la rétine, où les rayons issus d'un même point doivent converger pour obtenir une image nette.

Les muscles ciliaires peuvent déformer le cristallin, ce qui modifie sa distance focale et permet une vision de près.

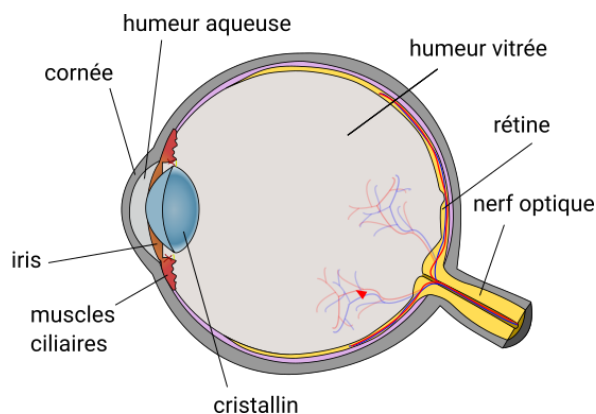


FIG. 19 – Anatomie simplifiée de l'œil.

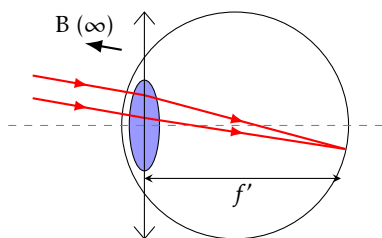


FIG. 20 – Vision d'un objet à l'infini. L'image se forme sur la rétine, qui joue le rôle de plan focal de la lentille.

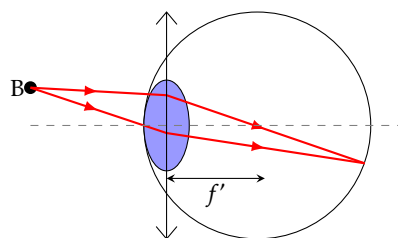


FIG. 21 – Vision d'un objet proche. Pour que l'image se forme toujours sur la rétine, la distance focale doit diminuer : c'est l'**accommodation**.

Le phénomène d'accommodation, qui réduit la distance focale de l'œil pour la vision de près, sollicite les muscles ciliaires. Cet effort entraîne une fatigue musculaire et ne peut être soutenu dans la durée. On appelle **punctum proximum** (PP) le point le plus proche de l'œil (accommodation maximale) où l'on puisse observer un objet nettement, de façon prolongée. Ce point se trouve à une distance fixée à 25 cm pour les applications numériques.

On appelle **diamètre apparent** (ou diamètre angulaire) l'angle sous lequel est vu un objet depuis une certaine distance.

Un objet petit et proche peut être vu sous le même diamètre apparent qu'un objet lointain et plus grand.

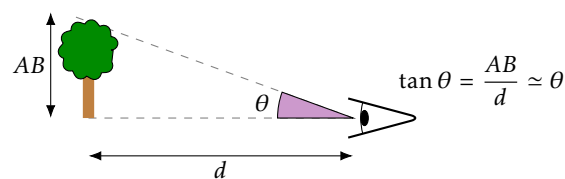
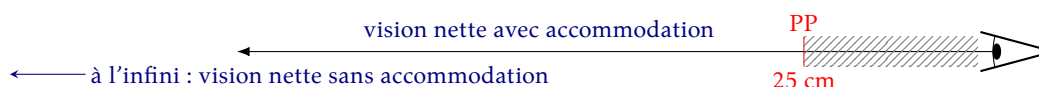


FIG. 22 – Diamètre apparent d'un objet.

Pour appliquer cette formule, on se place dans un **triangle rectangle** : à partir du côté opposé et du côté adjacent à l'œil, on calcule le diamètre apparent θ .

Approximation des petits angles : $\tan \theta \simeq \theta$ (en radians).



Pouvoir séparateur de l'œil.

Si deux taches sont trop proches l'une de l'autre, l'œil les voit comme une seule (il ne peut pas les séparer). On appelle **pouvoir séparateur** la distance minimale entre deux points que l'œil peut distinguer.

Pour l'œil humain¹, il correspond à un diamètre apparent de 1 minute d'arc, soit $\frac{1}{60}$ de degré, soit $3 \cdot 10^{-4}$ rad.

Application numérique.

Avec $\theta = 3 \cdot 10^{-4}$ rad, calculer le pouvoir de résolution AB de l'œil.

[illegible]

11.7. Loupe

La loupe est une lentille convergente de distance focale de l'ordre de la dizaine de cm.

Son usage nécessite que l'objet observé se trouve **proche de la lentille**. La loupe donne une image **agrandie** et **droite**; voyons comment les lois vues précédemment s'appliquent pour expliquer ces propriétés.

II.7.1. Construction de l'image à travers une loupe

Quand l'objet se trouve sur le foyer F de la loupe (FIG. 23b) :

- les rayons issus de B ayant traversé la lentille sont **parallèles**.
- L'œil recevant ces rayons les interprète comme n'ayant pas été déviés; ces rayons sont vus comme provenant d'un point obtenu en les **prolongeant** à l'avant de la lentille (pointillés). Ce point se trouve **à l'infini**. **L'œil n'a pas besoin d'accommoder**.

Dans tous les cas :

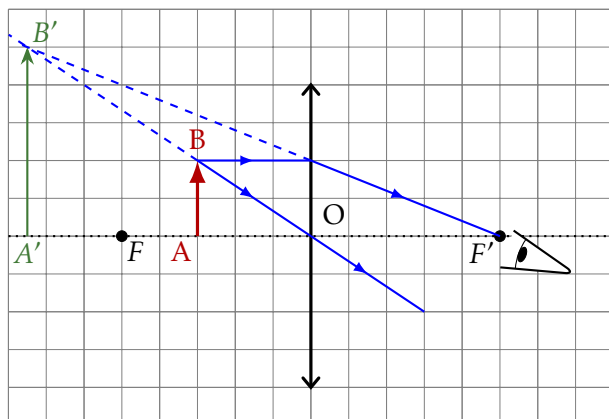
- L'image $A'B'$ est **une image virtuelle**, non projetable sur un écran, mais visible par l'œil.
- L'image est **agrandie** et **de même sens** que l'objet.

11.7.2. Grossissement d'une loupe

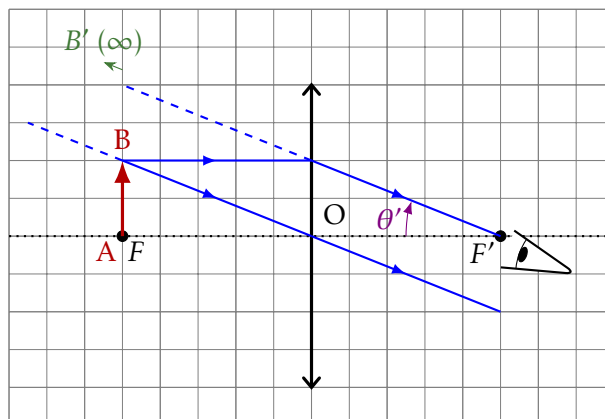
À travers la loupe, l'œil voit l'image $A'B'$ sous un angle θ' (Fig. 23b). Cet angle est supérieur à l'angle θ sous lequel on verrait l'objet à l'œil nu.

Dans les conditions les plus favorables, à l'œil nu on voit l'objet depuis son *punctum proximum*, situé à une distance $d_m = 25$ cm. On a alors :

1. Cette valeur est liée à la densité de cellules tapissant la rétine.



(a) Objet entre le foyer objet F et la loupe.



(b) Objet sur le foyer F.

FIG. 23 – Construction de l'image d'un objet avec une loupe.

$\theta = \frac{AB}{d_m}$ (pour de petits angles). D'autre part, pour l'angle θ' on a (voir FIG. 23b) : $\theta' = \frac{AB}{f'}$

Le **grossissement** G (différent du grandissement) est le rapport entre l'angle sous lequel on voit l'objet à la loupe, et celui où l'objet est vu à l'œil nu :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} \quad \text{avec les expressions ci-dessus : } G = \frac{\frac{AB}{f'}}{\frac{AB}{d_m}} = \frac{d_m}{f'} \quad G = \frac{d_m}{f'}$$

Comme on le voit, le grossissement augmente si la distance focale f' diminue.

En résumé sur la loupe.

La loupe forme une image **virtuelle, de même sens** que l'objet, idéalement située **à l'infini** (pour le confort de l'œil).

Le **grossissement** G d'une loupe est le rapport des diamètres apparents :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{d_m}{f'}$$

III. Microscope

III.1. Principe du microscope

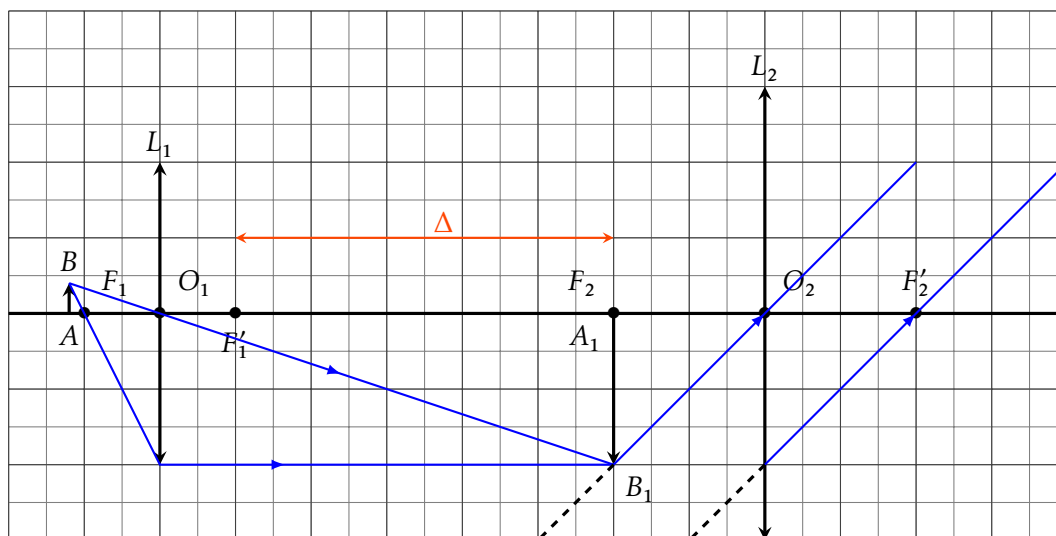


FIG. 24 – Principe de construction de l'image avec le microscope.

Un microscope est constitué de deux lentilles² :

- la 1^{re} joue le rôle d'**objectif** : elle forme une image intermédiaire (A_1B_1) **réelle, très agrandie et inversée**.
- la 2^e joue le rôle d'**oculaire** : à partir de $A'B'$ elle forme une image finale **virtuelle, à l'infini, et inversée** par rapport à l'objet.

Pour que l'image intermédiaire soit la plus grande possible, il faut rapprocher l'objet AB du foyer F_1' de l'objectif.

Il faut ensuite que l'image intermédiaire se forme dans le plan focal objet de l'oculaire, afin que l'image finale soit à l'infini.

On note Δ l'**intervalle optique** du microscope. C'est la distance séparant le foyer image F_1' de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire. Il est fixe, et généralement de 16 cm.

Les ordres de grandeur des distances focales sont :

- quelques millimètres pour l'objectif.
- quelques centimètres pour l'oculaire.

III.2. Grossissement du microscope

Quand l'objet est observé à l'œil nu au *punctum proximum*, il est vu sous un diamètre apparent :

$$\theta = \frac{AB}{d_m} \quad (d_m = 25 \text{ cm}) \quad (\text{voir FIG. 22 page 8})$$

À travers le microscope, l'image définitive est vue sous un diamètre apparent :

$$\theta' = \frac{A_1B_1}{f_2'} \quad (f_2' \text{ distance focale de l'oculaire, voir §. II.7.2 page 8})$$

2. en réalité, deux groupes de lentilles, chacun groupe étant symbolisé par une lentille unique.

Le **grossissement commercial** G_c du microscope est défini par le rapport entre ces angles :

$$G_c = |\gamma| \times G_{oc}$$

$$G_c = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{A_1 B_1 / f'_2}{AB / d_m} = \frac{A_1 B_1}{AB} \times \frac{d_m}{f'_2}$$

où $|\gamma| = \frac{A_1 B_1}{AB}$ est le **grandissement de l'objectif**, et $G_{oc} = \frac{d_m}{f'_2}$ le **grossissement de l'oculaire**.

Ces deux paramètres sont inscrits sur leur lentille correspondante.

Exemple.

Si l'objectif porte l'inscription « x40 » (grandissement) et l'oculaire l'inscription « x10 » (grossissement), alors le grossissement commercial du microscope est

$$G_c = |\gamma| \times G_{oc} = 40 \times 10 = 400$$

III.3. Objectif à immersion

L'objectif à immersion améliore la qualité de l'image obtenue, et ce pour plusieurs raisons.

L'immersion consiste à insérer quelques gouttes d'un liquide (souvent, une huile) entre la lamelle recouvrant l'échantillon et la première lentille de l'objectif.

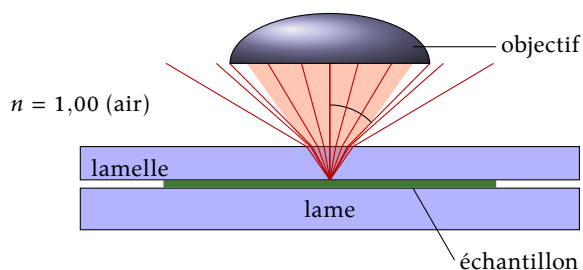


FIG. 25 – Un objectif « sec » (sans huile à immersion). Les rayons issus de la lamelle sont fortement réfractés.

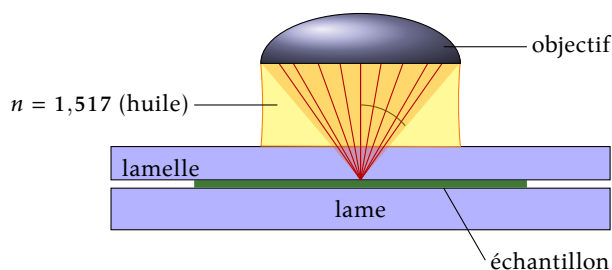


FIG. 26 – Un objectif à immersion. Les rayons issus de la lamelle ne sont quasiment pas réfractés.

Objectifs à immersion

La caractéristique essentielle des huiles d'immersion est qu'elles ont **un indice de réfraction presque identique à celui du verre**.

L'huile **réduit fortement la réfraction des rayons à la sortie de la lamelle**, augmentant ainsi la quantité de lumière captée par l'objectif.

Les objectifs à immersion sont utilisés dans des applications où un grossissement élevé et une haute résolution sont requis.

Ouverture numérique d'un objectif.

L'angle maximal que forment les rayons captés par l'objectif avec l'axe optique de l'objectif est appelé **angle d'ouverture** θ .

On définit alors l'**ouverture numérique**³ $O.N.$ de l'objectif par $O.N. = n \times \sin \theta$

où n est l'indice de réfraction du milieu séparant la lamelle de l'objectif.

Plus $O.N.$ est élevé, meilleures sont les performances de l'objectif.

Les objectifs secs ont une faible ouverture numérique. Puisque $n_{air} = 1,00$, on a $O.N. = 1,00$ au maximum. (Cependant, en raison de limitations pratiques, il n'est pas possible de fabriquer un objectif sec avec une ouverture numérique supérieure à 0,95.)

3. « NA » en anglais, pour *numerical aperture*.

À l'aide d'huiles à immersion, il est possible d'atteindre une ouverture numérique d'environ 1,4.

III.4. Pouvoir séparateur. Résolution.

Si deux points de l'échantillon sont trop proches l'un de l'autre, l'œil ne pourra pas les distinguer l'un de l'autre : ils seront vus comme un seul point.

Définition

On appelle **résolution** d'un microscope la plus petite distance séparant deux points de l'objet, pouvant être séparés par l'œil.

La principale limite à la résolution d'un microscope est causée par le **phénomène de diffraction**. Le passage de la lumière par l'ouverture circulaire de l'objectif produit une diffraction qui étale la lumière.

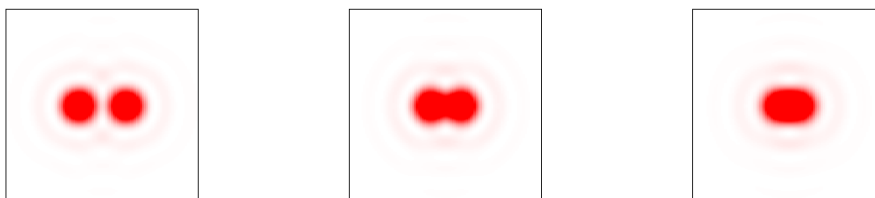


FIG. 27 – Taches de diffractions autour de deux points lumineux vus au microscope. Si la distance qui les sépare est trop faible, l'œil ne pourra pas les séparer (crédits J. Roussel).

On peut établir une expression de la limite de résolution d'un microscope : $d = \frac{0,61 \times \lambda}{O.N.}$ avec :

- λ : longueur d'onde de la lumière
- $O.N. = n \times \sin \theta$: ouverture numérique du microscope
- d : distance minimale entre 2 points distincts.

On voit donc que **plus O.N. est élevé, plus d diminue.**

Application numérique.

Calculer la résolution d'un microscope avec $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ dans les deux cas suivants :

- 1) O.N. = 0,90 (objectif sec) 2) O.N. = 1,4 (objectif à immersion).

[illegible]

En résumé, sur les objectifs à immersion

- L'huile à immersion possède un **indice de réfraction presque identique à celui du verre**.
- La **réfraction** des rayons à la sortie de la lamelle est **fortement diminuée**.
- Un objectif à immersion **collecte davantage de lumière**.
- l'ouverture numérique $O.N.$ de l'objectif est plus élevée, ce qui améliore aussi le **pouvoir de résolution**.

III.5. Indications portées sur un objectif



FIG. 28 – Exemples d'indications figurant sur l'objectif d'un microscope.

III.6. Intérêt du microscope électronique

On a vu au §.III.4 que le pouvoir de résolution du microscope dépend de la longueur d'onde.

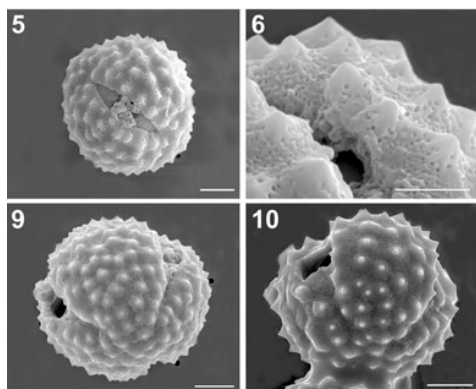
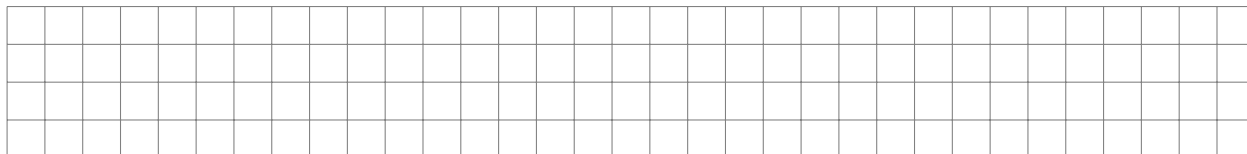
On peut envisager de **diminuer la longueur d'onde** pour réduire (améliorer) la distance minimale de séparation des détails. Cependant la longueur d'onde minimale de la lumière visible est limitée à $0,4 \mu\text{m}$.

Le **microscope électronique** permet de réduire fortement la longueur d'onde, en remplaçant la lumière par **un flux d'électrons**. Ces derniers traversent la matière à observer, avant d'être guidés par des lentilles magnétiques.

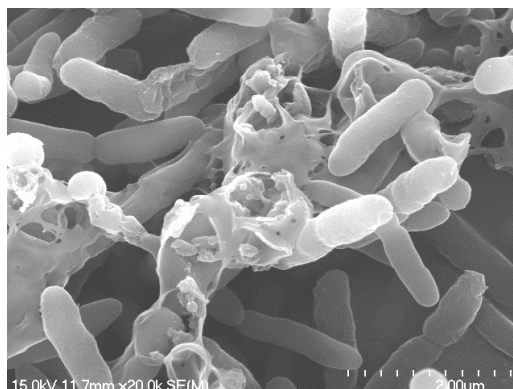
En physique quantique, en effet, les électrons peuvent se comporter comme des ondes, dont la longueur d'onde est bien plus faible que celle de la lumière; elle est donnée par la formule de Louis de Broglie : $\lambda = \frac{h}{m \times v}$ avec h : constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$) m : masse de l'électron ($9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) v : vitesse des électrons

Application numérique.

Pour des électrons de vitesse $2 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, calculer λ , puis la limite de résolution, avec $O.N. = 0,010$.



(a) Grains de pollen.



(b) Bacilles.

FIG. 29 – Clichés obtenus par microscopie électronique.