

# OPTIQUE

Optique géométrique	Optique physique
<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Généralités.</u></li><li>• <u>Éléments à faces planes.</u></li><li>• <u>Éléments à faces sphériques.</u></li><li>• <u>Systèmes centrés.</u></li><li>• <u>Caractéristiques d'un instrument d'optique.</u></li><li>• Instruments d'optique<ul style="list-style-type: none"><li>○ <u>lentilles minces</u></li><li>○ <u>loupe</u></li><li>○ <u>microscope</u></li><li>○ <u>lunette astronomique</u></li><li>○ <u>miroirs sphériques</u></li><li>○ <u>œil</u></li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Généralités.</u></li><li>• <u>Interférences localisées.</u></li><li>• <u>Interférences non localisées.</u></li><li>• <u>Polarisation.</u></li></ul>

Voir également :

- En complément des notes de cours ci-dessus, les notions théoriques associées aux [prépas TP](#) (section optique)
- En **optique géométrique**, pour vos révisions, [le formulaire](#) et [les QCM](#).

<b>Généralités</b>	
<b>Notes de cours</b>	<a href="#">Principe de FERMAT</a> <a href="#">Notion d'objet et d'image</a>
<b>Travail personnel</b>	<a href="#">Auto évaluation sur le cours (QCM)</a> <a href="#">Formulaire</a>

## Optique = Étude des phénomènes lumineux

La lumière se propage dans le vide à la vitesse  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s et dans les milieux matériels transparents à une vitesse  $v$  caractéristique du milieu. En conséquence un milieu sera caractérisé par :

- son **indice absolu**  $n$  :

$$n = c/v$$

- son **indice relatif** par rapport à un autre milieu :

$$n_{1/2} = n_1/n_2$$

$n_1$  et  $n_2$  sont les indices absolus des milieux en présence

### **I - Hypothèse fondamentale.**

#### **1 - Principe de Fermat.**

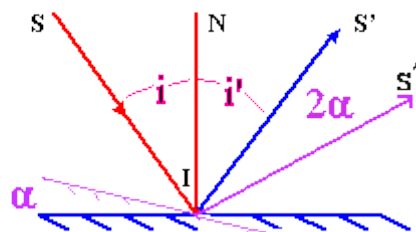
**Pour aller d'un point A à un point B , la lumière emprunte un chemin tel que le trajet AB soit de durée stationnaire.**

## 2 - Conséquences.

- propagation rectiligne de la lumière :
  - **le plus court chemin entre deux points est la ligne droite.**
- principe de retour inverse :
  - **le chemin suivi est indépendant du sens de parcours.**

On admettra l'indépendance des rayons lumineux.

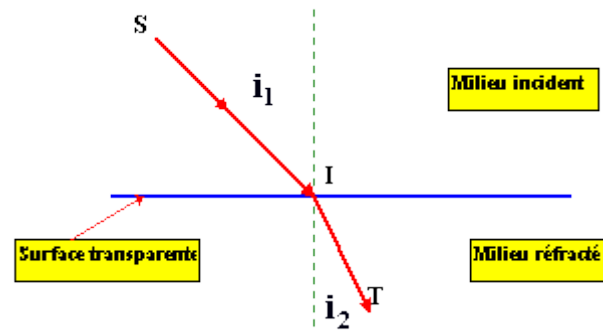
- lois de **DESCARTES** :
  - **pour la réflexion.**



**\* Rayon incident SI, rayon réfléchi IS' et normale IN sont dans un même plan**

**\*  $i = i'$**

- **pour la réfraction.**

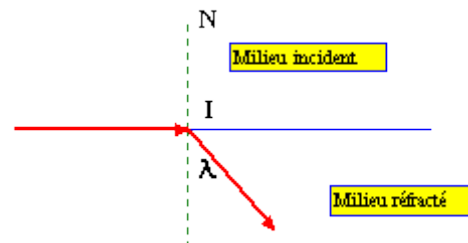


\* Rayon incident SI, rayon transmis IT et normale IN sont dans un même plan.

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

### Remarques :

- lorsque  $n_1 < n_2$ , le second milieu est plus réfringent, le rayon lumineux se rapproche de la normale. Si l'angle d'incidence est égal à  $\pi/2$ , alors l'angle de réfraction correspondant est l'angle de réfraction limite.

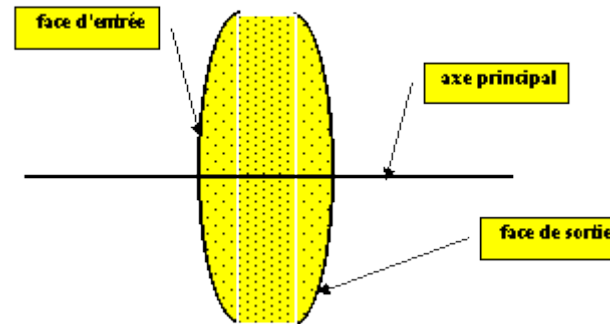


- principe de retour inverse : si le milieu incident est plus réfringent que le second milieu et l'angle d'incidence supérieur à l'angle de réfraction limite, le phénomène de réflexion totale se produit.

**II - Notion d'objet et d'image.**

## 1 - Systèmes optiques.

- Ensemble de milieux transparents séparés par des surfaces planes ou sphériques.



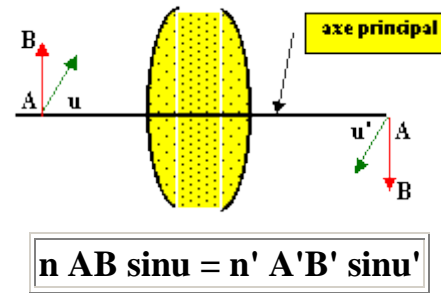
## 2 - Notion d'objet et d'image. Stigmatisme.

- Un point A a pour image A' si tous les rayons lumineux issus de ce **point A** concourent au **point A'**. Si un système satisfait à une telle propriété, c'est à dire que d'un objet ponctuel A il donne une image ponctuelle A', alors ce système est dit **stigmatique**.
- Par convention **les rayons réels** représentent le chemin effectivement suivi par la lumière et **les rayons virtuels** le prolongement.

## 3 - Stigmatisme approché : Conditions de stigmatisme de Gauss.

- Les conditions de stigmatisme sont rares ; les conditions de stigmatisme approché sont celles pour lesquelles l'image d'un point sera de dimension telle qu'elle puisse être assimilable à un point.
- Conditions de stigmatisme approché : **faisceau lumineux étroit , peu incliné sur l'axe du système** (optique paraxiale).

## 4 - Aplanétisme : objet plan ==> image plane si la condition d'Abbe est vérifiée.

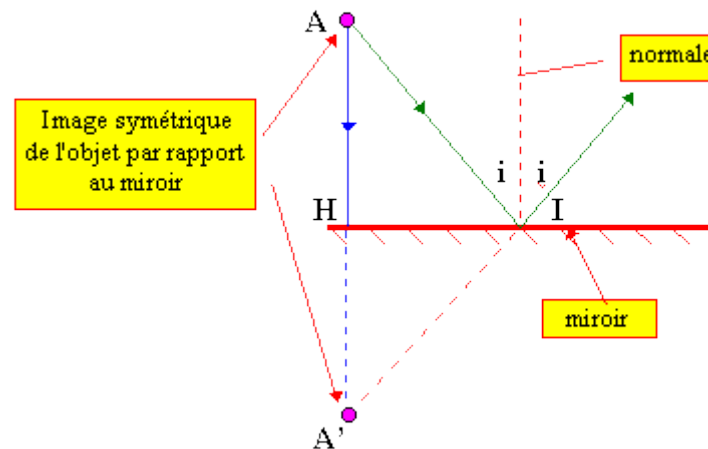


- $u$  et  $u'$  sont, respectivement, l'angle formé par l'axe du système avec la direction du rayon incident choisi et l'angle formé par l'axe et le rayon émergent correspondant.

<b>Éléments à faces planes</b>	
<b>Notes de cours</b>	<a href="#">Le miroir plan</a> <a href="#">Le dioptre plan</a> <a href="#">La lame à faces parallèles</a> <a href="#">Le prisme</a>
<b>Travail personnel</b>	<a href="#">Auto évaluation sur le cours (QCM)</a> <a href="#">Formulaire</a>

### **- I - Le miroir plan.**

- **Définition** : c'est une surface plane réfléchissante.



- **Image d'un point**

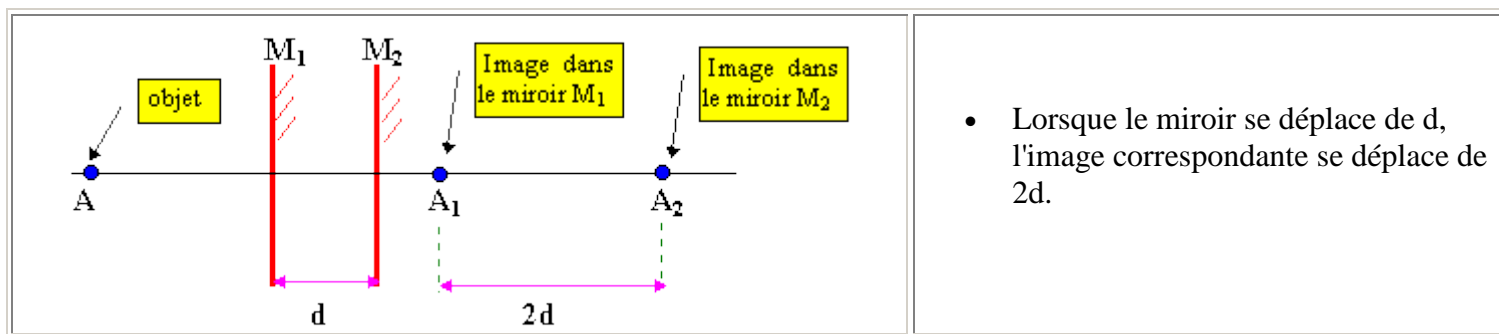
Un miroir plan est un dispositif stigmatique.

- **Relation de conjugaison objet - image.**

- Objet et image sont **symétriques** par rapport au miroir :  $IA = IA'$  , quel que soit le rayon lumineux utilisé pour la construction de l'image.
- Si l'objet est réel, l'image est virtuelle et inversement.

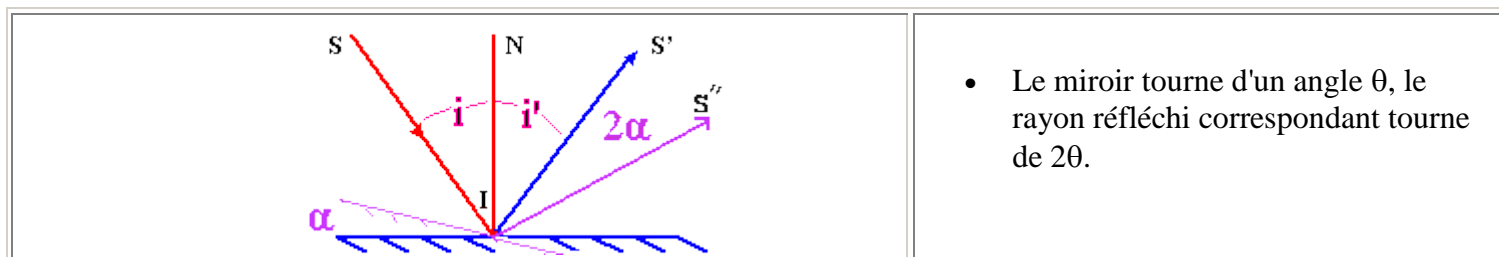
- **Déplacement du miroir.**

- translation.



- Lorsque le miroir se déplace de  $d$ , l'image correspondante se déplace de  $2d$ .

- **Rotation.**



- Le miroir tourne d'un angle  $\theta$ , le rayon réfléchi correspondant tourne de  $2\theta$ .

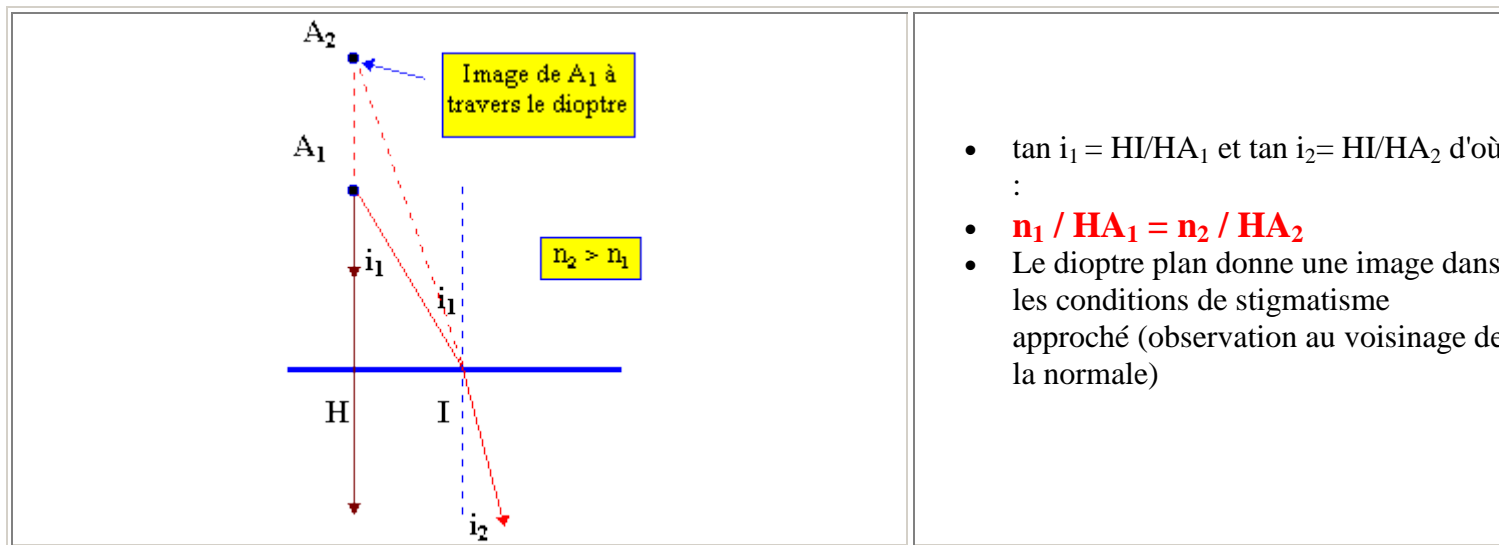


## - II - Le dioptre plan (en lumière monochromatique).

- Définition

Deux milieux transparents séparés par une surface plane. La surface plane est le dioptre plan.

- Image d'un point.



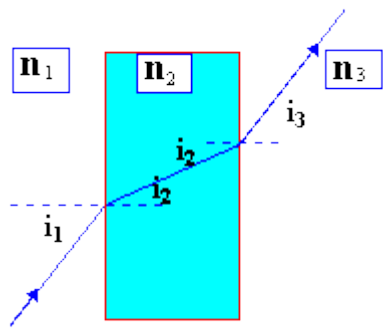
- $\tan i_1 = HI/HA_1$  et  $\tan i_2 = HI/HA_2$  d'où :
- $n_1 / HA_1 = n_2 / HA_2$
- Le dioptre plan donne une image dans les conditions de stigmatisme approché (observation au voisinage de la normale)

## - III - La lame à faces parallèles.

- Définition.

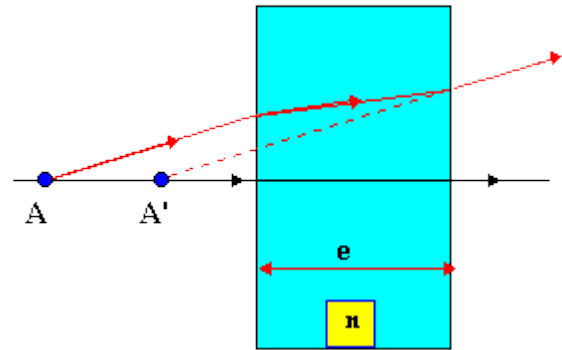
Milieu d'indice  $n$  limité par deux plans parallèles.

- Marche d'un rayon lumineux.



- $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 = n_3 \sin i_3$
- La direction du rayon émergent est indépendante de l'indice de la lame ; rayon incident et émergent sont **parallèles** si les milieux extrêmes sont identiques.

- Image d'un point objet A.

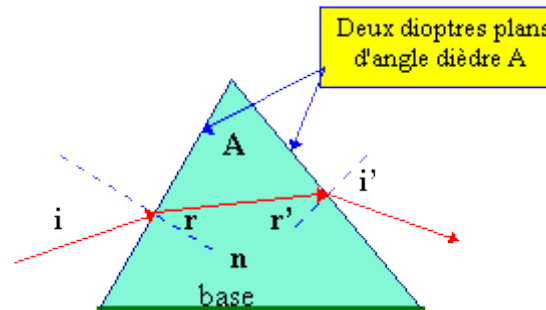


- $AA' = e(1 - 1/n)$
- Le déplacement objet - image s'effectue vers la lame.

#### - IV - Le prisme.

- Définition.

Milieu transparent d'indice  $n$  limité par deux plans non parallèles.



- **Relations du prisme.**

$\sin i = n \sin r$
$\sin i' = n \sin r'$
$r + r' = A$
$D = i + i' - A$

- **Condition d'émergence.**

- L'angle de réfraction à l'intérieur du prisme doit être inférieur à l'angle de réfraction limite  $\lambda$ .
- L'émergence n'a lieu que si :  $\pi/2 > i > i_0$  ;  $\sin i_0 = n \sin (A - \lambda)$ .

$i_0$  est l'angle d'incidence limite.

- **Étude de la déviation.**

- La déviation dépend de A, n et i :  $D = f(A, i, n)$ .
- D croît avec A et passe par un minimum  $D_m$  pour une valeur  $i_m$  située dans l'intervalle  $[i_0, \pi/2]$ .
- Au minimum de déviation :

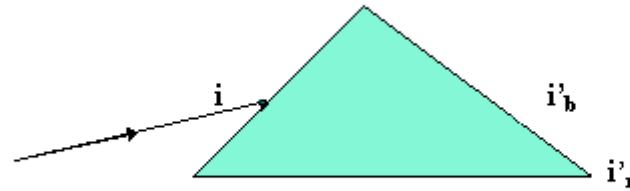
$i = i'$
$r = r' = A/2$

$$D_m = 2 i_m - A$$

$$n = \frac{\sin[(A + D_m)/2]}{\sin(A/2)}$$

- D varie avec la longueur d'onde de la lumière incidente ; en effet l'indice d'un matériau varie avec  $\lambda$  selon la Loi de Cauchy :  $n = P + Q/\lambda^2$ .

- Le phénomène de dispersion.

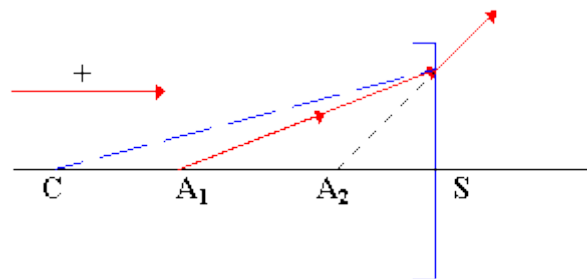


Au minimum de déviation pour la radiation moyenne :  $di' = 2 \tan i_m \cdot dn/n$ .

<b>Éléments à faces sphériques</b>	
<b>Notes de cours</b>	<a href="#">Le dioptre sphérique</a> <a href="#">Le miroir sphérique</a>
<b>Travail personnel</b>	<a href="#">Auto évaluation sur le cours (QCM)</a> <a href="#">Formulaire</a>

### - I - Le dioptre sphérique ( en lumière monochromatique).

- **Définition** : ensemble de deux milieux transparents séparés par une surface sphérique.
- **Image d'un point** (  $n_1 > n_2$  )



Le dioptre sphérique est **non stigmatique**

- **Relation de conjugaison objet - image** (sens positif conventionnel de la gauche vers la droite).

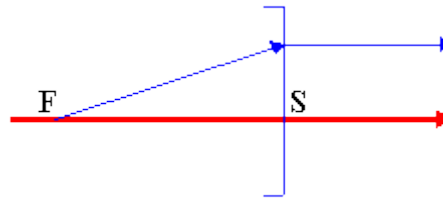
Origine au sommet	$n_1 / SA_1 - n_2 / SA_2 = (n_1 - n_2) / SC$
-------------------	--

Origine au centre

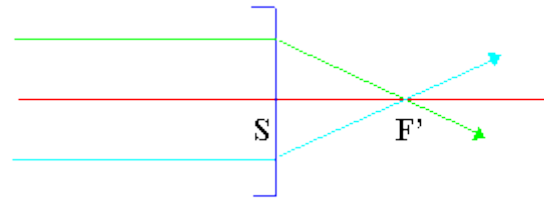
$$n_1 / CA_2 - n_2 / CA_1 = (n_1 - n_2) / CS$$

- **Foyers - distances focales.**

- **Foyer objet F** : point de l'axe auquel correspond une image à l'infini ; SF est la distance focale objet.



- **Foyer image F'** : point de l'axe image d'un point objet situé à l'infini ; SF' est la distance focale image.



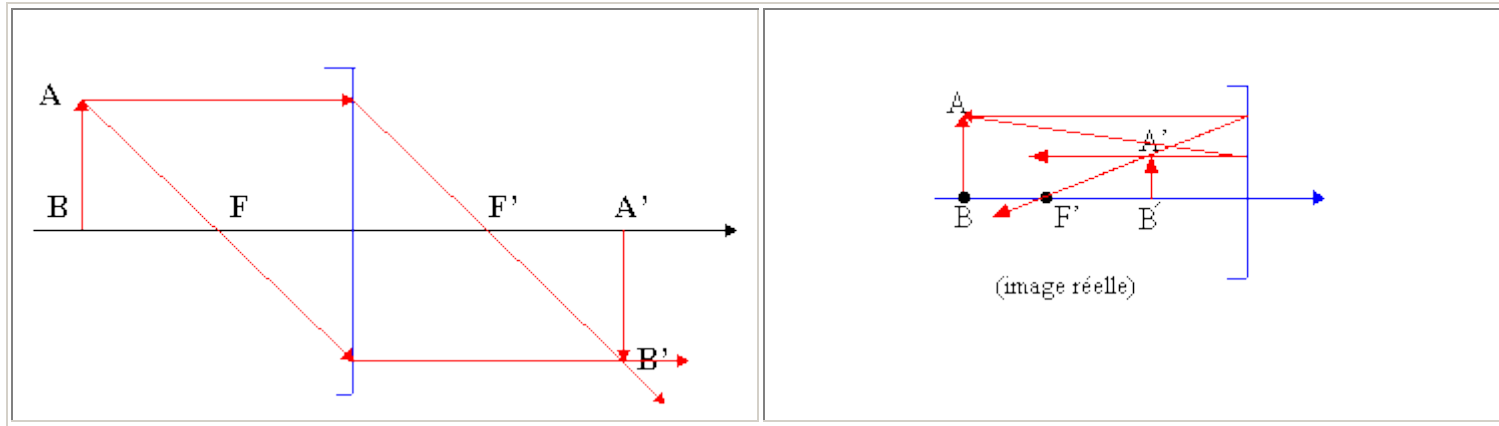
- **Nota :**

- $SF' > 0$  ; le dioptre est convergent.
- $SF' < 0$  le dioptre est divergent.
- F et F' sont toujours situés de part et d'autre du dioptre.

- **Construction de l'image** (condition d'aplanétisme supposée respectée).

**DIOPTRE CONVERGENT**

**DIOPTRE DIVERGENT**



- **Grandissement** : c'est le rapport de la dimension linéaire de l'image à la dimension de l'objet.

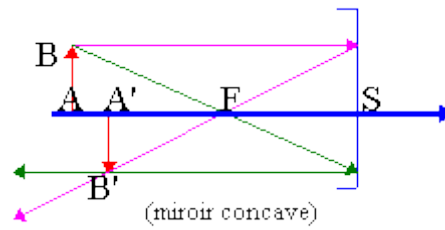
$$\gamma = I / O$$

## - II - Le miroir sphérique.

- **Définition** : surface sphérique réfléchissante. Pour le miroir concave, la surface intérieure est réfléchissante et, pour le miroir convexe, c'est la surface extérieure qui est réfléchissante. Le miroir est un dispositif **non stigmatique**.
- **Relations de conjugaison.**

origine au sommet S	$1 / SA + 1 / SA' = 2 / SC$
origine au centre C	$1 / CA + 1 / CA' = 2 / CS$

- **Foyers.** Les foyers objet F et image F' sont confondus :  $SF = SF' = SC/2$



- **Construction de l'image.**

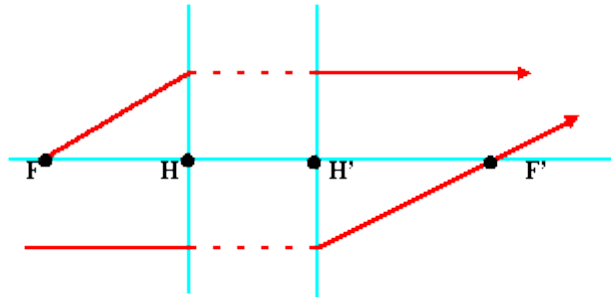
Miroir convexe	Miroir concave
<p>(image virtuelle)</p>	<p>(image réelle)</p>



<b>Systemes centres</b>	
<b>Notes de cours</b>	<a href="#">Définitions</a> <a href="#">Relations de conjugaison</a>
<b>Travail personnel</b>	<a href="#">Auto évaluation sur le cours (QCM)</a> <a href="#">Formulaire</a>

### I - Définitions.

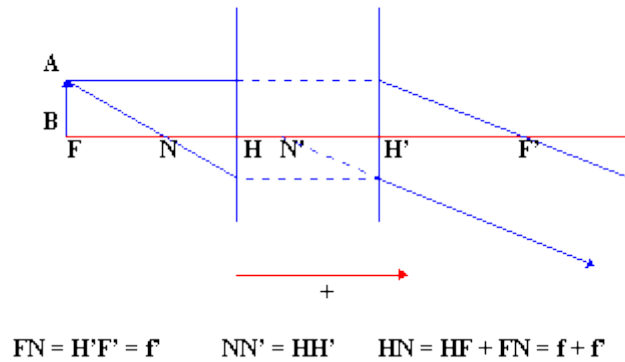
- Un système centré est un **ensemble de dioptrés et miroirs sphériques disposés de telle sorte que leurs axes soient confondus.**
- Un tel système est parfaitement défini par quatre points :
  - **F et F'** respectivement foyers objet et image
  - **H et H'** respectivement points principaux objet et image
- Tout rayon lumineux issu du point **F** foyer principal objet se réfracte parallèlement à l'axe.
- Tout rayon lumineux incident parallèle à l'axe se réfracte en passant par **F'** foyer principal image.
- Les plans perpendiculaires à l'axe et passant par **H** et **H'** sont les plans principaux objet et image respectivement. Un objet situé dans le plan principal objet a une image dans le plan principal image et le grandissement est égal à +1.
  - **Plan principal objet** : lieu des points d'intersection des rayons incidents passant par F et des rayons émergents parallèles à l'axe. **HF distance focale objet = f.**
  - **Plan principal image** : lieu des points d'intersection des rayons parallèles à l'axe et des rayons émergents passant par F'. **H'F' distance focale image = f '.**



- Si les points F et F' sont rejetés à l'infini le système est **afocal**
- Les conditions de stigmatisme approché et d'aplanétisme sont **supposées réalisées**.

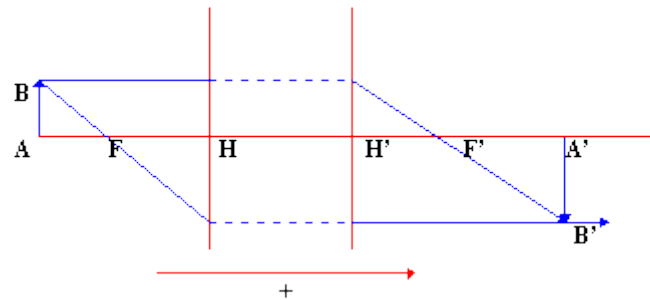
$$\mathbf{n / f = - n' / f'}$$

- Remarque : si les milieux extrêmes sont identiques les distances focales objet et image sont égales en valeur absolue :  $\mathbf{f = - f'}$
- La vergence du système est par définition :  $\mathbf{C = n'/f'}$  ; n' est l'indice du milieu dans lequel se forme l'image
  - $C < 0$  système **divergent** ;
  - $C > 0$  système **convergent** ;
  - $C = 0$  système **afocal**.
- **Points nodaux** : les points nodaux N et N' sont deux points conjugués de l'axe tels qu'à tout rayon incident passant par N corresponde un rayon émergent passant par N' , parallèle au rayon incident :



- **Remarque :** si les milieux extrêmes sont identiques  $HN = 0$  . Les points nodaux et principaux sont alors confondus.

## II - Relations de conjugaison.



Origine aux foyers F et F'	Origine aux plans principaux H et H'
<b><math>FA \cdot F'A' = f f'</math></b>	<b><math>f / HA + f' / H'A' = 1</math></b>

- **Application aux lentilles minces.** Une lentille est dite **mince** si la distance  $S_1S_2$  des sommets des dioptries qui la composent est petite devant les rayons de courbure de ces dioptries.

- **Centre optique** : Point situé dans le milieu intermédiaire tel qu'à tout rayon incident dont le support passe par ce point ,il correspond un rayon émergent parallèle.
- **Plans principaux** : Ces points tous les deux confondus avec le centre optique O , ainsi que les points nodaux
- **Distances focales** : Elles sont égales en valeur absolue ( les milieux sont identiques ).
- **Relations de conjugaison:**

Origine au centre optique O	Origine double aux foyers F et F'
$1/OA - 1/OA' = 1/OF'$	$FA \cdot F'A' = -f'^2$

<b>Caractéristiques d'un instrument d'optique</b>	
<b>Notes de cours</b>	<a href="#"><u>Grandissement</u></a> <a href="#"><u>Puissance</u></a> <a href="#"><u>Grossissement</u></a> <a href="#"><u>Pouvoir séparateur</u></a> <a href="#"><u>Champ</u></a>
<b>Travail personnel</b>	<a href="#"><u>Auto évaluation sur le cours (QCM)</u></a> <a href="#"><u>Formulaire</u></a>

Les instruments d'optique seront supposés parfaits ( pas d'aberrations géométriques, ni d'aberrations chromatiques). Les caractéristiques considérées ne concernent que l'image obtenue.

### - I – GRANDISSEMENT

<b><math>\gamma = A_i B_i / AB</math></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>AB</b> et <b>A<sub>i</sub>B<sub>i</sub></b> dimensions linéaires respectivement de l'objet et de l'image ; <math>\gamma</math> grandissement (&lt; 0 si image renversée par rapport à l'objet sinon <math>\gamma &gt; 0</math> image droite, de même sens que l'objet).</li> <li>• Unités : <math>\gamma</math> sans dimension ; AB et A<sub>i</sub>B<sub>i</sub> en mètre (m).</li> </ul>
---	--

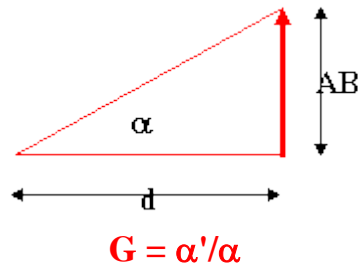
### - II - PUISSANCE

<b><math>P = \alpha' / AB</math></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>P</b> puissance optique de l'instrument ; <math>\alpha'</math> angle sous lequel on voit l'objet à travers l'instrument ; <b>AB</b> dimension linéaire de l'objet.</li> </ul>
--------------------------------------	---

- Unités : P en dioptrie ( $\delta$ ) ;  $\alpha'$  angle en radian (rad) ; AB en mètre (m).

- La puissance dépend des conditions de vision. Si l'oeil regarde à l'infini, la puissance prend le nom de puissance intrinsèque. L'objet se trouve alors dans le plan focal objet de l'instrument.

### - III – GROSSISSEMENT



- $\alpha$  et  $\alpha'$  angles sous lequel l'objet est vu, **respectivement, à l'oeil nu** (à la distance minimale de vision distincte d) et à travers l'instrument.
- Unités : G sans dimension ;  $\alpha$  et  $\alpha'$  en radian (rad) ou degré ( $^\circ$ ).

- Comme, par ailleurs, on a :  $\alpha = AB / d$  , il s'ensuit :  $G = \alpha' d / AB = P d$

### - IV - POUVOIR SÉPARATEUR

- Il mesure :
  - la distance minimale entre deux points vus distinctement à travers l'appareil, si l'objet est à distance finie.
  - l'angle minimal de deux points vus distinctement, si l'objet est éloigné.

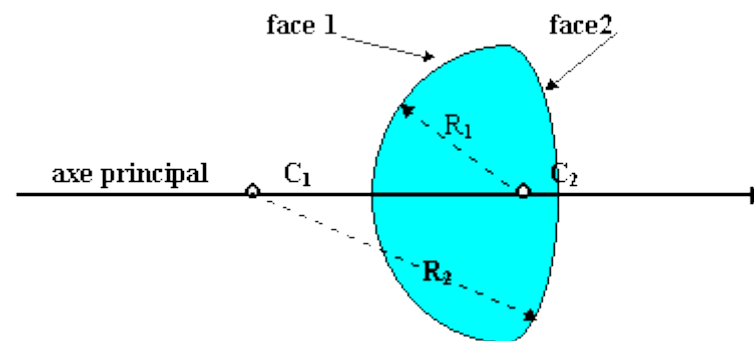
### - V - CHAMP

- C'est la portion de l'espace visible à travers l'instrument
- Champ en profondeur ou sur l'axe** : un objet ne peut être vu que si son image se situe dans les limites de vision de l'oeil . Cette image doit donc se trouver entre le punctum proximum et le punctum remotum de l'oeil . L'intervalle entre les positions de l'objet est appelée **profondeur de champ** de l'appareil ou **latitude de mise au point**.

- **Champ en largeur** : c'est la portion de l'espace visible dans une direction de l'axe optique. Les diaphragmes de l'instrument limitent ce champ en largeur.

<b>Lentilles Minces</b>	
<b>Notes de cours</b>	<a href="#">Définitions</a> <a href="#">Relation de Descartes</a> <a href="#">Vergence - Focométrie</a>
<b>Travail personnel</b>	<a href="#">Autoévaluation sur le cours (OCM)</a> <a href="#">Formulaire</a>

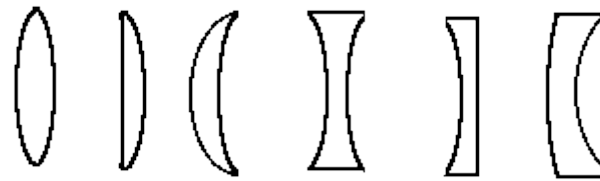
## 1 - Définitions.



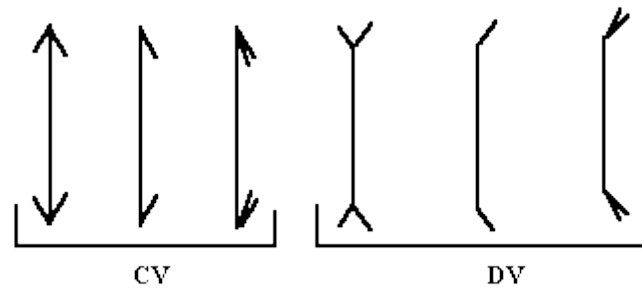
- Différents types de lentilles minces :



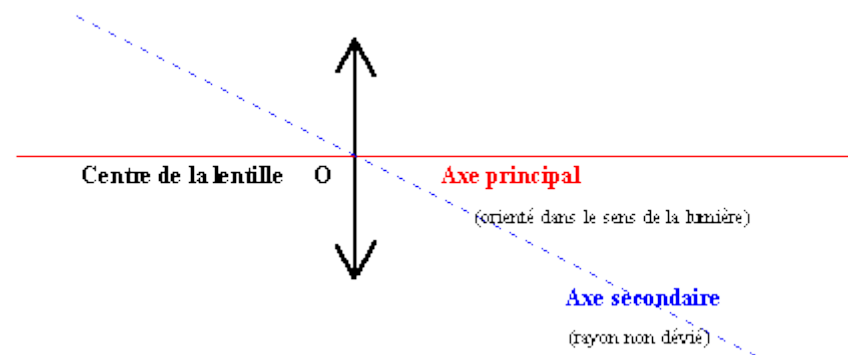
\* Différents types de lentilles minces :



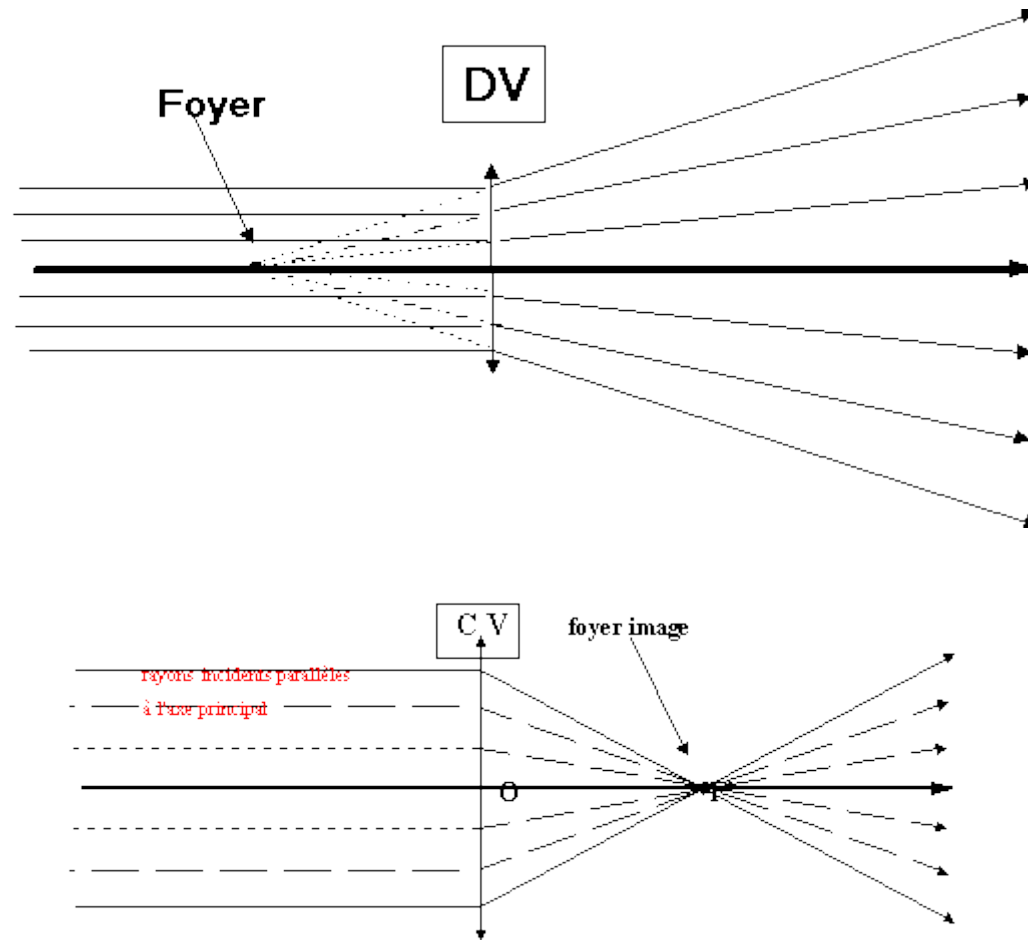
\* Représentation symbolique :



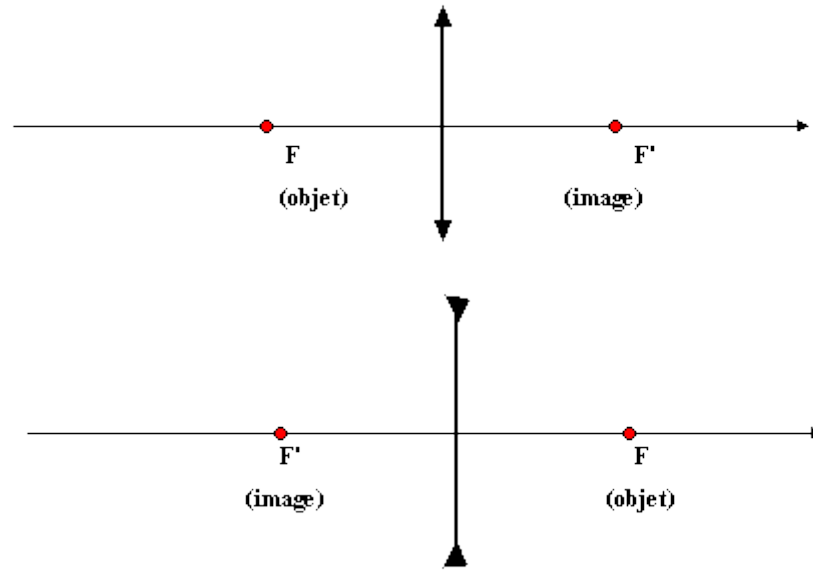
- **Axes :**



- Foyers (objet, image) :



- **Foyer image** : Point  $F'$  de l'axe principal où convergent les rayons incidents parallèles à l'axe principal.
- **Foyer objet** : Point  $F$  de l'axe principal donnant lieu à un faisceau émergent parallèle à l'axe principal.



- Pour les lentilles minces, les foyers sont symétriques par rapport au centre O.

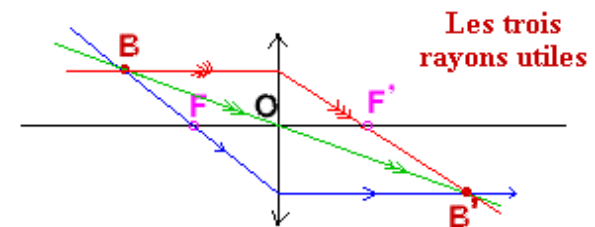
- **Les 3 rayons utiles**

**Les trois rayons utiles**

(passer la souris sur les trois rayons pour les visualiser)

[Le rayon incident passant par F](#)

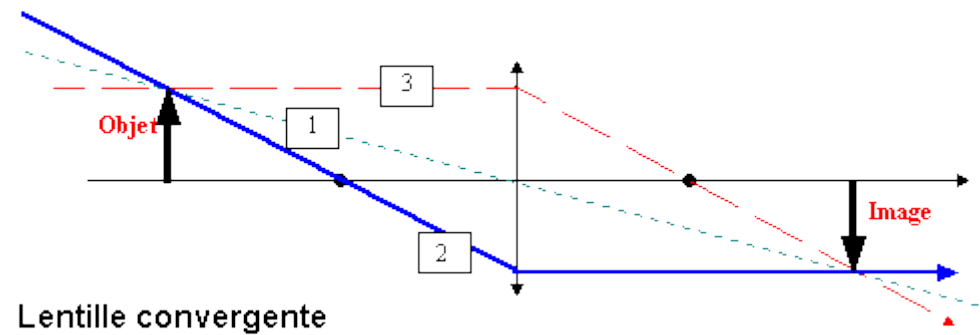
[Le rayon incident passant par O](#)

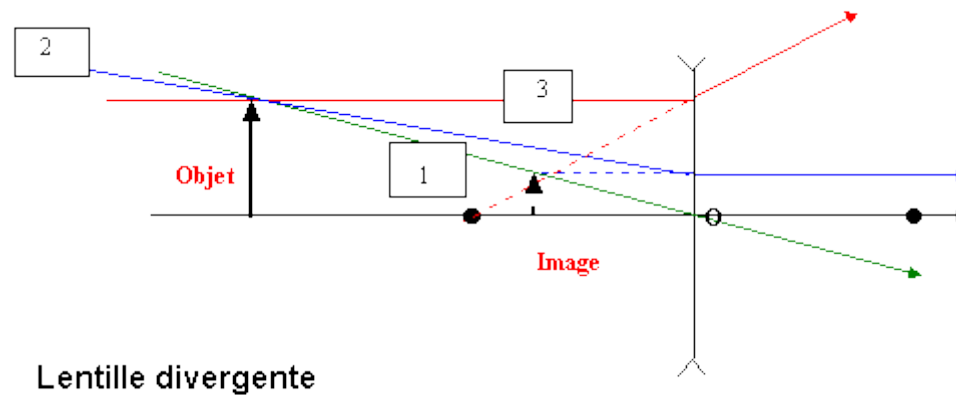


### Le rayon incident parallèle à l'axe

- **Construction d'une image.**

- Deux rayons suffisent ; on considère que si l'objet AB est perpendiculaire à l'axe principal, l'image A'B' est aussi perpendiculaire à l'axe principal (aplanétisme).
- Pour construire A'B', il suffira donc de trouver le point B', image du point B. L'image A' du point A sera obtenue en projetant B' sur l'axe principal.
- On prendra deux rayons "utiles" issus de B; ils définiront la position de B' ; on projettera ensuite B' sur l'axe ---> A'.



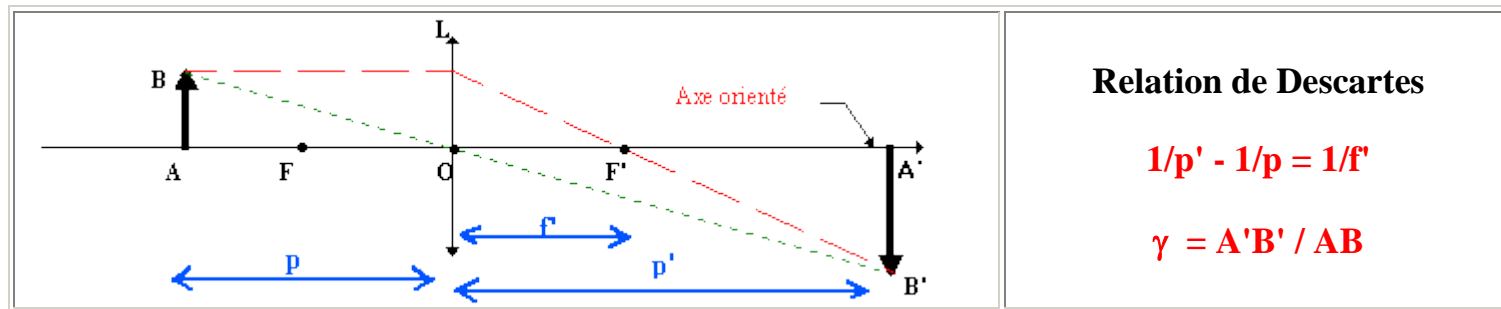


Lentille divergente

(NB : le 3ème rayon utile confirme la position de B obtenue par les deux premiers).

## 2 - Formule des lentilles minces. Relation de Descartes.

- C'est la relation liant la position de l'objet ( $p$ ), celle de l'image ( $p'$ ) et la caractéristique de la lentille ( $f'$ ).



- **Conventions :**
  - L'axe est orienté dans le sens de propagation de la lumière.
  - L'origine de l'axe est le centre de la lentille.

- On pose :  $OA = p$  ;  $OA' = p'$  ;  $OF' = f'$ .
- **Remarques :**
  - à noter que pour
    - les lentilles CV  $\rightarrow f' > 0$ ,
    - les lentilles DV  $\rightarrow f' < 0$ .
  - pour chaque cas étudié, il faut faire  $\rightarrow$  la détermination géométrique.....et le calcul numérique....

### 3 - Vergence - Focométrie.

- **Vergence**
  - On définit :  **$C = 1/f'$  (C "vergence")**
  - Unité  $\rightarrow$  la dioptrie ( $\delta$ ) (la dimension de la dioptrie est le  $m^{-1}$ ).
  - Signe de C :
    - $C < 0$  pour DV
    - $C > 0$  pour CV
  - Lorsque plusieurs lentilles minces sont accolées, **la vergence de l'ensemble est égale à la somme de vergences :**

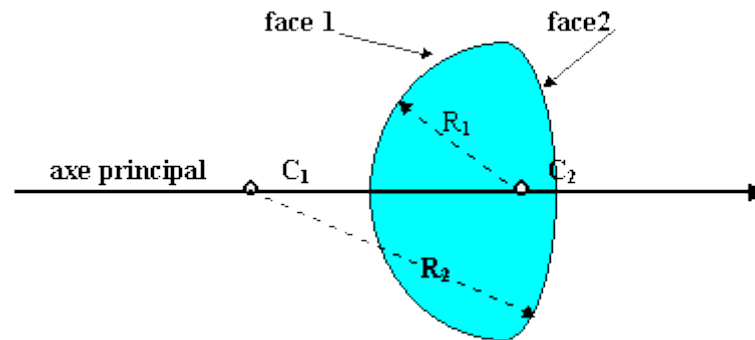
$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

- Pour les lentilles minces, la vergence s'exprime à partir des caractéristiques géométriques ( $R_1, R_2$ ) et de l'indice de verre ( $n$ ) :

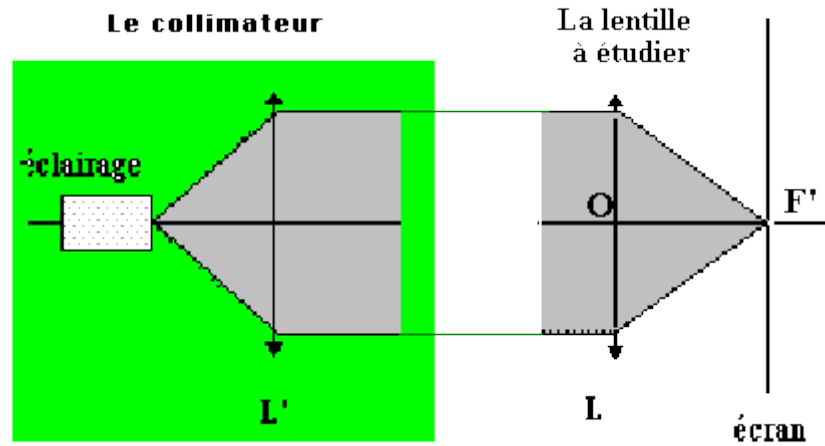
$$C = (n - 1) (1/R_1 + 1/R_2)$$

- C vergence de la lentille ; n indice du verre ;  $R_1$  et  $R_2$  rayons de courbure des faces, comptés positivement pour les faces convexes et inversement)
- Unités : C en dioptrie( $\delta$ ) ; n indice sans unité ;  $R_1$  et  $R_2$  en mètre(m)

- Exemple d'une lentille biconvexe :



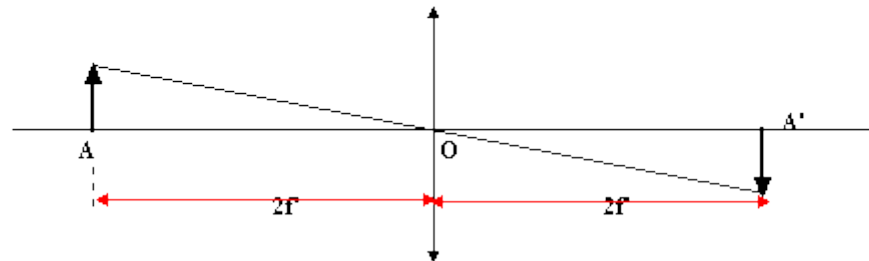
- Les faces 1 et 2 étant toutes deux convexes,  $R_1$  et  $R_2$  sont tous deux positifs et la vergence l'est aussi, ce qui correspond bien à une lentille convergente.
- **Focométrie**
  - Détermination de la distance focale  $f$  d'une lentille (pour les lentilles convergentes uniquement).
    - *Méthode de l'objet à l'infini (lentilles CV)*



- *Méthode de Silbermann (lentilles convergentes).*

Il existe une situation pour laquelle  $p' = p$  et  $(A'B'/AB) = 1$   
 (image et objet de même dimension)

**On a alors  $p' = p = 2f$ .**

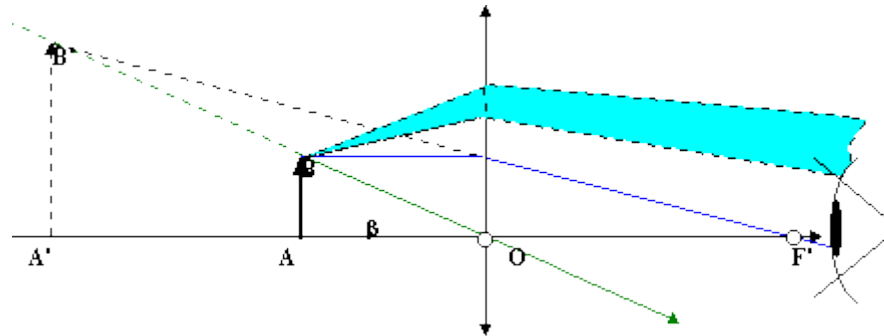




# La loupe

## 1 - Principe.

C'est une lentille CV, de faible distance focale, qui donne d'un objet réel une image virtuelle droite, grande par rapport à l'objet.



- Puissance :

$$P = \beta / AB$$

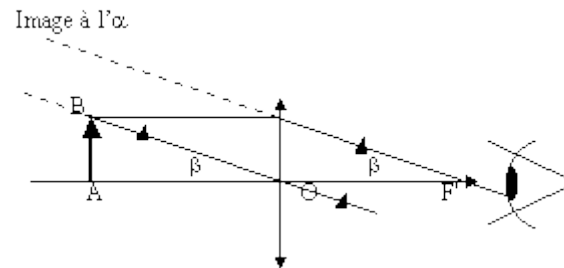
- **P** puissance optique ; **β** angle sous lequel est vu l'objet à travers l'instrument ; **AB** taille de l'objet.
- Unités : P en dioptrie (δ) ; β angle en radian (rad) ; AB en mètre (m).

- Grossissement :

$$G = \beta / \alpha$$

- $\alpha$  et  $\beta$  angles sous lesquels on voit l'objet à l'œil nu et à travers l'instrument.
- Unités : G sans dimension ;  $\alpha$  et  $\beta$  exprimés dans la même unité d'angle, radian (rad) ou degré (°).

## 2 - Vision à l'infini.



- **Puissance** : l'œil est en F'.

$$P = \beta / AB = (AB / f') / AB = 1 / f' = C$$

- **P** puissance de la loupe ; **AB** taille de l'objet ; **f'** distance focale et **C** vergence de la loupe.
- Unités : P en dioptrie ( $\delta$ ) ; f' en mètre(m) ; C en dioptrie ( $\delta$ ).

- **Grossissement** :

$$G = \beta / \alpha = (AB / f') (AB / d) = d / f'$$

- $\alpha$  et  $\beta$  angles sous lesquels on voit l'objet à l'œil nu et à travers l'instrument ;  $d$  distance minimum de vision distincte ;  $f'$  distance focale de la loupe ;  $AB$  taille de l'objet.
- Unités :  $G$  sans dimension ;  $\alpha$  et  $\beta$  exprimés dans la même unité d'angle, radian (rad) ou degré ( $^\circ$ ) ;  $AB$ ,  $d$  et  $f'$  en mètre (m).

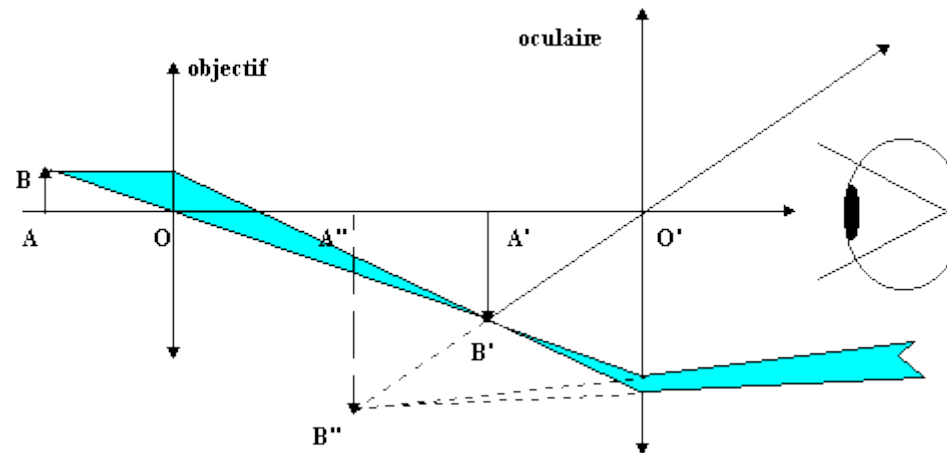
### 3 - Usage des loupes :

- naturalistes, horlogers, et tous utilisateurs d'instruments d'optique puisque l'oculaire est une loupe (microscope, jumelles, télescope,.... ...)
- grossissement habituels (2,5 à 12,5).

# Le microscope

- Principe :

C'est un couple de deux lentilles CV, de faible distance focale, qui donne, d'un objet réel petit, une image virtuelle renversée, observée par l'oeil et très grande par rapport à l'objet.



- L'objectif donne d'un objet réel, une image réelle renversée beaucoup plus grande que l'objet.
- L'oculaire est une loupe examinant cette image réelle (qui joue pour elle le rôle d'objet réel).

- Définitions :

- **Cercle oculaire** : Plage éclairée visible dans l'oculaire. C'est l'image de l'objectif donnée par l'oculaire.
- **Mise au point** : La distance objectif-oculaire est fixe. On met "au point" la netteté de l'image en adaptant la distance objet-objectif de façon à ce que l'image se trouve entre le PP et le PR de l'œil qui observe.
- **Latitude de mise au point** : Distance entre les deux positions de l'objet (p/r à l'objectif) donnant des images au PR et au PP.
- **Puissance** :

$$P = \beta / AB$$

- **P** puissance optique de l'instrument ;  **$\beta$**  angle sous lequel on voit l'objet à travers l'instrument ; **AB** dimension linéaire de l'objet.
- Unités : P en dioptrie ( $\delta$ ) ;  $\beta$  angle en radian (rad) ; AB en mètre (m).

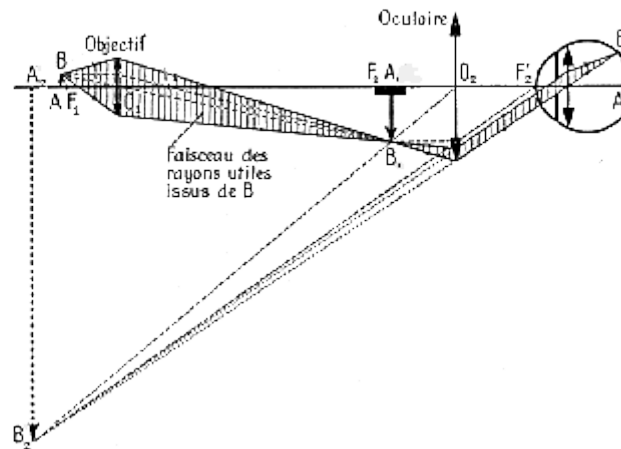
- **Grossissement :**

$$G = \beta / \alpha$$

- $\alpha$  et  $\beta$  angles sous lequel l'objet est vu, **respectivement, à l'oeil nu** (à la distance minimale de vision distincte  $d$ ) et à travers l'instrument.
- Unités : G sans dimension ;  $\alpha$  et  $\beta$  en radian (rad) ou degré ( $^\circ$ ).

- Marche des rayons lumineux :

### Marche des rayons lumineux



- **Quelques valeurs :**
  - Couramment : P ~ 100 à 1 000 dioptries ; G ~ 25 à 250
  - Limite : P ~ 10 000 dioptries ; G ~ 2 à 3 000
  - Plus petite distance observable à l'aide d'un microscope optique : **de l'ordre du micromètre (micron).**
- **Utilisations courantes d'un microscope :**
  - iologie, métallographie, métrologie, bactériologie, minéralogie.
  - Lorsque les objets à étudier sont transparents, on utilise des microscopes interférentiels ou polarisants.

La lunette astronomique

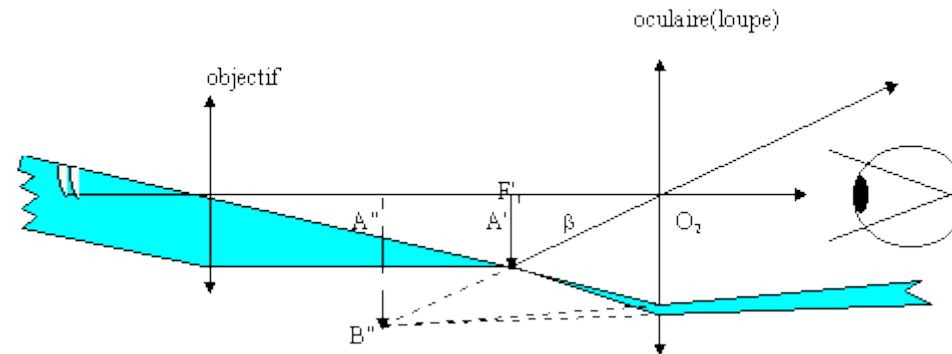
L'appareil photographique

Le projecteur

## I - La lunette astronomique.

C'est un appareil d'optique destiné à l'observation d'objets éloignés.

- Principe :



- L'objectif donne de l'objet une image réelle, la plus grande possible.
- L'oculaire est une loupe examinant cette image réelle (lui servant d'objet réel).
- L'image finale  $A''B''$  est une image virtuelle renversée. L'angle  $\beta$  sous lequel on voit  $A''B''$ , c'est à dire l'objet à travers l'instrument, est grand devant  $\alpha$ , angle sous lequel on le voit à l'œil nu. L'image est renversée ! Si donc on veut faire une

observation "dans le même sens que l'objet", il faut renverser cette image. C'est ce qui est réalisé dans les jumelles (on réalise une réflexion d'image sur deux prismes à réflexion totale ).

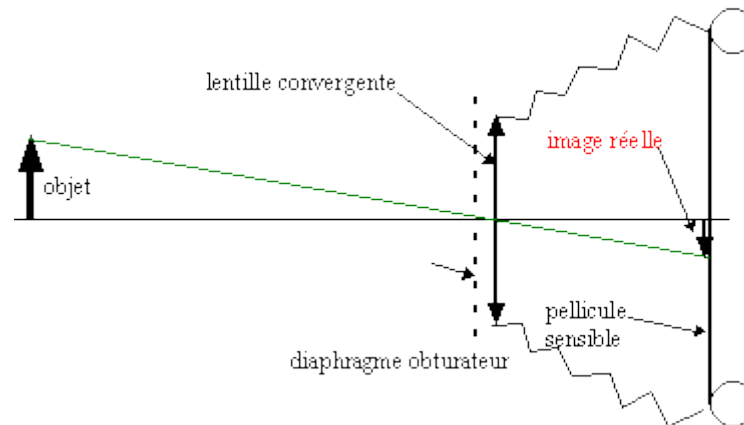
- Note : différence essentielle entre microscope et lunette : le principe optique est le même : objectif donnant une image réelle observée par l'oculaire servant de loupe. La différence tient, bien entendu, en ce que l'objectif du microscope donne d'un petit objet une image grande (faible distance focale, qq mm), tandis que l'objectif de la lunette donne d'un objet grand mais éloigné, une grande image (grande distance focale  $f \sim 1$  m).

- **Utilisation de la lunette :**

- observation des astres,
- théodolite (balistique, contrôle de niveau),
- observation terrestre (jumelles, télescope, télémètre).

## **II - L'appareil photographique.**

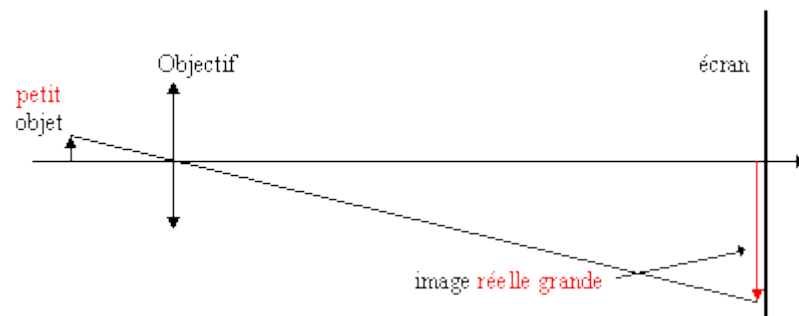
**C'est une lentille CV donnant d'un objet réel une image réelle dans le plan de la pellicule**





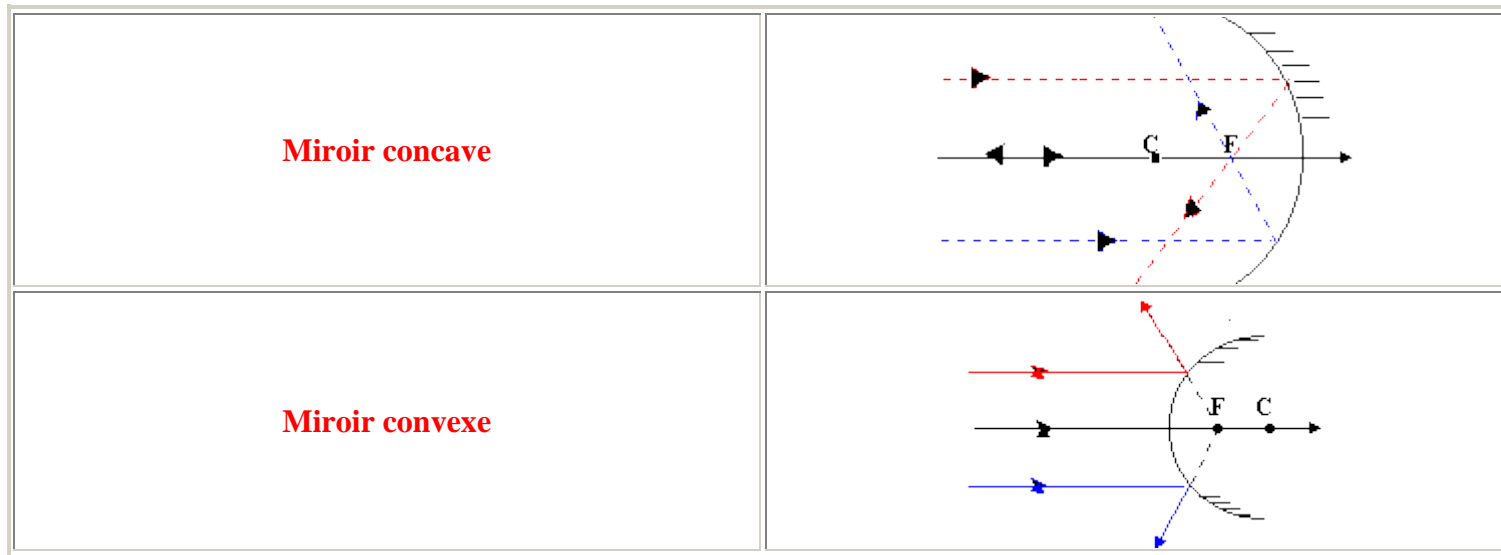
### III - Le projecteur.

L'objet réel, petit (le film ou la diapo), est situé devant un objectif (lentille CV) de faible distance focale, qui en donne une image réelle renversée sur l'écran, très grande par rapport à l'objet



## Les miroirs sphériques

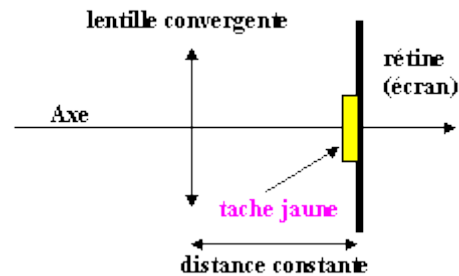
- Déviations d'un faisceau lumineux :



- **Le miroir**
  - dévie les rayons en les "réfléchissant",
  - dispose d'un point de convergence du faisceau incident parallèle ("foyer"),
  - peut être assimilé à un couple (lentille + miroir plan).
- **Remarques.**
  - On pourra donc faire converger ou diverger des faisceaux, comme avec les lentilles. Mais on travaille bien sûr par réflexion.
  - On dispose ainsi de "miroirs convergents" ---> miroirs concaves,
  - "miroirs divergents" ---> miroirs convexes.
  - Ces dispositifs peuvent remplacer les lentilles surtout dans la mesure où leur usinage est généralement plus facile et moins onéreux (télescopes). Ils équipent notamment les grands télescopes scientifiques.
  - Utilisations plus courantes : rétroviseurs, miroirs de carrefours, miroirs de beauté, etc.

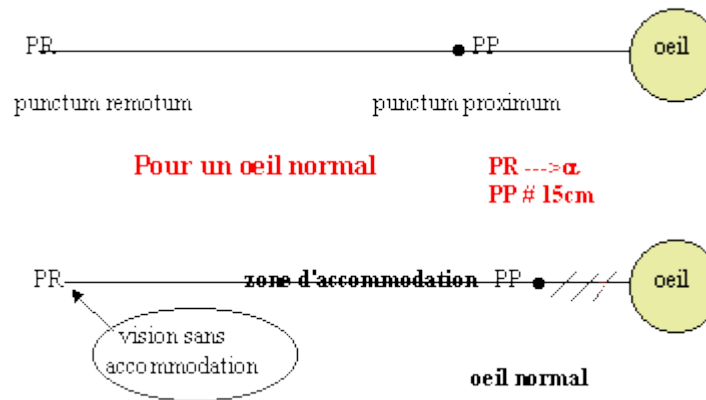
<b>L'œil</b>	
<b>Notes de cours</b>	<u>Oeil réduit</u> <u>Accommodation de l'œil</u> <u>Défauts de l'œil</u>

- **Oeil réduit :**



- **Accommodation de l'œil :**

- L'œil doit réaliser **une image nette sur la rétine**, c'est à dire à une distance fixe bien définie de la lentille équivalente de l'œil. Pour obtenir ces images nettes, d'objets situés à des distances variables de l'œil ( $p$  variable) et alors que l'image se trouve nécessairement sur la rétine ( $p' = \text{constante}$ ), la seule possibilité est de **faire varier  $f'$** . Ce "réglage" de  $f'$  s'effectue par **déformation** du cristallin. On dit que l'œil **ACCOMMODE**.



- **Défauts de l'œil :**

- ***Myopie .***

- L'œil est trop convergent. L'image d'un objet ponctuel à l'infini ne se forme pas sur la rétine (pas de possibilité d'accommodation qui rendrait la lentille encore plus convergente !)
    - Pour "soigner" cette œil on lui adjoint une lentille de correction---->lentilles "accolées".
    - Les myopes portent donc des "lunettes divergentes", la distance focale des lentilles divergentes est telle qu'au repos, l'œil, comme l'œil normal, voit nettement les objets situés à l'infini.

- ***Hypermétropie.***

- L'œil n'est pas assez convergent.
    - L'image d'un point objet(réel) sur la rétine est une tache . Pour soigner cet œil on lui adjoint une lentille correctrice convergente.

- ***Presbytie.***

- Le cristallin ne se déforme plus ---> l'œil difficilement sinon pas du tout. Il n'est plus assez convergent pour la vision de près. Comme pour les hypermétropes, on adjoint à l'œil, pour la vision de près, des verres correcteurs convergents.

- ***Astigmatisme .***

- L'œil comporte des défauts de constitution (il n'est pas de symétrie autour de son axe principale). Il ne donne pas, d'un objet ponctuel une image elle-même ponctuelle. On corrige l'œil en compensant ces défauts généralement selon des axes particuliers.

- Remarques : On appelle **pouvoir séparateur de l'œil** la plus petite distance angulaire entre deux points séparés par l'œil. Il faut que les images des deux points, "séparés" par l'œil, soient situées sur deux cellules distinctes de la rétine. On trouve alors  $\varepsilon \sim 1'$  soit  $3/1000$  rad.

<b>OPTIQUE PHYSIQUE Généralités</b>	
<a href="#"><u>Vibrations monochromatiques</u></a>	<a href="#"><u>Propagation</u></a>
<a href="#"><u>Surface d'onde</u></a>	<a href="#"><u>Mécanisme de l'émission</u></a>
<a href="#"><u>Addition de deux vibrations monochromatiques</u></a>	

*Les ondes monochromatiques ont une grande importance, d'une part, à cause de leur simplicité, et surtout parce que, par combinaison linéaire, elles peuvent représenter n'importe quelle onde **périodique** (Théorème de Fourier).*

## **- I - Vibrations monochromatiques**

**- I - 1 - Définition.** L'amplitude de la vibration est représentée par :

$V(t) = A \cos(\omega t - \varphi)$  avec : A amplitude ;  $\omega$  pulsation ;  $\varphi$  phase à l'origine ;  $\omega$

fréquence ; T période ;  $\lambda$  longueur d'onde. On a , d'autre part, les relations suivantes entre ces paramètres :

$$T = 2\pi / \omega$$

**- I - 2 - Représentation complexe.**

$$V(t) = A e^{j(\omega t - \varphi)}$$

**- I - 3 - Énergie d'une vibration monochromatique.**

L'énergie d'un oscillateur est proportionnelle au carré de son amplitude :

$$E = A^2$$

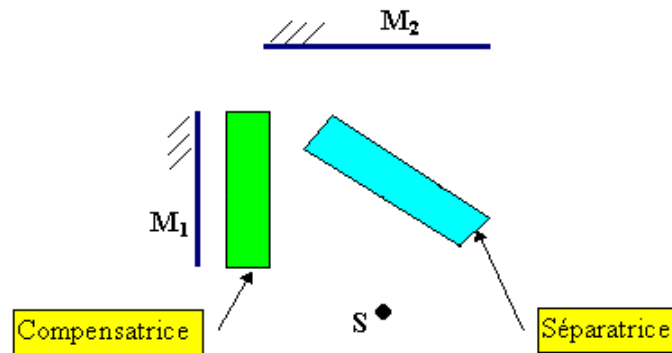
## - II - Surface d'onde

- Lieu des points atteints par l'onde (la lumière) au même instant (dans le cas des sources ponctuelles).
- Pour une source à l'infini la surface d'onde est plane ("approximation de l'onde plane").

## - III - Addition de deux vibrations monochromatiques

- Considérons deux vibrations de même fréquence :  $V_1(t) = A_1 e^{j\omega t}$  et  $V_2(t) = A_2 e^{j(\omega t - \varphi)}$
- $V(t) = V_1(t) + V_2(t) = (A_1 + A_2 e^{-j\varphi}) e^{j\omega t}$
- donc :  $I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2 \cos \varphi)^{1/2}$

## - IV - Propagation



- En O, l'onde est représentée par :  $s_o(t) = A \cos \omega t$ .
- En M, on a :  $s_M(t) = A \cos \omega(t - t')$  où  $t'$  est le décalage temporel de l'onde en M par rapport à O. L'onde se déplaçant à la vitesse  $V$ , ce décalage en M situé à la distance  $x$  de O est  $t' = x/V$ . D'où :

$$s_M(t) = A \cos(\omega(t - x/V)) = A \cos(\omega t - 2\pi x/VT) = A \cos(\omega t - \varphi)$$

avec :

- $\varphi = 2\pi x / \lambda$  "déphasage" du phénomène en M par rapport à O ;
- $\lambda$  période **spatiale** du phénomène :  $\lambda = VT$  ;  $\lambda_0 = CT = n \lambda$  est la longueur d'onde dans le vide).
- on écrit aussi :  $\varphi = 2\pi x/\lambda = 2\pi\delta/\lambda_0$  où  $\delta$  est le **chemin optique**.

### - V - Mécanisme de l'émission

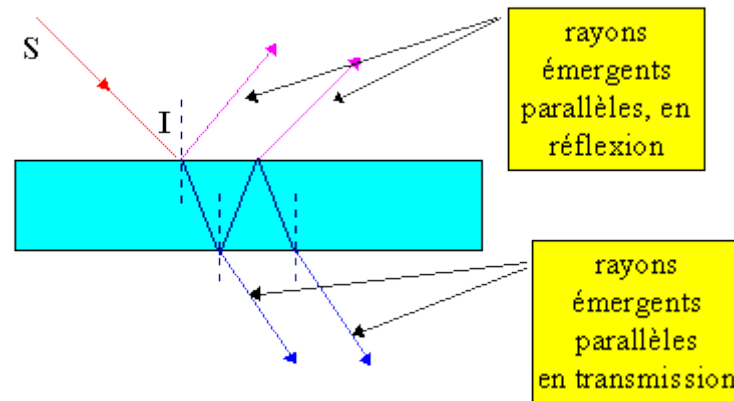
- La lumière est due aux **ondes électromagnétiques** émises par les atomes de la manière suivante. Un atome possède plusieurs niveaux d'énergie  $E_1$  ;  $E_2$  ;  $E_3$  ; etc ..; lorsqu'il passe d'un état d'énergie  $E_1$  à un état d'énergie moindre  $E_2$ , il émet une onde électromagnétique d'énergie  $E_1 - E_2$  et de fréquence telle que  $(E_1 - E_2) = h\nu$  ;  $h$  est la constante de Planck.
- Les ondes électromagnétiques ne sont pas émises continûment par les atomes, ceux ci émettent des **trains d'onde** de durée  $\tau$  dont l'ordre de grandeur est de l'ordre de  $10^{-6}$  s à  $10^{-9}$  s pour les sources classiques.
- Pendant la durée du train d'ondes, on peut représenter la vibration émise par une expression de la forme :  $s = A \cos(\omega t - \varphi)$ .
- Au bout d'un temps supérieur à  $\tau$ , la vibration cesse, soit par amortissement, soit parce qu'il y a eu choc de l'atome émetteur avec d'autres atomes. Si, pour une raison quelconque, l'atome est de nouveau excité, il émettra de nouveau, s'il redescend de  $E_1$  sur  $E_2$ , une vibration de la forme :  $s' = a' \cos(\omega t - \varphi')$  où  $a'$  et  $\varphi'$  sont différents de  $a$  et  $\varphi$ .
- $a$  et  $\varphi$  peuvent donc changer un très grand nombre de fois par seconde et ceci de manière aléatoire. Il n'y a donc pas de relation de phase entre deux trains d'ondes distincts.



OPTIQUE PHYSIQUE		INTERFERENCES LOCALISEES	
<a href="#">Franges d'égale inclinaison localisées à l'infini</a>		<a href="#">Interférences d'ondes multiples</a>	
<a href="#">Franges d'égale épaisseur</a>			

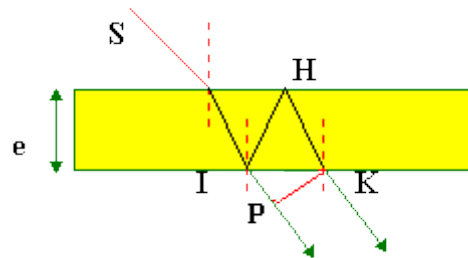
- On n'obtient en général pas de franges d'interférences avec une source étendue. En fait, avec de telles sources, on ne peut observer des franges d'interférence qu'aux points où se rencontrent deux rayons provenant d'un rayon incident **unique** (division de l'amplitude de l'onde précédente). Le lieu de ces points est en général une surface : le phénomène d'interférence est dit **localisé**.

**- I - Lames à faces planes parallèles. Franges d'égale inclinaison localisées à l'infini.**



**- 1 - Calcul de la différence de marche.**

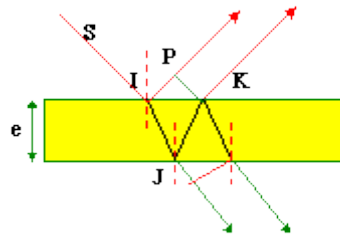
- En transmission.



- $\delta = (IHK) - IP$  ; or :  $IH = HK = e / \cos r$  et  $IP = IK \sin i = 2e \tan r \sin i$

d'où :  $\delta = 2 ne / \cos r - 2e \tan r \sin i = 2 n e \cos r$

- **En réflexion.**



- Le calcul de  $\delta = (IJK) - IP$  s'effectue donc comme ci dessus et conduit au même résultat, **à ceci près cependant** qu'il faut tenir compte du changement de phase provoqué par le phénomène de réflexion, changement de phase de  $\pi$  (c'est à dire une différence de marche supplémentaire de  $\lambda/2$ ).

d'où :  $\delta = 2 n e \cos r + \lambda/2$

- Remarque : les systèmes d'interférences observés en réflexion et en transmission sont complémentaires.

**- 2 - Franges d'égal inclinaison, anneaux à l'infini.**

- Chaque rayon incident donne **deux rayons** réfléchis ou transmis, cohérents. Comme, de plus, ils sont parallèles, les franges sont alors **localisées à l'infini**.  $\delta$  la différence de marche ne dépend que de  $r$  c'est à dire de  $i$ , angle d'inclinaison des rayons incidents ; d'où leur nom ---> **anneaux d'égale inclinaison**.

### - 3 - Observation des franges. Rayons des anneaux.

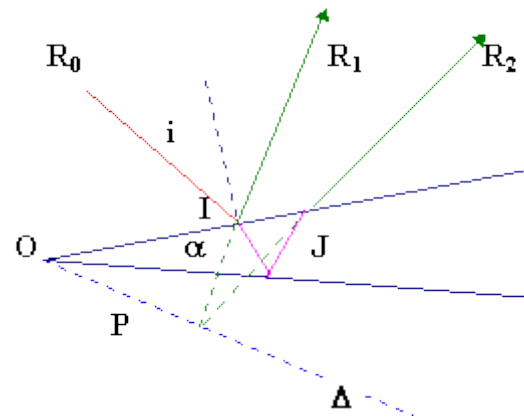
- Les rayons réfléchis ou transmis provenant de rayons de même incidence  $i$  étant parallèles entre eux, vont converger à l'infini. C'est donc à l'infini que ces interférences entre ces rayons pourraient être observées. Dans la pratique, on utilise une lentille convergente pour les faire converger dans son plan focal où elles seront alors facilement observables. On constate, dans ce plan focal, des zones de concentration ou d'absence de lumière (franges brillantes ou sombres). Ces franges sont de révolution autour de l'axe de la lentille et représentent des cercles concentriques dont le rayon  $R$  dépend **de  $i$  et de  $e$** .
- Calcul de  $R$  (en transmission).
  - $R = f' i$  ;  $i$  petit car les rayons angulaires observables sont limités par l'ouverture numérique de la lentille.
  - En transmission :  $\delta = 2 n e \cos r$ . Au centre, puisque  $i = 0$ ,  $\delta_0 = 2 n e$ . Si le centre est brillant :  $\delta_0 = p_0 \lambda$  et les autres anneaux brillants correspondront à :  $\delta = p \lambda$ , avec  $p < p_0$  (l'ordre d'interférence est max au centre).
  - Pour des valeurs faibles de  $i$ , premiers anneaux, on peut remplacer  **$2n \cos r$**  par  $2ne(1 - r^2/2)$ .
  - D'où :  $p_0 \lambda - n e r^2 = p \lambda \implies (p_0 - p) \lambda = n e r^2$ . Comme :  $i = n r$ ,  $n e r^2 = e i^2/n$
  - En posant :  $(p_0 - p) = K$ , numéro de l'anneau, il vient :  $K \lambda = e i^2/n$ . D'où l'obtention de la valeur de  $i$ .
  - Enfin pour  $R$  :  **$R = f' i = f'(n\lambda/e)^{1/2} K^{1/2} = R_K$** .
  - **L'ordre d'interférence est max au centre et en général quelconque, il décroît à partir du centre. Les anneaux sont d'autant plus serrés que l'épaisseur de la lame est grande. Les anneaux se resserrent du centre vers l'extérieur.**

## - II - Interférences localisées sur des lames d'épaisseur légèrement variable : franges d'égale épaisseur.

- Les lames que nous allons étudier ont une faible épaisseur, de l'ordre de 0,1 mm, légèrement variable d'un point à un autre. De telles lames, éclairées en incidence normale par une source monochromatique, permettent l'observation de franges d'interférence **pratiquement localisées sur la lame** et observables sans dispositif particulier.

### - 1 - Lame-coin - Franges d'égale épaisseur.

- Une lame d'indice  $n$  en forme de coin, d'angle  $\alpha$  très petit (de l'ordre de la minute), reçoit un faisceau cylindrique de lumière monochromatique sous une incidence  $i$  faible.

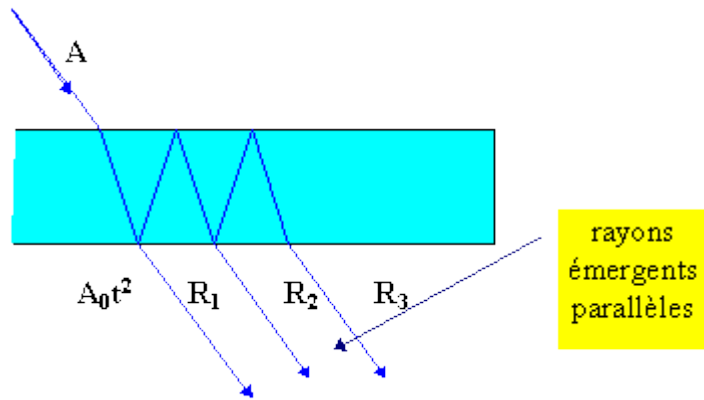


- Un rayon incident  $R_0$  fournit deux rayons réfléchis  $R_1$  et  $R_2$  qui se coupent en P. Si l'on déplace  $R_0$  parallèlement à lui-même ( $i$  constant), la nouvelle figure formée par les rayons est l'homothétique de la première. P se déplace ainsi sur une droite passant par O. La surface de localisation des franges, lieu du point P, est un plan de trace  $O\Delta$  passant par l'arête du coin. Ce plan est très voisin de la lame.
- $\delta \approx 2(IJ) + \lambda/2$  soit :  $\delta \approx 2n\alpha x + \lambda/2$  ;  $\delta$  dépend de  $x$  (distance  $OI$  à  $OP$ )  $\implies$  franges rectilignes parallèles à l'arête du coin.
- En O :  $\delta_0 = \lambda/2 \implies$  frange noire.
- Interfrange : considérons  $P_1$  et  $P_2$  positions de deux franges obscures ; la variation de chemin optique de  $P_1$  à  $P_2$  est de  $\lambda$  donc la variation d'épaisseur de  $\lambda/2 \implies$  les franges sont des lignes d'égale épaisseur optique.
- Par transmission, les franges, également localisées sur la lame, sont complémentaires des franges par réflexion. Si la lame est homogène ces franges sont des franges d'égale épaisseur.

### **- III - Les interférences d'ondes multiples.**

- Nous n'avons considéré jusqu'à présent que les interférences produites par deux ondes parties d'un même point de la source et présentant une certaine différence de marche. Si on donne à la lame un pouvoir réflecteur élevé, on ne peut plus négliger les ondes multiples.

#### **- 1 - Amplitude des ondes transmises.**



- Les rayons transmis  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ , ont respectivement pour amplitude :

$$A_0 t^2 ; A_0 t^2 r^2 ; A_0 t^2 r^4 ; \dots ; A_0 t^2 r^{2n}$$

- Deux rayons consécutifs sont donc déphasés de la quantité  $\Phi = 2\pi \delta / \lambda$ , avec  $\delta = 2 n \cos r$ . On obtient l'amplitude résultante, en un point P du plan focal d'une lentille, en ajoutant les amplitudes complexes des ondes transmises.

## - 2 - Intensité de l'onde résultante .

- $I = I_0 T^2 / (1 - R e^{-j\phi}) (1 - R e^{+j\phi})$
- $I = I_0 T^2 / (1 - R^2 - 2R \cos\phi)$
- $I = I_{\max} / (1 + F \sin^2(\phi/2))$
- Avec :  $I_{\max} = I_0 T^2 / (1 - R)^2$  et  $F = 4R / (1 - R)^2$
- Fonction constituée de pics dont la largeur à mi-hauteur est :

$$\Delta\phi = 2(1 - R) / R^{1/2}$$

## - 3 - Rayons des anneaux brillants.

- On obtient des anneaux, comme dans le cas des interférences à deux ondes (anneaux d'égale inclinaison). Au centre, l'ordre d'interférence s'écrit :

$$\mathbf{p}_0 = 2\mathbf{ne} / \lambda = \mathbf{m}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}$$

- Le rayon du k<sup>i</sup>ème anneau brillant dans le plan focal d'une lentille est :

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{f}' \mathbf{i} = \mathbf{f}' (\mathbf{n} \lambda / \mathbf{e})^{1/2} (\mathbf{K} - \mathbf{1} + \boldsymbol{\varepsilon})^{1/2}$$

## OPTIQUE PHYSIQUE INTERFERENCES NON LOCALISEES A DEUX ONDES

Conditions d'obtention d'un phénomène d'interférences

Caractéristiques d'un phénomène d'interférences

Les dispositifs interférentiels à deux ondes

Déplacement du système d'interférence. Emploi d'une fente source

**Interférences** => intensité obtenue par addition de deux vibrations ; cette "addition" est différente de la simple somme arithmétique des intensités composantes.

L'intensité obtenue varie en **fonction de la position du point** d'observation. (car est une variable d'espace).

### **- I - Conditions d'obtention d'un phénomène d'interférences.**

**1 - Cohérence** : relation de phase entre les deux ondes qui interfèrent.

- Source **réelle** = Infinité de centres émetteurs constituant une infinité de sources **incohérentes**---> infinité de systèmes d'interférences superposés.

### **2 - Vibrations de même fréquence.**

- Soient deux vibration  $V_1(t)$  et  $V_2(t)$  représentées par :

$$V_1(t) = A \cos \omega_1 t \text{ et } V_2(t) = A \cos (\omega_1 t - \varphi)$$

- L'addition de ces deux vibrations est  $V(t)$  :

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) = A [\cos \omega_1 t + \cos (\omega_1 t - \varphi)] \text{ ---> } \mathbf{\text{battements}}$$

## **- II - Caractéristiques d'un phénomène d'interférences.**

### **1 - Surface d'égalité intensité.**

- $I = \text{cte}$  car  $\delta = \text{cte}$  et, donc,  $\varphi = 2\pi\delta/\lambda = \text{cte}$
- Si ces interférences intéressent :
  - une région de l'espace  $\implies$  interférences **non localisées**.
  - une surface particulière concernée  $\implies$  interférences **localisées**.

**2 - Franges d'interférence** : intersections des surfaces d'égalité intensité avec le plan d'observation.

**3 - Interfrange** : distance entre deux franges consécutives de même nature

- $\Delta\delta = \lambda \implies \Delta\varphi = 2\pi$
- $I_{\text{max}} \implies$  frange brillante ;  $I_{\text{min}} \implies$  frange sombre
- $I_{\text{min}} = 0$  lorsque  $A_1 = A_2$ .

### **4 - Contraste des franges**

- $\gamma = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / I_{\text{max}}$
- $\gamma = 1$  si  $A_1 = A_2$

### **5 - Ordre d'interférences.**

- $p = \delta / \lambda$  ; si  $p$  entier  $\implies$  frange brillante ; si  $p$  demi entier  $\implies$  frange sombre.

### **6 - Profil des franges** : $I = f(\varphi)$

## **- III - Les dispositifs interférentiels à deux ondes.**

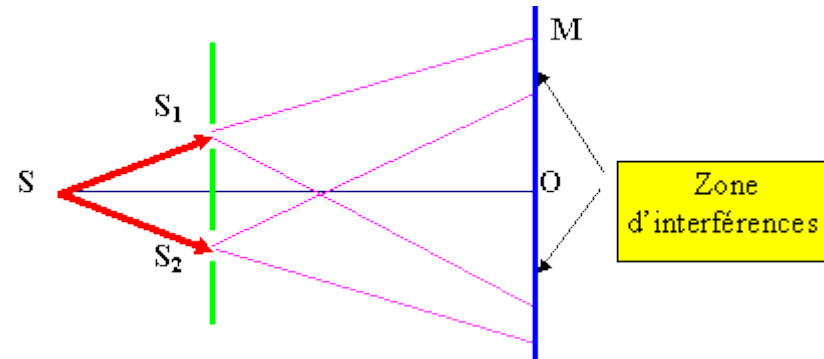
Les interférences ne sont observables que si les ondes qui les produisent présentent des relations de phase entre elles. Ces ondes seront obtenues :  
- soit par division du front d'onde,



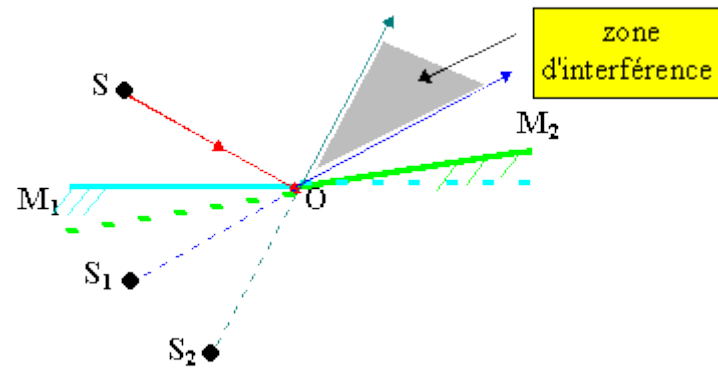
- soit par division de l'amplitude de l'onde.

### 1 - Division du front d'onde.

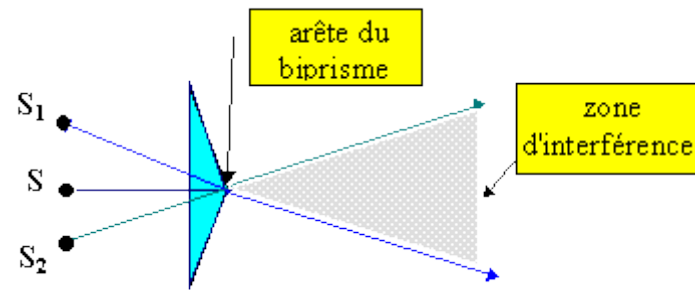
#### *1- 1 - Trous d'Young.*



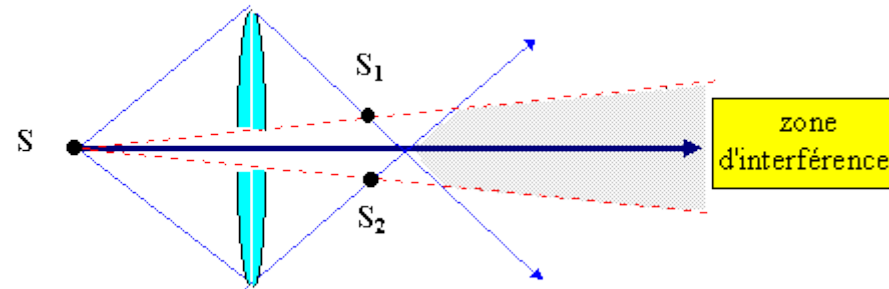
#### *1- 2 - Miroirs de Fresnel.*



#### *1- 3 - Biprisme de Fresnel.*

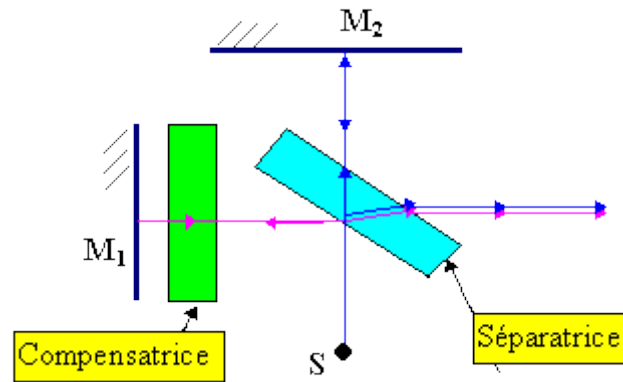


**1- 4 - Bilentille de Billet.**



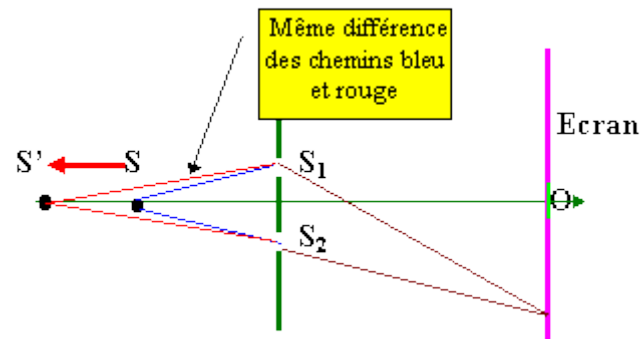
**2 - Division d'amplitude.**

- Elle est obtenue à l'aide d'un interféromètre (par exemple l'interféromètre de Michelson) ou de lames minces.



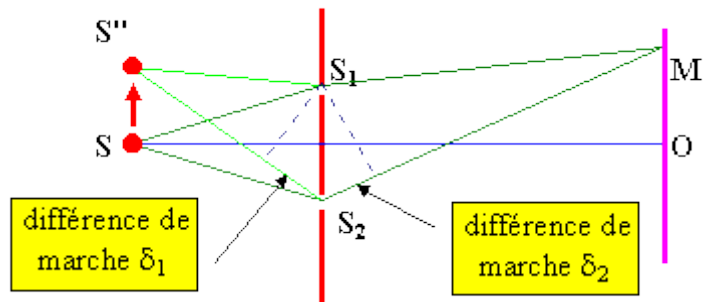
**- IV - Déplacement du système d'interférence. Emploi d'une fente source.**

**1 - Déplacement de S en S'.**



**Pas de modification du phénomène.**

**2 - Déplacement de S en S''.**



$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = a y / d + a x / D$$

Décalage en bloc du système de franges : franges rectilignes et même interfrange que précédemment.

### 3 - Emploi d'une fente linéaire.

Fente de faible largeur ==> augmentation de la luminosité, cependant trouver la largeur optimale pour éviter le brouillage.

## **- V - Applications.**

### 1 - Mesure d'angles.

### 2 - Mesure d'indice.

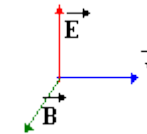
### 3 - Mesure d'épaisseur.

### 4 - Mesure de l'écart angulaire entre deux rayons.

<b>OPTIQUE PHYSIQUE</b>		<b>POLARISATION</b>	
<u><a href="#">Introduction</a></u>		<u><a href="#">Polarisation elliptique</a></u>	
<u><a href="#">Polarisation rectiligne</a></u>		<u><a href="#">Lames onde, demi onde et quart d'onde</a></u>	

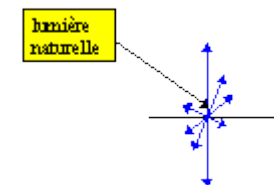
**- I - Introduction.**

- Les phénomènes lumineux peuvent, selon la théorie électromagnétique, être considérés comme liés à la propagation simultanée d'un champ électrique **E** et d'un champ magnétique **B**, constamment perpendiculaires entre eux, ainsi qu'à la direction de propagation, et dont les valeurs sont des fonctions sinusoïdales du temps  $t$ .

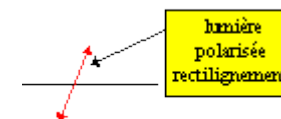


- On raisonnera ci dessous sur le seul champ électrique **E**, auquel sont notamment dus les phénomènes lumineux :
  - Tout d'abord, les vibrations **n'ont pas** de composante parallèle à la direction de propagation.

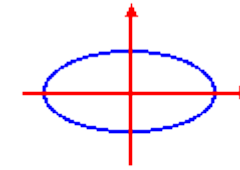
- Dans la lumière dite **naturelle** toutes les orientations, dans le plan perpendiculaire à la vitesse, sont équivalentes.



- On peut cependant produire des lumières dites **polarisées rectilignement**, pour lesquelles le vecteur représentatif reste parallèle à une direction fixe particulière, son extrémité ayant alors une trajectoire rectiligne.

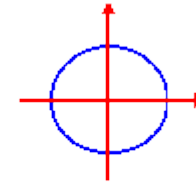


- Il peut également se faire que, dans certaines conditions, son extrémité décrive une ellipse (polarisation elliptique)



Polarisation elliptique

- ou un cercle (polarisation circulaire).



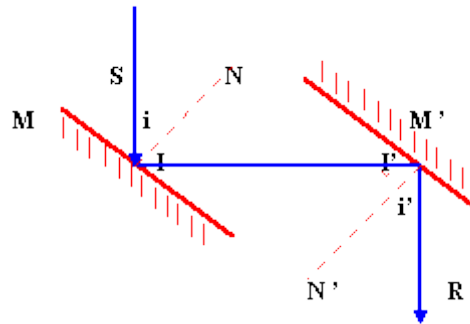
Polarisation circulaire

- En résumé :
  - la lumière naturelle correspond à des orientations de  $\mathbf{E}$ , normales par rapport à la direction de propagation, et toutes équivalentes.
  - la lumière polarisée correspond à **une** orientation privilégiée de  $\mathbf{E}$ .

## - II - Obtention de la lumière polarisée. Polarisation rectiligne.

### - 1 - Polarisation par réflexion vitreuse

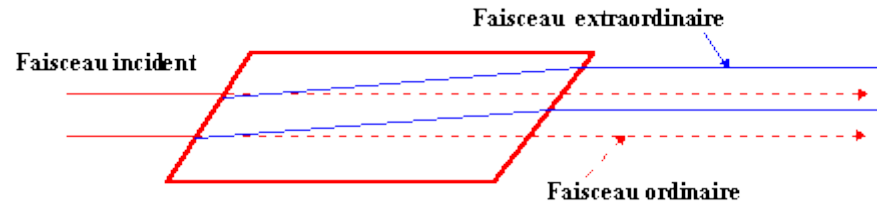
- Soit un faisceau SI de rayons parallèles arrivant sur un miroir de verre M, dont la face postérieure est noircie, de façon que la réflexion n'ait lieu que sur la face antérieure. Le faisceau réfléchi II' est reçu sur un second miroir M' semblable au premier.
- Lorsque l'on fait tourner le miroir M' autour de II', on constate que l'intensité du rayon réfléchi I'R passe par deux maxima et deux minima lors d'un tour complet.



- Les minima sont nuls pour  $i = i'$  (incidence **Brewstérienne**) ; on a alors :  $\tan i = n$  ( $n$  indice du milieu réfléchissant ;  $i = 57^\circ$  pour le verre).
- Lumière rectiligne totale en incidence Brewstérienne.
- La lumière parvenant de la source est de la lumière naturelle : quelle que soit la disposition donnée au miroir  $M$  par rapport au rayon  $SI$  ; on observe donc toujours un rayon réfléchi ; si l'on fait tourner  $M$  autour du rayon  $SI$  l'intensité du rayon réfléchi  $II'$  ne change pas.
- Le faisceau  $II'$ , en revanche, possède des propriétés différentes. En effet, la rotation de  $M'$  autour de l'axe  $II'$  modifie la valeur de l'intensité réfléchie ; le faisceau  $II'$  est un faisceau de **lumière polarisée**.
- Le miroir  $M$  qui **produit** la polarisation de la lumière par réflexion est un **polariseur**.
- Pour repérer les positions relatives des miroirs dans l'expérience fondamentale nous nous donnerons les positions relatives des plans de réflexion sur les miroirs, c'est-à-dire des plans définis par le rayon incident et le rayon réfléchi (ou la normale au miroir au point d'incidence). Nous appellerons ces plans, **plans de polarisation** des miroirs.
- Le second miroir  $M'$  qui permet, par les variations d'intensité du faisceau  $I'R$ , de reconnaître que la lumière est polarisée, est appelé **analyseur**.

## - 2 - Polarisation par double réfraction.

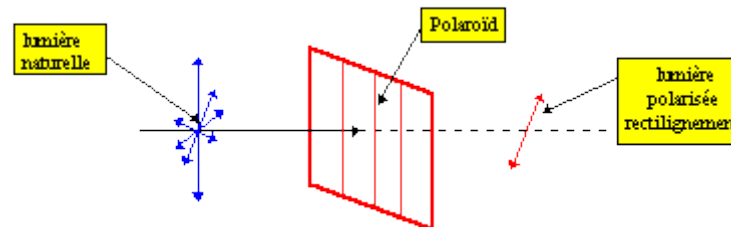
- La majeure partie des cristaux sont biréfringents c'est-à-dire qu'ils donnent deux faisceaux réfractés pour un seul faisceau incident ; ils ont donc **deux** indices de réfraction, l'un correspond aux lois de DESCARTES, il est appelé **indice ordinaire** ; l'autre, qui ne suit pas ces lois, est dit **extraordinaire**.



- On constate que les deux faisceaux transmis sont **polarisés** et que leurs plans de polarisation sont rectangulaires.
- Pour le vérifier, on peut éclairer un tel cristal en lumière naturelle et analyser la lumière transmise à l'aide d'un miroir ; on constate alors que, lorsque le miroir éteint l'un des faisceaux, l'autre est réfléchi avec le maximum d'intensité. Les deux faisceaux de lumière polarisée ont généralement la même intensité et sont peu déplacés l'un par rapport à l'autre ; pour obtenir de la lumière polarisée par réfraction il suffit donc de séparer ces deux rayons.

### - 3 - Polaroids.

- Une feuille de matière plastique (polyvinyle) est étirée à chaud, ses longues molécules sont alors alignées. La feuille ainsi préparée est collée sur une feuille transparente et non élastique ; on obtient ainsi une lame **orientée de façon permanente**. On la trempe alors dans une solution contenant de l'iode qui est fixée par les molécules orientées sous forme de chaînes moléculaires formés d'ions d'iode et pour cela bonnes conductrices de l'électricité.



- Si une onde tombe sur ce réseau, avec ses vibrations parallèles aux conducteurs, ceux-ci absorberont les vibrations sous forme de courants induits ; par contre, si les vibrations sont perpendiculaires aux conducteurs, elles passeront presque sans perte.

### - 4 - Polariseur et analyseur.



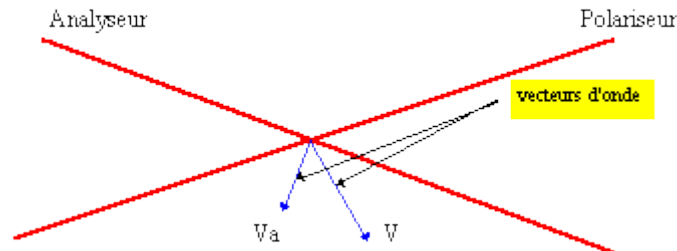
- Tout polariseur rectiligne peut servir d'analyseur, et inversement ; il n'y a donc pas lieu d'étudier deux types différents d'éléments. En d'autres termes, il y a bien une différence de fonction entre polariseur et analyseur, mais **pas de différence de nature**.

### - 5 - Loi de Malus.

- Disposons, à la suite l'un de l'autre, deux polariseurs quelconques (miroirs transparents sous l'indice brewstérienne par exemple) et mesurons, par un procédé photométrique, l'intensité transmise par les deux polariseurs. Celle-ci est **maximale** quand les plans de polarisation sont parallèles et **nulle** lorsque les plans de polarisation sont perpendiculaires.
- Faisons alors tourner le second polariseur ( l'analyseur ) autour du rayon qu'il reçoit ; Malus a montré que si les deux plans de polarisation font entre eux un angle quelconque  $\alpha$ , l'intensité  $I$  émergente est :

$$I = I_0 \cos^2 \alpha ; I_0 \text{ intensité incidente}$$

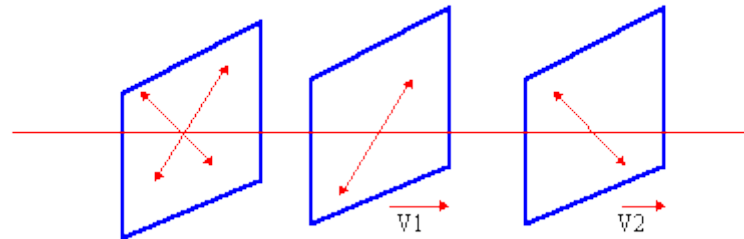
- Interprétation de la loi de Malus :



- Considérons un observateur qui reçoit la lumière comme si elle lui arrivait normalement à travers la page ; soit P la trace du plan de polarisation et A celle du plan de polarisation de l'analyseur. Si V est l'amplitude transmise par le polariseur,  $V_a = V \cos \alpha$ , projection sur le plan de polarisation de la vibration issue du polariseur, est l'amplitude transmise par l'analyseur

### **- III - Polarisation elliptique.**

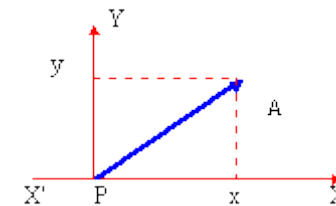
- Si une onde plane de lumière naturelle arrive normalement sur la surface plane d'une lame cristalline, on sait par expérience qu'elle se divise, en pénétrant dans le cristal, en deux ondes, polarisées à angle droit, et ayant des vitesses de phase différentes.
- Soient  $O_1$  et  $O_2$  les directions des vibrations lumineuses de ces ondes ; en reportant ces directions sur la surface de la lame nous y déterminons deux lignes  $xx'$  et  $yy'$ , appelées lignes (ou axes) neutres de la lame, et ayant les propriétés suivantes. Si une onde incidente polarisée rectilignement selon une direction coïncidant avec l'une ou l'autre de ces lignes neutres, elle traversera le cristal sans changer de nature.



- Par convention, on appelle  $xx'$  l'axe correspondant à l'onde la plus lente (on appelle cette ligne l'axe lent de la lame) c'est-à-dire celle pour laquelle l'indice de réfraction est le plus grand.

### - 1 - Vibration elliptique.

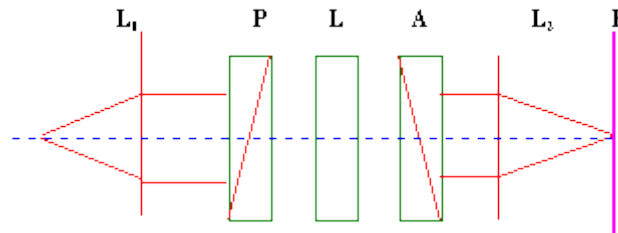
- Soit P un point quelconque de la surface d'entrée de la lame,  $xx'$  et  $yy'$  les lignes neutres en ce point, et A la vibration d'une lumière polarisée. Nous pouvons décomposer A en deux projections portées par les lignes neutres.
- $x = A \cos \alpha$  et  $y = A \sin \alpha$  avec  $A = a \cos \omega t$ .



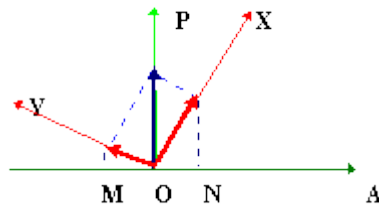
- Ces deux lumières polarisées rectilignes qui existent réellement, se propagent avec des vitesses de phase  $v_x$  et  $v_y$  différentes ( $v_x < v_y$  par convention).

- La lame, d'épaisseur  $e$ , sera parcourue par l'onde lente en un temps  $e/v_x$ , et par l'onde rapide par un temps  $e/v_y$ . Le retard de l'onde lente sur l'onde rapide est donc  $\Delta t = e(1/v_x - 1/v_y)$  et la différence de marche correspondante :  $\delta = C \Delta t$ , où  $C$  est la vitesse de la lumière dans le vide.
- Il lui correspond une différence de phase  $\Phi$  :  $\Phi = 2\pi \delta/\lambda = 2\pi e (n_x - n_y)/\lambda$ .
- Par conséquent, à la sortie de la lame, la vibration lumineuse aura pour projection, sur les lignes neutres de la lame :
  - $x = a \cos \alpha \cos \omega t$  et  $y = a \sin \alpha \cos(\omega t - \Phi)$
- Le point de coordonnées  $(x, y)$ , c'est-à-dire l'extrémité du vecteur vibrant, parcourt une ellipse (dont les équations précédentes sont les équations paramétriques), au lieu de parcourir un segment de droite, comme c'était le cas à l'entrée de la lame, puisque  $y/x = \tan \alpha$ .
- **Les lignes neutres sont les seules directions suivant lesquelles une vibration rectiligne puisse traverser une lame biréfringente sans modification, c'est à dire en restant polarisée rectilignement.**

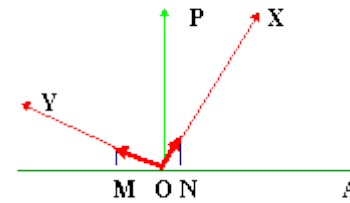
## - 2 - Montage d'étude.



- Une source ponctuelle  $S$  fournit, grâce à une lentille  $L_1$ , un faisceau de lumière parallèle qu'un polariseur transforme en lumière polarisée rectilignement. Le système à étudier est représenté sous forme d'une lame à faces parallèles  $L$ . Un analyseur  $A$  reçoit ensuite la lumière qui émerge de  $L$  et une lentille  $L_2$  fournit une image de la lame  $L$  sur un écran  $E$ .
  - On dispose d'abord les polariseur et analyseur croisés ; lorsque l'on place entre eux une lame cristalline la lumière est en général rétablie à la sortie de l'analyseur. En effet, la vibration incidente est décomposée à l'entrée de la lame  $L$ , en deux vibrations rectilignes dirigées suivant les lignes neutres.
  - A la sortie, ces deux vibrations, projetées sur le plan de vibration de l'analyseur, ont une résultante qui n'est pas nulle. En effet, à l'entrée de la lame  $L$ , les deux composantes  $ON$  et  $OM$  sont à tout instant opposées ; mais comme leur vitesse de propagation dans la lame est différente, elles ne sont plus opposées à la sortie et leur résultante n'est donc plus nulle.



A l'entrée de la lame



A la sortie de la lame

- L'intensité lumineuse observée est proportionnelle à la longueur du segment MN. Si on fait tourner la lame L dans son plan, à chaque fois que l'une de ses lignes neutres devient parallèle à la vibration incidente, celle-ci est transmise sans modification et l'extinction à la sortie de l'analyseur est rétablie ; c'est ainsi que l'on détermine les lignes neutres d'une lame donnée L.

### - 3 - Etude de la vibration obtenue - cas général.

- Si l'on reporte toute la variation de phase sur l'une des composantes de la vibration, à la sortie de la lame, on aura :

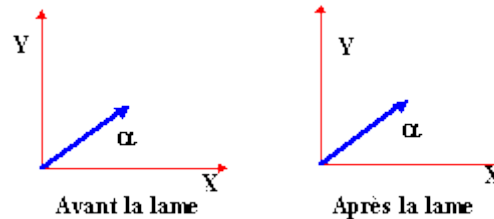
$$x = x(t) = A \cos \alpha \cos \omega t$$

$$y = y(t) = A \sin \alpha \cos (\omega t - \Phi)$$

- Ces équations paramétrées correspondent à une famille d'ellipses, dont les paramètres dépendent de  $\alpha$  et du déphasage  $\Phi$ . A la sortie de la lame, x et y varient respectivement entre  $\pm A \cos \alpha$  et  $\pm A \sin \alpha$  mais atteignent ces valeurs extrêmes à des temps différents, contrairement à ce qui se passait à l'entrée. **Ils ne sont généralement plus en phase** ; donc l'extrémité de la vibration émergente ne parcourt plus, comme c'était le cas à l'entrée de la lame, un axe passant par O. La vibration émergente n'est donc plus polarisée rectilignement. On peut démontrer que la trajectoire est une **ellipse** dont les axes de symétrie sont distincts des axes neutres. L'angle entre eux dépend de la valeur de  $\Phi$  et de  $\alpha$ .
- Cas particuliers( Pour plus de détails, voir en annexe.)
  - L'ellipse peut se réduire à un segment de droite
    - Dans le cas général :  $y / x = \tan \alpha ( \cos \omega t / \cos(\omega t - \Phi) )$ . Ceci se ramène à :

$$y / x = \pm \operatorname{tg} \alpha \text{ si } \Phi = K \pi \text{ c'est à dire si } \delta = K \lambda / 2 .$$

- De plus :
  - si K est **pair** :

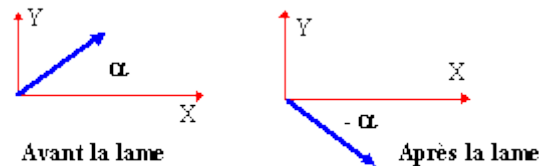


**Même direction de polarisation**

la vibration a la même direction qu'à l'entrée ; en effet :  $y / x = \tan \alpha$  .

Ce cas correspond à  $\delta = k \lambda$  ; la lame considérée est appelée "**lame onde**".

- si K est **impair** :

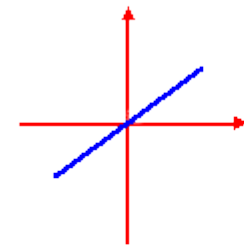


**Directions de polarisation opposées**

on a :  $y / x = - \tan \alpha = \tan(-\alpha)$  ; la vibration possède à la sortie de la lame une direction symétrique de sa position d'entrée, par rapport aux axes neutres.

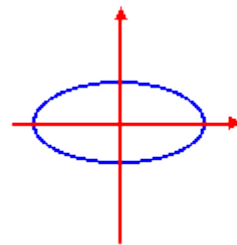
- Une telle lame, qui produit une différence de phase de  $\Phi = (2k+1) \pi$  , c'est à dire une différence de marche de  $(2k+1)\lambda/2$  est appelée "**lame 1/2 onde**".

- L'ellipse peut se réduire à un cercle.
  - Lorsque  $\Phi = (2k+1)\pi / 2$ , c'est à dire  $= (2k+1)\lambda/4$ , l'ellipse, lieu géométrique de l'extrémité de l'onde émergente, possède des axes de symétrie confondus avec les axes neutres.



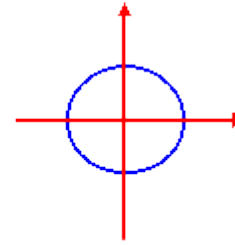
A l'entrée de la lame

**Polarisation rectiligne**



A la sortie de la lame  
(  $\alpha$  quelconque )

**Polarisation elliptique**



A la sortie de la lame  
(  $\alpha = \pi / 4$  )

**Polarisation circulaire**

- Lorsque  $\alpha = \pi / 4$ , valeur de  $\alpha$  pour laquelle  $\cos \pi / 4 = \sin \pi / 4$ , alors l'ellipse se ramène à un cercle. Une lame produisant une telle différence de phase de  $(2k+1)\lambda/4$  (c'est à dire  $= (2k+1)\lambda/4$ ) est appelée "**lame quart d'onde**".

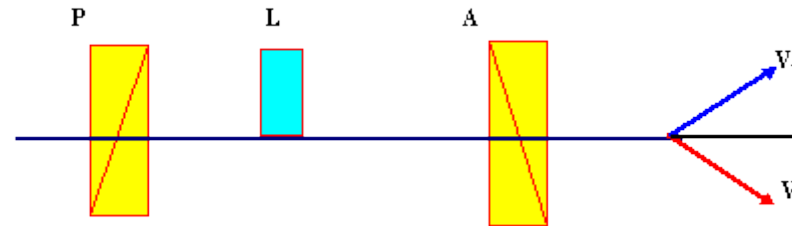
### - III - Etude de lame à faces parallèles : 1/2 onde ou 1/4 onde.

#### - 1 - Lame onde.

- Ce sont des lames de quartz ou de mica qui introduisent entre les deux vibrations une différence de marche  $\delta = k\lambda$ , donc une différence de phase de  $2k\pi$ .
- Elles ne changent donc rien aux propriétés de la lumière de longueur d'onde  $\lambda$ , mais de celle-là seulement ; placées entre polariseur et analyseur croisés, **en lumière blanche**, elles laisseront éteintes la lumière pour laquelle elles sont "onde" mais rétabliront les autres.

#### - 2 - Lame demi onde.

- Comme on l'a vu ci dessus, une lame 1/2 onde recevant une vibration rectiligne  $V_1$  fournit à la sortie une vibration également rectiligne  $V_2$ , symétrique de  $V_1$  par rapport aux axes neutres de la lame. Ceci est mis à profit pour mesurer de faibles rotations du plan de vibration d'une lumière rectiligne.



- Entre un polariseur et un analyseur, on place, sur la moitié seulement du champ, une lame 1/2 onde dont une des lignes neutres fait un angle  $\alpha$  **petit** avec le plan de vibration de l'onde ; elle transforme la vibration incidence  $V_i$  en une vibration  $V_t$ , symétrique par rapport à la ligne neutre. Dès lors, les deux moitiés du champ contenant l'une  $V_i$  et l'autre sa symétrique  $V_t$  ; l'analyseur ne peut en éteindre qu'une, mais les positions correspondantes se repèrent mal. Par contre, on peut repérer, **avec beaucoup plus de précision**, la position de l'analyseur pour laquelle les deux plages ont **la même intensité** car, à ce moment là, l'analyseur a son plan de vibration perpendiculaire à la ligne neutre qui est bissectrice de l'angle entre, d'une part, la vibration provenant directement du polariseur et, d'autre part, celle ayant traversé la lame demi onde et dont le plan de polarisation est symétrique du précédent par rapport à l'axe neutre.
- Si, pour une raison quelconque, le plan de vibration de la lumière polarisée tourne d'un petit angle  $\beta$ , et que la cause de cette rotation soit introduite entre la lame 1/2 onde et l'analyseur, c'est une variation angulaire de  $2\beta$  que l'on retrouvera entre les deux ondes arrivant sur l'analyseur. Pour rétablir **l'égalité d'éclairement** il faudra alors tourner l'analyseur du même angle  $\beta$ , pour que son plan de vibration redevienne perpendiculaire à la bissectrice ( $V_i$ ,  $V_t$ ) et que cela rétablisse l'égalité d'éclairement des deux moitiés du champ. Cela permet une grande précision de détermination de l'angle  $\beta$ .

Partie ne traversant pas la lame
Extinction partielle après traversée de la lame

Eclairement uniforme après réglage de l'analyseur
---

### - 3 - lame quart d'onde.

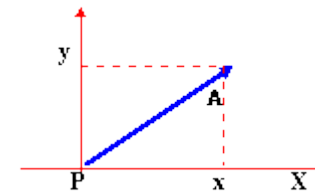
- Expérimentalement, on place la lame L entre deux polariseurs croisés P et A, et on détermine les orientations de la lame pour lesquelles on maintient l'extinction. Ces positions sont celles des axes neutres de la lame, qui par définition n'affectent pas la nature de l'onde incidente (polarisée rectilignement selon un plan de polarisation fixé). On tourne alors L dans de 45°; les lignes neutres font alors un angle de 45° avec les plans (perpendiculaires) des vibrations de P et A. A la sortie de la lame, la lumière polarisée circulairement n'est plus éteinte par l'analyseur, quelle que soit sa position. L'intensité transmise par l'analyseur est même constante. On a une lumière émergente polarisée circulairement.

## ANNEXE

### 1 ) A l'entrée de la lame

$$x = a \cos \alpha \cos (\omega t)$$

$$y = a \sin \alpha \cos(\omega t - \phi)$$



### 2 ) A la sortie de la lame.

- $x = a \cos \alpha \cos \omega t$  (3) et  $y = a \sin \alpha \cos (\omega t - \Phi) = a \sin \alpha (\cos \omega t \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi)$  (4)
- La trajectoire de l'extrémité du vecteur d'onde étant donnée par :  $y = f(x)$ , il faut donc éliminer t dans les équations précédentes :



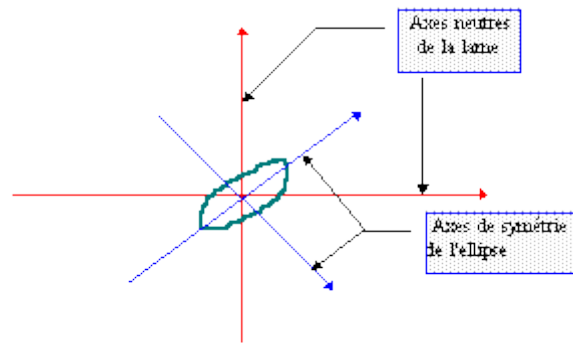
$$\cos \omega t = x / a \cos \alpha ; \text{ et donc : } \sin \omega t = (1 - \cos^2 \omega t)^{1/2} = (1 - x^2 / a^2 \cos^2 \alpha)^{1/2}$$

- On trouve, pour la relation  $y = f(x)$  :  
 $y = a \sin \alpha (x \cos \phi / a \cos \alpha + \sin \phi (1 - x^2 / a^2 \cos^2 \alpha)^{1/2})$

soit :  $(y - x \cos \phi \sin \alpha / a) = \sin \phi (1 - x^2 / a^2 \cos^2 \alpha)^{1/2}$  et, en élevant au carré, :

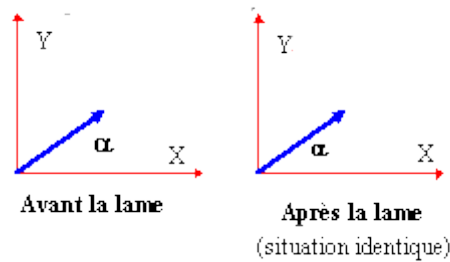
$$(y - x \cos \phi \sin \alpha / a)^2 = \sin^2 \phi (1 - x^2 / a^2 \cos^2 \alpha)$$

- Cette relation est l'équation d'une ellipse, de centre est O, mais dont les axes de symétrie **ne coïncident pas** avec les axes de coordonnées, ici les axes neutres de la lame.



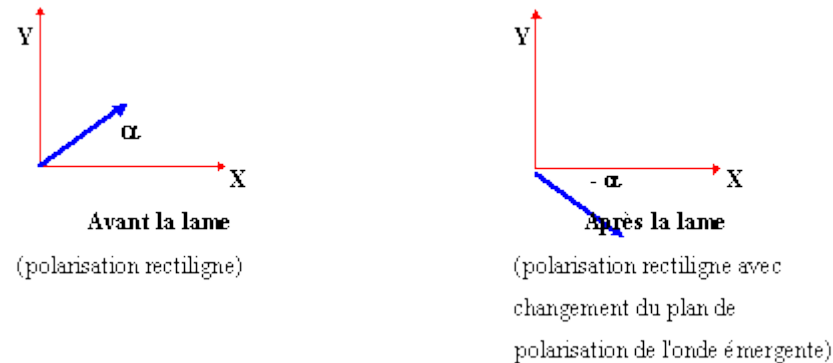
### 3) Cas particuliers.

- On recherchera les cas où l'ellipse définie ci dessus se ramène à une droite , ou à une ellipse rapportée aux axes de coordonnées ou, mieux, à un cercle. Pour étudier ces différents cas, il suffira de rechercher l'expression analytique de la trajectoire du vecteur d'onde, à partir des équations (3) et (4), en éliminant  $t$ .
  - i) lame onde.* Elle est telle que  $\delta = k\lambda$  c'est à dire  $\phi = 2k\pi$ . On a donc, dans (4) :  $\cos (\omega t - \Phi) = \cos (\omega t)$  ;  
 d'où, en exprimant  $\cos (\omega t)$  dans (3) et (4),  $y / x = \tan \alpha$  équation d'une droite faisant avec les axes de coordonnées (axes neutres de la lame) un angle  $\alpha$  . L'onde émergente est donc polarisée rectilignement et son plan de polarisation fait avec les axes neutres le même angle que l'onde incidente. **En résumé, il n'y a aucune modification de l'onde incidente.**



- *Lame demi-onde.* Une telle lame produit une différence de phase de  $\Phi = (2k+1)\pi$ , c'est à dire une différence de marche de  $(2k+1)\lambda/2$ . Dans l'équation (4), on a alors :  $\cos(\omega t - \Phi) = -\cos(\omega t)$  ;

d'où, à partir des équations (3) et (4), la relation :  $y/x = -\tan \alpha = \tan(-\alpha)$ . L'onde émergente est donc polarisée rectilignement, mais son plan de polarisation fait avec l'axe Ox un angle  $-\alpha$ , alors que l'onde incidente faisait un angle  $\alpha$ . **En résumé, la lame demi-onde conserve la polarisation rectiligne de l'onde mais modifie son plan de polarisation ; celui-ci devient symétrique du plan de polarisation de l'onde incidente par rapport aux axes neutres.**



- *Lame quart d'onde.* Une telle lame, produit une différence de phase de  $\Phi = (2k+1)\pi/2$ , c'est à dire une différence de marche de  $(2k+1)\lambda/4$ . Dans l'équation (4), on a alors :  $\cos(\omega t - \Phi) = \pm \sin(\omega t)$ .

On extrait alors  $\cos(\omega t)$  de l'équation (3), et  $\pm \sin(\omega t)$  de l'équation (4), puis on somme leurs carrés (le signe  $\pm$  du sinus n'a alors plus d'importance). On obtient donc :

- $(x / a \cos \alpha)^2 + (y / a \sin \alpha)^2 = 1$  ; d'où :  $x^2 / (a \cos \alpha)^2 + y^2 / (a \sin \alpha)^2 = 1$
- qui est l'équation d'une ellipse rapportée aux axes de coordonnées.

