Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
Faculté de Physique




# مدخل الى البصريات الهندسية

# Introduction à l'optique géométrique

Messaoud Benguerba

Cours destiné aux étudiants de $1^{ere}$ année.
( Sciences de la Nature et de la Vie, Alger 2022)

# Table des matières


- Généralités أساسيات ..... 4
- Système optique
  النظام البصري ..... 6
- Réflexion de la lumière انعكاس الضوء ..... 8
- Réfraction de la lumière انكسار الضوء ..... 15
- Dioptre plan الكاسر المستوي ..... 22
- Prisme المنشور ..... 29
- Lentilles minces العدسات الرقيقة ..... 40
- L'œil العين ..... 69
- Loupe العدسة المكبرة ..... 88
- Microscope optique المجهر البصري ..... 100

# Présentation

• En biologie,les étudiants visualisent souvent des micro-organismes animaux et végétaux sur des images obtenues avec un instrument d'optique constitué de lentilles. L'objet(tissu biologique,cellule,..etc) à étudier est éclairé par une lumière visible. Les rayons lumineux réfléchis par l'objet sont envoyés sur une lentille convergente où ils subissent la réfraction en formant une image à la sortie de la lentille.

• Dans un microscope composé de lentilles, l'image est agrandie de 10 à 1000 fois la taille de l'objet examiné, ce qui permet d'observer des micro-organismes de dimensions $\geq 0.2\,\mu m\,(2\,10^{-4}\,mm)$.

• L'optique geométrique explique la formation des images à travers un système optique.Elle permet de comprendre et de corriger des défauts visuels de l'œil et d'identifier des mico-organismes biologiques.

Cette introduction à l'optique geométrique, est un cours avec exemples illustratifs, destiné aux étudiants de $1^{ere}$ année des sciences de la nature et de la vie (SNV), Alger 2022.



# Généralités اساسيات (عموميات)

## Généralités اساسيات

* L'optique étudie des phénomènes qui se produisent lorsque la lumière visible rencontre un milieu transparent(eau, verre,..etc).
* La lumière qui nous permet de voir des objets,est une forme d'énergie électromagnétique طاقة كهرومغنطيسية.

* Elle est émise par une source lumineuse منبع ضوئي qui produit la lumière(soleil,lampe..),ou par un objet éclairé qui réfléchit la lumière (lune,miroir,..).




* Dans un milieu transparent شفاف homogène متجانس la lumière se propage en ligne droite ينتشر الضوء في خط مستقيم.

* La lumière est décrite en termes de rayons lumineux اشعة ضوئية représentés par des flèches qui indiquent la direction de propagation de la lumière.



- Dans le vide( l'air), la lumière se propage à la vitesse $c = 3\,10^8$ m/s et elle devient v inférieure à c dans un autre milieux transparent, $v < c \mapsto c = n\,v$ où n est une constante positive qui dépend du milieu, on l'appelle indice de réfraction $\mapsto \boxed{n = \frac{c}{v} > 1}$.

| Milieux | Air | Eau | Verre | Diamant |
|---|---|---|---|---|
| indice n | 1 | 1.33 | 1.50 | 2.42 |

- Par exemple la vitesse de la lumière dans l'eau est,
  $\mapsto v = \frac{c}{n} = \frac{3\,10^8}{1.33} = 2.256\,10^8\ m/s$

## Principe du retour inverse: مبدأ الرجوع العكسي للضوء

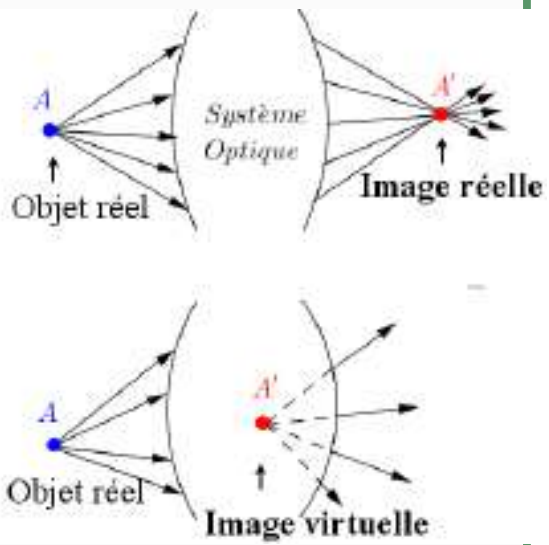
Si on inverse la direction d'un rayon lumineux allant d'un point A vers un point B, il suivra le même chemin dans le sens inverse de B vers A.



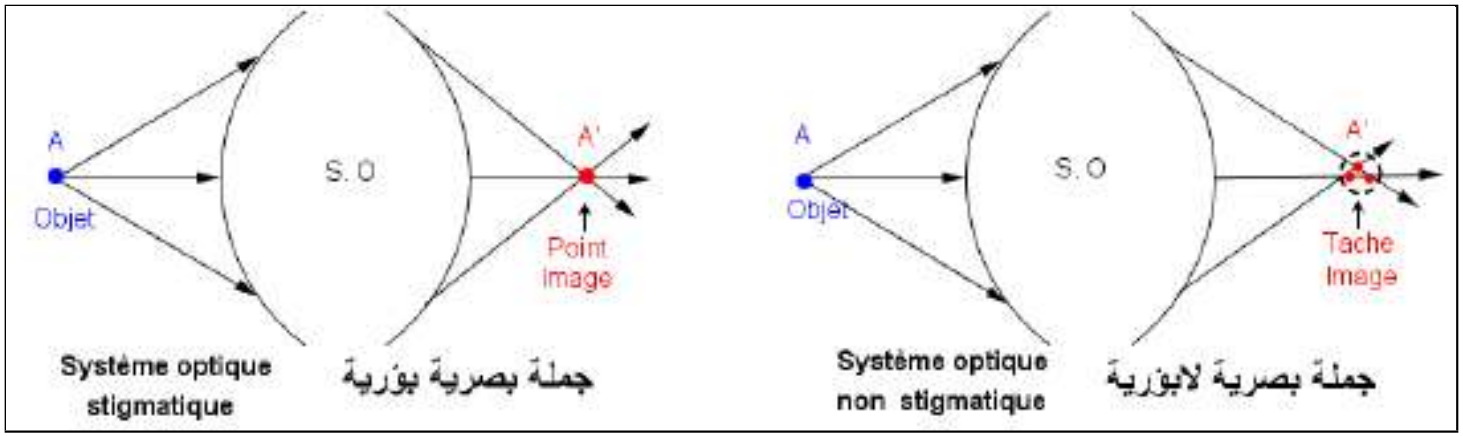
# Système optique نظام بصري

- Un système optique نظام بصري est formé d'un seul élément optique(un miroir,prisme,loupe...) ou d'un ensemble d'éléments optiques(microscope, téléscope, ...etc).
- Un systeme optique donne d'un objet A une image A'.

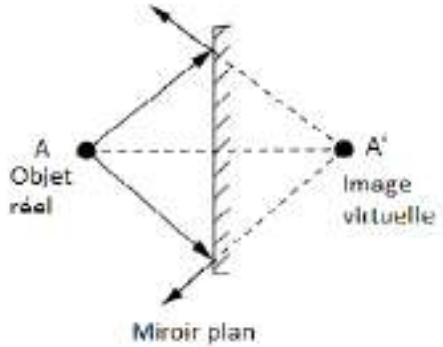
- L'objet et l'image peuvent être de nature réelle ou virtuelle.
- L'image réelle صورةحقيقية se forme après le système↦on peut la projeter sur un écran.
- L'image virtuelle صورة تقديريةse forme dans le système ↦ par exemple,l'image produite dans un microscope est virtuelle.



- Lorsqu'un système optique donne d'un point objet A, un seul point image A', il est dit stigmatique نظام نقطي (بؤري) . Ceci signifie que, les rayons lumineux qui partent de A et tombent sur le système, emergent du système en passant par le même point A'.
- Par contre, si l'image d'un point objet A, à travers un système optique est une petite tache(plusieurs images A'), le système n'est pas stigmatique نظام لانقطي .




Le miroir plan المرآة المستوية est un système optique stigmatique نظام بصري نقطي, car il donne d'un point objet A, un seul point image A'.



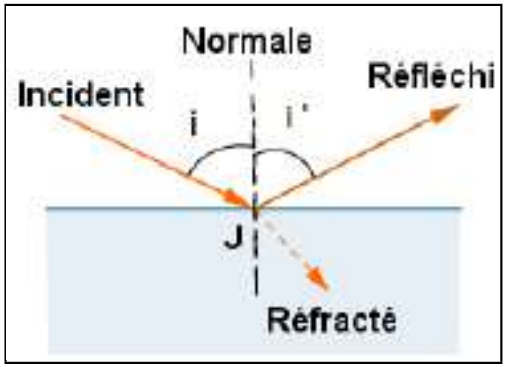
# انعكاس الضوء
# Réflexion de la lumière



L'image de la montagne qui apparait sur la photo est formée par réflexion de la lumière sur la surface de l'eau

# Réflexion de la lumière انعكاس الضوء

Lorsqu'un rayon lumineux tombe sur une surface séparant deux milieux transparents, un rayon réfléchi et un rayon réfracté(transmis)apparaissent.



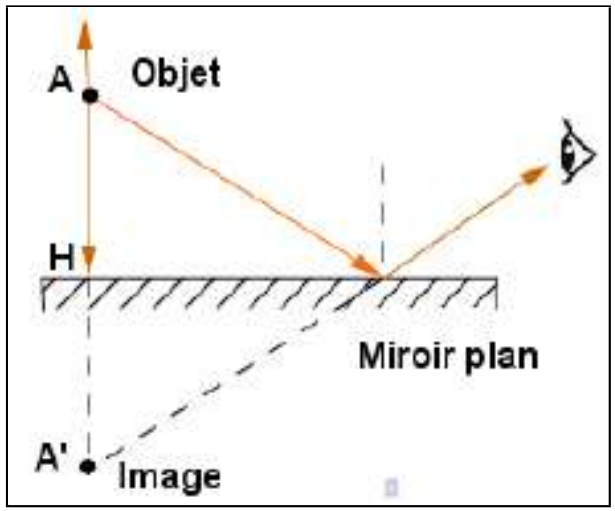

- La normale est une droite perpendiculaire à la surface au point J.
- Le rayon incident fait un angle d'incidence $\mapsto$ i avec la normale.
- Le rayon réfléchi fait un angle de réflexion $\mapsto$ i' avec la normale.

## Lois de Snell-Descartes

1. La normale à la surface,le rayon incident et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence.
2. L'angle d'incidence=l'angle de réflexion $\mapsto$ $\boxed{i = i'}$.

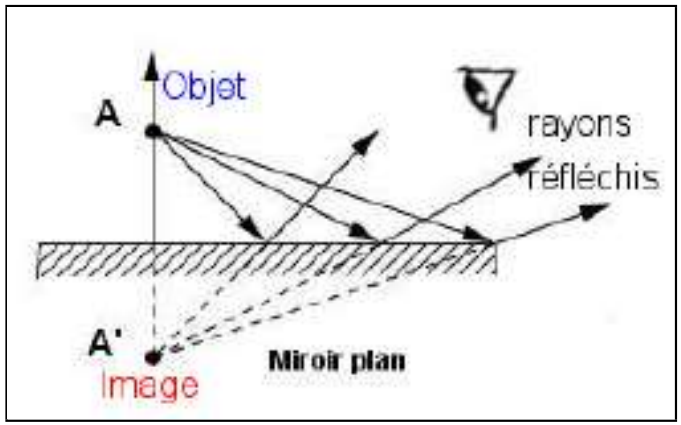
# Miroir plan مرآة مستوية

- Un miroir plan est une surface polie et réfléchissante qui donne d'un objet réel A une image virtuelle A'(unique).
- Pour un point objet A, le miroir donne un seul point image A'.
- L'image A' est symétrique متناظرة de l'objet A par rapport au miroir: $\overline{HA} = -\overline{HA'}$




Le miroir plan est stigmatique نظام نقطي.

Pour l'œil les rayons lumineux issus de A, semblent provenir du même point image A' après réflexion sur le miroir.



## Réflexion de la lumière dans la nature

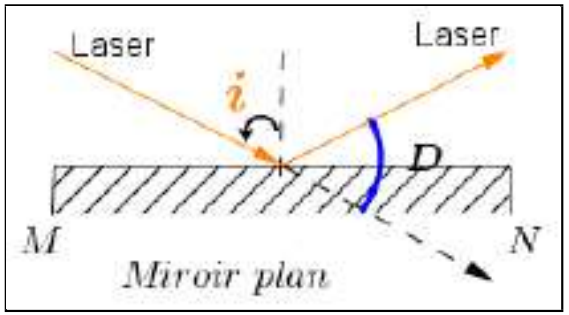
Une surface d'eau calme réfléchit la lumière comme un miroir plan en formant une image de l'espace naturel qui l'entoure.



يعكس سطح الماء الهادي الضوء
مثل المراة المستوية مكونا صورة
للفضاء الطبيعي المحيط به

# Exemple 1

I) Sur la figure ci-contre, un rayon laser se réfléchit sur un miroir plan MN en subissant une déviation D.

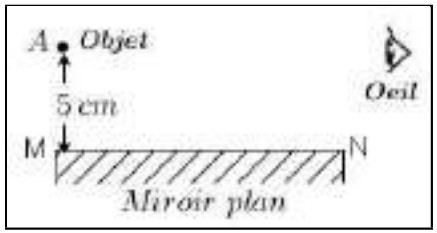



1. Exprimer D en fonction de l'angle i.
2. Pour quelle incidence i on a D= 90° ?
3. A quelle incidence correspond D = i ?

1/ Réfléxion $\mapsto$ angle d'incidence = angle de réflexion
D'après le schéma on a : $2 \times i + D = 180° \mapsto \boxed{D = 180 - 2 \times i}$ .
2/ $D = 90° \mapsto i = \frac{180-D}{2} = 45°$.
3/ La déviation D=i se produit pour $i = 180 - 2 \times i \mapsto \boxed{i = 60°}$.

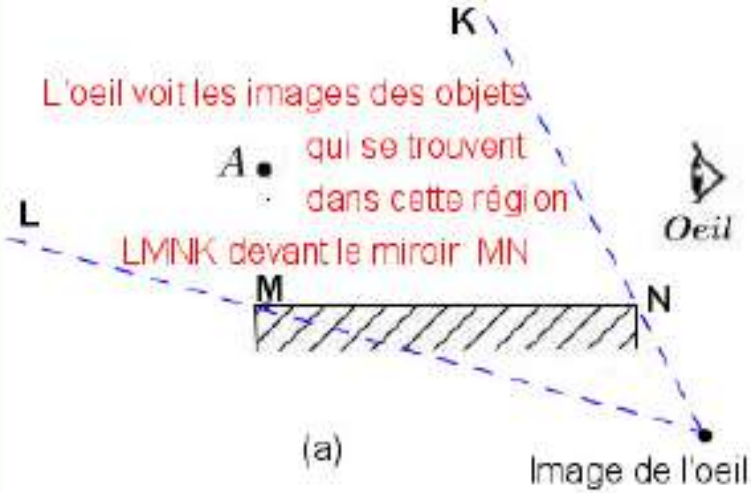
# Exemple 2

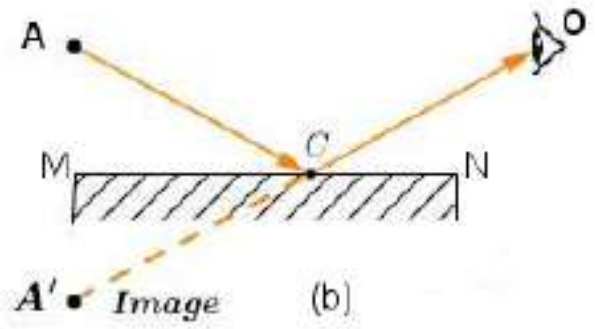
La figure ci-contre représente l'œil d'un observateur et un objet A placé à 5 cm d'un miroir plan MN.




- Indiquer sur le schéma la région de l'espace vue par l'œil dans le miroir.
- L'œil voit-il l'image A' de A ? Expliquer sur un schéma.

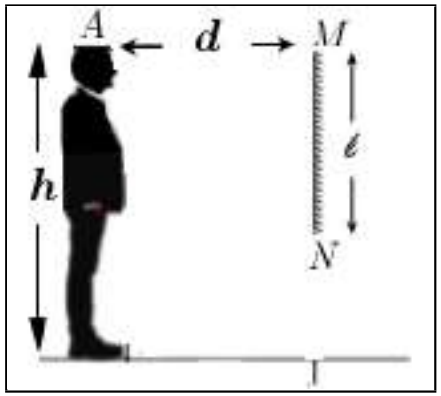
- L'image A' de A s'obtient par symétrie $\overline{MA} = -\overline{MA'} = 5\,cm$.
- Oui car l'objet A est dans le champ de vision de œil, fig.(a).
- La lumière part de A, se réfléchit sur le miroir en C et arrive sur l'œil. Pour l'œil la lumière semble venir de A' suivant la droite A'CO.



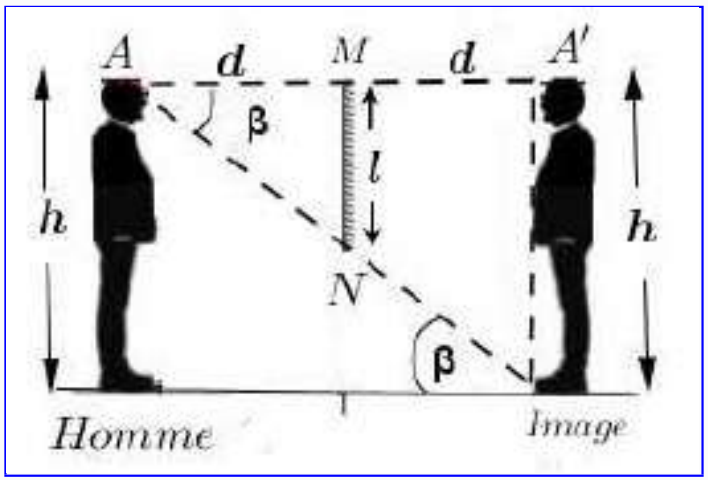
# Exemple 3

Dans la figure ci-contre, un homme,de taille h=1.8 m est debout devant un miroir plan vertical MN de longueur $\ell$ à une distance d. Quelle doit être la valeur minimale de la longueur $\ell$ du miroir pour que cet homme puisse se voir entièrement dans le miroir ?




## Solution

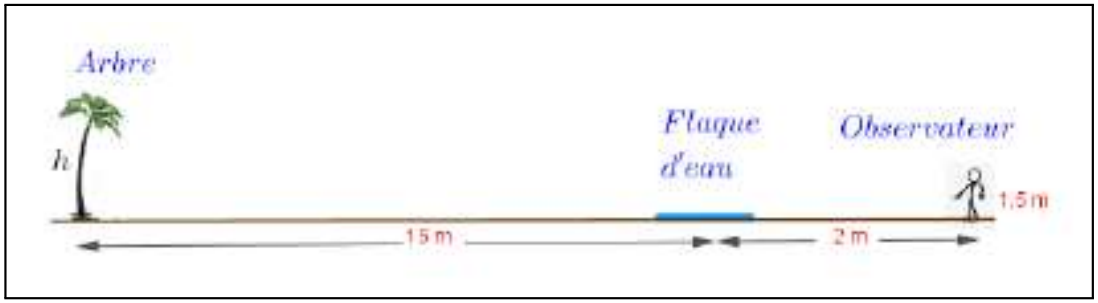
L'image A' de A s'obtient par symétrie $\overline{MA} = -\overline{MA'} = d$.
D'après le triangle en pointillé :
$tg(\beta) = \frac{h}{2\,d} = \frac{\ell}{d}$
$\mapsto$ Longueur du miroir
$\ell = \frac{h}{2} = \frac{180}{2} = 90$ cm.



# Exemple 4( série d'exercices SNV, exercice5)

Sur un sol horizontal,à 15m du pied d'un arbre, se trouve une petite aque d'eau. Un observateur, dont les yeux sont à 1.5 m du sol, doit se placer à 2 m, de cette faque d'eau, pour voir le sommet de l'arbre par réflexion.

Déterminer la hauteur de l'arbre.

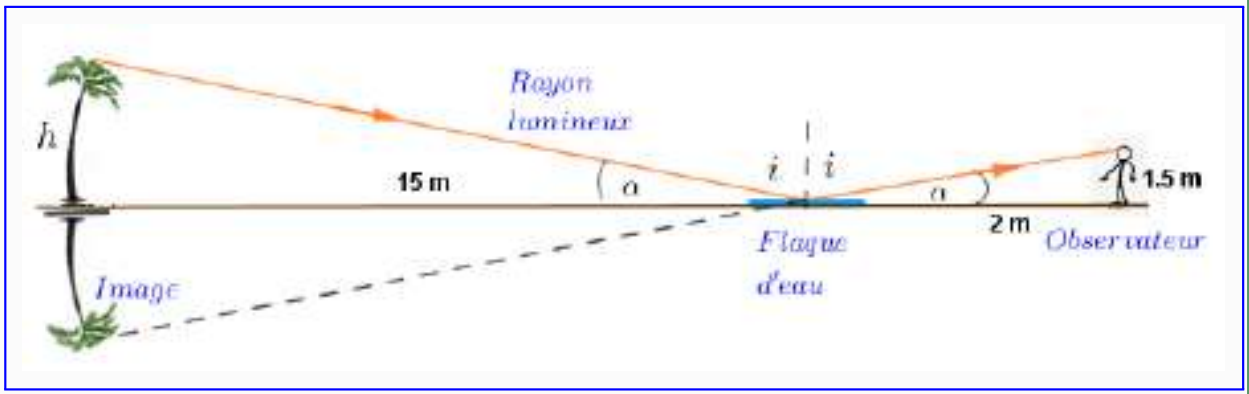



La flaque d'eau agit comme un miroir plan qui donne de l'arbre une image par réflexion.Un rayon lumineux issu du sommet se réfléchit sur la surface d'eau et arrive à lœil de l'observateur.

D'après la figure :

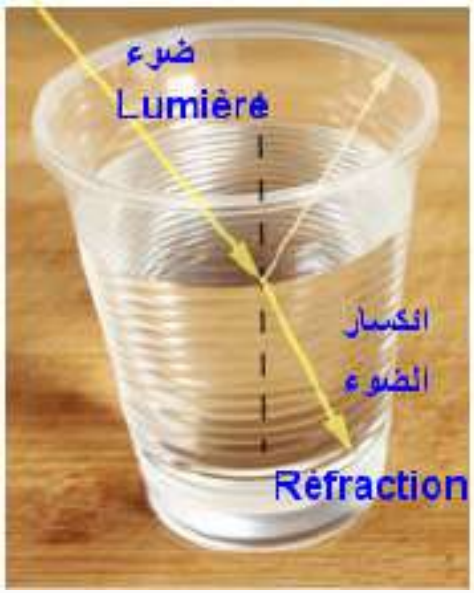
$tg(\alpha) = \frac{h}{15} = \frac{1.5}{2}$

h= 11.25 m



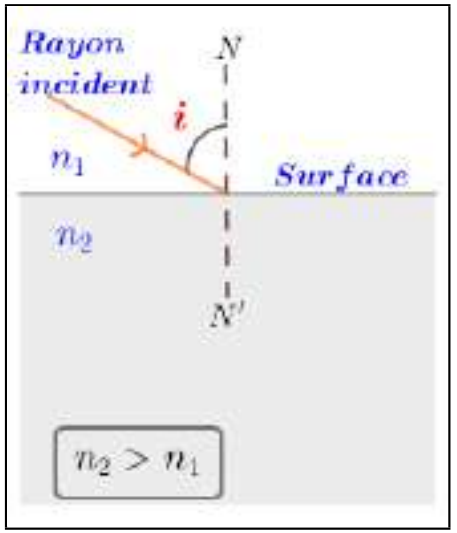
# انكسار الضوء

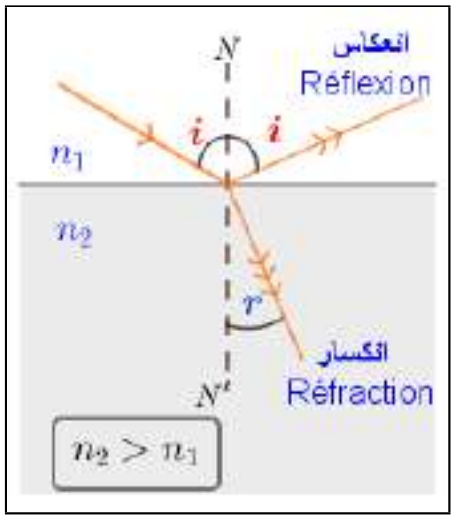
## Réfraction de la lumière



# Réfraction de la lumière انكسار الضوء

Lorsque des rayons lumineux tombent sur une surface séparant deux milieux transparents d'indices différents($n_1 < n_2$),sous un angle d'incidence i par rapport à la normale N'N, il se produit:



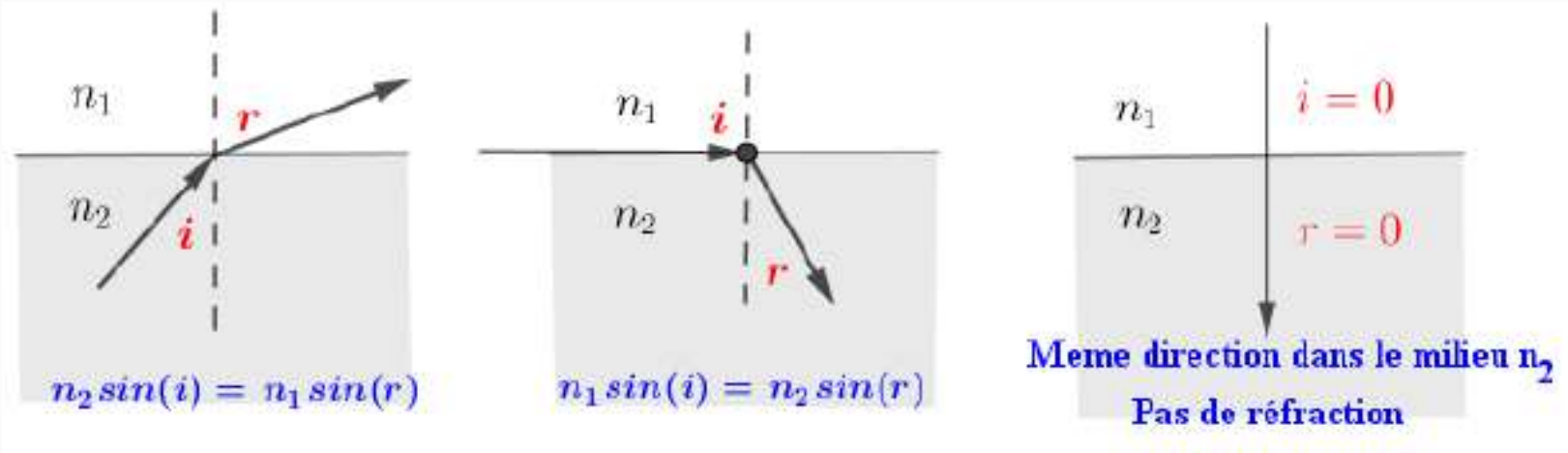

- Une réflexion انعكاس avec le même angle i dans le milieu $n_1$ .
- Une réfraction انكسار dans le milieu $n_2$ avec un angle r.

## Lois de Snell-Descartes

1. La normale à la surface et les rayons, incident et réfracté sont dans le plan d'incidence.
2. La relation entre les indices $n_1$,$n_2$ et les angles i,r est:

$$n_1\, sin(i) = n_2\, sin(r)$$

Ecrire la loi de la réfraction pour chaque cas de figure

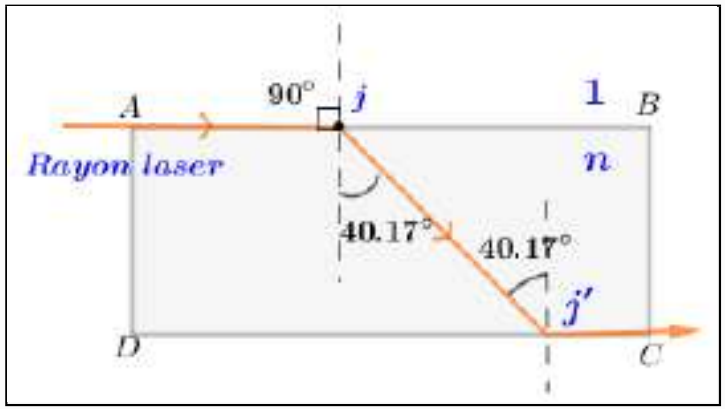


# Exemple 1

Un rayon laser tombe sur un bloc de polystyrene ABCD d'indice n inconnu,en rasant la face AB du bloc. Le rayon laser se réfracte dans le polystyrene avec un angle de 40.17°.

1. Tracer la marche du rayon laser dans le polystyrene.
2. Calculer l'indice de réfraction du polystyrene.

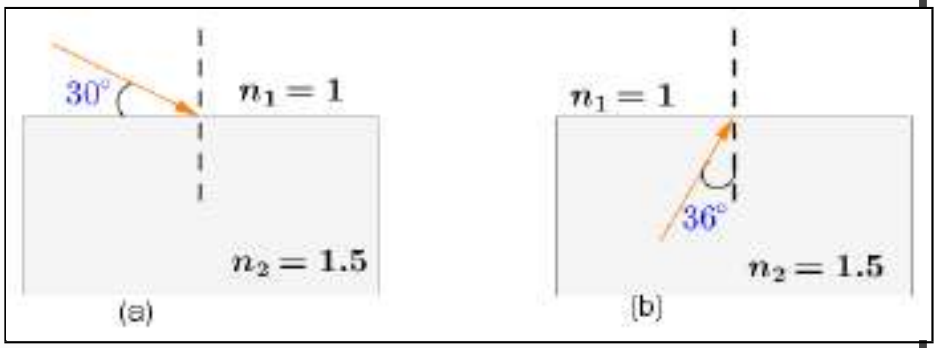
1. Après réfraction en j, le laser arrive sur la face intérieure CD en j' sous l'incidence i'=40.17° et se réfracte dans l'air en rasant la face CD.
2. D'après le schéma ci-contre on a $i = 90°$. et r= 40.17° on a:
   $n' \sin(i) = n \sin(r)$
   $n = \frac{\sin(90)}{\sin(40.17)} = 1.55$



# Exemple 2

Dans les figures (a) et (b) ci-dessous, un rayon lumineux tombe sur une surface séparant deux milieux d'indice $n_1$ et $n_2$.

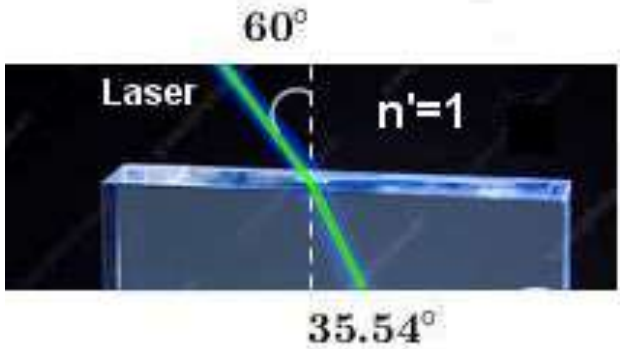
-Écrire la lois de Snell-Descartes dans chaque cas de figure.
-Déterminer l'angle de réfraction du rayon lumineux.




1. Figure(a):L'angle d'incidence est mesuré par rapport à la normale $i = 60°$
   $1. \times sin(60) = 1.5 \times sin(r) \rightsquigarrow \quad r = 35.3°$.
2. Figure(b): angle d'incidence $i = 36°$
   $1.5 \times sin(36) = 1. \times sin(r). \rightsquigarrow \quad r = 61.8°$

# Exemple 3

Un rayon laser se propageant dans l'air d'indice n'=1, à la vitesse $c = 3.10^8\ m/s$ tombe sur un block acrylique sous une incidence de 60°. Le rayon se réfracte dans le block avec un angle de 35.54°

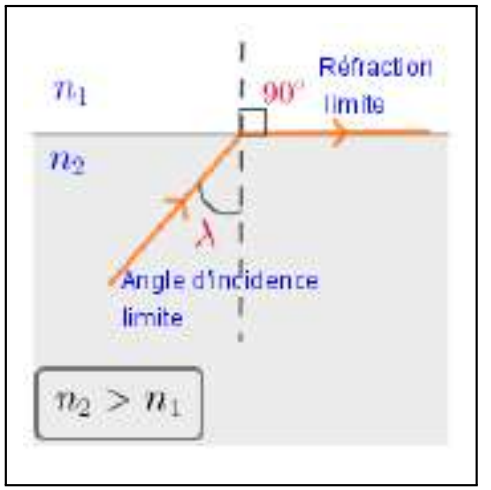



1. Calculer l'indice n du block acrylique.
2. Quelle est la vitesse du laser dans l'acrylique?

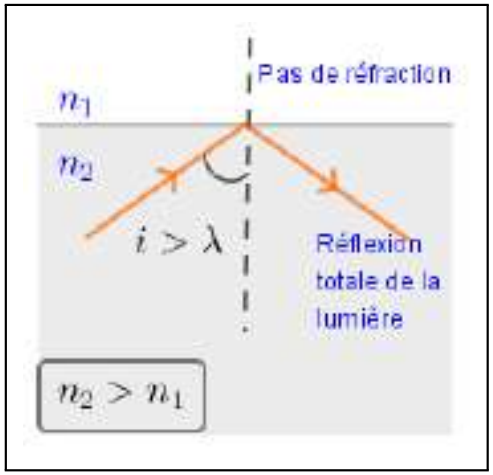
1. $1.sin(60) = n\ sin(35.54) \mapsto$ indice de l'acrylique n=1.49.
2. $v_{laser} = c/n = c = 3.10^8/1.49 = 2\,10^8\ m/s$

# Réfraction limite - Réflexion totale

Lorsque la lumière passe d'un milieu d'indice $n_2$ vers un milieu d'indice $n_1$ plus petit(milieu moins réfringent)($n_1 < n_2$)(par exmple de $1.33 \mapsto 1.$ ):




- La réfraction limite انكسارحدي se produit lorsque l'angle de réfraction dans le milieu $n_1$ est égale à $90^\circ$ , ce qui correspond à un angle d'incidence limite $i = \lambda$.
$\Rightarrow n_2\, sin(\lambda) = n_1\, sin(90) \rightsquigarrow \boxed{sin(\lambda) = n_1/n_2}$




- Lorsque $i > \lambda \mapsto sin(r) > 1$, mais pour avoir une réfraction $sin(r) \leq 1$, donc la lumière ne se réfracte pas dans le milieu $n_1$, elle subit une réflexion totale انعكاس كلي dans le milieu $n2$.

# Exemple 4

Une source laser se trouve au fond d'une cuve remplie d'eau d'indice n= 1.33 et palcée dans l'air d'indice n'=1.

1. Pour quelle incidence i le laser émerge dans l'air avec l'angle 45° ?
2. Pour quelle incidence i le laser émerge en rasant la surface de l'eau ?
3. Que se passe-t-il si le laser atteint la surface sous l'angle i= 60°?

1. $1.33\, sin(i) = 1.\, sin(45) \mapsto \quad i \simeq 32°$.
2. Le laser émerge en rasant la surface: $r = 90°$ correspondant à l'incidence $i = \lambda \quad \mapsto \quad 1.33\, sin(\lambda) = sin(90)$ , $\boxed{\lambda \simeq 48.75°}$.
3. $1.33\, sin(60) = sin(r) \mapsto sin(r) = 1.15 > 1.$ il n'y a pas de réfraction dans l'air, le laser subit la réflexion totale dans l'eau.

## Phénomène du mirage ظاهرة السراب

La lumière se propage en ligne droite dans l'air d'indice de réfraction n=1. Lorsque la température de l'air varie l'indice n varie aussi. La lumière subit des réfractions successives (car n change)en suivant une trajectoire curviligneمسار منحني ce qui conduit à l'apparition du mirage.

Dans le desert où le sol est chaud, le mirage apparait et crée l'illusion de la présence d'eau et des images d'arbres, comme le montre la figure ci-contre.



# الكاسر المستوي

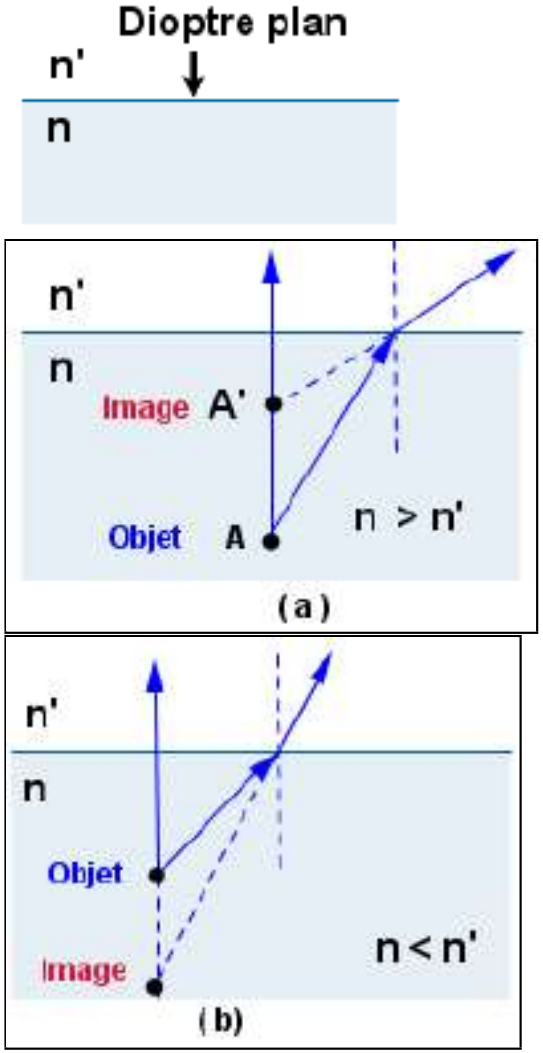
# Dioptre plan

# Image formée à travers un dioptre Plan

- Le dioptre plan c'est une surface qui sépare 2 milieux transparents d'indices différents $n \neq n'$.

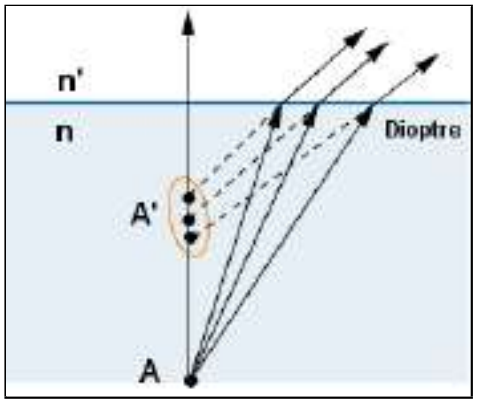
- Le dioptre plan donne d'un objet réel A une image A' virtuelle.

- L'objet A et son image A' sont du même côté, donc de nature différente:
  - Objet A réel $\mapsto$ image A' virtuelle.
  - Objet A virtuel $\mapsto$ image A'réelle.

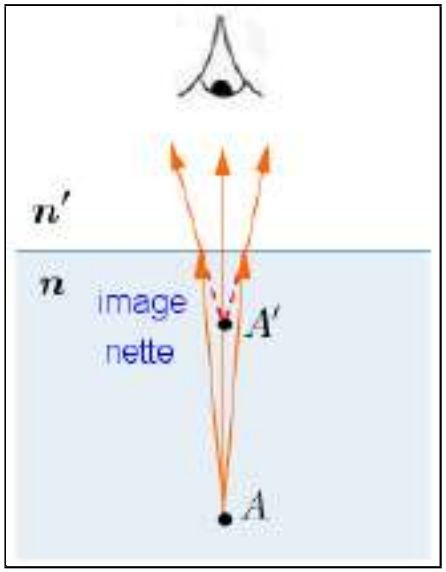


# Dioptre Plan - Stigmatisme

- Pour un point objet A, le dioptre plan donne plusieurs points images A', l'image finale est donc floueصورة ضبابية ↦ Pas de stigmatismeنظام لانقطي.

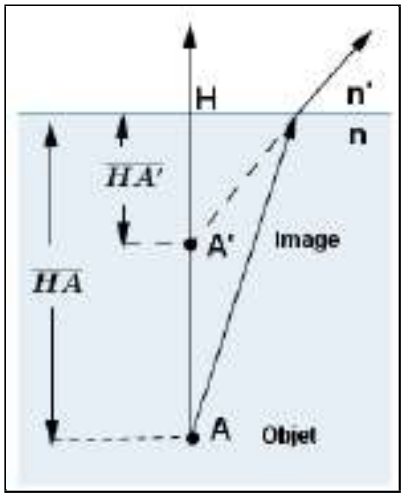



- Un stigmatisme approché(نقطية تقريبية) peut être observé en regardant verticalement l'image.



# Formule du dioptre plan علاقة الكاسرالمستوي

On regarde verticalement l'image A' donnée par le dioptre plan( conditions du stigmatisme approché).




1. Les positions algebriques de l'image $\overline{HA'}$ et de l'objet $\overline{HA}$ sont reliées aux indices n', n, dans les conditions du stigmatisme approché par:

$$\boxed{\frac{\overline{HA'}}{n'} = \frac{\overline{HA}}{n}}$$

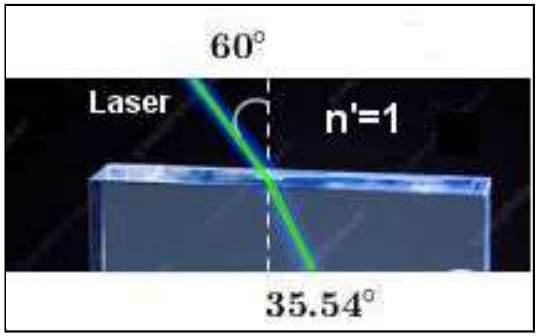
2. Un point objet à la surface du dioptre est lui-même son image

$$\overline{HA'} = 0 \mapsto \overline{HA} = 0$$

3. Objet A à l'infini $\rightarrow$ image A' à l'infini ( stigmatisme rigoureux (نقطية مثالية).

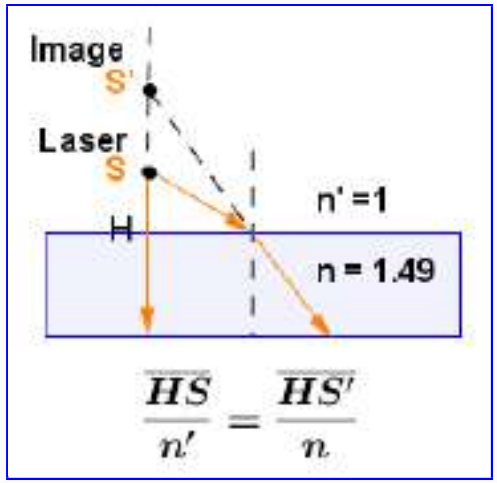
# Exemple 1

Sur la figure ci-contre une source laser S est placée dans l'air d'indice n'=1, à 20 cm à la verticale d'un block acrylique d'indice 1.49.



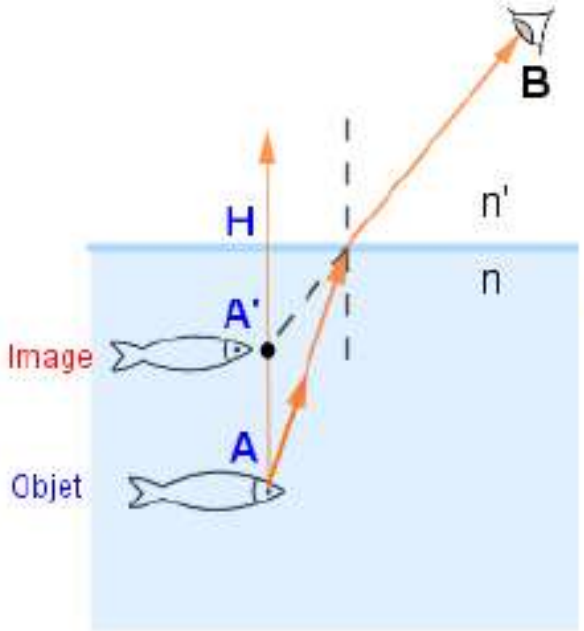

1. Indiquer sur un schéma l'image S' de la source S donnée par le dioptre air-acrylique en précisant sa nature.
2. Déterminer la position algébrique $\overline{HS'}$, de l'image S' par rapport au dioptre air-block.

1. Le dioptre donne de l'objet réel S une image S' virtuelle(du même coté que S).
2. S dans n'=1 $\mapsto$ l'image S' dans n =1.49.
$\frac{\overline{HS'}}{n} = \frac{\overline{HS}}{n'} \rightsquigarrow \frac{\overline{HS'}}{1.49} = \frac{20}{1} \mapsto \overline{HS'} = 29.8$ cm.



# Exemple 2

Dans l'air d'indice n'=1, un pêcheur dont l'œil B est à 1.5 m au-dessus d'une surface d'eau d'indice n=1.33, regarde un poisson A qui se trouve à une profondeur de 80 cm de la surface de l'eau.
A quelle profondeur $\overline{HA'}$ le pêcheur voit-il le poisson A ?




Solution

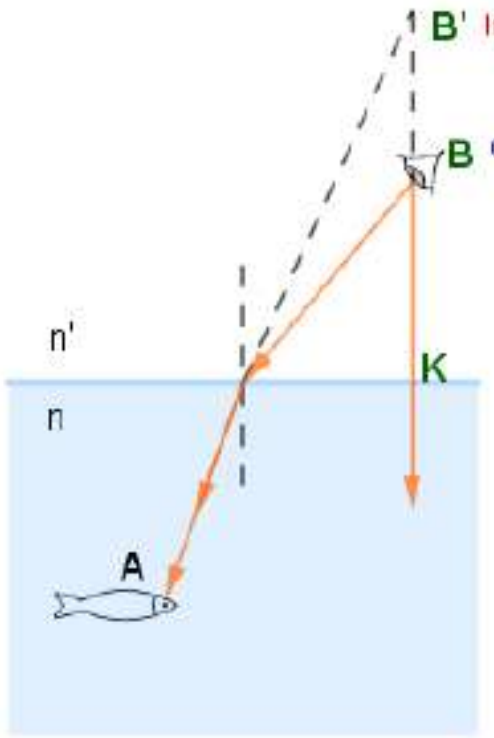
Poisson dans n→ image poisson dans n'

$$\frac{\overline{HA}}{n} = \frac{\overline{HA'}}{n'}$$

$$\overline{HA'} = n' \times \frac{\overline{HA}}{n} = 1 \times \frac{\overline{80}}{1.33} = 60\,cm$$

# Exemple 3

Dans l'air d'indice n'=1, un pêcheur dont l'œil B est à 1.5 m au-dessus d'une surface d'eau d'indice n=1.33, regarde un poisson A qui se trouve à une profondeur de 80 cm de la surface de l'eau.
A quelle position $\overline{KB'}$,le poisson voit-il le pêcheur ?




Solution

Pecheur dans n' ⇒ image pecheur dans n

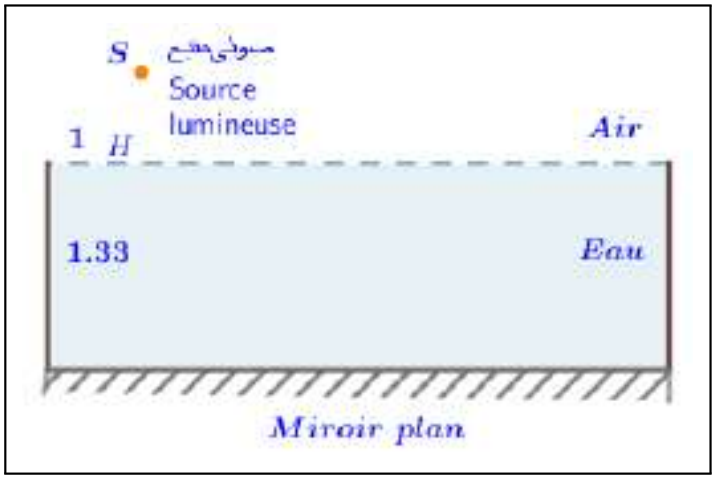
$$\frac{\overline{KB}}{n'} = \frac{\overline{KB'}}{n}$$

$$\overline{KB'} = n \times \frac{\overline{KB}}{n'} = 1.33 \times \frac{\overline{1.5}}{1} = 2\,m$$

# Exemple 4 (série d'exercices,SNV, exercice 11 )

Une cuve, dont le fond horizontal est un miroir plan, contient de l'eau sur une épaisseur de 12 cm. À 9 cm au-dessus de la surface libre, on place une source ponctuelle S de lumière.

1. Dessiner, en précisant leurs natures, les images successives de S données par le système optique décrit ci-dessus.
2. Calculer leurs positions.

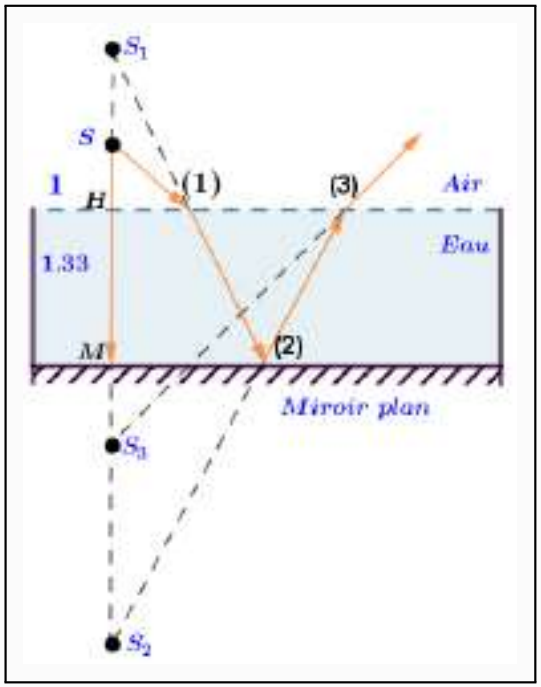


- Le trajet de la lumière à travers le système montre qu'il y a 3 images virtuelles: $S_1$, $S_2$ et $S_3$.
- L'image $S_1$ est formée à la position $\overline{HS_1}$ par réfraction en (1)par le dioptre air-eau$(1 \mapsto 1.33)$

$$\frac{\overline{HS}}{1} = \frac{\overline{HS_1}}{1.33} \longmapsto \overline{HS_1} = \overline{HS} \times 1.33 = 12cm.$$

- L'image $S_1$ devient un objet situé à la distance $|MS_1|$ par rapport au miroir plan(M) qui donne de $S_1$ une image $S_2$ par réflexion en (2) formée à une position symétrique $\overline{MS_2}$ par rapport à M.

$$\overline{MS_2} = |MS_1| = |\overline{MH} + \overline{HS_1}| = 12 + 12 = 24cm.$$




- L'image $S_2$ devient un objet à la position $\overline{HS_2}$ par rapport au dioptre eau-air$(1.33 \mapsto 1)$qui donne de $S_2$ une image $S_3$ par réfraction en(3) à la position $\overline{HS_3}$ avec $HS_2 = HM + MS_2 = 12 + 24 = 36cm$.

$$\frac{\overline{HS_2}}{1.33} = \frac{\overline{HS_3}}{1} \mapsto \overline{HS_3} = \frac{\overline{HS_2}}{1.33} = \frac{36}{1.33} = 27cm.$$

# Prisme المنشور

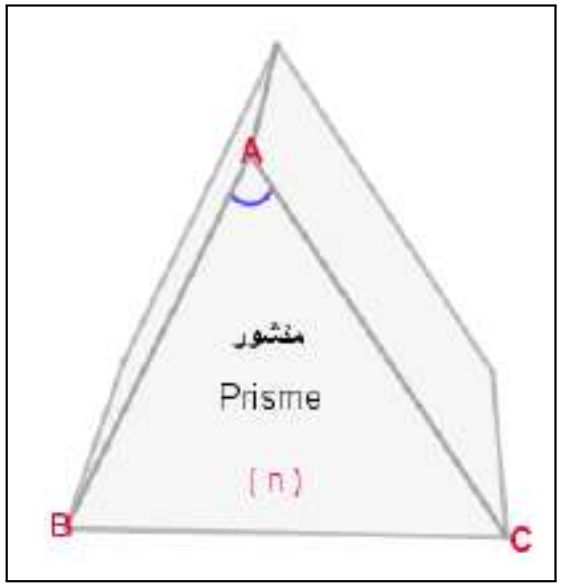
# Prisme – Plan du cours

- Effet du prisme sur la lumière
- Relations fondamentales.
- Conditions d'emergence
- Minimum de déviation



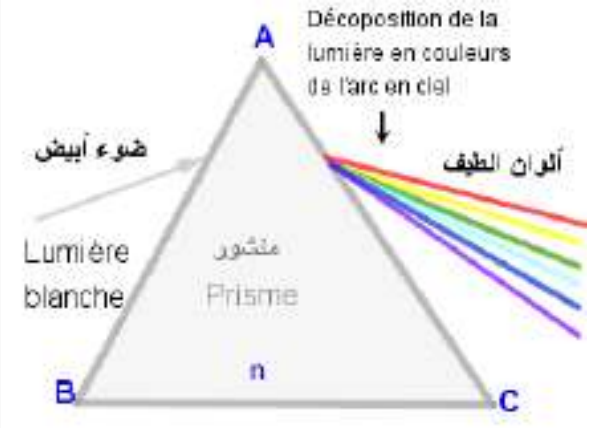
# Effet du prisme sur la lumière

- Un prisme ABC est un milieu transparent d'indice n, formé d'une base BC et de deux dioptres plans AB et AC faisant entre eux un angle A.
- Le prisme est représenté par le triangle ABC.



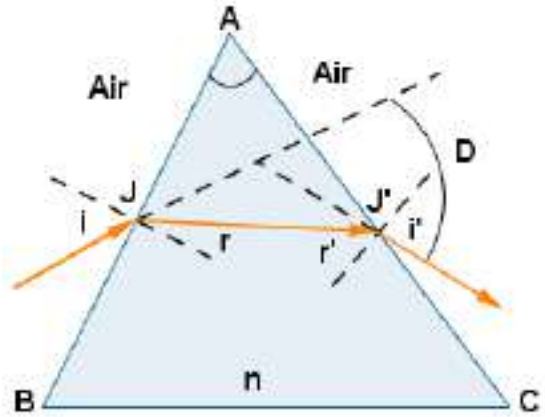

Lorsque la lumière blanche traverse un prisme, on observe:

1. Une décomposition de la lumière تشتت الضوء en 7 couleurs (arc en ciel قوس قزح).
2. Une déviation انحراف vers la base à cause de la réfraction.



# Marche d'un rayon lumineux dans le prisme

Considérons un rayon lumineux qui tombe sous un angle i sur la face AB d'un prisme ABC d'indice n, placé dans l'air d'indice n'=1.



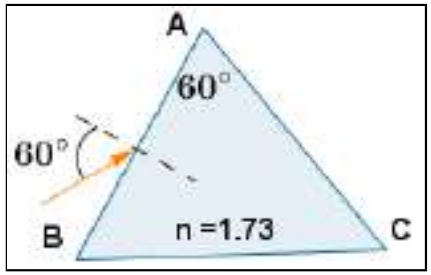

## Relations fondamentales علاقات اساسية

1. Réfraction du rayon à travers le dioptre plan AB $\rightsquigarrow sin(i) = n\,sin(r)$
2. Le rayon tombe sur le dioptre AC sous une incidence r': $\rightsquigarrow r + r' = A$
3. Le rayon émerge par la face AC avec un angle i': $\rightsquigarrow sin(i') = n\,sin(r')$
4. Déviation totale subie par le rayon à la sortie par AC $\rightsquigarrow D = i + i' - A$
5. Angle limite de réfraction $i = \lambda$ du prisme dans l'air $\rightsquigarrow \boxed{sin(\lambda) = 1/n}$

# Exemple 1

Un rayon lumineux tombe sur la face AB d'un prisme d'angle $A = 60°$ et d'indice n=1.73, sous une incidene i= 60°.Déterminer:

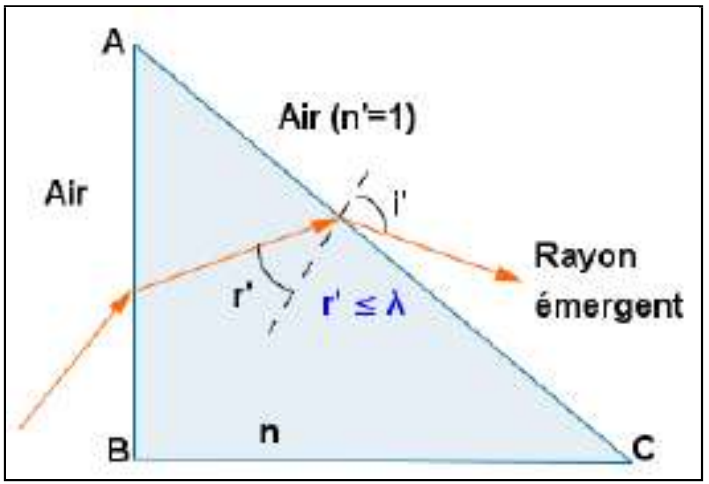
1. l'angle r (réfraction/ AB).
2. L'angle r'(incidence/ AC).
3. L'angle d'émergence i'.
4. La déviation totale D.




1. $sin(r) = \frac{sin(60)}{1.73} \mapsto r = 30°$.
2. $r' = A - r = 30°$.
3. $sin(i') = 1.73 \times sin(30) \mapsto i' = 59.88°$
4. $D = i + i' - A = 60 + 59.88 - 60 = 59.88°$.

# Conditions d'émergence sur l'angle A du prisme

- Consirérons un rayon lumineux qui passe de l'air d'indice n'=1 dans un prisme ABC d'indice n ($n > n'$).
- L'angle limite du prisme est $sin(\lambda) = n'/n$.
- Le rayon émerge par la face AC si $r' \leq \lambda$.
- Si la lumière rentre par la face AC, elle émerge par la face AB si $r \leq \lambda$



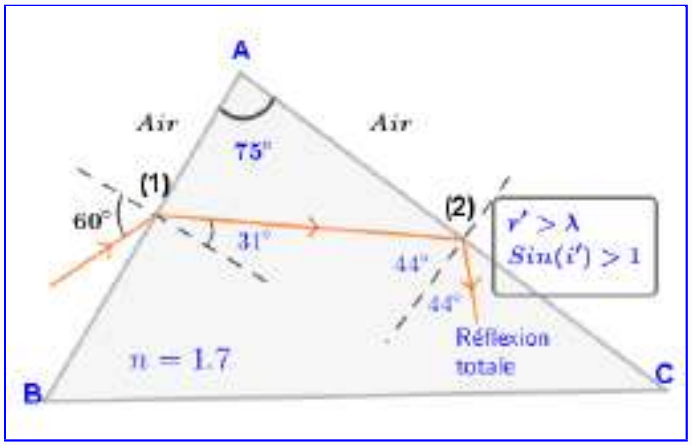

La lumière émerge(تخرج) du prisme si: $\boxed{A \leq 2\lambda}$

# Exemple 2

Un rayon laser tombe sous une incidence de 60° sur la face AB d'un prisme d'angle 75° et d'indice n= 1.7 placé dans l'air( n'=1).Le laser peut-il émerger du prisme par la face AC?

On calcule l'angle de réfraction limite: $sin(\lambda) = \frac{1}{1.7} \mapsto \lambda = 36°$.
Puisque $A = 75° > 2 \times \lambda \mapsto$ pas d'émergence par la face AC.

Pour vérifier on calcule l'angle r'.
Si $r' > \lambda$ pas de réfraction par AC.
En(1) $sin(60) = 1.7 \times sin(r)$ $r \simeq 31°$ et
$r' = A - r = 44° > \lambda$ pas de réfraction.



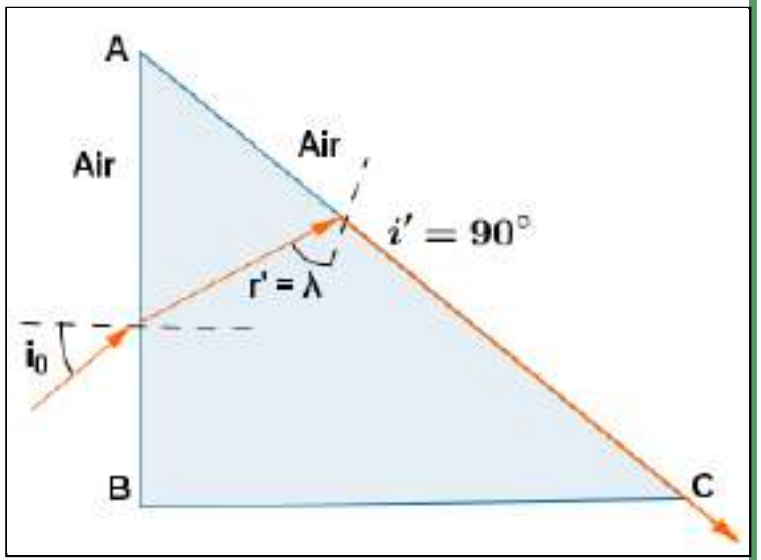

En effet $i' = n \times sin(r') = 1.7 \times sin(44°) = 1.18$ $sin(i') > 1 \mapsto$ réfraction impossible, le laser subit la réflexion totale en (2).

# Conditions d'emergence sur l'angle d'incidence i

Un rayon lumineux tombe sur la face AB d'un prisme ABC d'angle A et d'indice n, sous une incidence $i_0$. Quel doit être la valeur de $i_0$ pour que le rayon lumineux émerge en rasant la face AC يخرج ملامسا للسطح?

Emergence rasante si $i' = 90° \Rightarrow r' = \lambda$
r = A-r'= A- $\lambda$ et on détermine $i_0$ à partir de $sin(i_0) = n\, sin(r)$

$$\boxed{\sin(i_0) = n \sin(A - \lambda)}$$




Avec $A = 60°$ et n = 1.5 on a: $sin(\lambda)$=1/n $\mapsto \lambda \simeq 42°$ et $i_0 = 27.6°$

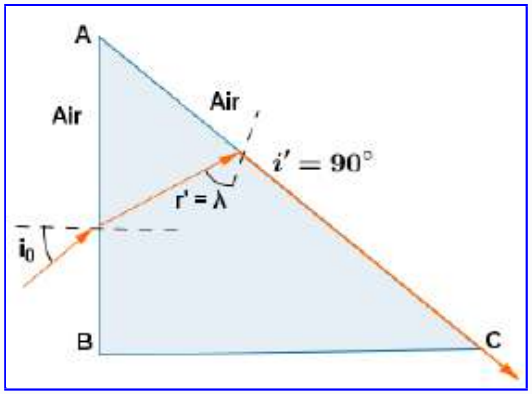
# Exemple 3

Un rayon lumineux tombe sur la face AB d'un prisme d'angle $A = 60°$ et d'indice n=1.73, sous une incidene de 60°.

1. Le rayon lumineux peut-il émerger du prisme ?
2. calculer l'angles $i_0$.
3. calculer l'angle d'émergence i'.

1. Oui car la condition $A \leq 2\lambda$ est verifiée $\mapsto$ $A = 60° < 2\lambda = 70.62°$.
2. $\sin(i_0) = 1.73 \sin(60 - 35.31) \longmapsto i_0 = 46.27°$

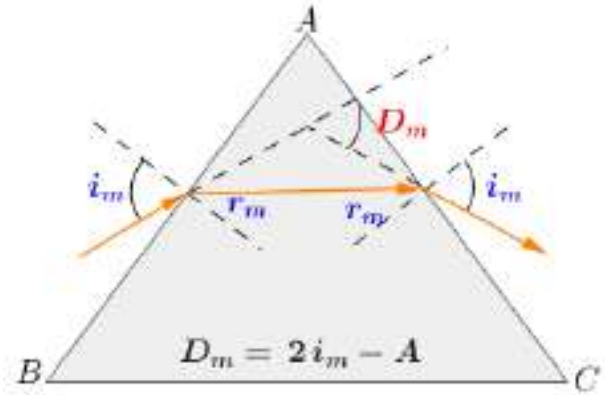
$\sin(r) = \sin(46.27)/1.73 \longmapsto r = 26.69° \mapsto$
$r' = 35.31°$ $\sin(i') = 1.73 \sin(35.31) \simeq 1$
$\mapsto i' = 90^0$



# Minimum de déviation(الانحراف الأصغر(الأدنى

En traversant un prisme la lumière subit une déviation vers la base. La déviation passe par un minimum $D_m$ pour: $i = i' = i_m$ et $r = r' = r_m$

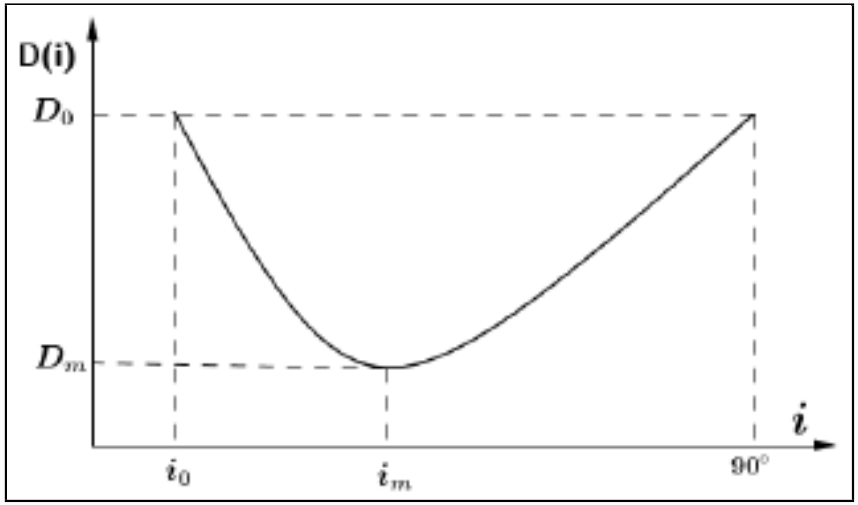
- $D_m = i + i' = 2i_m - A \mapsto$ $\boxed{i_m = (D_m + A)/2}$
- $A = r + r' = 2r_m \mapsto$ $\boxed{r_m = A/2}$
- L'indice n est donné par $\boxed{sin(i_m) = n\, sin(r_m)}$




▲ Déduire les valeurs de $i_m$ et $D_m$ à partir de la courbe mesurée.

▲Remplacer l'équation suivante pour obtenir l'indice de réfraction n:

$$\boxed{n = \sin\left(\frac{A+D_m}{2}\right) / \sin\left(\frac{A}{2}\right)}$$



# Exemple 4

Un rayon lumineux tombe sur la face AB d'un prisme d'angle $A = 60°$ et d'indice n placé dans l'air(n'=1) et émerge par la face AC en subissant une déviation minimum D=30°.Déterminer son indice de réfraction.

À la déviation minimum on a

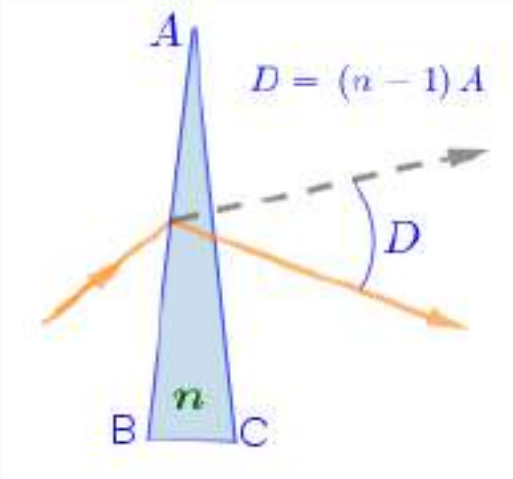
- $i = i' = i_m$ et $r = r' = r_m = \frac{A}{2} = \frac{60}{2} = 30°$.
- Déviation minimum:$D_m = 2 \times i_m - A$
  $\mapsto i_m = \frac{(D_m + A)}{2} = \frac{(30+60)}{2} = 45°$.
- Indice de réfraction du prisme:
  $sin(i_m) = n\, sin(r_m) \mapsto n = \frac{sin(i_m)}{sin(r_m)} = \frac{sin(45)}{sin(30)} = 1.41$

# Prisme de petit angle A منشور صغير الزاوية

La déviation de la lumière dans un prisme ABC d'indice n et de petit angle A placé dans l'air ( n'=1) ne dépend pas des angles i, i'.

1. Dans le cas de faibles angles on applique: $sin(x) = x$
   $sin(i) = n\,sin(r) \mapsto$ i=n r et i'=n r'.
2. Déviation D= i+i'-A=n(r+r')-A $\mapsto \boxed{D = (n-1) \times A}$.

Exemple 5 :
Calculer la déviation totale subie par un rayon laser en traversant un prisme ABC d'angle $A = 18°$ et d'indice n=1.5.
Solution:
$D = (n-1) \times A = (1.5-1) \times 18 = 9°$



# العدسات الرقيقة

# Lentilles minces

# Lentilles Minces عدسات رقيقة(رفيعة)

- Introduction مدخل
- Dioptre sphérique الكاسر الكروي
- Lentilles minces العدسات الرفيعة
- Formule de conjugaison علاقة العدسات
- Construction des images انشاء الصور
- Association de lentilles تجميع العدسات
- Applications تطبيقات



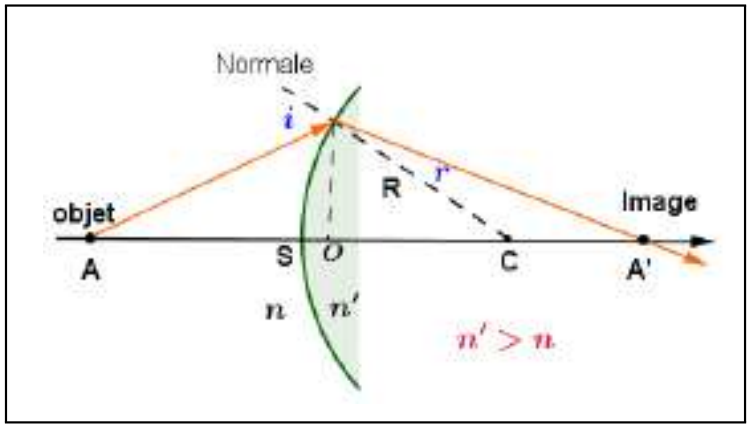
# Introduction مدخل

Les lentilles sont importantes dans la pratique car:

1. Elles sont à la base de plusieurs instruments $\mapsto$ microscope, caméra, appareils photo, ..etc.
2. Elle sont utilisées dans la correction des défauts de l'œil $\mapsto$ myopie, hypermetrpie, presbytie,..etc.
3. Les lentilles sont formées, principalement des dioptres sphériques, il est donc important de rappeler les propriétés du diotre sphérique.

# Dioptre spherique كاسر كروي

1 Dioptre sphérique $\mapsto$ Calotte spéhrique سطح كروي transparente de rayon $R \simeq oc$ séparant 2 milieux d'indices différents $n$ et $n'$.




- Formule du dioptre $\mapsto$la relation entre les positions $\overline{OA}$(objet), $\overline{OA'}$(image),le rayon $\overline{OC}$ et les indices n, n' est établie dans les conditions de Gauss($n\,i = n'r$ *et* $os \ll oc$ ):

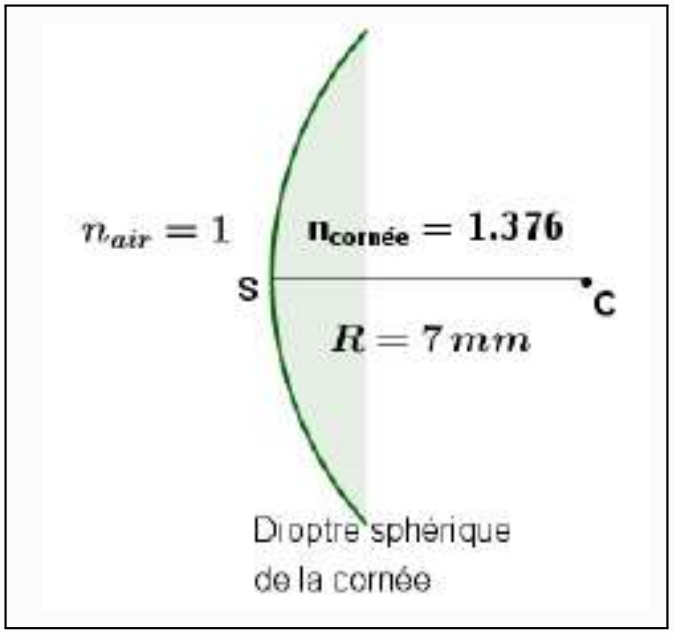
$$\boxed{\frac{n'}{\overline{OA'}} - \frac{n}{\overline{OA}} = \frac{(n'-n)}{\overline{OC}}} \quad \text{pour } (n' > n)$$

- Vergence du dioptre sphérique(sa puissance): $\boxed{C = \frac{(n'-n)}{\overline{OC}}}$
- L'unité de la vergence est $m^{-1}$ appelée dioptrie notée $\delta$ ou D

# Exemple 1

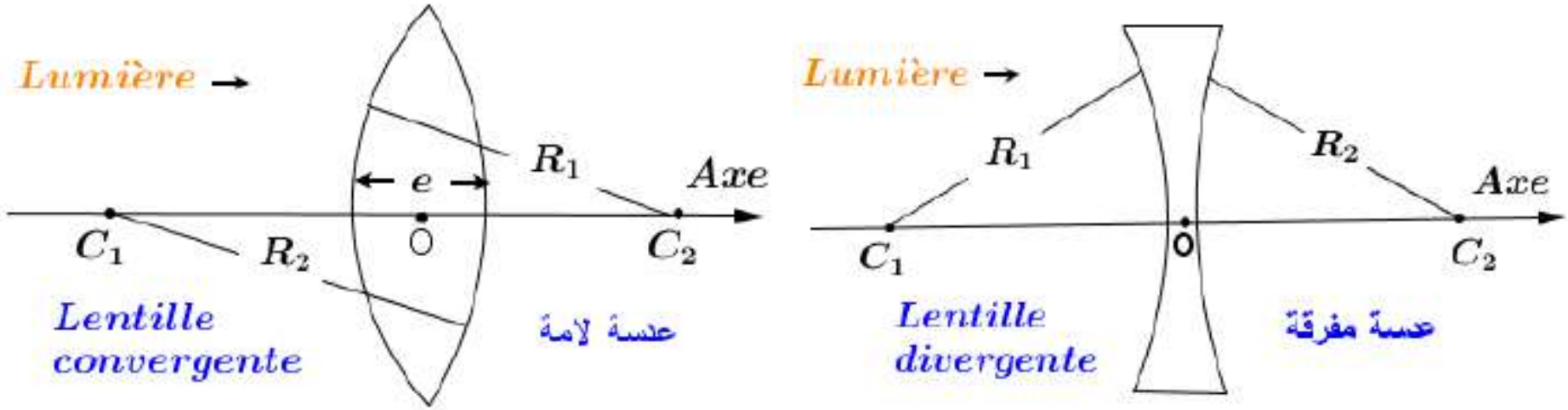
On assimile la cornée de l'œil à un dioptre sphérique de rayon moyen $R = SC \simeq 7.8mm$ séparant un milieu d'indice $n_{cor} = 1.376$ ( stroma cornéen) de l'air d'indice $n_{air} = 1$. Estimer la vergence de la cornée.

- Vergence de la cornée:$\mapsto$ $C = \frac{(n_{cor} - n_{air})}{R}$
- Application numérique $C = \frac{(1.376-1)}{7.810^{-3}} = 48.20 \ \ m^{-1}$.



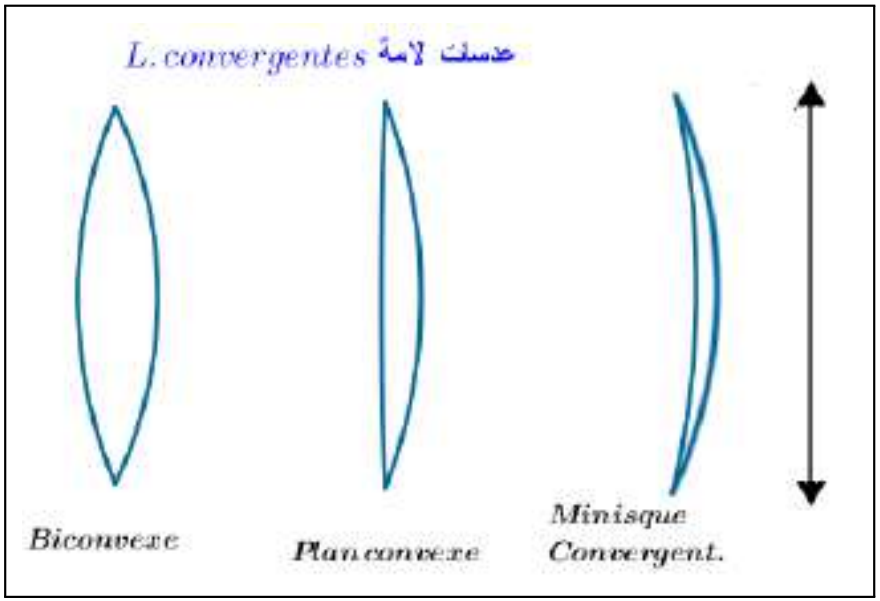
# Lentilles Minces عدسات رقيقة

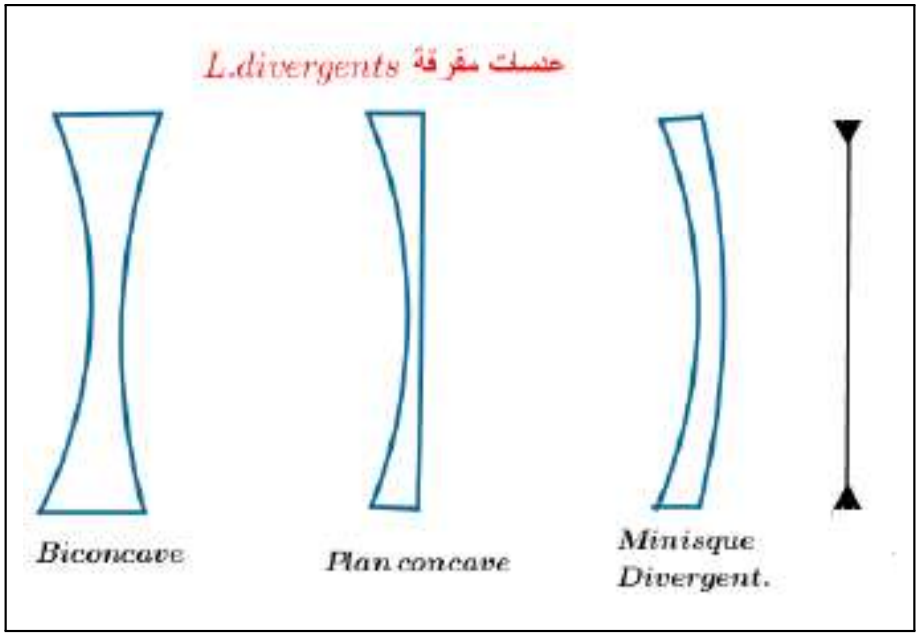
- Lentille $\mapsto$ milieu transparent d'indice n, limité par 2 dioptres sphériques de rayons de courbure $R_1 et\, R_2$ ou (sphérique+plan).




- Lentille mince si l'epaisseur $e \ll R_1$ et $e \ll R_2$.

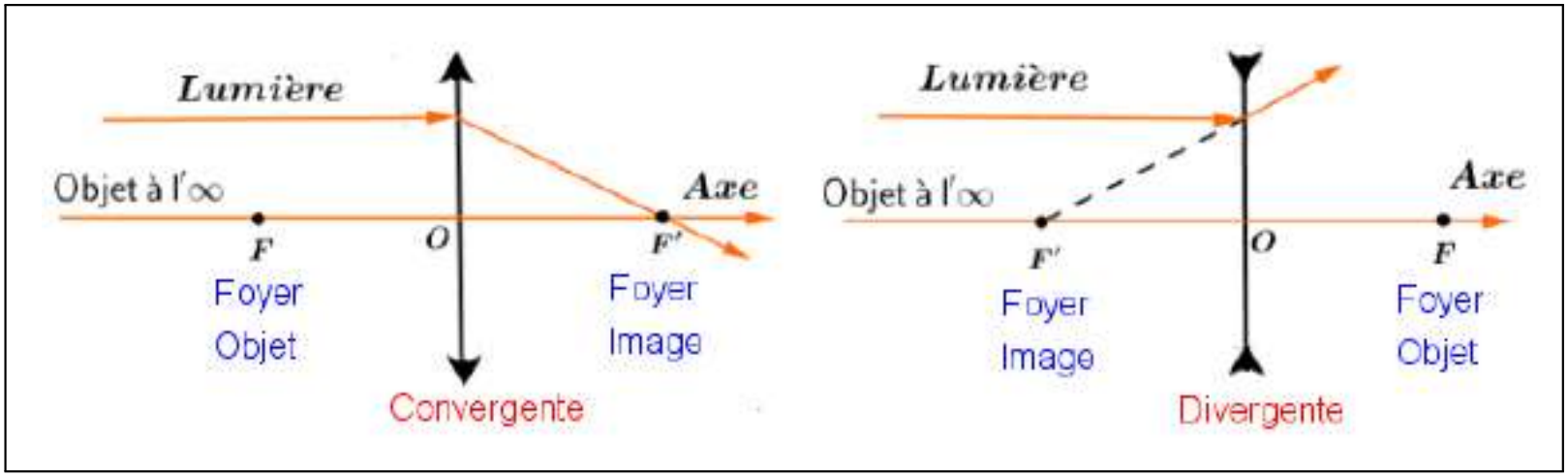
# Types de lentilles انواع العدسات



# Foyer d'une lentille محرق العدسة

1. L'axe optique est orienté dans le sens du trajet de la lumière $\rightsquigarrow$.
2. Le foyer principal image F' est l'image, donné par la lentille, d'un point objet situé à l'infini sur l'axe optique.

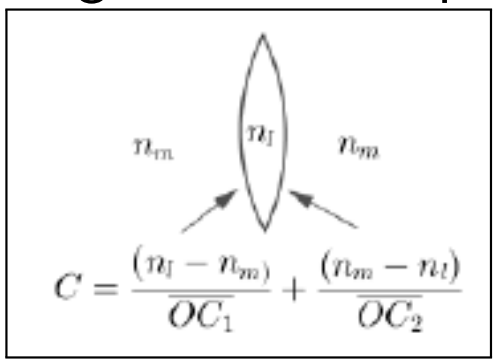



3. Le foyer objet F est symétrique de F' par rapport à la lentille F'و F متناظرتان بالنسبة لمركز العدسة
4. Distance focale de la lentille $\mapsto$ $\boxed{f' = \overline{OF'}}$ البعد البؤري للعدسة

# Vergence d'une lentille قوة العدسة

Considérons une lentille mince formée de deux dioptres sphériques de rayons $OC_1$ et $OC_2$ et d'indice $n_l$. La vergence C de la lentille placée dans un milieu d'indice $n_m$ est donnée par la somme des vergences des dioptres:

$C = \frac{(n_l - n_m)}{\overline{OC_1}} + \frac{(n_m - n_l)}{\overline{OC_2}}$,cette équation s'écrite sous la forme:$\mapsto$ $C = (n_l - n_m)(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}})$

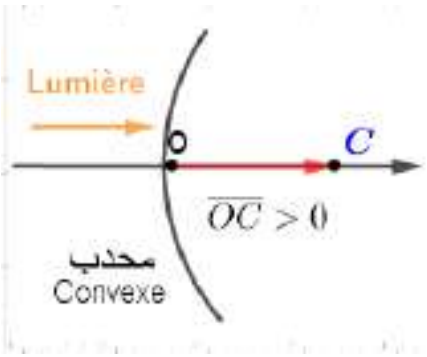



- La distance focale $\overline{OF'}$ est reliée à la vergence par: $\frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{C}{n_m}$: $\frac{1}{\overline{OF'}} = (\frac{n_l}{n_m} - 1)(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}})$
- Si la lentille est placée dans l'air $(n_m = 1)$ la vergence devient: $C = \frac{1}{\overline{OF'}} = (n_l - 1)(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}})$
- Les grandeurs$\overline{OA}, \overline{OA'}$ et $\overline{OF'} < 0$ sont algébriques.

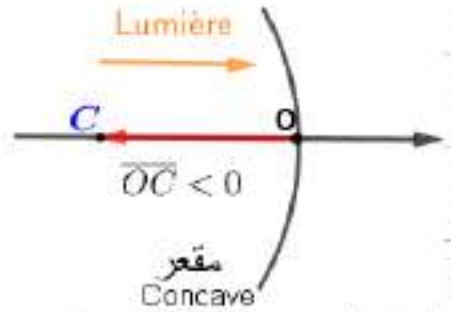
# Orientation de l'axe optique توجيه المحور البصري

Dans la formule $\boxed{\frac{1}{\overline{OF'}} = (\frac{n_l}{n_m} - 1)(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}})}$,les grandeurs $\overline{OF'}, \overline{OC_1}$ *et* $\overline{OC_2}$ sont algébriques(pouvant être positives ou négatives). Pour l'appliquer, il faut orienter l'axe optique dans le sens de direction des rayons lumineux qui se dirigent vers le dioptre de rayon de courbure $\overline{OC}$( نصف قطر الانحناء) .

- Dioptre convexe(محدب): son rayon de courbure est dans la direction de la lumière $\mapsto \overline{OC} > 0$.




- Dioptre concave(مقعر):son rayon de courbure est dans la direction opposée de la lumière $\mapsto \overline{OC} < 0$.



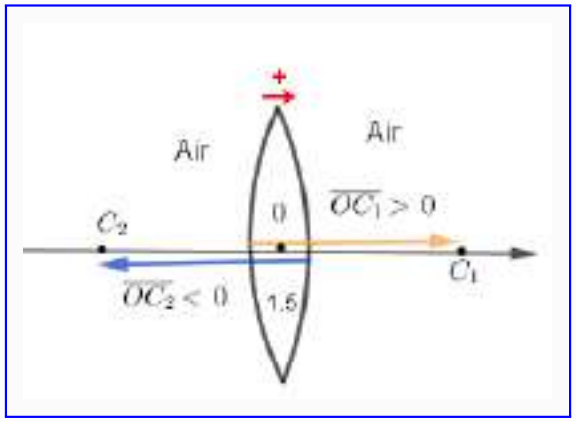
# Exemple 2- lentille biconvexe عدسة مضاعفة التحدب

Une lentille biconvexe d'indice 1.5 est formée de 2 dioptres sphériques identiques de 5 cm de rayon de courbure. La lentille est placée dans l'air d'indice $n' = 1$, déterminer sa vergence C et sa distance focale OF'.

Axe optique orienté de gauche à droite. Le Premier dioptre renconté $\overline{OC_1} > 0$, le second dioptre est concave de rayon $\overline{OC_2} < 0$.
$n_l$ =1.5 ; $n_m$=n'=1 , $\overline{OC_1} = +510^{-2}$ m et $\overline{OC_2} = -510^{-2}$ m.

$$C = \begin{cases} = (n_l - n_m)(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}}) \\ = (1.5 - 1)(\frac{1}{510^{-2}} - \frac{1}{-510^{-2}}) \\ = 20 \ dioptries \end{cases}$$

Distance focale $\overline{OF'} = \frac{n'}{C} = \frac{1}{20} = 0.05$ m



# Exemple 3- lentille plan convexe عدسة مستوية محدبة

Une lentille plan convexe d'indice 1.5 est placée dans l'air d'indice $n' = 1$. Le rayon de courbure de la face convexe est de 5 cm, déterminer sa vergence C et sa distance focale OF'.

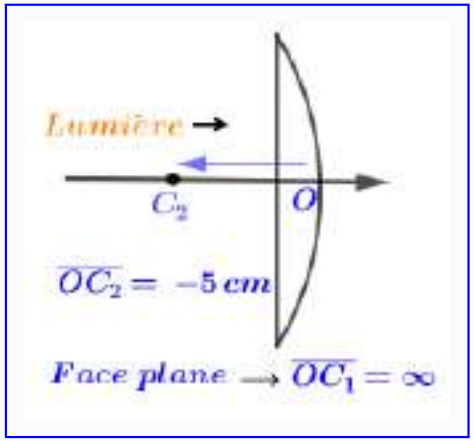
Axe optique orienté de gauche à droite. Le Premier dioptre renconté en allant de gauche à droite est plan de rayon $\overline{OC_1} \equiv \infty$, le second dioptre est concave de rayon $\overline{OC_2} < 0$.

$n_l$ =1.5 ; $n_m$=n'=1

$\overline{OC_1} = \infty$ m, $\overline{OC_2} = -510^{-2}$ m

$$C = \begin{cases} = (n_l - n_m)(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}}) \\ = (1.5 - 1)(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{-510^{-2}}) \end{cases} \quad \text{C=10}$$

dioptries




Distance focale $\overline{OF'} = \frac{n'}{C} = \frac{1}{10} = 0.1$ m

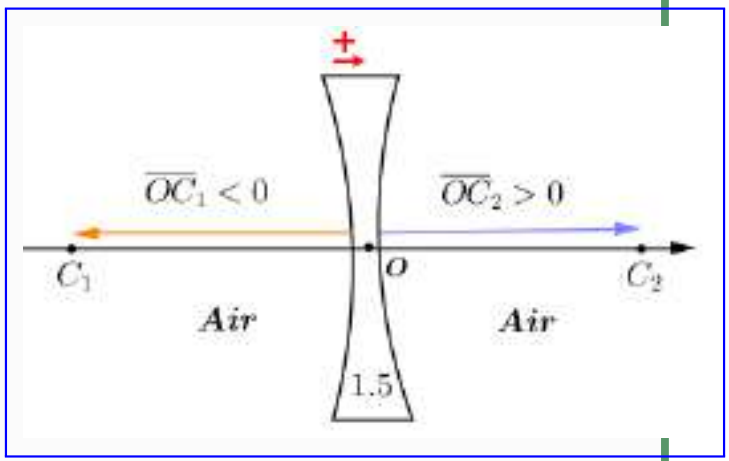
# Exemple 4-lentille biconcave عدسة مضاعفة التقعر

Une lentille biconcave d'indice 1.5 est formée de 2 dioptres sphériques identiques de 5 cm de rayon de courbure. La lentille est placée dans l'air d'indice n'=1, déterminer sa vergence C et sa distance focale OF'.

Axe optique orienté de gauche à droite. Le Premier dioptre renconté en allant de gauche à droite est concave de rayon $\overline{OC_1} < 0$, le second dioptre est convexe de rayon $\overline{OC_2} > 0$.
$n_l$ =1.5 ; $n_m$ =n'=1 , $\overline{OC_1} = -510^{-2}$ m et $\overline{OC_2} = +510^{-2}$ m

$$C = \begin{cases} = (n_l - n_m)(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}}) \\ = (1.5-1)(\frac{1}{-510^{-2}} - \frac{1}{+510^{-2}}) \\ = -20 \ dioptries \end{cases}$$

$$\overline{OF'} = \frac{n'}{C} = \frac{1}{-20} = -0.05 \text{ m}$$



# Exemple 5- lentille plan convexe عدسة مستوية مقعرة

Une lentille plan concave d'indice 1.5 est placée dans l'air d'indice $n' = 1$. Le rayon de courbure de la face concave est de 5 cm, déterminer sa vergence C et sa distance focale OF'.

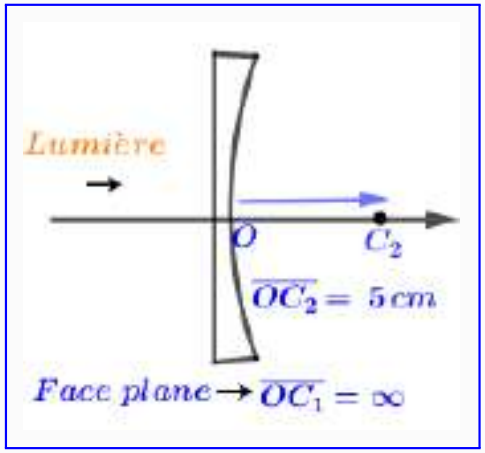
Axe optique orienté de gauche à droite. Le Premier dioptre renconté en allant de gauche à droite est plan de rayon $\overline{OC_1} \equiv \infty$, le second dioptre est convexe de rayon $\overline{OC_2} > 0$.

$n_l$ =1.5 ; $n_m$=n'=1

$\overline{OC_1} = \infty$ m, $\overline{OC_2} = 510^{-2}$ m

$$C = \begin{cases} = (n_l - n_m)(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}}) \\ = (1.5 - 1)(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{510^{-2}}) \end{cases} \quad \text{C=- 10}$$

dioptries




Distance focale $\overline{OF'} = \frac{n'}{C} = \frac{1}{-10} = -0.1$ m

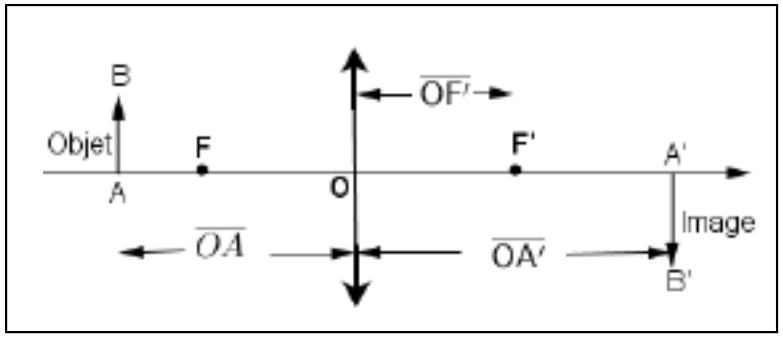
# Formule des lentilles قانون العدسات

- Soit une lentille de distance focale $\overline{OF'}$ et un objet AB placé à une position algebrique $\overline{OA}$ devant la lentille (voir figure). L'image A'B' de l'objet AB à travers la lentille sera formée à une position algebrique $\overline{OA'}$ de la lentille.
- La relation entre les grandeurs algebriques $\overline{OA}$, $\overline{OA'}$ et $\overline{OF'}$ est donnée par la formule des lentilles (de conjugaison):

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

Position algebrique de l'image:

$$\overline{OA'} = \overline{OA}\,/(1 + \frac{\overline{OA}}{\overline{OF'}})$$



# Exemple 6

Un objet réel AB est placé à 6cm devant une lentille convergente de 3 cm de distance focale, à quelle position de la lentille se forme l'image?

1. L'axe de la lentille est orienté dans le sens propagation de la lumière(objet $\mapsto$ lentille ).
2. Le centre optique O de la lentille est l'origine de mesure des positions $\Rightarrow$: $\overline{OA}$ = - 6 cm, $\overline{OF'}$ =+ 3 cm et $\overline{OA'}$ = ?
3. L'image donnée par la lentille se forme à la position $\overline{OA'}$ déterminée à partir de la relation $\mapsto$ $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$

$$\overline{OA'} = \overline{OA}\,/(1 + \frac{\overline{OA}}{\overline{OF'}}) = -6\,cm\,/(1 + \frac{-6\,cm}{3\,cm}) = \frac{-6}{-1} = 6\,cm.$$

# Exemple 7

Déterminer la position $\overline{OA'}$ de l'image d'un objet réel AB placé à 6cm devant une lentille divergente de 3 cm de distance focale.

1. L'axe de la lentille est orienté dans la direction de la lumière(objet $\mapsto$ lentille ).
2. Le centre optique O de la lentille est l'origine de mesure des positions $\Rightarrow$: $\overline{OA}$ = - 6 cm, $\overline{OF'}$ = - 3 cm et $\overline{OA'}$ = ?
3. L'image donnée par la lentille se forme à la position $\overline{OA'}$ déterminée à partir de la relation $\mapsto$ $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{OF'}$

$\overline{OA'} = \overline{OA}\,/(1 + \frac{\overline{OA}}{OF'}) = -6\,cm\,/(1 + \frac{-6\,cm}{-3\,cm}) = \frac{-6}{1+2}$= -2 cm.

# Grandissement $\gamma$ تكبير العدسة

- Relation de conjugaison $\boxed{\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = C}$
- Grandissement d'une lentille $\longmapsto$ $\boxed{\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}}$ ou $\boxed{\gamma = \frac{\overline{OF'}}{(\overline{OA} - \overline{OF'})}}$
- $\gamma > 0 \longmapsto$ image A'B' droite صورة مستقيمة
- $\gamma < 0 \longmapsto$ image A'B' renversée صورة مقلوبة
- L'image A'B' est réelle si $\overline{OA'} > 0$ صورة حقيقية
- L'image A'B' est virtuelle si $\overline{OA'} < 0$ صورة تقديرية
- Si AB et A'B' sont les grandeurs de l'objet et de l'image respectivement on a:

  $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \longmapsto$ taille de l'image $\boxed{\overline{A'B'} = \overline{AB}\,(\frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}})}$

# Construction géométrique de l'image البناء الهندسي للصورة

Lorsqu'un objet réel AB est placé devant une lentille, des rayons lumineux partent de l'objet et tombent sur la lentille. En traverssant la lentille les rayons se réfractent et forment une image A'B'. On construit géométriquement l'image A'B' en considérant 2 rayons parmi les 3 rayons suivants:

1. Un rayon qui passe par le centre optique O de la lentille.
2. Un rayon qui tombe parallèlement à l'axe de la lentille.
3. Un rayon qui passe réellement ou virtuellement par un foyer de la lentille.

La construction détaillée de l'image est présentée dans ce qui suit pour les deux types de lentilles(convergente et divergente).

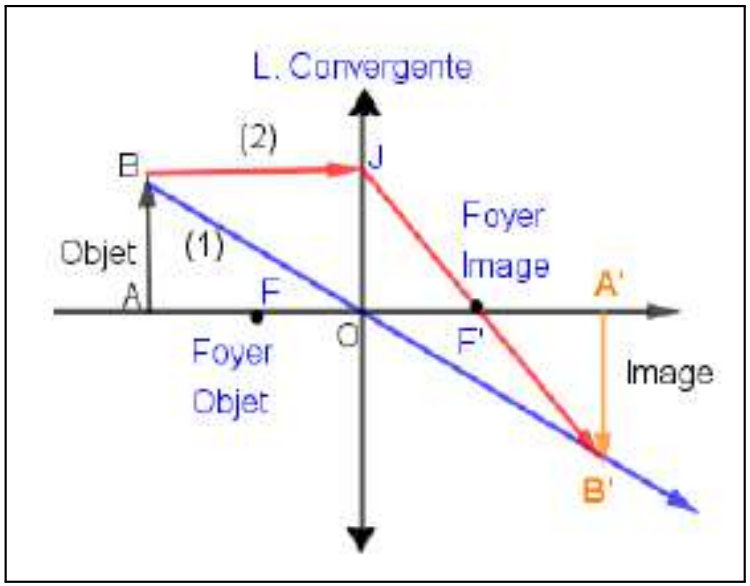
# Image donnée par une lentille convergente عدسة لامة

Tracer l'image A'B' de l'objet réel AB, donnée par la lentille convergente.

- L'image A' de A se situe sur l'axe de la lentille.
- Pour obtenir l'image B' on trace deux rayons lumineux issus de B:
  1. Le rayon(1) qui passe par le centre O sans déviation.
  2. Le rayon(2) parallèle à l'axe qui se réfracte en passant par le foyer image F' et coupe le rayon (1) au point B' image de B.

Methode 1

$A'B' \rightsquigarrow$ *image* $\begin{cases} \text{réelle حقيقية} \\ \text{renversée مقلوبة} \end{cases}$



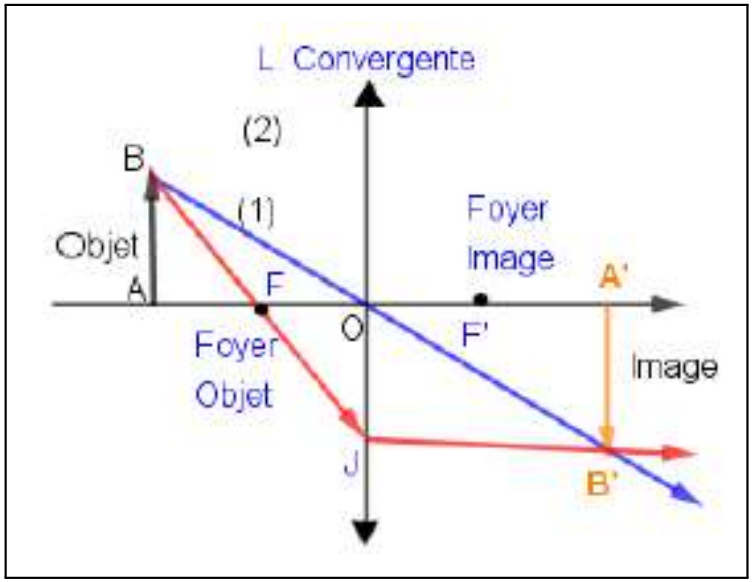
# Image donnée par une lentille convergente عدسة لامة

Tracer l'image A'B' de l'objet réel AB, donnée par la lentille convergente.

- L'image A' de A se situe sur l'axe de la lentille.
- Pour obtenir l'image B' on trace deux rayons lumineux à partir de B:
  1. Le rayon(1) qui passe par le centre O sans déviation.
  2. Le rayon(2) qui passe par le foyer objet F et se réfracte parallèlement à l'axe et coupe le rayon(1) au point B' image de B.

Methode 2

$A'B' \rightsquigarrow image \begin{cases} \text{réelle حقيقية} \\ \text{renversée مقلوبة} \end{cases}$



# Exemple 8

Un objet réel AB est placé à 3 cm devant une lentille convergente de distance focale 2 cm. Déterminer la position $\overline{OA'}$ de l'image A'B'.

1. Axe orienté de A $\mapsto$ A'.
2. $\overline{OF'} = +2\,cm$ et $\overline{OA} = -3\,cm$. $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OF'}} + \frac{1}{\overline{OA}}$.
3. $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{-3} = \frac{1}{6}$,
4. position de l'image: $\overline{OA'} = 6\,cm$.

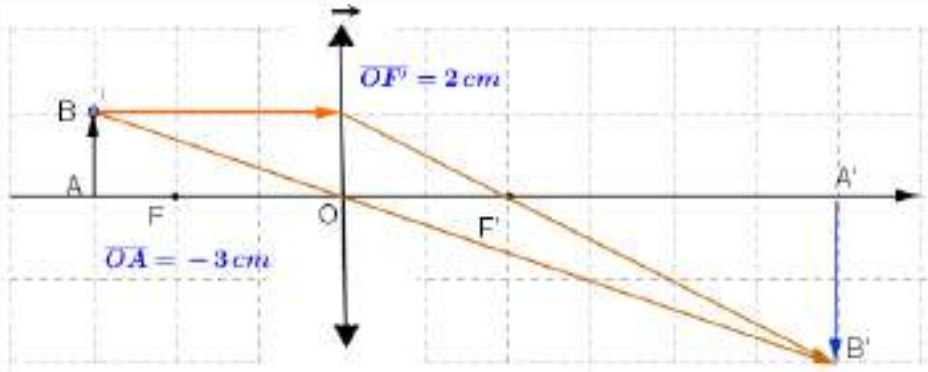



Image A'B':
- 1 rayon BOB' passe par O et B'.
- 1 rayon parallèle à l'axe se réfracte en passant par F' et B'.

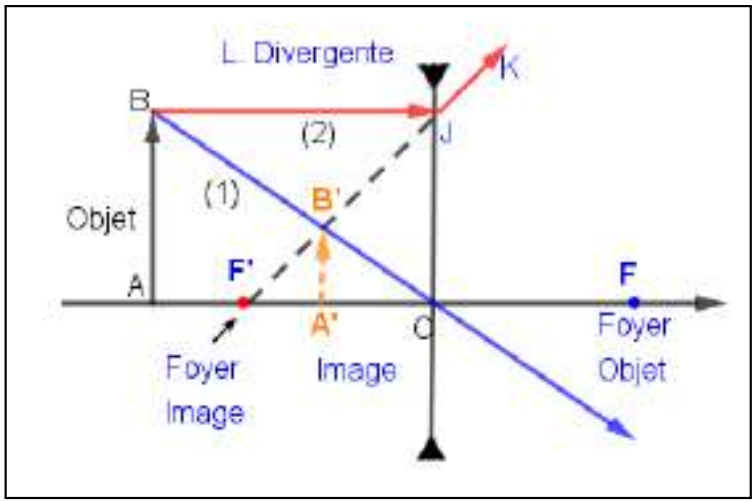
# Image donnée par une lentille divergente عدسة مفرقة

Tracer l'image A'B' de l'objet réel AB, donnée par la lentille divergente.

- L'image A' de A se situe sur l'axe de la lentille.
- Pour obtenir l'image B' on trace deux rayons lumineux issus de B:
  1. Le rayon(1) qui passe par le centre O sans déviation.
  2. Le rayon(2) parallèle à l'axe se réfracte dans une direction JK de telle sorte que son prolongement JF' امتداد coupe le rayon(1) au point B' image de B, en passe par le foyer image F'.

**Methode 1**

$A'B' \rightsquigarrow image \begin{cases} \text{virtuelle تقديرية} \\ \text{droite مستقيمة} \end{cases}$



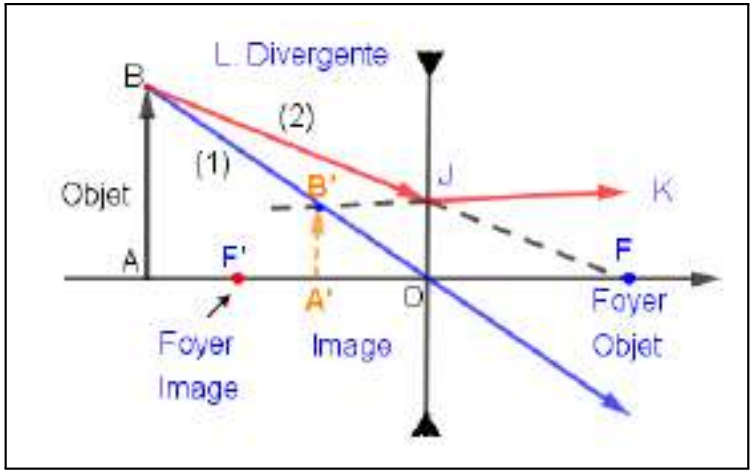
# Image donnée par une lentille divergente عدسة مفرقة

Tracer l'image A'B' de l'objet réel AB, donnée par la lentille divergente.

- L'image A' de A se forme sur l'axe de la lentille.
- Pour obtenir l'image B' on trace deux rayons lumineux issus de B:
  1. Le rayon(1) qui passe par le centre O sans déviation.
  2. Le rayon(2) dirigé vers le foyer objet F se réfracte parallèlement à l'axe dans la direction JK de telle sorte que son prolongement JB' coupe le rayon(1) au point B' image de B.

**Methode 2**

$A'B' \rightsquigarrow image \begin{cases} \text{virtuelle تقديرية} \\ \text{droite مستقيمة} \end{cases}$



# Exemple 9

Un objet réel AB est placé à 4 cm devant une lentille divergente de distance focale 4 cm. Déterminer la position $\overline{OA'}$ de l'image A'B'.

1. Axe orienté de A $\mapsto$ O.
2. $\overline{OF'} = -4\,cm$ ,
   $\overline{OA} = -4\,cm$.
   $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OF'}} + \frac{1}{\overline{OA}}$.
3. $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{-4} + \frac{1}{-4} = -\frac{1}{2}$,
4. position de l'image:
   $\overline{OA'} = -2\,cm$.

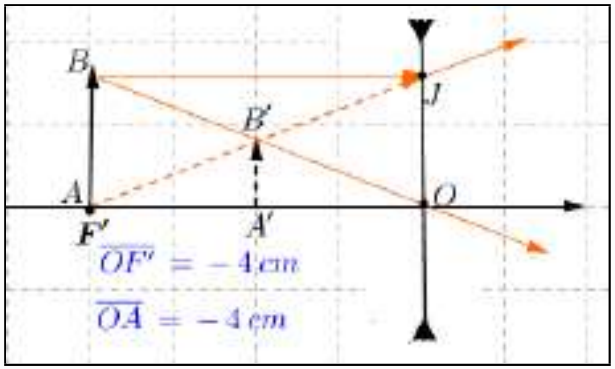


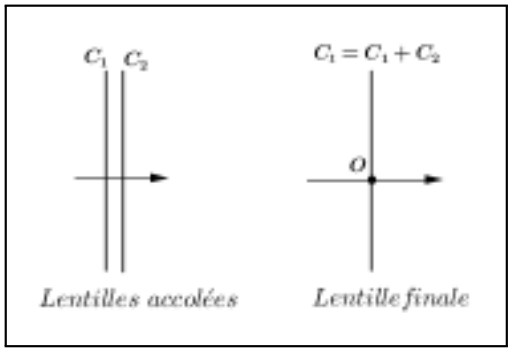

Image A'B':
- 1 rayon BO passe par O.
- 1 rayon BJ parallèle à l'axe se réfracte comme s'il provient de F'.

# Association des lentilles minces تجميع العدسات الرقيقة

- Les instruments d'optique comme le microscope, sont formés par l'association de lentilles (et de miroirs).
- Soient 2 lentilles $L_1$ et $L_2$ de vergences $c_1$ et $c_2$ respectivement.
- On peut les associer de 2 façons:
  $\mapsto$ lentilles accolées عدسات متصلة(متلامسة)
  $\mapsto$ lentilles séparées (doublet ثنائية) عدسات متباعدة

# Lentilles accolées عدسات متلامسة

Deux lentilles de vergences $c_1$ et $c_2$ accolées forme un système optique dont la vergence est donnée pa la somme : $c_t = c_1 + c_2$.




Exemple 10:

On accole deux lentilles de vergence $c_1 = 50m^{-1}$ et $c_2 = -33,33m^{-1}$.

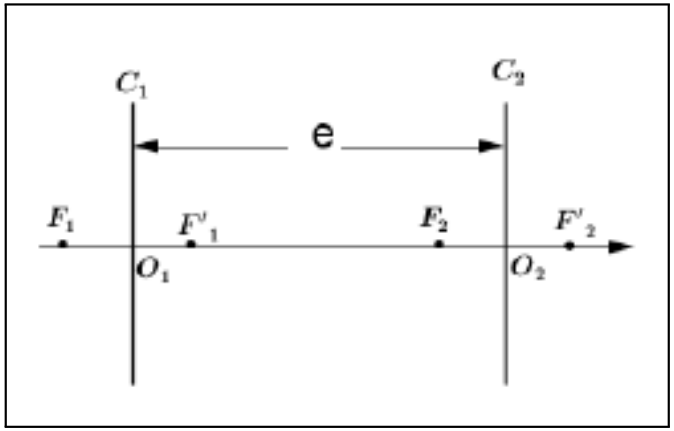
1. Déterminer la nature et la distance focale de chaque lentille ?
2. Quelle est la vergence totale du système formé des deux lentilles ?

1. $c_1 > 0 \longmapsto$ lentille convergente de $f_1 = \frac{1}{50} = 0.02\,\text{m}$.
2. $c_2 < 0 \longmapsto$ lentille divergente de $f_2 = \frac{1}{-33.33} =$- 0.03 m.
3. $c_{total} = c_1 + c_2 = 50 - 33.33 = 16.67\,\delta$.
4. Les 2 lentilles accolées sont équivalentes à une lentille convergente de distance focale $f_t = \frac{1}{c_t} = \frac{1}{16.67} \simeq 0.06\,m$.

# Lentilles séparées-doublet عدسات متباعدة ـ ثنائية

On forme un doublet avec 2 lentilles de vergences $c_1$ et $c_2$ séparées par 1 distance **e**.
La vergence du système sera:

$$c_t = c_1 + c_2 - e\,.c_1 c_2$$




Exemple 11:
Calculer la vergence d'un doublet composé de deux lentilles de vergences, $c_1 = 50m^{-1}$ et $c_2 = -50m^{-1}$ séparées d'une distance e= 2 cm dans l'air.

$C_t = 50 + (-50) - 2\,10^{-2} \times (50) \times (-50) = +50\,m^{-1}$
Distance focale $f_t = \frac{1}{C_t} = \frac{1}{50} \simeq 0.02\,m = 2\,cm$ (lentille convergente).

# Image d'un objet réel à travers un doublet

Exemple 12:

On forme un doublet avec une lentille convergente $L_1$ de distance focale $f_1$= 2cm et une lentille divergente$L_2$ de distance focale$f_2$= -4 cm. Les deux lentilles ont le même axe optique et leurs centres $O_1$ et $O_2$ respectivement sont séparés par une distance $O_1O_2 = 8cm$. Un objet réel AB est placé à 4 cm avant $L_1$ perpendiculairement à l'axe du doublet. Soit$A_1B_1$ l'image intermédiaire donnée par la lentille $L_1$, déterminer l'image finale $A_2B_2$ donnée par le doublet $L_1L_2$.

$$AB \xrightarrow{L_1} A_1B_1 \xrightarrow{L_2} A_2B_2$$

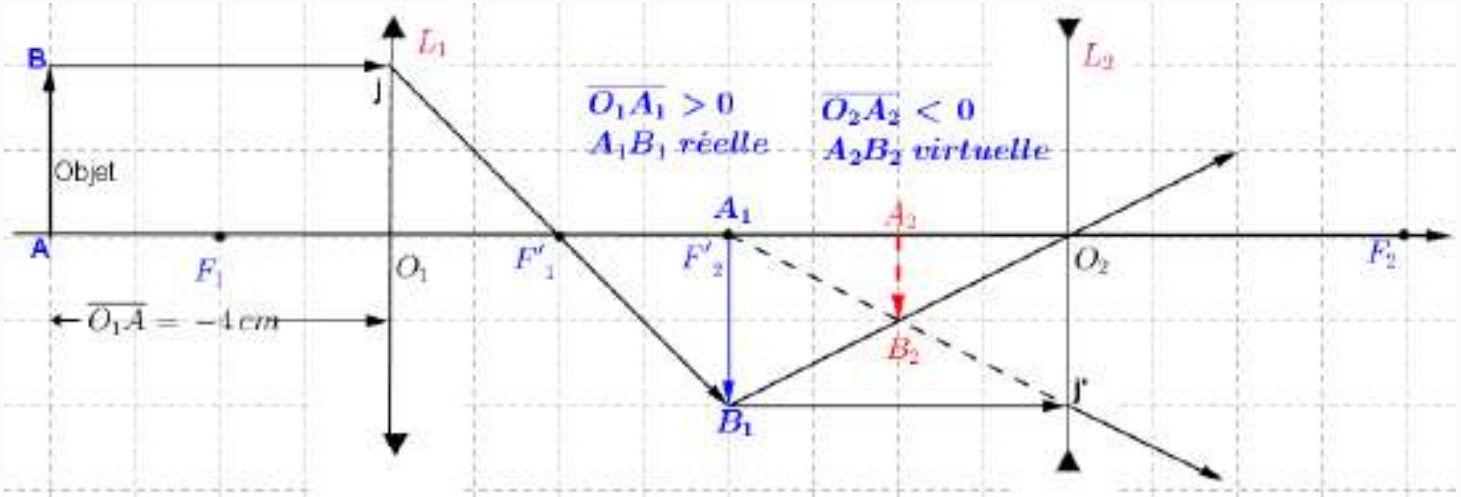
1)Pour $L_1$: $\overline{O_1A} = -4\,cm$ et $f_1 = 2\,cm$, la lentille donne une image $A_1B_1$ à la position: $\overline{O_1A_1} = \overline{O_1A}/(1+\frac{\overline{O_1A}}{f_1}) = -4cm/(1+\frac{-4cm}{2\,cm}) =$ $4\,\text{cm} \mapsto \overline{O_1A_1} > 0$,image réelle.

2)L'image $A_1B_1$ formée à 4 cm avant $L_2$ devient objet réel pour $L_2$ dont la position par rapport à $O_2$ est $\overline{O_2A_1} = -4cm$ (origine en $O_2$).

3)$L_2$ donne de $A_1B_1$ une image finale $A_2B_2$ virtuelle à la position

$$\overline{O_2A_2} = \overline{O_2A_1}/(1+\frac{\overline{O_2A_1}}{f_2}) = -4cm/(1+\frac{-4cm}{-4cm}) = -2\,cm$$

$$\gamma = \frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{\overline{O_2A_2}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{-2cm}{-4cm} = 0.5cm. \mapsto A_2B_2 = A_1B_1/2 \text{ (reduite)}.$$



# Image d'un objet réel à travers un doublet

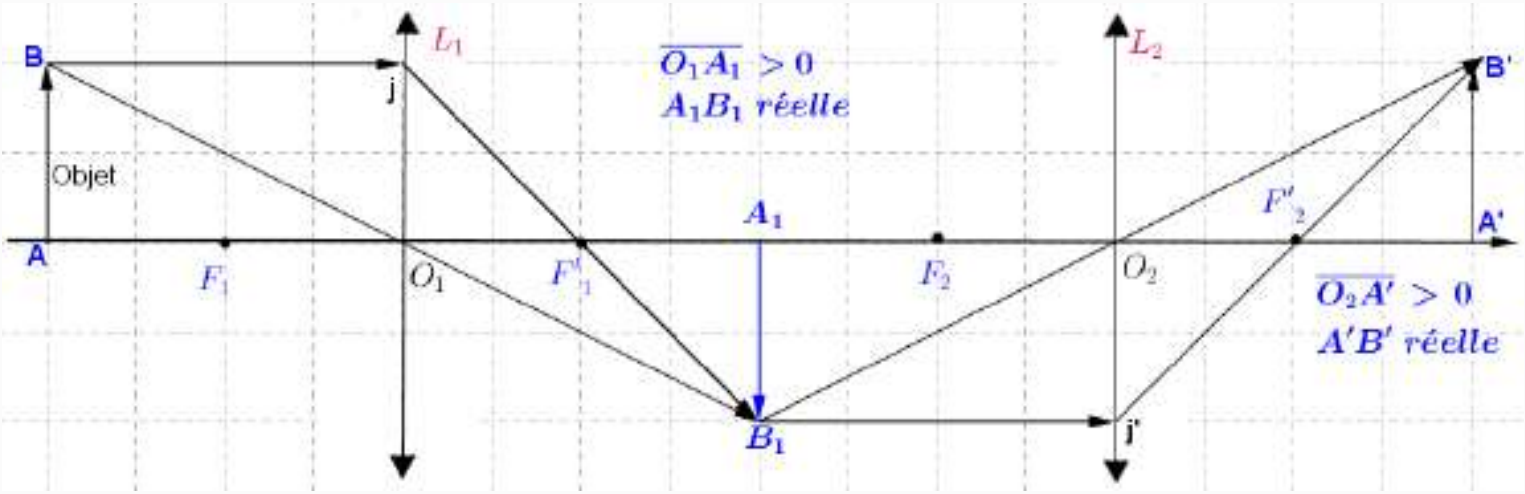
Exemple 13:

On forme un doublet avec deux lentilles convergentes identiques $L_1$ et $L_2$ de distance focale $f_1 = f_2 = 2$cm et de même axe optique. Leurs centres $O_1$ et $O_2$ respectivement sont séparés par une distance $O_1O_2 = 8$cm. Un objet réel AB est placé à 4 cm avant $L_1$ perpendiculairement à l'axe du doublet. Soit $A_1B_1$ l'image intermédiaire donnée par la lentille $L_1$, déterminer l'image finale $A'B'$ donnée par le doublet $L_1L_2$.

$$AB \xrightarrow{L_1} A_1B_1 \xrightarrow{L_2} A'B'$$

1)Pour $L_1$: $\overline{O_1A} = -4\,cm$ et $f_1 = 2\,cm$, la lentille donne une image $A_1B_1$ à la position: $\overline{O_1A_1} = \overline{O_1A}/(1+\frac{\overline{O_1A}}{f_1}) = -4cm/(1+\frac{-4cm}{2\,cm}) =$ 4 cm $\mapsto \overline{O_1A_1} > 0$,image réelle.

2)L'image $A_1B_1$ étant formée à 4 cm de $L_2$, elle devient objet réel situé à $\overline{O_2A_1} = -4cm$ de $L_2$. On calcule la position de l'image A'B': $\overline{O_2A'} = \overline{O_2A_1}/(1+\frac{\overline{O_2A_1}}{f_2}) = -4cm/(1+\frac{-4cm}{2\,cm}) =$ 4 cm de $L_2$.



# L'œil العين

# L'œil – Plan du cours

- Description مدخل
- L'œil réduit العين المختزلة
- Accommodation de l'œil تكيف العين
- Acuité visuelle de l'œil حدة البصر
- Défauts de vision عيوب البصر(النظر)

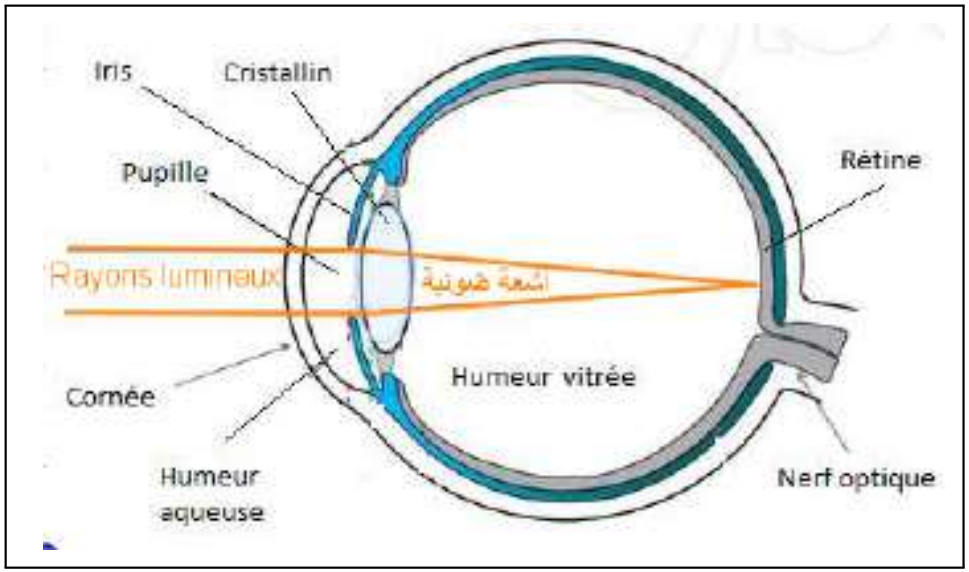
1. Myopie قصر النظر
2. Hypermétropie طول النظر
3. Presbytie تراجع البصر



# Description de l'œilوصف العين

- L'œil $\rightrightarrows$ 1 système optique qui nous permet de voir des objets.
- La lumière, provenant des objets, pénètre dans l'œil et traverse différents milieux séparés par des dioptres sphériques avant d'arriver sur la rétine où se forme l'image.
- La lumière traverse les milieux suivants avant d'arriver sur la rétine.

- la cornée(n=1.37)
- l'humeur aqueuse
- le cristallin (n=1.39)
- l'humeur vitrée(n=1.33)



# L'œil réduit العين المختزلة

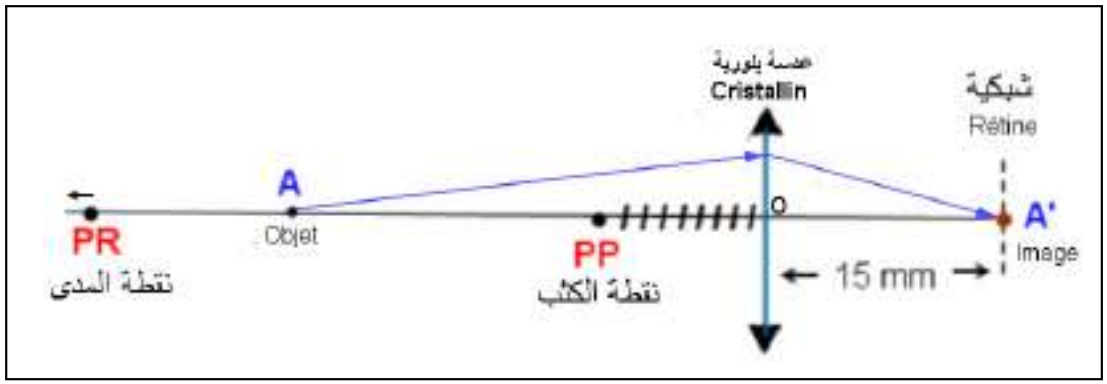
Les dioptres sphériques de l'œil sont équivalents à :
$\mapsto$ 1 lentille convergente(cristallin) + écran(rétine)
La distance OA' entre le cristallin et la rétine dépend de l'œil
OA'= 15mm, 17mm, ...etc.

1. le point le plus éloigné vu nettement par un œil est le Punctum remotum(PR)نقطة المدى.
2. Le point le plus proche vu nettement par un œil est le punctum proximum(PP)نقطة الكثب.

Vergence du critallin

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

Avec $\overline{OA'} = 15\,mm$,
C et $\overline{OA}$ variables



# Exemple 1

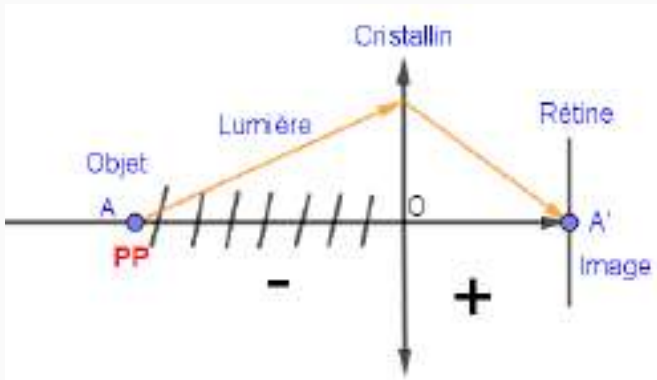
Un œil normal dont le PR est à l'infini et le PP à 25 cm de l'œil, observe un objet A au PP, calculer la vergence du cristallin pour que l'image A' de A se forme sur la rétine.

Le centre optique O du cristallin est considéré comme origine de mesure des positions(en metre) on a:
$\overline{OA} = -0.25\,m$ , $\overline{OA'} = +0.015\,m$ et on calcule C= ?

Vergence du cristallin $C = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}}$

$C = \frac{1}{(0.015)} - \frac{1}{(-0.25)}$

$= \frac{1000}{15} + \frac{100}{25} = 70.66\ m^{-1}$

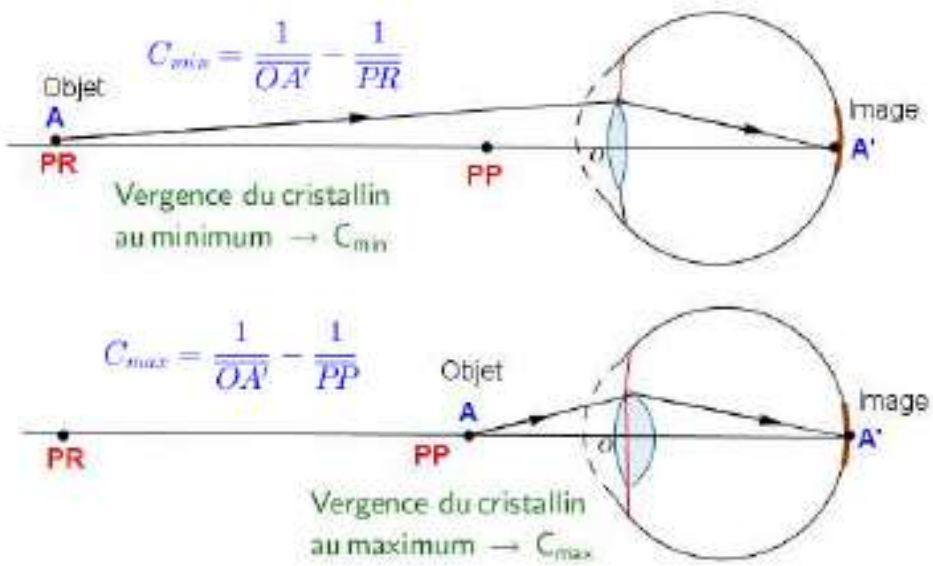



Vérifier que si l'objet est au PR, la vergence devient $C = 66.66\,m^{-1}$

# Accommodation de l'œil تكيف العين

L'œil voit un objet au PR sans accommodation.

l'œil voit un objet au PP avec accommodation maximum.




## Amplitude d'accommodation سعة المطابقة(التكيف)

Pour voir un objet placé entre PR et PP, le cristallin augmente sa vergence d'une quantité A appelée amplitude d'accommodation.

$A = C_{max} - C_{min} = \frac{1}{PR} - \frac{1}{PP}$

# Exemple 2

Calculer la vergence du cristallin d'un œil normal dont le PP est à 25 cm et le PR à l'infini, pour observer un objet situé au PP.

Le centre O du cristallin est l'origine de mesure des positions, ( avant O négatives et après O positives) $\mapsto PP < 0, \overline{OA} < 0$ et $\overline{OA'} > 0$

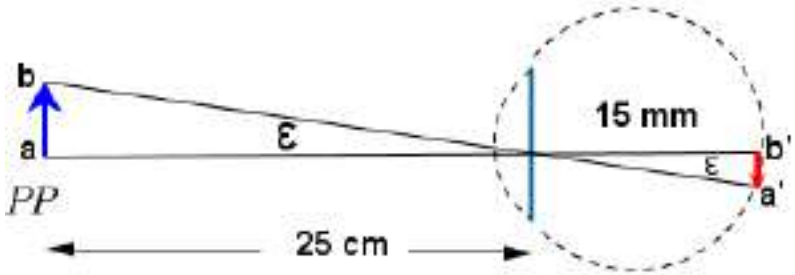
1. Objet au PR, l'image sur la rétine: $\overline{OA'} = 0.015m, \overline{OA} = -\infty$: $C = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{0.015} - \frac{1}{-\infty} = 66.66\,\delta$ .
2. Objet au PP, l'image arès la rétine, le cristallin augmente sa vergence pour la ramener sur la rétine : $\overline{OA} = -0.25m$: $C = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{0.015} - \frac{1}{-0.25} = 66.66 + 4 = 70.66\delta.$ La vergence augmente de 4 $\delta$(accommodation maximum).

Amplitude dioptrique $\boxed{A = \frac{1}{PR} - \frac{1}{PP} = \frac{1}{-\infty} - \frac{1}{-2510^{-2}} = 4\delta}$

# Acuité visuelle de l'œil حدة البصر

1. Acuité visuelle de l'œil⇝ Aptitude à distinguer des détails sur 1 objetقدرة العين على تمييز التفاصيل.
2. 2 points a,b sont vus séparés si leurs images a',b' sont formées sur 2 cellules séparées sur la rétine.
3. Distance moyenne a'b' (rétine )$\approx 510^{-3}$ mm(mesurée au microscope).

$$\varepsilon = \frac{a'b'}{OA'} = \frac{510^{-3} m}{15\, m} \simeq 310^{-4} \text{ radian}$$

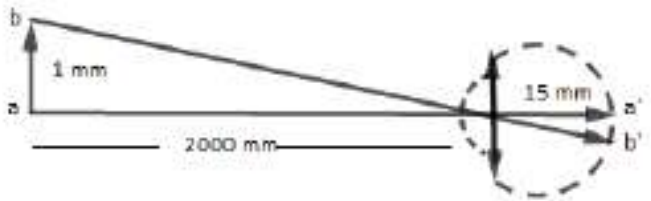



4. La plus petite longueur ab vue par un œil normal à 25 cm est $ab = \varepsilon \times 25 = 310^{-4} \times 25cm = 0.075mm = 75\,\mu m$.

# Exemple 3

1. Un œil normal dont l'acuité visuelle est $\epsilon \simeq 3.10^{-4}$ rd, regarde un petit insect de taille ab=1 mm à une distance de 2 m. Quelle est l'angle $\alpha$ sous lequel l'œil observe l'insect ?
2. La distance cristallin-rétine est de 15 mm, quelle est la taille de l'image a'b' de l'insect sur la rétine ?

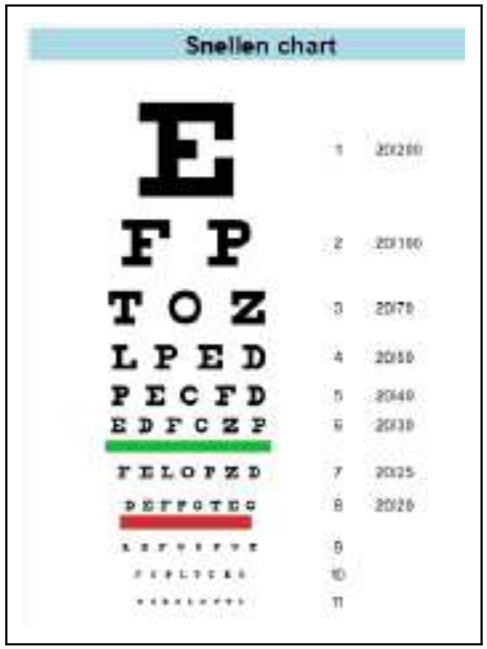
1. D'après le schéma
   $\alpha \simeq = \frac{1\,mm}{2000\,mm} = 5\,10^{-4} rad.$




2. $\frac{a'b'}{ab} = \frac{OA'}{OA} \mapsto a'b' = 1(mm)(\frac{15mm}{2000mm}) = 0.0075mm$
   $\boxed{a'b' = 7.5\mu m}$.

# Mesure de l'acuité visuelle

L'acuité visuelle est souvent mesurée avec un tableau de Snellen constitué de 11 lignes de lettres de tailles différentes. Les lettres sont vues sous un angle de 5 minutes d'arc par un patient placé à 20 feet(6 m)du tableau. L'acuité visuelle est indiquée devant chaque ligne par une fraction.Ex: $\rightsquigarrow \frac{20}{40}$

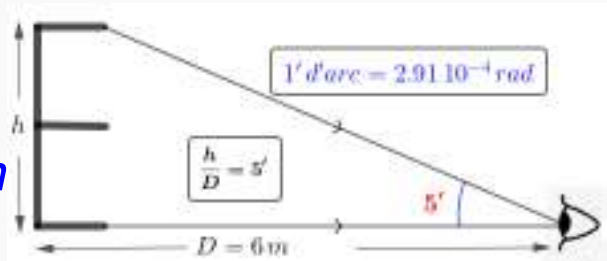



$\frac{20}{40}$ $\begin{cases} 20 \mapsto \text{distance entre le patient et le tableau (20 feet= 6m)} \\ 40 \mapsto \text{distance à laquelle un œil normale peut lire les memes lettres.} \end{cases}$

Quelle est la taille de la lettre vue par l'œil à 6 m sous l'angle de 5' d'arc ?

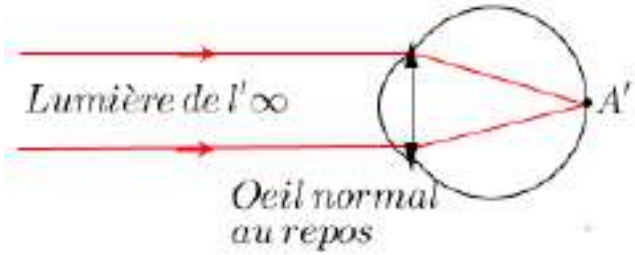
$5' = 5 \times 2.9110^{-4} = 0.001455\, rad$

$h = 5' \times D = 6000(mm) \times 0.001455 = 8.73mm$



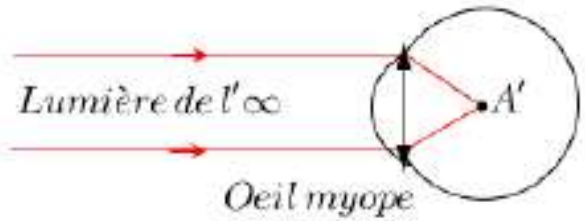
# Défauts visuels de l'œil عيوب النظر(البصر)

Pour un œil normal(emmétrope) au repos l'image d'un objet au PR (à l'$\infty$ )se forme exactement sur la rétine.

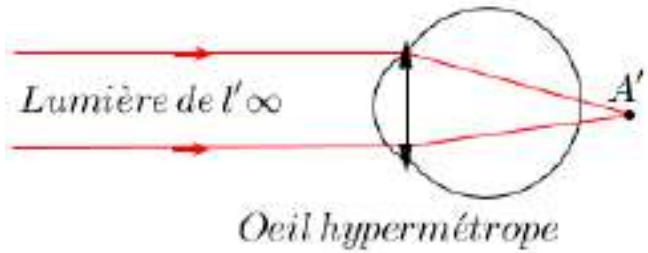



Pour un œil ayant un défaut visuel, l'image d'un objet à l'$\infty$ se forme:

1. Soit en avant de la rétine (myope).




2. Soit en arrière de la rétine (hypermétrope).



# Correction des défauts visuels تصحيح الاخطاء البصرية

- Un défaut visuel de l'œil est corrigé par des verres(lentilles) dont la vergence $C_v$ est choisie de telle sorte que, les verres produisent une image au PR (ou au PP) que l'œil puisse voir.
- La vergence $C_v$ de correction est donnée par l'équation:

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

Exemple 4:

Le Penctum rémotum(PR) d'une personne est à 90 cm de l'œil, déterminer la vergence $C_v$ des verres qui lui permettent de voir à l'infini.

On néligera la distance entre le centre optique O de la lentille(verre) et celui de l'œil$\rightsquigarrow$ $\overline{OA} = -\infty$ et $\overline{OA'} = -0.90m$ et $C_v = ?$

$C_v = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{-0.90} - \frac{1}{-\infty} = -\frac{1}{0.9} = -1.11\ m^{-1}$.

Correction $\mapsto$ lentille divergente avec $C_v = -1.11\,dioptries$

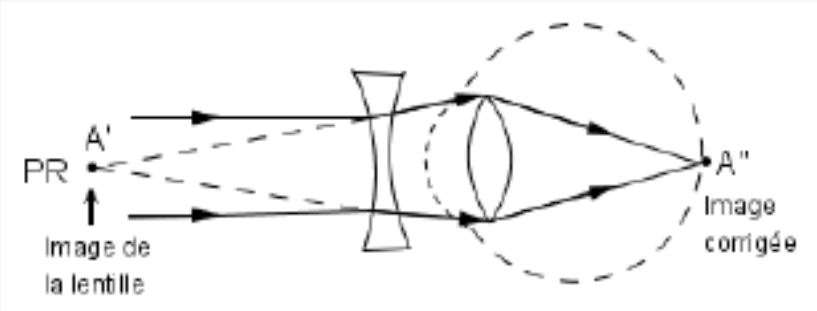
# Correction de la myopie تصحيح قصر النظر

- Le myope voit sans accommoder des objets situés au PR.
- Le myope ne voit pas des objets plus loins que son PR, car l'image ne se forme pas sur la rétine(image floue).

Pour voir un objet A plus loin que le PR, il faut des lentilles de correction qui donnent d'un objet A une image A' formée au PR, comme sur la figure.

Vergence de correction.

$$C_v = \frac{1}{\overline{PR}} - \frac{1}{-\infty} = \frac{1}{\overline{PR}}$$




Le PR étant devant l'œil$\mapsto \overline{PR} < 0 \mapsto C_{verre} < 0$ Lentille divergente.

Exemple 5:
Un œil myope voit distinctement des objets entre 15 cm et 80 cm.

1. Pourquoi le myope ne voit-il pas clairement un objet situé à 250 m?
2. Quelle vergence $C_v$ de lunettes que le myope peut utiliser pour bien voir à 250 m ?

1. Le myope ne voit pas clairement des objets à 250 m car l'image ne se forme pas sur la rétine(image floue).
2. Pour ramener l'image sur la rétine et voir nettement, on choisit $C_v$ de telle sorte que les verres donnent, d'un objet à 250 m, une image au PR $\mapsto C_v = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA}$
   $C_v = \frac{1}{-8010^{-2}} - \frac{1}{-250} \simeq -1.25\delta$ (verres divergents)

Vérifie par calcul que ce myope peut voir des objets à l'infini( $'\infty$) avec des verres de vergence $C_v = -1.25\,\delta$.

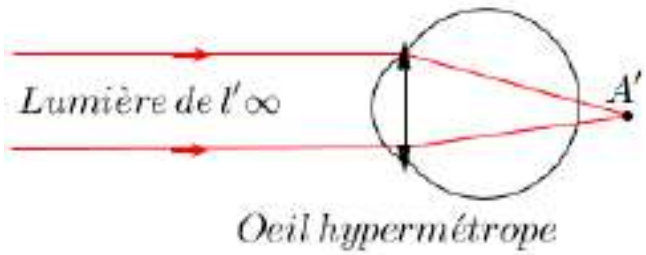
Exemple 6:
Un œil myope voit distinctement des objets entre 16 cm et 150 cm.

1. Quelle est la vergence des verres de correction qui lui permettent de voir des objets à l'infini($\infty$).
2. Quel est le punctum proximum $PP_c$ de l'œil avec les verres ?
3. Quel est le champ de vision de l'œil avant et après sa correction ?

1. $C_v = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{(-15010^{-2})} - \frac{1}{-\infty} = -0.667\,\delta(\text{ dioptrie }).$
2. $\overline{pp_c}$ = position de l'objet pour laquelle son image donnée par les verres de correction se forme au $\overline{pp_n}(16\text{ cm})$.
   $C_v = \frac{1}{\overline{pp_n}} - \frac{1}{\overline{pp_c}} \rightarrow -0.83 = \frac{1}{-0.16} - \frac{1}{pp_c} \mapsto pp_c = -18.4\text{ cm}.$
3. Sans correction le myope voit entre16 cm et 150 cm.
   Avec correction le myope voit entre 18,4 cm et l' $\infty$
   Œil corrigé $\Leftrightarrow$ œil normal avec: PR à $\infty$ et pp à 18,4 cm.

# Correction de l'hypermétropie تصحيح طول النظر

Le punctum remotum de l'œil hypermétrope PR est virtuel(derrière la rétine).

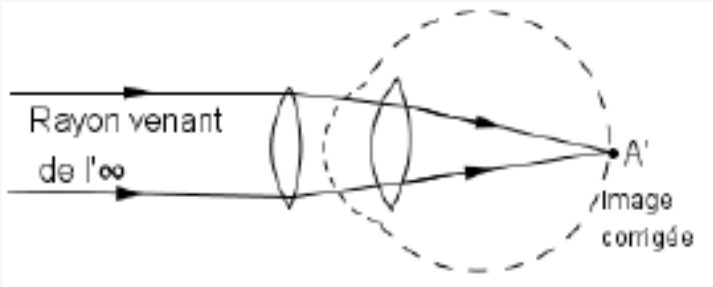



- Le PP de cet œil est plus loin que celui de l'œil normal($PP > 25\,cm$).
- L'hypermétrope accommoder pour voir des objets entre l'$\infty$ et le PP.

On corrige l'hypermétropie par des verres convergents qui donnent d'un objet A à l'infini une image A' sur la rétine comme le montre la figure.

Vergence de correction.

$$C_v = \frac{1}{\overline{PR}} - \frac{1}{-\infty} = \frac{1}{\overline{PR}}$$




Le PR se trouve après la rétine, $\overline{PR} > 0 \mapsto C_v > 0$

# Exemple 7

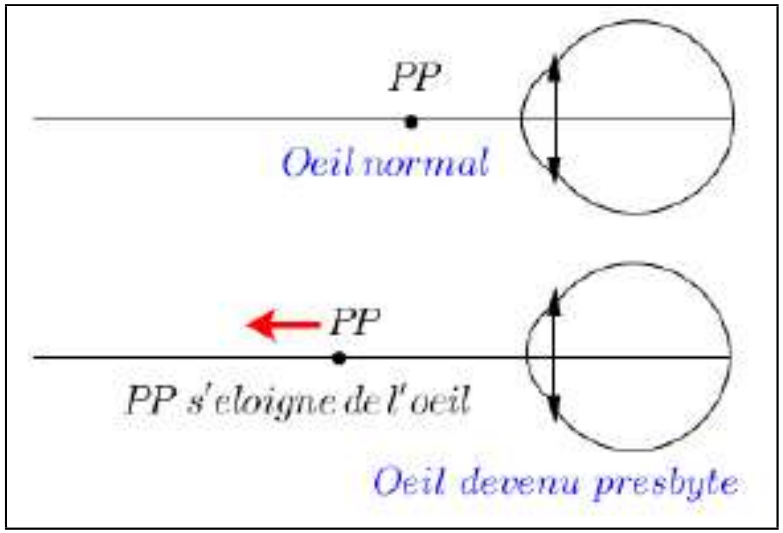
Un hypermetrope dont le pp est à 60 cm de l'œil veut examiner un objet situé à 25 cm à l'aide des lentilles de correction. Déterminer la vergence de ces lentilles.

1. L'hypermétrope voit des objets au pp naturel($pp_n$)avec accommodation maximum.
2. On choisit une lentille qui donne d'un objet à 25 cm une image au $pp_n \mapsto$ OA= -25 cm, OA'= - 60 cm .
   $C_{contact} = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{-6010^{-2}} - \frac{1}{-2510^{-2}} = 2.33\,\delta$

# Correction de la presbytie تصحيح تراجع البصر

- Avec l'age l'œil perd progressivement sa faculté d'accommodation car les muscles ciliaires qui commandent le cristallin deviennent régides.
- Le presbyte voit des objets situés au PR sans accommodation.

- Le PP s'eloigne progressivement $\mapsto$ correction de vision de près.
- Correction: lentille convergente qui donne d'un objet une image formée au PP naturel.



# Exemple 8

Le punctum proximum d'un œil presbyte est à 50 cm de l'œil.

1. Calculer la vergence de l'œil quand le presbyte regarde un objet au PP.
2. Déterminer la vergence de la lentille qui lui permet de lire à 25 cm?

1. Objet au pp $\overline{OA} = -0.50\,m$
   Image sur la rétine $\overline{OA'} = +0.015\,m \mapsto$
   $C_{oeil} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{0.015} - \frac{1}{-0.5} = 68,166\,\delta.$
2. Objet à 25 cm $\overline{OA} = -0.25\,m$ .
   Image au PP $\overline{OA'} = -0.50\,m \mapsto$
   $C_{verre} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{-0.5} - \frac{1}{-0.25} \mapsto C_{verre} = +2\delta$ (lentille convergente).

# Instruments d'optique اجهزة البصريات

Nous considérons dans ce qui suit deux instruments d'optique, la loupe et le microscope optique.

1. La loupe العدسة المكبرة
2. Le microscope optique المجهر البصري

# La loupe العدسة المكبرة

# La loupe – Plan du cours

- Formation de l'image تكوين الصورة
- Puissance قوة العدسة
- Grossissement تضخيم العدسة
- Mise au point ضبط( تركيز) العدسة



# Formation de l'image تكوين الصورة

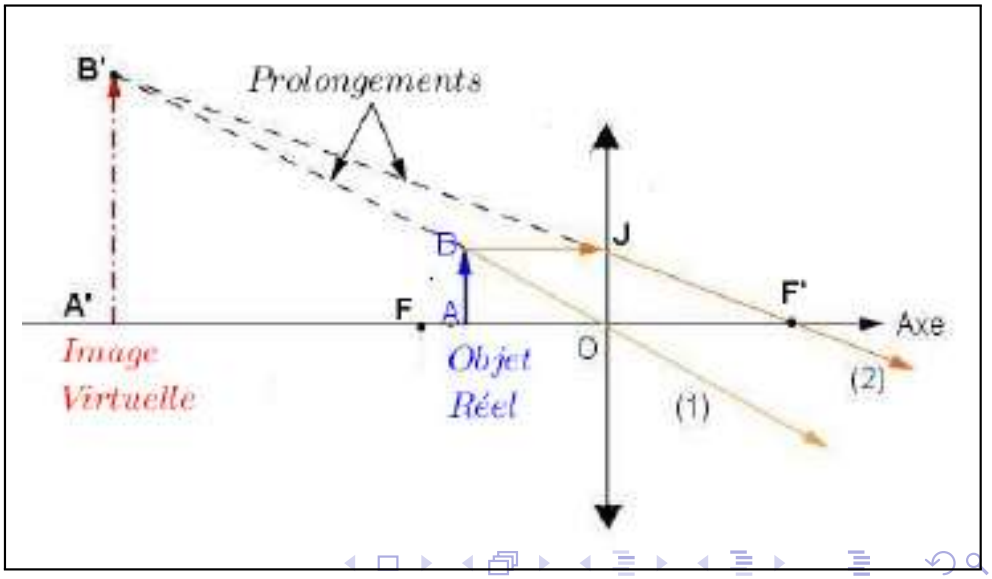
La loupe est une lentille convergente de distance focale, $OF' \ll PP$.
Pour examiner un objet réel AB, on le place entre le foyer F et le centre O et on trace l'image A'B' en considèrant deux rayons lumineux issus de B:

1. Le rayon(1) passe par le centre optique sans déviation.
2. Le rayon(2) parallèle à l'axe se réfracte en passant par le foyer F'.
3. Les rayons (1) et (2) ne se rencontrent pas après réfraction, on les prolonge jusqu'à leur intersection virtuelle en B'.

$$A'B' = \begin{cases} \text{image virtuelle تقديرية} \\ \text{image agrandie مكبرة} \end{cases}$$

Taille de l'image(حجم الصورة):

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



# Exemple 9

Une lentille convergente de 2 cm de distance focale est utilisée comme loupe pour examiner un petit objet réel AB= 2.5 mm, placé à 1.5 cm devant la lentille.

1. Déterminer la position OA' de l'image A'B' donnée par la lentille.
2. Quel est le grandissement de cette lentille ?
3. Quelle est la taille( grandeur) de l'image A'B' ?

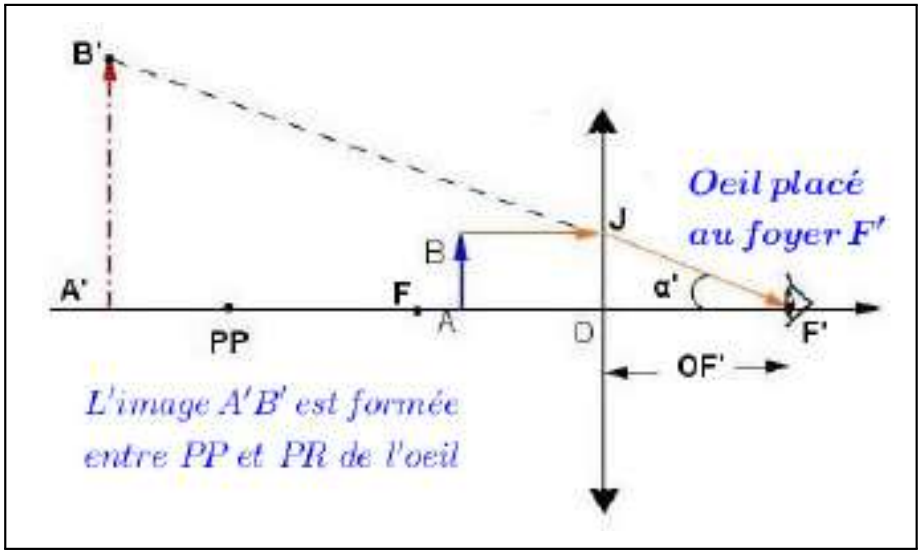
1. Objet réel avant la loupe $\triangleright$ $\overline{OA} = -1.5cm$
   Loupe$\mapsto$ lentille convergente $\triangleright$ $\overline{OF'} = +2cm$
   Position image:
   $\overline{OA'} = \overline{OA}/(1 + \overline{OA}/\overline{OF'}) = -1.5cm/(1. + (-1.5/2)) = 6\,cm.$
2. Grandissement $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{6cm}{-1.5cm} = 4.$
3. Grandeur de l'image $A'B' = \gamma \times AB = 4 \times 2.5\,mm = 1\,cm.$

# Puissance de la loupe قوة العدسة المكبرة

Pour examiner un objet AB avec une loupe, l'image A'B' de l'objet doit etre formée entre le PP et le PR de l'œil.

Un œil placé en F', observe l'image sous un angle $\alpha'$ et on définit la puissace de la loupe par: $\boxed{P = \frac{\alpha'}{AB}}$ en $m^{-1}$( dioptrie).

avec $\alpha' = \frac{OJ}{OF'} = \frac{AB}{OF'} \mapsto \boxed{P = \frac{1}{OF'} = C}$




- Si l'œil est à la distance x de F', la puissance devient $\boxed{P = \frac{1}{OF'}(1 - \frac{x}{z})}$, où z est la position de l'image par rapport à l'œil.
- Pour x=0 (œil placé au foyer image F') la puissance devient $\boxed{P = \frac{1}{OF'} = C}$.

# Exemple 10

Pour examiner des caractères de petite taille de l'ordre de 0.1 mm sur un texte, un observateur utilise une loupe de puissance 50 $\delta$ en plaçant son œil au foyer image F' de la loupe.

1. Quelle est la distance focale f' de la loupe en cm ?
2. Sous quel angle l'œil observe-t-il l'image donnée par la loupe?

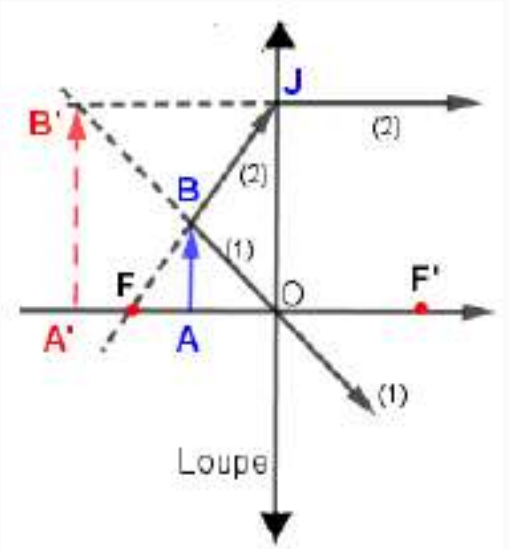
1. Puissance (œil en F'), $P = \frac{1}{\overline{OF'}} \rightarrow \overline{OF'} = \frac{1}{50}\, m = 2\, cm.$
2. $P = \frac{\alpha'}{AB} \mapsto \alpha' = 50\, m^{-1} \times 0.1\, 10^{-3} m = 5\, 10^{-3}\, radians$

Construction de l'image:

• Le rayon(1)passe par le centre O sans déviation.

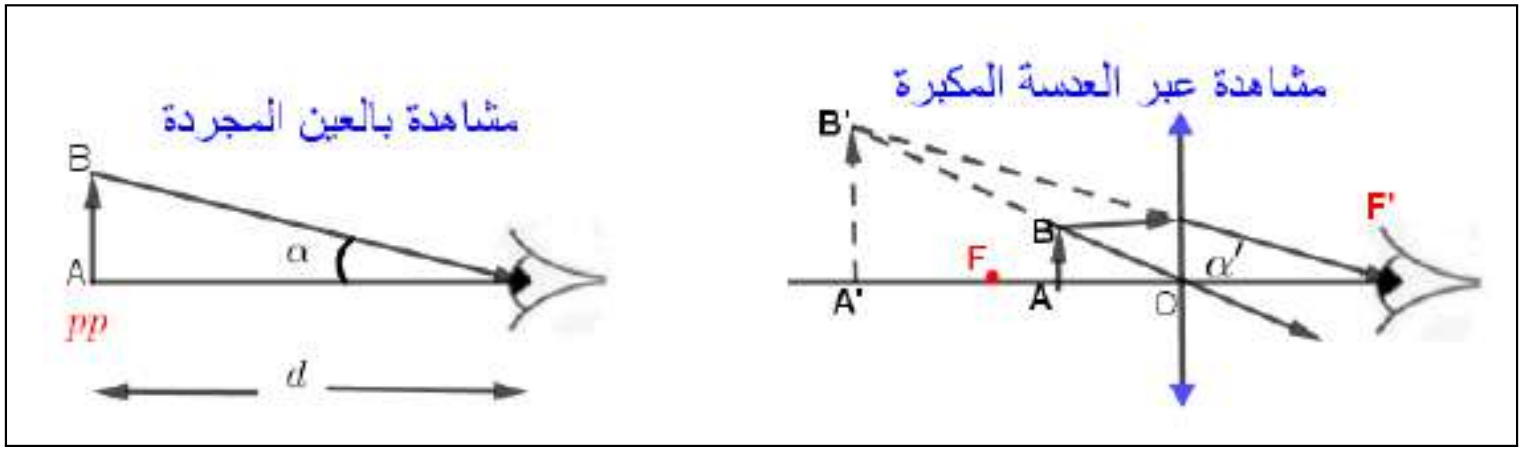
• Le rayon BJ(2) dont le prolongement BF(- -) passe par le foyer F, se réfrécte parallèlement à l'axe.

• le point image B' est définie par l'intersection des prolongements BB' et JB'sur la figure.



# Grossissement de la loupe تضخيم العدسة

- Un œil nu observe un objet AB placé à la distance minimale d de vision distincte sous un angle $\alpha = \frac{AB}{d}$.
- A travers la loupe, l'œil observe l'image A'B' d'un objet AB, sous un angle $\alpha' = P \times AB$.




1. Le grossissement de la loupe est défini par$\mapsto$ $\boxed{G = \frac{\alpha'}{\alpha} = P \times d}$.
2. Le grossissement commerciale $G_C$ de la loupe est défini pour une distance minimale de vision distincte d=25 cm (œil normal).

   Pour d= 25 cm= $\frac{1}{4}\,m \mapsto$ $\boxed{G_c = P \times d = \frac{G}{4}}$.

# Exemple 11

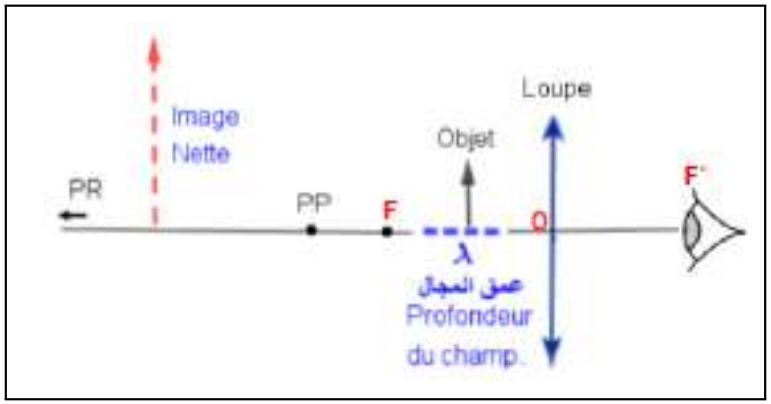
Une personne dont le PP est à 20 cm de l'œil utilise une loupe qui produit une image agrandie d'un facteur 5x. La personne plaçe son œil au foyer F' et examine l'image A'B' avec accommodation maximum.

1. Déterminer le grossissement de la loupe.
2. Sous quel angle $\alpha'$ l'œil voit-il l'image d'un objet AB=0.2 mm à travers cette loupe?

1. Soit A'B' l'image de l'objet AB à travers la loupe $\mapsto \frac{A'B'}{AB} = 5$.
   -Accommodation maximum$\mapsto$image au PP $\mapsto \alpha' = \frac{A'B'}{d}$
   - Observation à l'œil nu $\mapsto \alpha = \frac{AB}{d}$.
   - Grossissement $G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A'B'/d}{AB/d} = \frac{A'B'}{AB} = 5$.
   - Puissance:$P = \frac{G}{d} = \frac{5}{2010^{-2}} = 25\,\delta \mapsto f = \frac{1}{P} = \frac{1}{25} = 0.04\,m$
2. L'œil voit l'image de l'objet AB=0.2 mm sous un angle:
   $\alpha' = AB \times P = 0.2\,10^{-3}(m) \times 25(m^{-1}) = 5\,10^{-3} radians$

# Mise au point de la loupe تركيز(ضبط)العدسة المكبرة

Il s'agit de déplacer l'objet sur une petite distance $\lambda$ entre le centre O et le foyer F, jusqu'à observer une image nette(plus facile$\mapsto$ fixer l'objet et déplacer la lentille).




Pour un œil placé au foyer image F', la lattitude de mise au pointمسافة التركيز(profondeur de champعمق المجال) est donnée par

$$\lambda = f^2(\frac{1}{\overline{PR}} - \frac{1}{\overline{PP}})$$

Exemple 12:

Pour un œil normal( $PR \mapsto \infty$ et PP= 25 cm) placé au foyer image F' d'une loupe de distance focale f= 2 cm, la profondeur du champ est $\rightsquigarrow \lambda = f^2(\frac{1}{\overline{PR}} - \frac{1}{\overline{PP}}) = 2^2 \times (\frac{1}{-\infty} - \frac{1}{-25}) = 0.16cm = 1.6$ mm.

# Exemple 13

Un myope voit distinctement entre 16 cm, et 80 cm. Il utilise une loupe de distance focale 4 cm pour examiner un objet AB $= 0.1$ mm situé entre le centre optique O et le foyer F. L'œil est plaçant au foyer image F'.

1. Sous quel angle $\alpha'$ le myope voit-il l'image A'B' ?
2. Quelle est la puissance de la loupe ?
3. Déterminer le grossissement de la loupe
4. Calculer la lattitude de mise au point pour ce myope ?

Solution:
Données:$\mapsto$ $\overline{PP}$=- 16 cm, $\overline{PR}$=-80 cm, $\overline{OF'}$= 4 cm AB=0.1 mm.

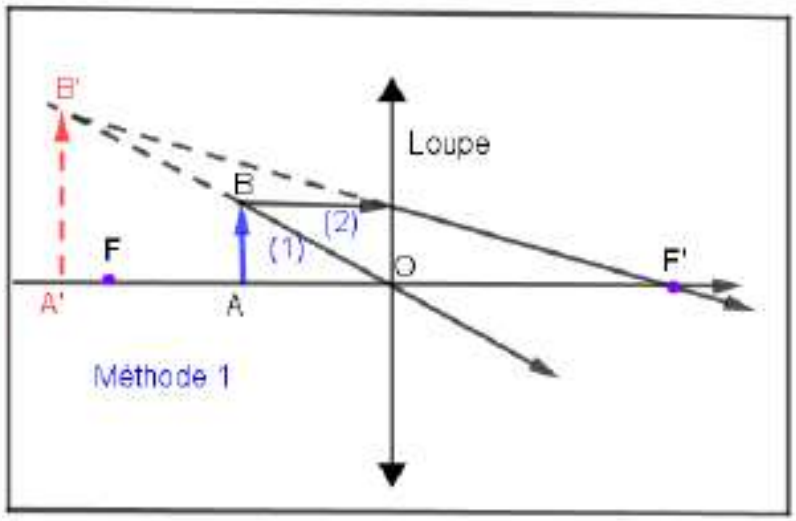
1. L'œil voit l'image sous : $\alpha' = \frac{AB}{OF'} = \frac{0.1mm}{40mm} = 25\,10^{-3} rd.$
2. Puissance de la loupe: $P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{25\,10^{-3}\,m}{0.1\,10^{-3}\,m} = \frac{25}{0.1} = 250\ \delta$
3. Grossissement de la loupe $G = P.d = 250\,m^{-1} \times 0.16\,m = 40.$
4. Lattitude de mise au point مسافة التركيز

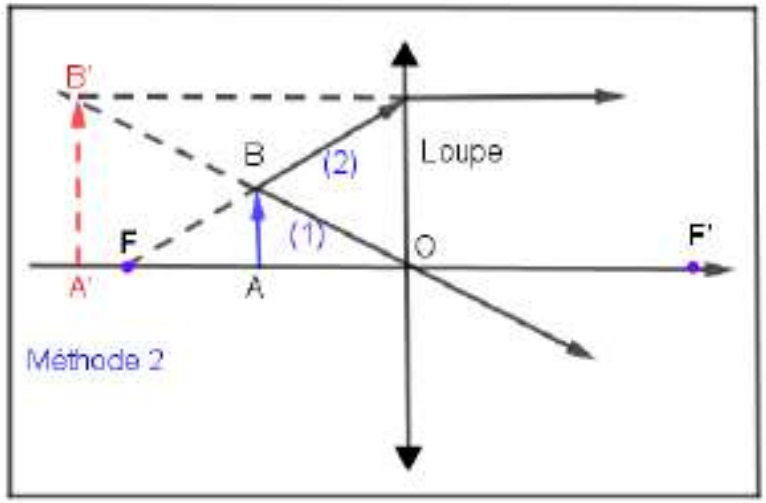
$$\lambda = \begin{cases} = f^2\,(\frac{1}{PR} - \frac{1}{PP}) \\ = 4^2 \times (\frac{1}{-80} - \frac{1}{-16}) = 0.8cm = 8\,mm. \end{cases}$$

# Construction géométrique de l'image البناء الهندسي للصورة

Un petit objet réel AB=8 mm est placé à 1.6 cm devant une loupe de distance focale 3 cm. Déterminer la position et la taille de l'image A'B'. Tracer l'image par deux méthodes(voir lentilles).

$$\overline{OA'} = \begin{cases} = \overline{OA}/(1+\frac{\overline{OA}}{\overline{OF'}}) \\ = -1.6cm/(1+\frac{-1.6}{3}) \\ = -3.42\,cm \end{cases} \qquad A'B' = \begin{cases} = AB \times \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \\ = 8(mm) \times \frac{-3.43}{-1.6} \\ = 1.71cm \end{cases}$$



# المجهر البصري (الضوئي)
# Microscope optique

# Le microscope - plan du cours

- Objectif هدف استعمال المجهر
- Principe de base المبدأ الأساسي
- Puissance du microscope قوة المجهر
- grossissement تضخيم (تكبير)
- Mise au point ضبط المجهر
- Exemples أمثلة

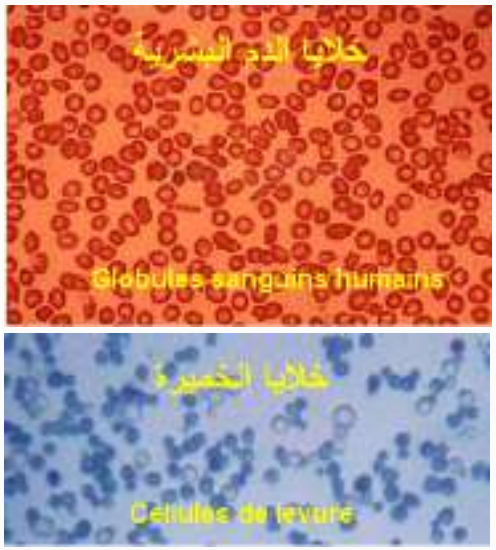


# But du microscope هدف المجهر

Microscope≡Instrument d'optique utilisant la lumière visible pour produire une image suffisamment agrandie, d'un micro organisme non visible à l'œil nu( cellules, verus,tissu biologique ...etc). Le microscope optique permet:

- D'examiner des détails très fins au niveau cellulaire.
- D'observer des mouvements dans des organismes vivants.
- De mesurer des tailles de l'ordre de $0.2\mu m$(cellules, virus, ..etc).

- Un œil nu normal peut observer des détails jusqu'à 0.1 mm.
- À travers un microscope l'œil peut examiner des détails $\geq 0.2\mu$ m.

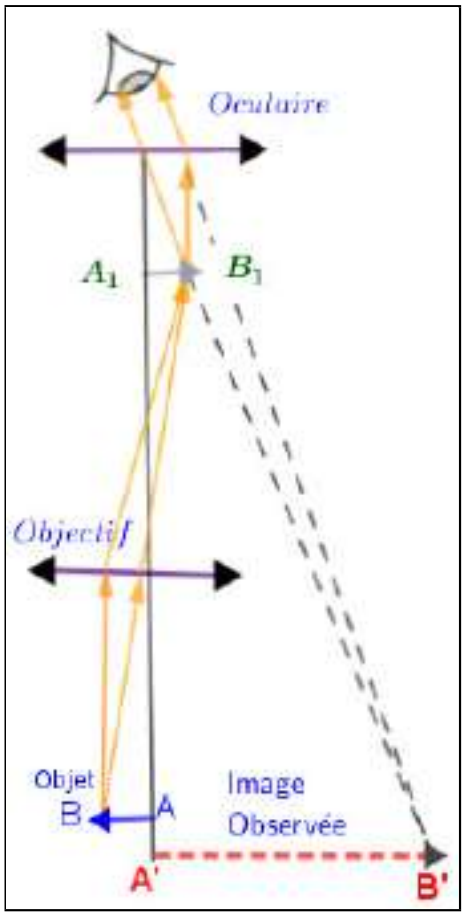


# principe de base المبدأ الأساسي

Le microscope est composé de deux systèmes optiques:

1. Un objectif عدسة شيئية $\mapsto$ une lentille convergente de distance focale $f_1$ ($\sim mm$).
2. Un oculaire عدسة عينية $\mapsto$ une lentille convergente de distance focale $f_2$($\sim cm$).

- Pour un micro organisme AB, l'objectif donne une image $A_1B_1$ formée avant l'oculaire($\sim$ foyer objet).
- L'oculaire qui joue le rôle d'une loupe donne, à son tour de $A_1B_1$ une image finale A'B' très agrandie.
- Pour avoir l'image A'B' entre le PR et le PP de l'œil utilisant le microscope, on fait une mise au point de l'appareil ضبط المجهر.

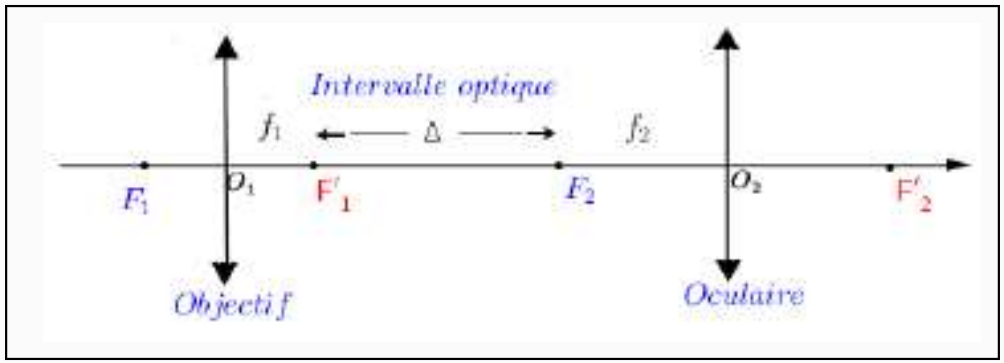


# Exemple 1

Assimilées à des lentilles minces de même axe optique, l'objectif et l'oculaire d'un microscope, ont des distances focales respectivement, $f_1 = 5\,mm$ et $f_2 = 1.5\,cm$. Leurs centres $O_1$ et $O_2$ sont distants de 20 cm. Quel est l'intervalle optique المجال البصري $\Delta$ du microscope ?

Intervalle optique $\mapsto \Delta = O_1O_2 - f_1 - f_2 = 20 - 0.5 - 1.5 = 18\,cm$

En réalité, l'intervalle optique $\Delta$ est normalisé à 16 cm ou à 18 cm.

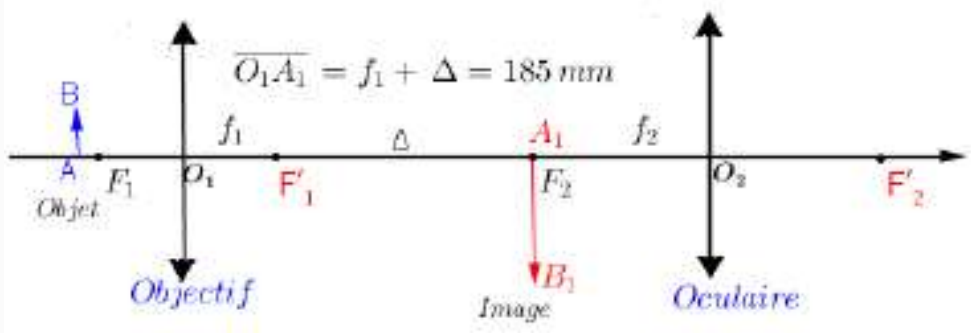


# Exemple 2

On veut observer un objet AB dans un microscope ayant les caractéristiques suivantes $f_1 = 5\,mm$, $f_2 = 15\,mm$ et $\Delta = 18cm$ .
A quelle position $\overline{O_1A}$ de l'objectif doit-on placer l'objet, pour que son image $A_1B_1$ se forme au foyer objet $F_2$ de l'oculaire(vision à l'infini) ?

L'image $A_1B_1$ étant formée au foyer $F_2$ de l'oculaire, sa position par rapport à l'objectif est: $\overline{O_1A_1} = f_1 + \Delta = 185mm$.
$\overline{O_1A} = \overline{O_1A_1}/(1 - \overline{O_1A_1}/f_1) = 185/(1 - 185/5) = -5.14mm$
Grandissement

$$\gamma_{obj} = \begin{cases} = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = \frac{\Delta}{f_1} \\ = \frac{18cm}{0.5cm} = 36 \end{cases}$$

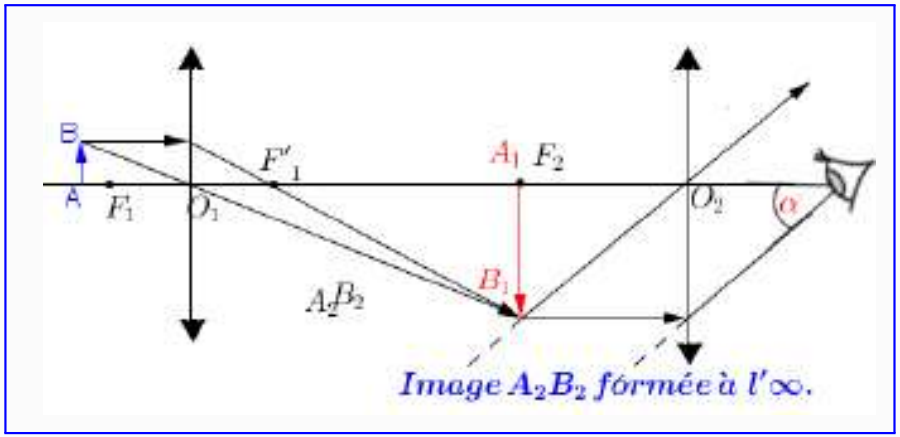


# Exemple 3

Dans l'exemple 2, l'image $A_1B_1$ donnée par l'objectif devient objet réel pour l'oculaire. Déterminer la position $\overline{O_2A_2}$ de l'image finale $A_2B_2$ donnée par l'oculaire.

L'image réelle $A_1B_1$(en rouge) donnée par l'objectif est formée avant l'oculaire à la position $\overline{O_2A_1} = \overline{O_2F_2} = -15\,\text{mm}$et devient un objet réel pour l'oculaire qui donne de cet objet une image $A_2B_2$ ( à l'$\infty$). La position $\overline{O_2A_2}$ est donnée par l'équation : $\frac{1}{\overline{O_2A_2}} - \frac{1}{\overline{O_2A_1}} = \frac{1}{f_2}$

$\overline{O_2A_2} = \overline{O_2A_1}/(1 + \overline{O_2A_1}/f_2)$
$\overline{O_2A_2} = -15/(1 - 15/15)$
$\overline{O_2A_2} = \infty \mapsto$ image virtuelle formée à l'infini.



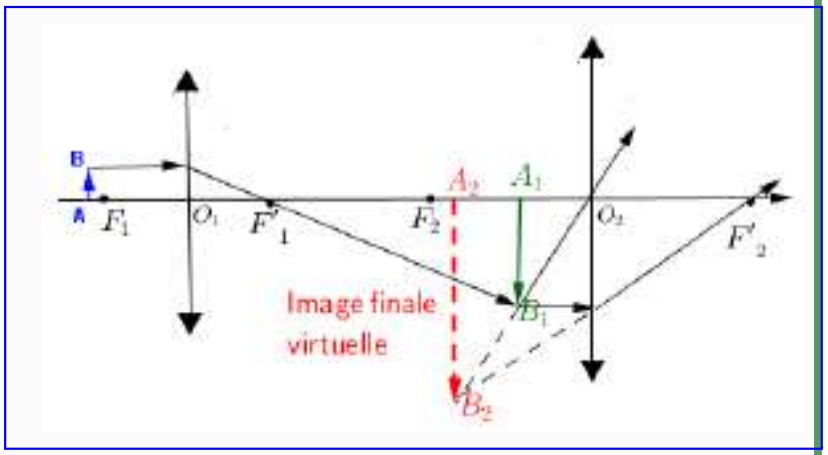
# Exemple 4

On veut que l'objectif donne de AB une image $A_1B_1$ formée à 5 mm de l'oculaire, déterminer la position de l'objet.

- Calculer la position de l'image $A_2B_2$ donnée par l'oculaire.
- Quelles sont la nature et la grandeur( la taille) de l'image $A_2B_2$.

•Position image $A_1B_1$ /objectif: $\overline{O_1A_1} = O_1O_2 - 5 = 195mm$,
position objet /objectif: $\overline{O_1A} = \overline{O_1A_1}/(1 - \overline{O_1A_1}/f_1)$
$\overline{O_1A} = 195mm/(1 - 195mm/5mm) = -5.13\,mm$
• Position image $A_2B_2$ : $\overline{O_2A_2} = \overline{O_2A_1}/(1 + \overline{O_2A_1}/f_2)$
$\overline{O_2A_2} = -5mm/(1 + (-5mm/15mm) = -7.5\,mm.$

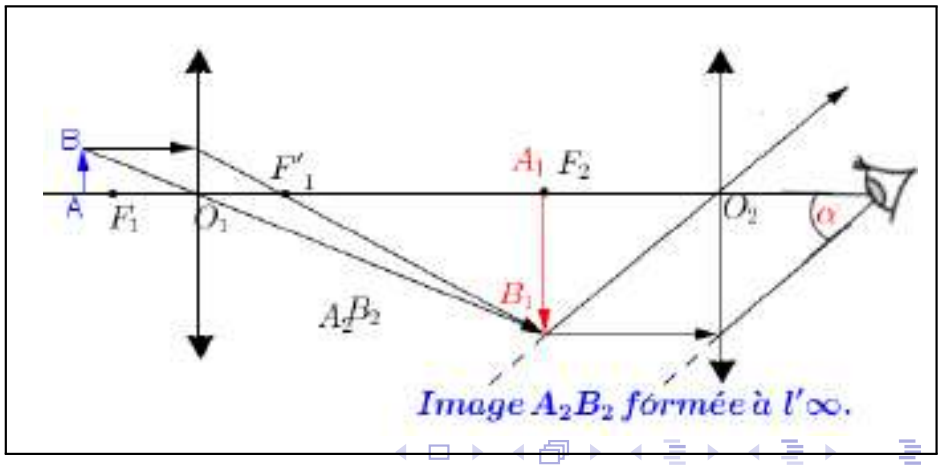
$$A_2B_2 = \begin{cases} \textit{image virtuelle} \\ = \dfrac{\overline{O_2A_2}}{\overline{O_2A_1}} = \dfrac{-7.5}{-5} \\ = 1.5 \times AB \end{cases}$$



# Puissance du microscope قدرة(قوة) المجهر

- Dans un microscope l'œil observe l'image A'B' d'un micro organisme de grandeur AB, sous un angle $\alpha'$.
- La puissance du microscope est définie par $\mapsto$ $\boxed{P = \frac{\alpha'}{AB}}$.
  avec $\alpha'$ en radian, AB en m et P en $m^{-1}$, en dioptrie($\delta$).
- Pour examiner un objet AB sans accommoder, on règle le microscope sur une vision à l'infini(œil normal). Pour cela,l'image$A_1B_1$ doit se former au foyer objet $F_2$ de l'oculaire de sorte que l'image finale $A_2B_2$ se forme à l'infini comme le montre la figure ci-dessous.

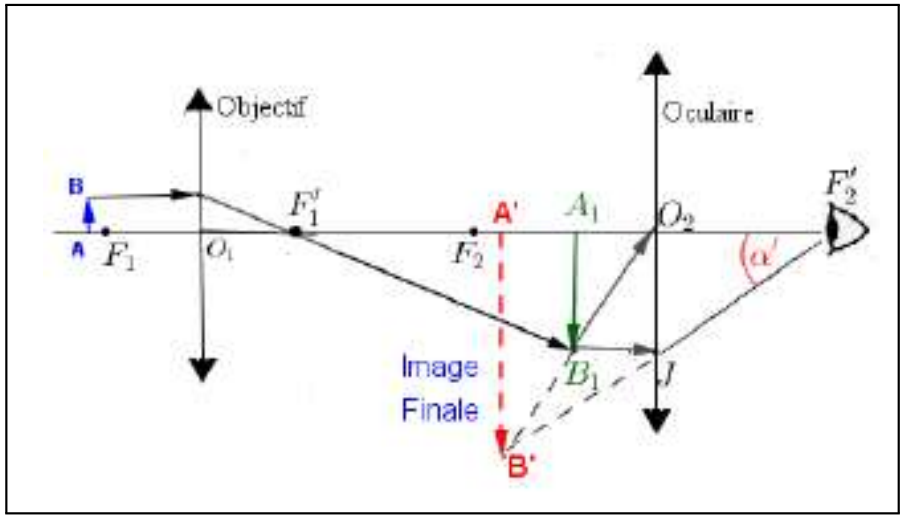
Dans le cas d'une vision à l'infini,la puissance(intrinsèque), devient $\boxed{P_{int} = \frac{\Delta}{f_1 f_2}}$.



# Grossissement du microscope تضخيم (تكبير) المجهر

Grossissement≡ rapport entre l'angle $\alpha'$ sous lequel l'œil voit l'image A'B' à travers le microscope et l'angle $\alpha$ sous lequel l'œil nu observe l'objet placé au PP

$\rightsquigarrow$ $\boxed{G = \frac{\alpha'}{\alpha} = P.d}$




- Grossissement dit commercial pour d= 25 cm $\mapsto$ $G_c = Px0.25 = \frac{P}{4}$.
- Observation à l'infini (A'B' à l'infini): $G = \frac{\Delta}{f_1 f_2}.d \mapsto \boxed{G = \gamma_{ob}.G_{oc}}$
- Exemple: $\gamma_{ob} = 40$ et $G_{oc} = 10 \mapsto G_{microscope} = 400$

# Exemple 5

Dans un microscope l'intervalle optique est $\Delta$= 16 cm, la distance focale de l'objectif $f_1 = 4$ mm, et celle de l'oculaire $f_2 = 2.5$ cm. Une personne ayant une vision normale( d=25 cm) examine au microscope une préparation (objet AB) biologique sans accommodation, en plaçant son œil au foyer image de l'oculaire.

1. A quelle distance de l'objectif se trouve la préparation ?
2. Tracer l'image A'B' de l'objet AB donnée par le microscope.
3. Calculer la puissance du microscope
4. Caculer le grossissement du microscope.

## Solution

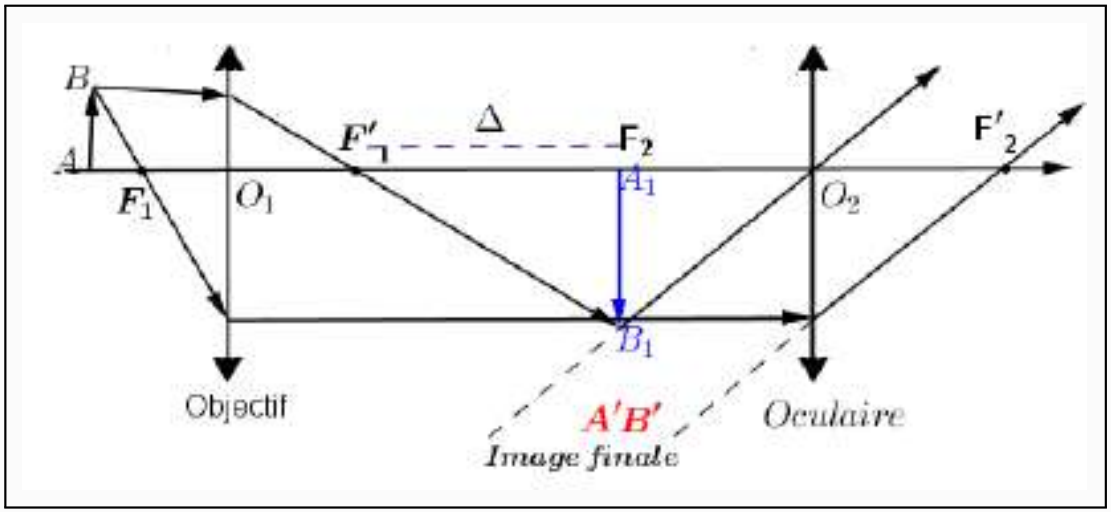
1. Observation sans accommodation$\mapsto$ image finale A'B' au PR(à l'$\infty$), donc l'image$A_1B_1$ donnée par l'objectif se form au foyer objet $F_2$ de l'oculaire: $O_1A_1 = O_1F_1' + \Delta = f_1 + \Delta = 164mm$

   On détermine la position $O_1A$ de l'objet par l'équation de conjugaison $\frac{1}{O_1A_1} - \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{f_1} \mapsto \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{164} - \frac{1}{4} \mapsto$ $O_1A = -4.1\,mm$

2. Observation à l'infini$\mapsto$ Puissance intrinsèque: $P = \frac{\Delta}{f_1\,f_2} = \frac{160.10^{-3}}{4.10^{-3}x25.10^{-3}} = 1600\ \delta.$

Grossissement

$$G = \begin{cases} = P.d \\ = 1600x0.25 \\ = 400 \end{cases}$$



# Mise au point du microscope ضبط المجهر

Il s'agit de déplacer l'ensemble du tube optique du microscope par rapport à l'objectif,jusqu'à obtenir une image nette(صورة واضحة)formée entre:

- Le punctum proximum PP pour une position $\overline{OA_p}$ de l'objet.
- Le punctum remotum PR pour une position $\overline{OA_R}$ de l'objet.

La distance entre $\overline{OA_p}$ et $\overline{OA_R}$ définit la profondeur du champ:

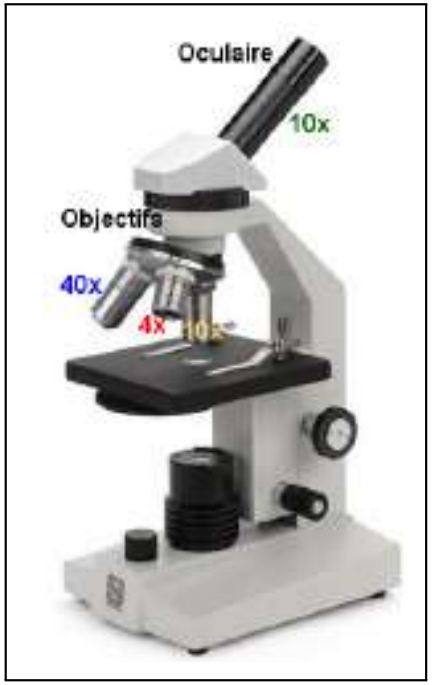
$$\lambda = \overline{OA_R} - \overline{OA_p} = f^2.(\frac{1}{PR} - \frac{1}{PP}) \text{ où } f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$$

Exemple 6: Un œil normal dont le pp=d=250 mm, utilise un microscope ayant les caractéristiques: $f_1 = 4$ mm, $f_2 = 25$ mm,et $\Delta = 160$ mm. Calculer la profondeur du champ.

$$\lambda = \begin{cases} = f^2.(\frac{1}{PR} - \frac{1}{PP}) \\ = (\frac{f_1 f_2}{\Delta})^2 \times (\frac{1}{\infty} - \frac{1}{d}) \\ = (\frac{4x25}{160})^2 \times (\frac{1}{250}) = 0.00156mm = 1.56\,\mu m \end{cases}$$

# Applications en Biologie تطبيقات في البيولوجيا

Lorsqu'on examine au microscope, un objet de taille AB, son image $A_1B_1$ à travers l'objectif, est le produit de la taille AB par le grandissement $\gamma_{ob}$ de l'objectif utiliisé, $\mapsto A_1B_1 = AB \times \gamma_{ob}$, où $\gamma_{ob} = 4\times, 10\times$ *ou* $40\times$..
L'image $A_1B_1$ est, à son tour, agrandie à travers l'oculaire par le grossissement $G_{oc}(10\times) \mapsto$ Image A'B' observée:
Taille observée(A'B')= Taille réelle(AB)$\times\gamma_{ob} \times G_{oc}$.




La formule permet d'estimer les tailles des microorganismes observés dans un microscope à partir des images enregistrées. Cependant, pour une analyse d'images avec plus de précision, il est recommandé d'utiliser un logiciel approprié(comme le logiciel libre ImageJ. Les exemples suivants illustrent la méthode d'estimation des tailles.

Exemple 1

On observe au microscope des globules rouges avec un objectif de 40x et un oculaire de 10x. Les globules apparaissent sur une micrographie comme des disques d'environ 3.2 mm de diamètre. Estimer la taille réelle moyenne d'un globule rouge.

## Globule rouge

- Taille réelle( AB) $= \frac{\text{taille observée(A'B')}}{\gamma_{ob} \times G_{oc}} = \frac{3.2mm}{40 \times 10} = 0.008mm.$

  or $1mm = 10^3\ \mu m \mapsto$ $\boxed{\text{taille estimée}=8\mu m}$

- La taille d'un globule rouge trouvée dans d'autres estimations est d'environ $\sim 7\ \mu m$.

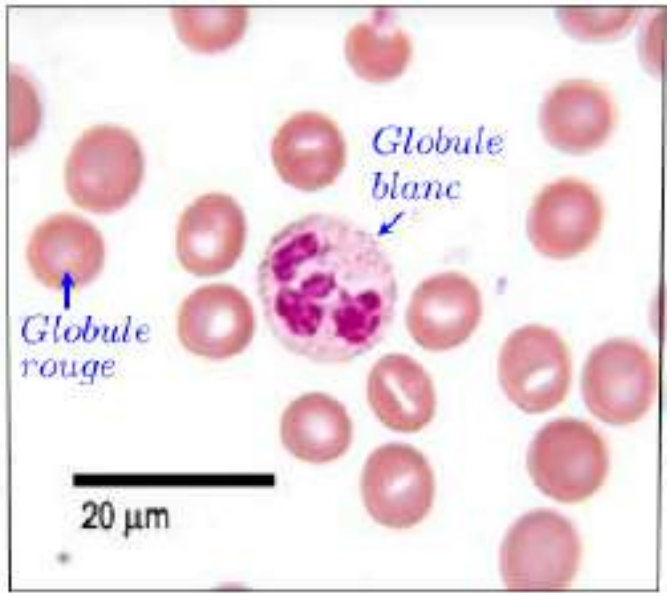


Globule rouge

## Exemple 2

La micrographie ci-contre montre un globule blanc entouré de globules rouges( Biology. Univ. Leeds, UK). Déterminer à l'aide de la barre d'échelle:

1. La taille moyenne du globule blanc
2. La taille moyenne d'un globule rouge.

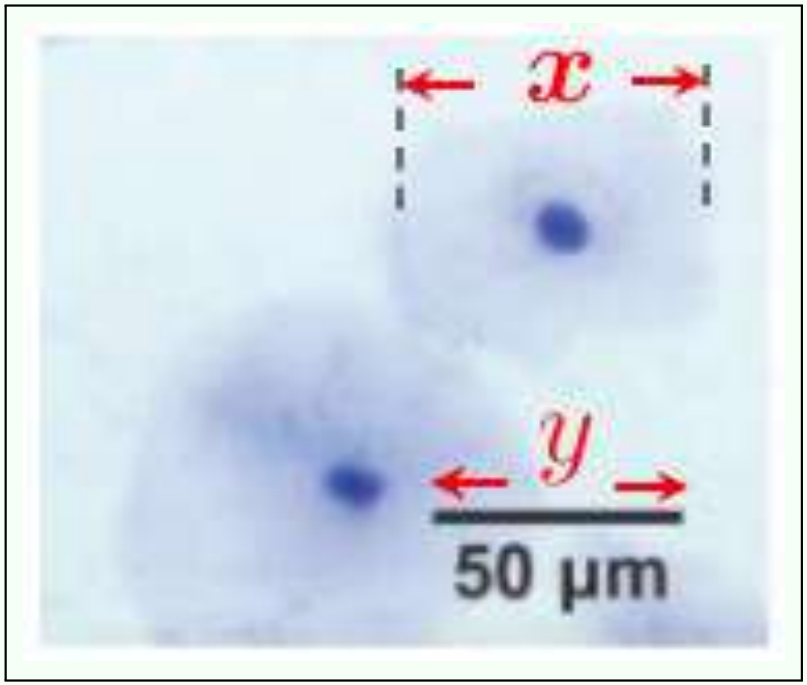



### Globule blanc

1. Taille du globule blanc $\mapsto$
   $AB = \frac{A'B'}{G} = \frac{21mm}{1500} = 0.014mm = 14\,\mu m$
2. Taille du globule rouge $\mapsto$
   $AB = \frac{A'B'}{G} \simeq \frac{11.5mm}{1500} \simeq 0.0077mm = 7.7\,\mu m.$

## Exercice d'application

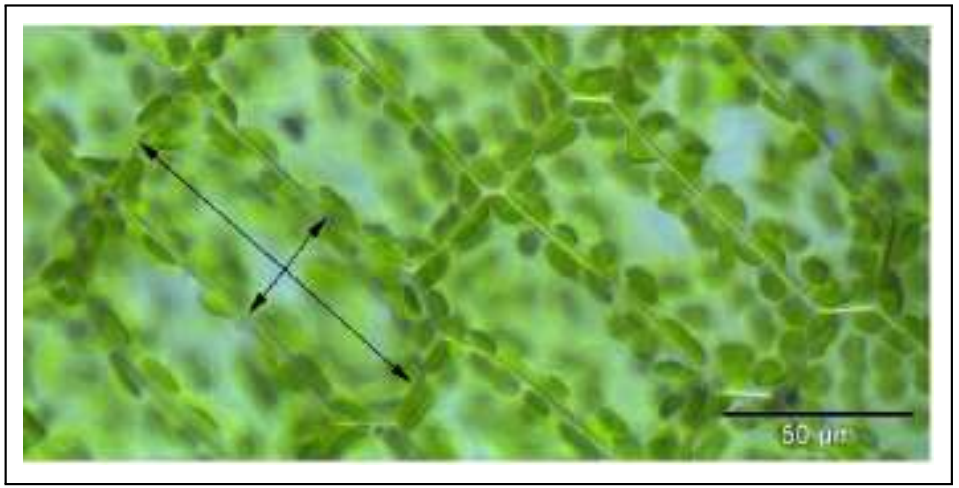
Des cellules buccales humaines observées dans un microscope optique, sont présentées sur la figure ci-contre. Mesurer avec une règle les grandeurs x et y en mm et estimer le diamètre x de la cellule sélectionée en $\mu m$ en utilisant la barre d'échelle de la figure.




Vérifier que le diamètre de la cellule sélectionnée sur l'image est $x \simeq 64.7\,\mu m$.

Exemple 3

La figure ci-contre( Wikipedia) représente une image de cellules végétales(elodea) prise au microscope optique avec un grossissement 400x. Estimer la taille moyenne réelle des cellules.




## Cellule végétale

- Taille de la cllule sur l'image originale $\simeq$ 4 cm = 40 000 $\mu m$
  Taille réelle = $\frac{40000}{400}$ = 100 $\mu m$
- Largeur de la cellule sur l'image originale $\simeq$ 1.7 cm.
  Largeur réelle $\simeq$ $\frac{17000}{400}$ = 42.5 $\mu m$

Exemple 4

Le microscope optique est, aussi, utilisé en geologie pour observer la structure des roches et minéraux . A titre d'exemple la micrographie ci-dessous illustre la structure de la surface d'un alliage d'Aluminium où les parties grises sont des grains de silicium( voir↦ researchgate.net).

## Structure des roches

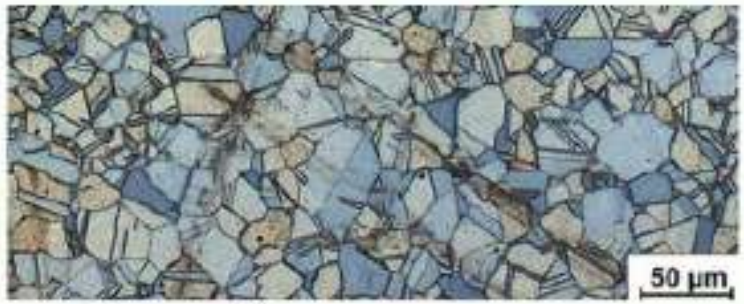
- La barre d'échelle sur l'image originale mesure environ $2\,cm \mapsto 50\,\mu m$.
  On estime Le grossissement commercial du microscope $G_c$:
  $\mapsto G_c = \frac{2cm}{50\,\mu m} = \frac{20000\mu m}{50\,\mu m} = 400x.$
- Connaissant $G_c$, on déduit la puissance intrinsèque du microscope. $G_c = P_i.d$ où d= 0.25 m est la distance minimale de vision distincte (œil normal)
  $P_i = \frac{G_c}{0.25} = G_c x4 = 1600\ \delta$ (dioptries).



## Structure de l'acier inoxydable(stainless steel)

A titre d'exemple d'application du microscope en minéralogie optique on peut citer, entre autre, l'observation de la structure de l'acier inoxydable(stainless steel).

La taille des grains meniraux qui apparaissent sur la surface peut être estimée en utilisant la barre d'échelle indiquée sur la micrographie.




▲ ↦ benguerba.usthb@gmail.com.