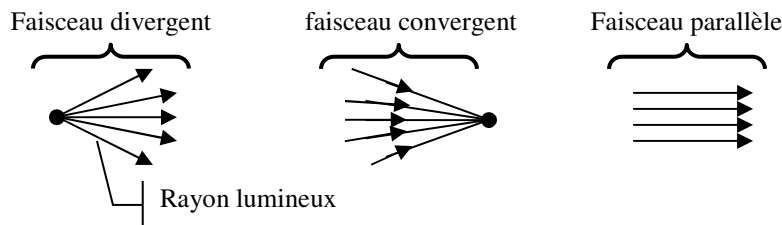


RESUME DU CHAPITRE 2 OPTIQUE ET BIOPHYSIQUE DE LA VISION

1- Principe de l'optique géométrique :

Dans l'étude de la lumière rencontrant les objets d'échelle macroscopique, la petitesse des longueurs d'onde ($\lambda \sim 10^{-7} \text{m}$) du visible vis à vis des grandeurs des objets qu'elle rencontre ($L \sim 1 \text{cm}$ et plus) a permis d'élaborer une théorie géométrique de la propagation des ondes lumineuses appelée "L'optique géométrique".

On appelle *rayon lumineux* la droite ou portion de droite suivi par la lumière. Un *faisceau lumineux* est l'ensemble des rayons émis par une même source. Un faisceau lumineux peut être *divergent* si les rayons lumineux s'éloignent les uns des autres, *convergent* s'ils se rapprochent, *parallèle* si les faisceaux qui le constituent sont parallèles entre eux.

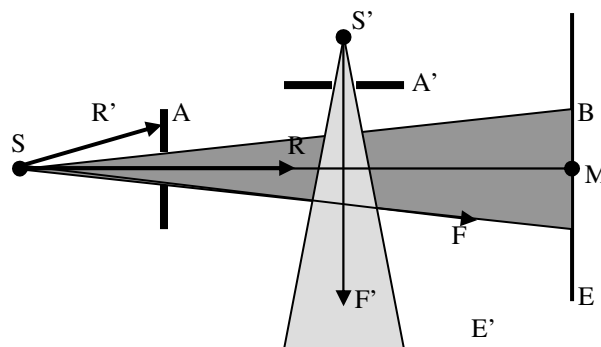


L'optique géométrique est basée sur trois principes :

Principe 1- Propagation rectiligne : Dans un milieu *homogène, transparent et isotrope*, les rayons lumineux se **propagent en lignes droites**

Principe 2- Indépendance des rayons lumineux : Il existe des *rayons lumineux* qui **restent indépendants** les uns des autres (pas d'interaction entre eux).

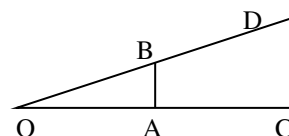
Principe 3. Les rayons lumineux, traversant la surface de séparation entre deux milieux différents, obéissent aux lois de **Snell-Descartes**.



L'expérience schématisée ci-dessus, illustre les deux premiers principes. Deux sources ponctuelles S et S' émettent de la lumière qui traversent les ouvertures A et A' et viennent éclairer les écrans E et E'. On vérifie que la zone éclairée sur chaque écran est homothétique¹ de l'ouverture correspondante A ou A'. Le centre d'homothétie étant S et S'. Ceci confirme la validité du premier principe.

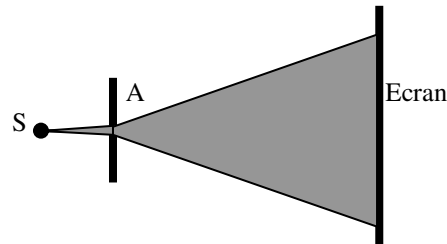
Si maintenant on modifie l'ouverture de A, on constate que l'éclairement en M ne varie pas. C'est à dire que le fait qu'un rayon tel que R', passe ou ne passe pas à travers A, ne modifie en rien la propagation du rayon R. Ceci

¹ l'homothétie dans le triangle est donnée par $\frac{OC}{OA} = \frac{CD}{AB}$



implique qu'il y'a indépendance des rayons lumineux issus d'une même source. Enfin la source S', qu'elle soit éteinte ou allumée ne produit aucun changement au point M. En d'autres termes les rayons lumineux F et F' se propagent indépendamment dans la même région.

La validité de ces principes cesse lorsque les dimensions des objets rencontrés par la lumière sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Si l'ouverture A devient très petite, la zone éclairée sur l'écran n'est plus homothétique de l'ouverture en A. Les dimensions de cette zone croissent même quand le diamètre de l'ouverture diminue. C'est la diffraction, phénomène que l'on peut expliquer par l'optique ondulatoire.

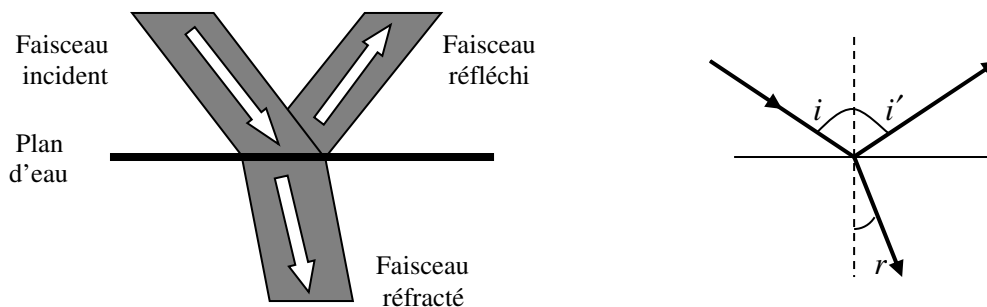


En conclusion les principes de l'optique géométrique restent valables tant que la lumière ne traverse pas des ouvertures étroites, ce que l'on évite précisément dans les instrument d'optique.

Faisons arriver un faisceau parallèle de lumière de longueur d'onde donnée (*Lumière monochromatique*) à la surface d'un plan d'eau additionnée de fluorescéine, pour rendre ainsi visible les trajets lumineux.

On observe :

- a- Un faisceau cylindrique *réfléchi* par la surface de l'eau.
- b- Un faisceau cylindrique *réfracté* à travers la surface de l'eau.



Les lois relatives à ces deux phénomènes : la *réflexion* et la *réfraction* décrivant le comportement des rayons lumineux, à la séparation de deux milieux, s'appellent les lois de *Snell-Descartes*.

1^{ère} loi : Les rayons incident, réfléchi et réfracté sont contenu dans un même plan appelé *plan d'incidence*.

2^{ème} loi : L'angle de réflexion i' est égale à l'angle d'incidence i .

3^{ème} loi : Il existe un rapport constant entre le sinus des angles d'incidence et de réfraction. la constante ne dépend que de la nature des milieux (1) et (2). Elle est appelée indice du second milieu par rapport au premier et noté $n_{2/1}$.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{2/1}$$

Certaines considérations permettent de dire que l'indice relatif de deux milieux (1) et (2) est le quotient de leurs indices par rapport à un autre milieu (3) pris comme référence.

$$n_{2/1} = \frac{n_{2/3}}{n_{1/3}}$$

Le vide est alors pris comme référence et son indice est l'unité.

On définit l'indice absolu d'un milieu (1), noté maintenant n_1 , par son indice par rapport à l'air $n_{2/air}$.

Il vient que :

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

Et en définitif, la 3^{ème} loi devient :

$$n_1 \times \sin i = n_2 \times \sin r$$

Remarque : L'indice de réfraction n d'un milieu a une signification physique. L'indice de réfraction représente le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide c et la vitesse de la lumière dans ce milieu v .

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

Cas particulier $n_1 < n_2$:

On dit que l'on passe d'un milieu (1) *moins réfringent* vers un milieu (2) *plus réfringent*.
la loi de Descartes nous donne que :

$$n_1 \times \sin i = n_2 \times \sin r$$

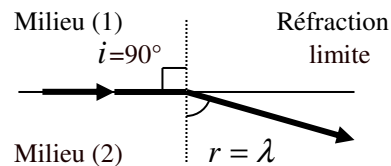
Nous en déduisons que :

$$n_1 < n_2 \Leftrightarrow \sin i > \sin r \Leftrightarrow i > r$$

L'angle de réfraction est toujours plus petit que l'angle d'incidence. L'angle d'incidence $i \in [0, \pi/2]$, il en découle que $r \in [0, \lambda]$.

où λ appelé *angle de réfraction limite*, est donnée par :

$$\sin \lambda = \frac{n_1}{n_2}$$



Si l'angle d'incidence est maximale $i = \pi/2$, l'angle de réfraction sera égale à l'angle λ :
C'est la *réfraction limite*.

Cas particulier $n_1 > n_2$:

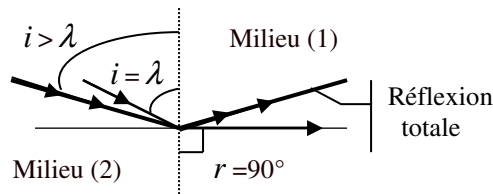
On dit que l'on passe d'un milieu (1) *plus réfringent* vers un milieu (2) *moins réfringent*.
De la relation de Descartes, on déduit que :

$$n_1 > n_2 \Leftrightarrow \sin i < \sin r \Leftrightarrow i < r$$

l'angle d'incidence est plus petit que l'angle de réfraction. $i \in [0, \lambda]$ alors que $r \in [0, \pi/2]$.

C'est r qui atteindra la valeur de $\pi/2$, alors que i atteindra la valeur de l'angle limite λ , donnée par :

$$\sin \lambda = \frac{n_2}{n_1}$$



Si maintenant l'angle d'incidence venait à dépasser la valeur de λ , la loi de Descartes n'est plus valable et le phénomène de *réflexion totale* apparaît. la surface se comporte comme un miroir.

Remarque : le sinus de l'angle limite λ est le rapport de l'indice le plus petit sur l'indice le plus grand.

2- Systèmes optique : Stigmatisme, Réalité et Virtualité.

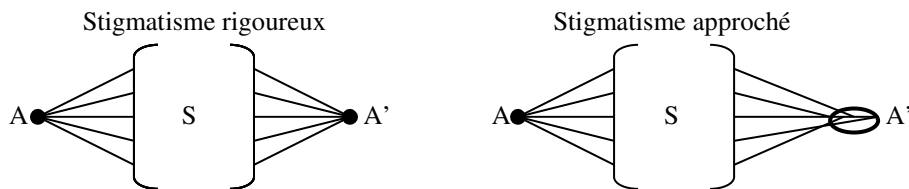
On appelle **système optique** un ensemble de surfaces réfléchissantes et/ou transparentes ayant *une face d'entrée et une face de sortie* des faisceaux lumineux. Il existe deux classes de systèmes optiques :

- Les *systèmes dioptriques* que la lumière traverse de bout en bout, en ne subissant que des réfractions.
- Les *systèmes catadioptriques* où la lumière subit une série de réfraction et se trouve renvoyée par une réflexion dans sa direction initiale.

2-1. Le stigmatisme :

Un point lumineux A envoie des rayons lumineux vers un système optique S. On dit qu'il y a un *stigmatisme rigoureux* si tous les rayons qui sortent de S passent tous par un seul point A'.

A est appelé le *point objet* et A' le *point image*. On dit que A' est une image rigoureusement stigmatique de A par rapport au système optique S.



A l'exception du miroir plan, le stigmatisme rigoureux est très rarement réalisé. En réalité, les rayons qui sortent du système passent tous à l'intérieur d'une région entourant A'. A un point objet A correspond une tache image A'. Cette tache étant destinée à être vue par des instruments imparfaits, elle peut être confondue avec un point si ses dimensions sont réduites. C'est le *stigmatisme approché*.

2-2. Réalité et virtualité :

L'objet est objet réel s'il se trouve avant la face d'entrée du système.

L'objet est objet virtuel s'il se trouve après la face d'entrée du système.

L'image est dite réelle si elle se trouve après la face de sortie du système.

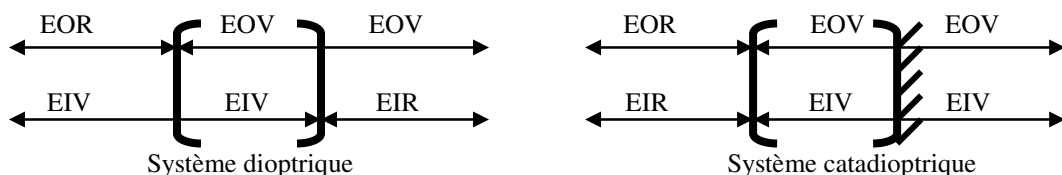
L'image est dite virtuelle si elle se trouve avant la face de sortie du système.

Chaque point de l'espace peut être un point objet ou un point image. L'espace est donc dédoublé : *l'espace objet* et *l'espace image*.

L'espace objet est divisé en deux régions par la face d'entrée du système : Espace Objet Réel (EOR) et Espace Objet Virtuel (EOV).

L'espace image est divisé en deux régions par la face de sortie du système : Espace Image Réel (EIR) et Espace Image Virtuel (EIV).

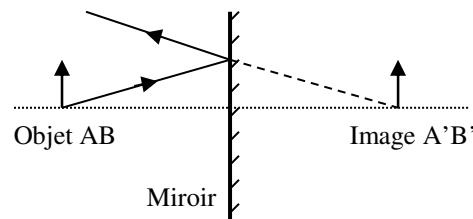
Pour les systèmes catadioptriques la face d'entrée est aussi une face de sortie



3- Le miroir plan :

L'état miroir est une surface réfléchissante. Seul le phénomène de réflexion entre en jeu.

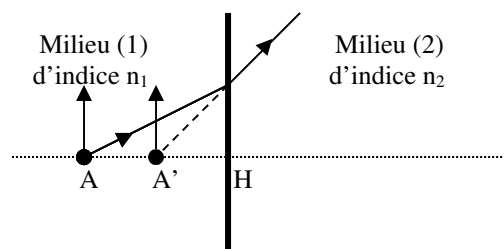
le miroir plan est une surface plane réfléchissante. Il donne une image rigoureusement stigmatique, symétrique de l'objet par rapport au miroir.



- L'objet AB et son image A'B' sont **symétrique** par rapport au miroir M.
- **L'objet et l'image sont toujours de nature différente** : Si l'objet est réel son image est virtuelle et inversement si l'objet est virtuelle son image est réelle.
- L'objet et l'image sont toujours de **part et d'autre** du miroir.
-
- le miroir est **rigoureusement stigmatique**.

4- Le dioptre plan :

Le *dioptre* est la **surface de séparation entre deux milieux homogènes d'indice différent**. Il est dit *dioptre plan* si cette surface est plane.



La position de l'objet HA noté p et la position de l'image HA' noté q sont relié par la relation de conjugaison :

$$\frac{n_1}{p} = \frac{n_2}{q}$$

- **L'objet et l'image sont toujours du même coté** du dioptre.
- L'objet et l'image sont toujours **de nature différente** : Si l'objet est réel son image est virtuelle et inversement si l'objet est virtuelle son image est réelle.
- L'image est toujours **droite p** par rapport à l'objet et de même grandeur que l'objet : $\gamma = \frac{A'B'}{AB} = +1$ où γ est le grandissement.
- Le dioptre plan n'est pas un système optique stigmatique. **Seul le stigmatisme approché est réalisé.**

5- La lame à faces parallèles :

La lame à faces parallèles est constitué de **deux dioptres plans parallèles entre eux**. La lame est supposée dans l'air son épaisseur est e et son indice est n .

Les faisceaux incident et émergent sont parallèles : L'angle d'incidence est égale à l'angle d'émergence.

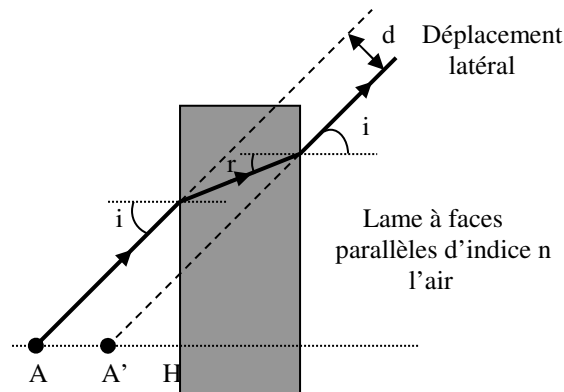
Le déplacement latéral d est donnée par :

$$d = e \times \frac{\sin(i-r)}{\cos r}$$

La position de l'objet AB et la position de l'objet A'B' sont reliées par la relation :

$$AA' = e \left(1 - \frac{1}{n} \right)$$

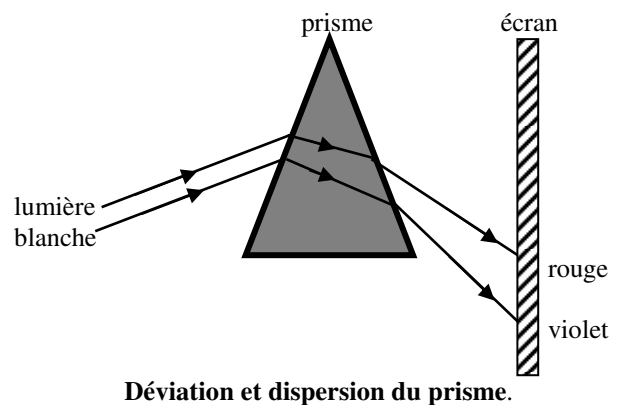
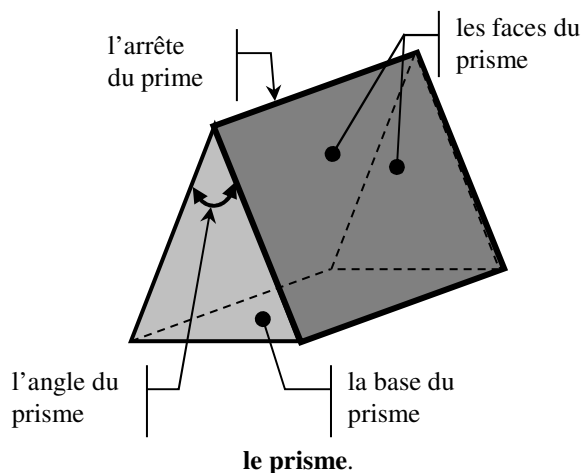
- La distance Objet-Image est indépendante de la distance de l'objet à la lame.
- Si la lame est plongée dans un milieu n' il suffit de remplacer n par $\frac{n}{n'}$ dans la formule précédente.
- **L'objet et l'image sont toujours de nature différente** : Si l'objet est réel son image est virtuelle et inversement si l'objet est virtuelle son image est réelle.
- L'image est toujours droite par rapport à l'objet et de même grandeur que l'objet : $\gamma = \frac{A'B'}{AB} = +1$ où γ est le grandissement.
- Si $n > n'$ l'image se trouve **après** l'objet et si $n < n'$ l'image se trouve **avant** l'objet.
- La lame à face parallèles **n'est pas un système rigoureusement stigmatique.**



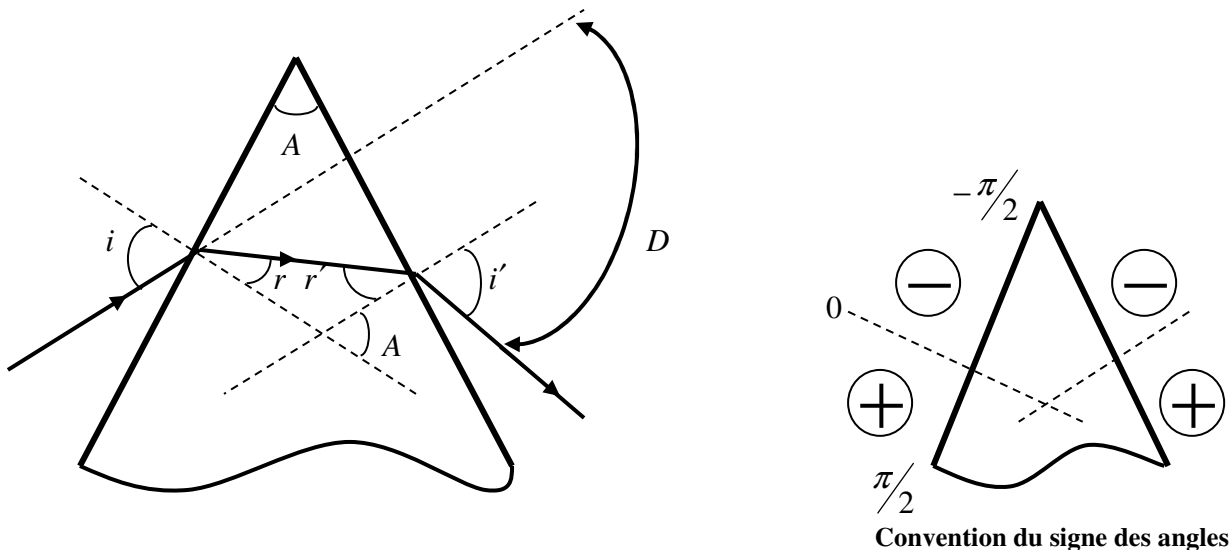
6- Le prisme :

Le prisme est un milieu transparent limité par deux surfaces **planes non parallèles appelées les faces du prisme**. **L'arrête du prisme** est la droite intersection des deux surfaces planes. L'angle formé par les deux faces du prisme est appelé **l'angle du prisme**. La troisième surface qui n'intervient pas dans la propagation de la lumière est appelée **la base du prisme**.

Le prisme a deux propriétés : **la dispersion** et **La déviation**.



- ❑ *La dispersion* : le prisme décompose la lumière blanche. La dispersion est d'autant plus grande que la longueur d'onde de la lumière incidente est petite.
- ❑ La déviation : Considérons un prisme d'angle A d'indice n dans l'air d'indice unité. La marche d'un rayon lumineux dans le prisme est donnée par la figure suivante :



Marche d'un rayon lumineux et angles correspondants

Les différents angles sont reliés entre eux par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \sin i &= n \times \sin r & \sin i' &= n \times \sin r' \\ A &= r + r' & D &= i + i' - A \end{aligned}$$

Conventions de signes : Les angles i , i' , r et r' sont des angles dont la valeur est algébrique. i et i' sont positifs s'ils sont du côté de la base par rapport à la normale. Ils sont négatifs s'ils sont du côté de l'arête par rapport à la normale. r et r' ont toujours le même signe que i et i' . A et D sont toujours positifs.

Conditions d'émergence : Pour que tout rayons incident sur la première face du prisme puisse émerger par la deuxième face il faut que les deux conditions suivantes soient vérifiées en même temps :

- ❑ 1^{ère} condition : L'angle du prisme A doit être inférieur ou égale au double de l'angle limite λ . Cette condition est **nécessaire mais non suffisante**.

$$A \leq 2 \times \lambda$$

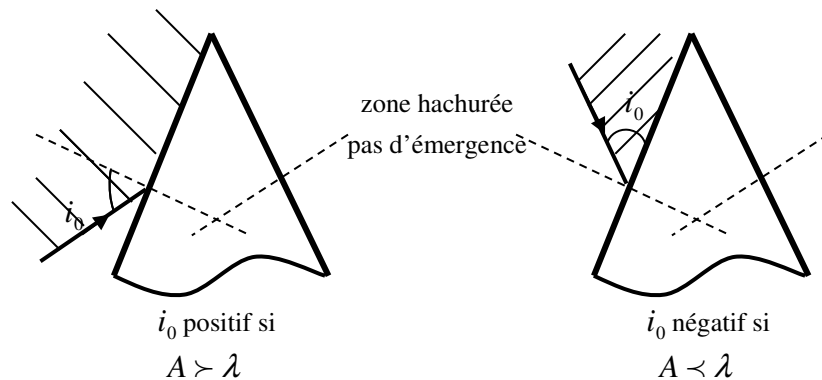
- ❑ 2^{ème} condition : L'angle d'incidence i doit être supérieur ou égal à un angle minimum i_0 . **Cette condition est nécessaire et suffisante**. Elle est donnée par la relation :

$$i \geq i_0 \quad \text{tel que : } \sin i_0 = n \times \sin(A - \lambda)$$

Si $A > 2 \times \lambda$, on a une réflexion totale sur la deuxième face. Celle-ci se comportera comme un miroir et il n'y a **pas d'émergence**.

Si $A \leq 2 \times \lambda$, deux cas peuvent se présenter : $i < i_0$ il n'y a pas d'émergence ou $i \geq i_0$ et il y a émergence.

La valeur de i_0 peut être positive ou négative selon que soit supérieur ou inférieur à λ .



La déviation minimum : La déviation D dépend de l'angle d'incidence, de l'angle A et de l'indice n du prisme.

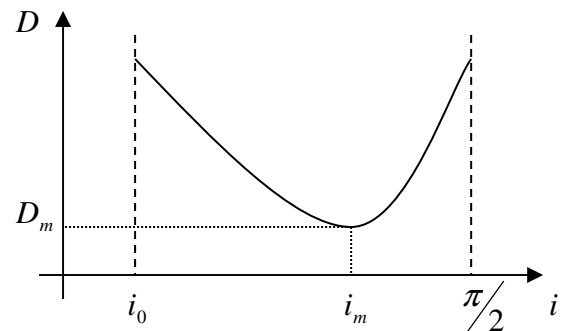
- D est une fonction croissante de A .
- D est une fonction croissante de n .
- D est une fonction de i qui passe par un minimum D_m pour une certaine valeur i_m .

Au minimum de déviation, nous avons les relations suivantes :

$$i = i' = i_m \text{ et } \sin i_m = n \times \sin r_m$$

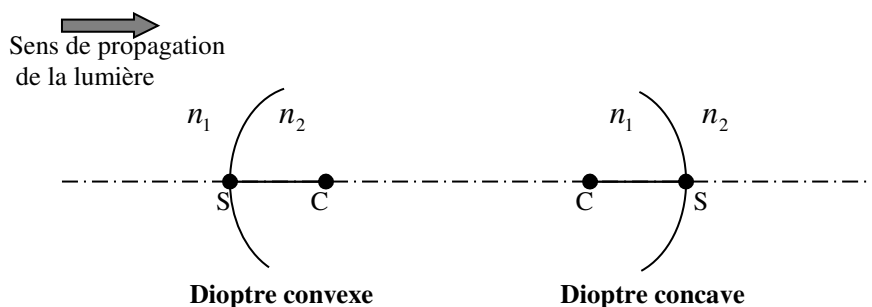
$$r = r' = r_m = \frac{A}{2}$$

$$D_m = 2 \times i_m - A$$



7- Le dioptre sphérique :

Le dioptre sphérique est constitué par deux milieux transparents homogènes séparés par une surface sphérique de rayon de courbure R . Le sommet du dioptre est noté S et le centre de courbure est noté C . L'axe optique est maintenant un axe orienté dans le sens de la lumière incidente. Son origine est le sommet S du dioptre sphérique.



- **Relation de conjugaison :** Considérons un dioptre sphérique de rayon $\overline{SC} = R$, séparant deux milieux d'indice n_1 et n_2 . Un objet A distant du sommet du dioptre de $\overline{SA} = p$ donnera une image A' distante de $\overline{SA'} = q$. La relation liant ces grandeurs est donnée par :

$$\frac{n_2}{q} - \frac{n_1}{p} = \frac{n_2 - n_1}{R} = \frac{n_2}{f'} = -\frac{n_1}{f}$$

où $f' = \overline{SF'}$ est la distance focale image et $f = \overline{SF}$ la distance focale objet. Le point F' est dit point focal image et F est le point focal objet. Les points focaux sont des points particuliers et ont les propriétés suivantes :

- Un objet placé à l'infini donne une image au point focal image F' .
- Un objet placé au point focale F objet donne une image à l'infini.

On définit aussi le grandissement γ du dioptre sphérique par :

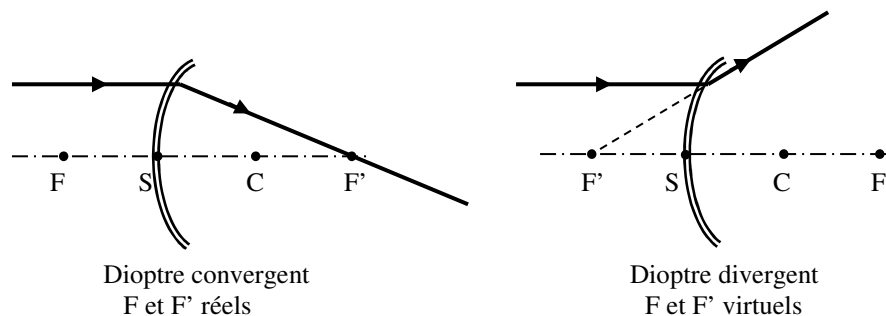
$$\gamma = \frac{\overline{A_1B_1}}{AB} = \frac{\left(\frac{q}{n_2}\right)}{\left(\frac{p}{n_1}\right)}$$

Si γ est positif l'image a la même orientation que l'objet : on dit que l'image est droite par rapport à l'objet.
Si γ est négatif l'image a une orientation inverse de l'objet : on dit que l'image est renversée par rapport à l'objet.

Les foyers objet et image sont toujours de même nature : ils sont tous les deux réels ou les tous deux virtuels. Les foyers sont toujours de part et d'autre du dioptre sphérique. Les distances focales objet et images vérifient les relations suivantes :

$$f + f' = R \qquad \frac{f'}{f} = -\frac{n_2}{n_1}$$

Un dioptre à foyers réels est convergent et un dioptre à foyers virtuels est divergent.



Remarque importante :

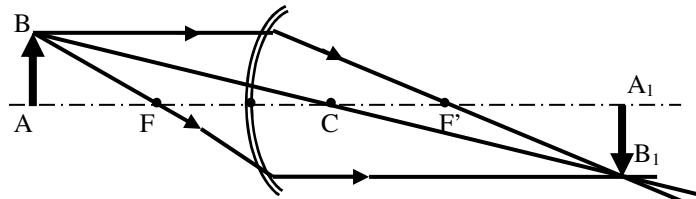
Toutes les grandeurs R , f , f' , p et q sont des grandeurs algébriques positives ou négatives selon leurs positions par rapport au point S .

L'axe est orienté selon la direction de propagation de la lumière (de la gauche vers la droite). Les grandeurs à droite de S sont positives. Les grandeurs à gauche de S sont négatives.

Construction géométrique :

La construction géométrique est un tracé de rayons qui permet de trouver la position approximative et la nature de l'image A_1B_1 d'un objet AB . C'est un bon moyen pour vérifier les résultats donnés par le calcul. On se base sur le tracé de trois rayons tous issus du point B de l'objet. Ces trois rayons traversent le dioptre sphérique et se coupent en un même point qui est la position de B_1 .

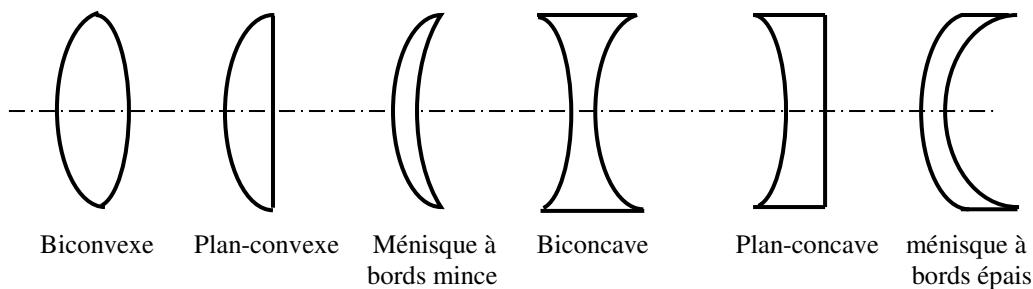
- 1^{er} rayon** : Issu de B, un rayon incident parallèle à l'axe optique principale donne un rayon émergent qui passe par le foyer image F'.
- 2^{ème} rayon** : Issu de B, un rayon incident passant par le foyer objet F donne un rayon émergent parallèle à l'axe optique principale.
- 3^{ème} rayon** : Issu de B, un rayon incident passant par le centre du dioptre C n'est pas dévié.



En réalité **deux rayons suffisent** à faire une construction géométriques.

7- La lentille mince :

La lentille est l'association de deux dioptré dont l'un au moins est sphérique. Une lentille est dite **mince** si son épaisseur est négligeable devant les rayons de courbures des deux dioptrés. Si la condition de minceur est vérifiée, nous pouvons confondre les sommets S₁ et S₂. Il existe six sortes de lentilles suivant les rayons de courbures des faces qui la constitue.



Toutes les **lentilles à bords minces** sont **convergentes** et toutes les **lentilles à bord épais** sont **divergentes**.

- **Relation de conjugaison** : Considérons une lentille mince d'indice n de rayons de courbures $\overline{SC}_1 = R_1$ et $\overline{SC}_2 = R_2$, placé dans l'air. Un objet A distant du sommet de la lentille de $\overline{SA} = p$ donnera une image A' distante de $\overline{SA'} = q$. La relation liant ces grandeurs est donnée par :

$$\frac{1}{q} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n-1) \times \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

où $f' = \overline{SF'}$ est la **distance focale image** et $f = \overline{SF}$ la **distance focale objet**. Le point F' est dit **point focal image** et F est le **point focal objet**. La définition des points focaux est identique à celle donnée pour le dioptre sphérique.

On définit aussi le grandissement γ de la lentille mince par :

$$\gamma = \frac{q}{p}$$

Si γ est positif l'image est droite par rapport à l'objet.

Si γ est négatif l'image est renversée par rapport à l'objet.

Les foyers objet et image sont toujours de même nature : ils sont tous les deux réels ou les tous deux virtuels. Les foyers sont toujours de part et d'autre de la lentille. Les distances focales objet et images vérifient la relation suivante :

$$f' = -f$$

Une lentille à foyers réels est convergente et une lentille à foyers virtuels est divergente.

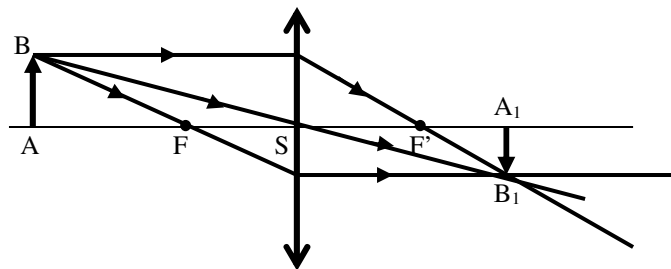
Construction géométrique :

On se base sur le tracé de trois rayons tous issus du point B de l'objet. Ces trois rayons traversent la lentille et se coupent en un même point qui est la position de B₁.

1^{er} rayon : Issu de B, un rayon incident parallèle à l'axe optique principale donne un rayon émergent qui passe par le foyer image F'.

2^{ème} rayon : Issu de B, un rayon incident passant par le foyer objet F donne un rayon émergent parallèle à l'axe optique principale.

3^{ème} rayon : Issu de B, un rayon incident passant par le sommet de la lentille S n'est pas dévié.



7- Le théorème de la vergence :

On définit la vergence comme l'inverse de la distance focale image. Elle est donnée par l'expression :

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

L'unité légale de la vergence est le dioptre notée δ , la distance focale étant en mètre.

La vergence d'une lentille convergente est positive. Celle d'une lentille divergente est négative.

Le théorème de la vergence énonce qu'un ensemble de lentilles minces accolées est équivalent à une lentille mince unique dont la vergence V est égale à la somme des vergences V_1, V_2, \dots, V_n des lentilles qui constituent cet ensemble.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

Pour un doublet de lentilles accolées on a :

$$V = V_1 + V_2$$

Si le doublet n'est pas accolé, les deux lentilles étant séparées d'une distance e on a :

$$V = V_1 + V_2 - e \times V_1 \times V_2$$

Si en plus le doublet baigne dans un milieu d'indice n_0 , la vergence est donnée par :

$$V = V_1 + V_2 - \frac{e}{n_0} \times V_1 \times V_2$$

Remarque : Pour le dioptré sphérique, la vergence est donnée par :

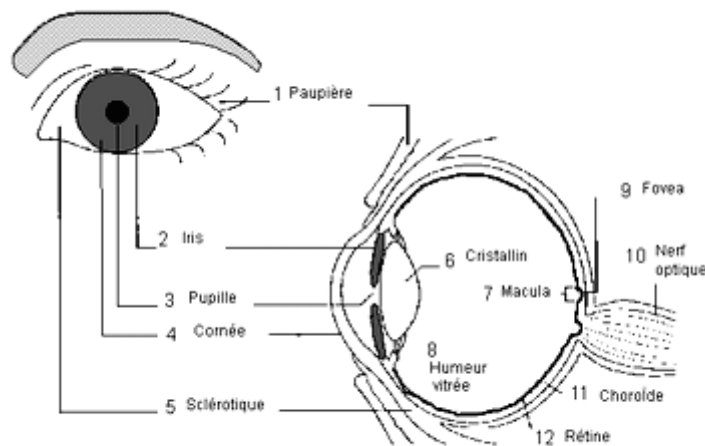
$$V = \frac{n_2}{f'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Pour une lentille mince placée dans un milieu d'indice n_0 aura comme vergence :

$$V = \frac{n_0}{f'} = (n - n_0) \times \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

8- Dioptrique oculaire et vision :

La biophysique de la vision constitue un vaste domaine. Nous nous bornerons à une description de l'œil comme un instrument d'optique et la rétine comme un récepteur sensible aux longueurs d'ondes du visible.

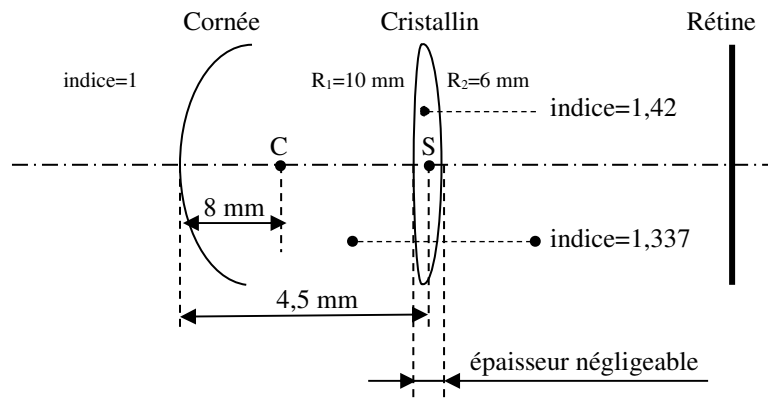


L'œil a la forme approximative d'une **sphère de 12mm de rayon**. Il est complété vers l'avant par une fenêtre transparente plus bombée, fragment d'une sphère de rayons 8mm et 6mm pour les faces antérieure et postérieure et de 2mm d'épaisseur appelée **cornée transparente**. Son indice de réfraction est de 1,377. L'intérieur du globe oculaire comprend une lentille biconvexe molle distant de 4,5mm de la cornée, appelé **le cristallin**. Sa structure est feuilletée (semblable à un oignon) de rayons respectifs 10mm et 6mm pour les faces antérieure et postérieure. En raison de sa structure hétérogène son indice croît de l'extérieur vers l'intérieur. Nous lui attribuerons un indice moyen de 1,42. Un liquide limpide **l'humeur aqueuse**, d'indice 1,337, remplit l'espace compris entre la cornée et le cristallin. L'espace limité par le cristallin et **la rétine** est remplie par **l'humeur vitrée** qui est une sorte de gelée transparente d'indice 1,337.

- **L'œil théorique :**

L'œil est un système optique centré dont la puissance est de 60δ en moyenne pour un œil normal au repos qui donne d'un objet à l'infini une image sur la rétine. Pour corriger les défauts dioptriques de l'œil, il est impératif de le décrire grâce à des modèles théoriques. C'est une description optique qui doit se rapprocher le plus possible de la réalité.

1^{er} modèle : Il assimile l'œil à un dioptré sphérique de rayon 8mm entre les milieux air et humeur aqueuse d'indice 1,337, suivi à 4,5mm d'une lentille mince, le cristallin, de rayons respectifs 10mm et 6mm et d'indice 1,42. Les deux faces de la lentille baigne dans un même milieu d'indice 1,337.



Cet œil est l'association d'un dioptre sphérique et d'une lentille mince, distant de $e = 4,5\text{mm}$ l'un de l'autre et baignant dans un milieu $n_0 = 1,337$.

La puissance calculée du cristallin est égale à :

$$P_{\text{cristallin}} = \frac{n_0}{f'} = (n - n_0) \times \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = 22\delta$$

La puissance calculée de la cornée est égale à :

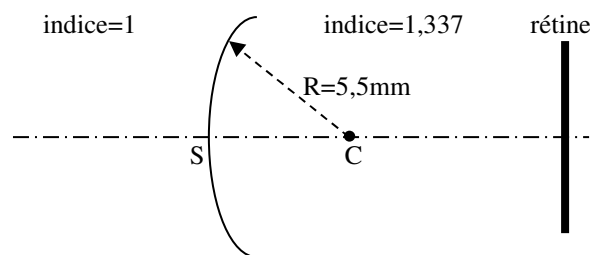
$$P_{\text{cornée}} = \frac{n_0 - n_{\text{air}}}{R} = 42\delta$$

Le calcul de la puissance théorique de cet œil au repos est donnée par :

$$P_{\text{oeil}} = P_{\text{cornée}} + P_{\text{cristallin}} - \frac{e}{n_0} \times P_{\text{cornée}} \times P_{\text{cristallin}} = 60,9\delta$$

Il vient que ce modèle peut servir de base à un calcul de correction.

2^{ème} modèle : Une autre manière de simplifier encore plus le problème est de considérer que le système optique composant l'œil est équivalent à un dioptre sphérique. Ce modèle simplifié est dit *œil réduit de Listing* dont les caractéristiques sont un dioptre sphérique de rayon 5,5mm séparant l'air et un milieu d'indice 1,337.



La puissance calculée de ce modèle donne :

$$P_{\text{oeil}} = \frac{n - n_{\text{air}}}{R} = 61\delta$$

L'œil réduit de Listing est un modèle plus simple et fort utilisé pour la description de l'œil.

• **Conditions de vision nette :**

Nous allons supposer que la rétine et les voies nerveuses sont dans un état physiologique normal. la vision d'un objet est nette si le système optique formé par l'œil est capable de fournir une image sur la rétine et que cette

image soit stigmatique de l'objet. Nous pouvons alors imaginer deux sortes de défauts qui donnent une mauvaise vision :

L'œil donne une image stigmatique mais celle-ci ne se forme pas sur la rétine dans certaines conditions. Ceci se produit si l'œil a une puissance optique qui ne correspond pas à ses dimensions. L'œil est soit trop puissant soit faiblement puissant.

L'œil n'est pas capable de former une image stigmatique de l'objet. Ceci est le cas lorsque l'œil n'a pas de symétrie de révolution, en particulier lorsque le dioptre cornéen n'est pas sphérique.

• **L'accommodation :**

Imaginons un objet placé à une distance p du sommet de l'œil. Son image se forme sur la rétine à la distance q . Si cet objet se rapproche de l'œil, la distance p va varier mais l'image se formera toujours sur la rétine à la même distance q . Or d'après la relation du dioptre sphérique on a :

$$\frac{n}{q} - \frac{n_{air}}{p} = \frac{n}{f'} = D$$

où D est la puissance² de l'œil. Il vient qu'en faisant varier p , tout en gardant q constant, l'égalité n'est vérifiée que si la puissance de l'œil varie.

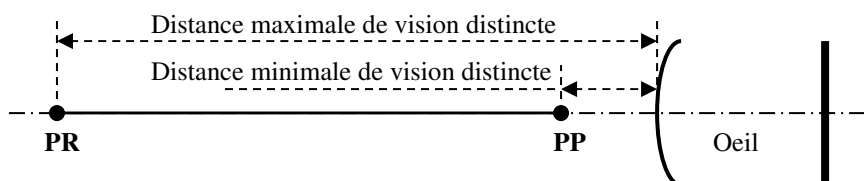
Donc quelque soit la distance de l'objet à l'œil, l'image se formera toujours sur la rétine grâce à une variation de la puissance de l'œil. Ce phénomène est appelé **l'accommodation**.

Il est naturel de se demander par quel moyen l'œil peut-il faire varier sa puissance. La réponse se trouve dans la **formule de la puissance du dioptre sphérique**. La puissance augmente par une augmentation de l'indice de réfraction et par une diminution du rayon de courbure. En réalité c'est le **cristallin qui réalise cette variation** de puissance en faisant varier ses rayons de courbures (essentiellement la face antérieure) et aussi son indice de réfraction moyen grâce à sa structure feuilleté.

Nous définissons l'amplitude d'accommodation A par la différence entre la puissance maximale D_{max} et la puissance minimale D_{min} .

$$A = D_{max} - D_{min}$$

Pour voir les **objets rapprochés** la **puissance est maximale** et pour les objets éloignés la puissance est minimale. On définit alors le "**Punctum Proximum**" (ou le **PP**) par le point le plus proche qui est vu nettement par l'œil avec sa puissance maximale. La distance entre l'œil et le PP est dite "**distance minimale de vision distincte**". De même on définit le "**Punctum Remotum**" (ou le **PR**) par le point le plus éloigné qui est vu nettement par l'œil avec sa puissance minimale. La distance entre l'œil et le PR est dite "**distance maximale de vision distincte**".



En écrivant les relations de conjugaison pour les objets placés au PP et au PR, on obtient :

$$\frac{n}{q} - \frac{1}{PR} = D_{min}$$

$$\frac{n}{PP} - \frac{1}{PP} = D_{max}$$

Il vient que :

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

² Nous noterons la puissance D pour ne pas la confondre avec la distance p .

Si on définit la proximité du PR par $R = \frac{1}{PR}$ et la proximité du PP par $P = \frac{1}{PP}$, il vient que :

$$A = D_{\max} - D_{\min} = R - P$$

R et P sont en dioptries et PP et PR en mètre.

Nous pouvons définir l'amplitude d'accommodation comme la différence entre la proximité du PR et la proximité du PP.

Pour un œil normal le PP est à 25cm et le PR est à l'infini. Il vient que pour un œil normal la valeur de l'amplitude d'accommodation est :

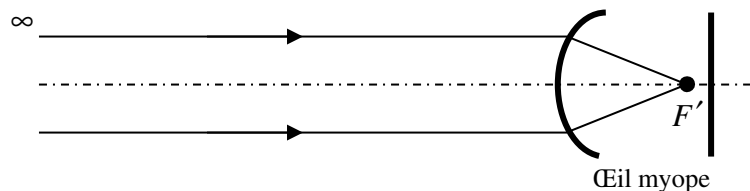
$$A = R - P = \frac{1}{PR} - \frac{1}{PP} = 0 - \left(\frac{1}{-0,25} \right) = 4\delta$$

9- Amétropies sphériques :

Un œil normale est dit emmétrope. L'amétropie sphérique est un défaut de l'œil doué de stigmatisme mais dont l'image ne se forme pas sur la rétine dans certaines conditions. Nous pouvons imaginer deux cas de figure. L'œil étant au repos, un objet à l'infini peut donner soit une image en avant de la rétine soit en arrière de la rétine. Dans le premier cas l'œil est dit *myope* et dans le second il est dit *hypermétrope* (ou hyperope).

- **La myopie :**

L'image se forme en avant de la rétine. Ce défaut peut être dû à un excès de puissance de l'œil ou à un trouble du développement de l'œil qui est alors trop long.



Sachant que le PR est le point le plus éloigné que peut voir un œil avec sa puissance minimale, nous pouvons déduire sa position par construction géométrique³ soit par l'analyse des relations de conjugaisons.

$$\frac{n}{f'} - \frac{1}{\infty} = D_{\min}$$

$$\frac{n}{q} - \frac{1}{PR} = D_{\min}$$

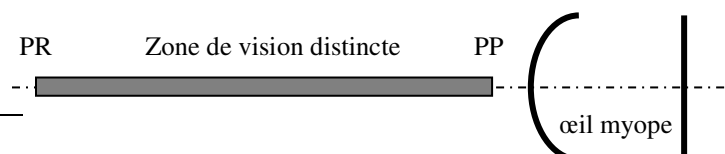
où q est la distance image lorsqu'elle se forme sur la rétine. Il vient que :

$$\frac{1}{PR} = n \times \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{f'} \right)$$

Sachant que $q > f'$, le signe du PR est négatif. Nous pouvons donc énoncer que *le PR d'un myope est réel*. On définit le *degré de myopie* par la proximité R du PR. Un myope de 2δ veut dire que $R = -2\delta$. Concernant le PP il suffit d'analyser l'expression :

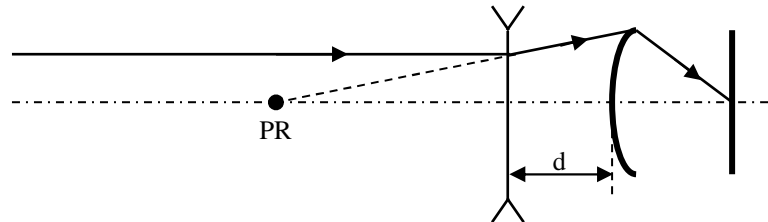
$$P = R - A$$

Il vient que *le PP d'un myope est aussi réel*.



³ Vu en cours.

Pour corriger un œil myope, il faudrait lui donner la faculté de voir les objets à l'infini grâce à des lentilles de correction. Pour cela, il faudrait que la lentille de correction donne de l'objet à l'infini une image au PR de cet œil. La figure suivante montre que le foyer image de la lentille de correction doit coïncider avec le PR de l'œil.



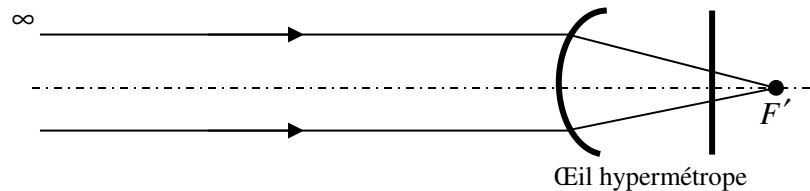
Donc la lentille de correction est **divergente** de distance focale f' et de vergence V donnée par :

$$V = \frac{1}{f'} = \frac{1}{PR + d}$$

où d est la distance entre le sommet de l'œil et la lentille de correction. cette distance peut être négligeable pour les faibles myopies (si $PR \gg d$).

• **L'hypermétropie :**

Dans ce cas l'image se forme derrière la rétine. L'œil est peu convergent ou trop court.

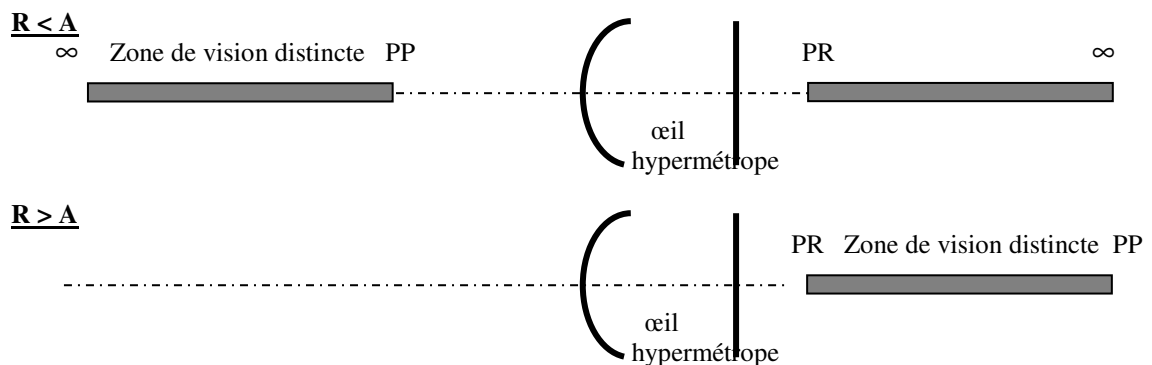


Une analyse identique à celle faite pour le myope donne :

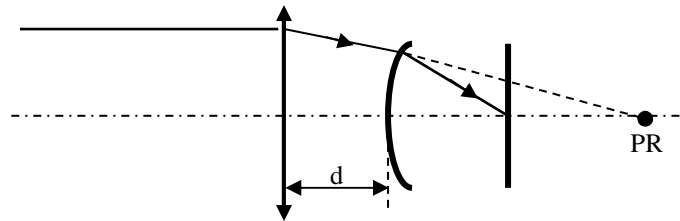
$$\frac{1}{PR} = n \times \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{f'} \right)$$

Sachant que c'est $f' > q$ permet de dire que le PR est de signe positif. Donc *le PR d'un hypermétrope est virtuel*. De la même manière le degré d'hypermétropie est donné par la proximité R du PR. Un hypermétrope de 3δ signifie $R=+3\delta$.

Concernant le PP, on a deux cas. Si R est inférieur à A , le PP est réel. Mais Si R est supérieur à A , le PP est virtuel aussi



Dans le cas où le PP est aussi virtuel, l'œil ne peut pas se passer des verres correcteurs. Concernant la correction, on utilise des lentilles qui donnent d'un objet à l'infini une image au PR.



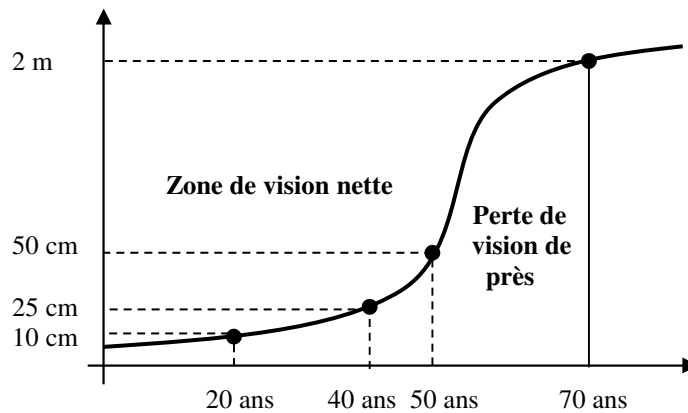
Donc la lentille de correction est **convergente** de distance focale f' et de vergence V donnée par :

$$V = \frac{1}{f'} = \frac{1}{PR + d}$$

où d est la distance entre le sommet de l'œil et la lentille de correction. cette distance peut être négligeable pour les faibles hypermétropies (si $PR \gg d$).

• **La presbytie :**

La faculté du cristallin à faire **varier la puissance de l'œil diminue** avec l'âge. L'amplitude d'accommodation diminue et le **PP s'éloigne** avec l'âge, comme le montre la figure ci-dessous. Il est probable que le **cristallin perde de son élasticité** avec l'âge.



Il est question de presbytie si l'amplitude d'accommodation est inférieure à 4 dioptries. La presbytie n'affecte pas le PR. **Le myope ressent les effets de la presbytie tardivement**. Ceci n'est pas le cas pour l'hypermétrope qui en souffrira très tôt.

La correction de la presbytie consiste à donner d'un objet placé à 25cm une image au PP de l'œil presbyte. C'est une lentille convergente à n'utiliser que pour la vision de près.

10- Astigmatisme :

L'œil est astigmatique si celui-ci ne possède pas de symétrie de révolution. C'est exclusivement le dioptre cornéen qui en est responsable. L'astigmatisme du cristallin est rare et moins important.

On distingue deux types d'astigmatisme :

- *L'astigmatisme irrégulier* : la perte de symétrie est dû à un traumatisme telles qu'une brûlure ou autres...
- *L'astigmatisme régulier* : dans ce cas la cornée n'a pas le même rayon de courbure partout. Son rayon passe par un minimum et un maximum pour deux plans perpendiculaires l'un à l'autre et appelés méridiens principaux. Ils correspondent à la puissance maximale (rayon minimum) et minimale (rayon maximum).

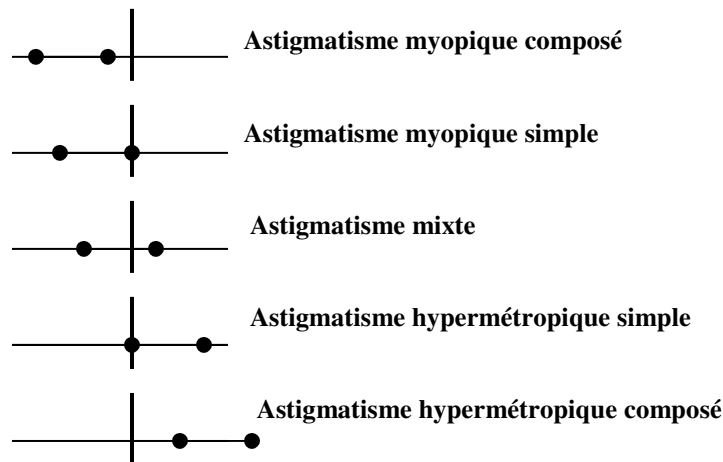
On mesure le degré d'astigmatisme par :

$$A_c = D_{\max} - D_{\min} = (n-1) \times \left(\frac{1}{R_{\min}} - \frac{1}{R_{\max}} \right)$$

L'œil astigmatique possède deux focales images qui correspondent aux deux puissances.

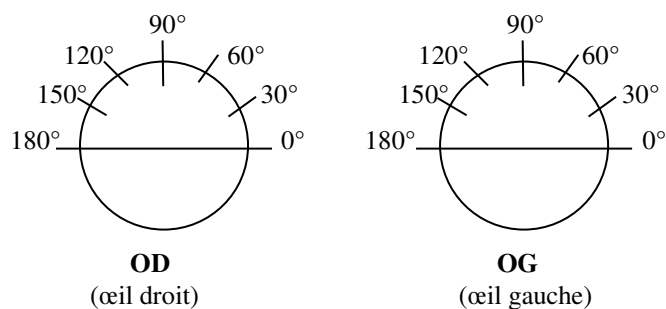
La classification des astigmatismes réguliers est basée sur deux critères qui sont la position des focales par rapport à la rétine et la direction des méridiens principaux.

Selon la position des focales, nous pouvons distinguer les cas illustrés ci-dessous :



L'astigmatisme régulier est en quelque sorte une double amétropies ou deux défauts à la fois.

Pour la position des méridiens principaux, on utilise la notation universelle de Javal. Les yeux du sujet sont des cercles gradués en degré et la direction horizontale est 0°-180°.



C'est toujours le méridien de puissance minimale que l'on repère sur la notation de Javal.

On distingue trois cas :

- *Astigmatisme conforme à la règle* : méridien de puissance minimale entre 0°-30° ou 150°-180°.
- *Astigmatisme inverse à la règle* : méridien de puissance minimale entre 60°-120°.
- *Astigmatisme oblique* : méridien de puissance minimale entre 30°-60° ou 120°-150°.

Pour la correction de l'astigmatisme il faut utiliser des verres astigmatiques, c'est à dire des verres ayant des puissances différentes dans des plans différents. Ces lentilles doivent ramener les deux focales sur la rétine. Si

nous prenons l'exemple d'un myopique composé de degré 2 et 3 dioptries. La lentille de correction aura comme puissance -2 et -3 dioptries et ses méridiens doivent coïncider avec ceux de l'œil.

Il existent plusieurs types de lentilles astigmatiques⁴.

- *Cylindriques* : Ces lentilles ont une puissance nulle selon leur axe et une puissance non nulle selon le second.
- *Bi-cylindriques* : c'est l'association de deux lentilles cylindriques.
- *Sphéro-cylindriques* : c'est l'association de deux lentilles l'une sphérique et l'autre cylindrique.
- *Toriques* : ce sont des lentilles obtenues à partir de tore, c'est à dire un cylindre en verre qu'on enroule autour d'un axe. On obtient ainsi deux rayons de courbures.
- *Sphéro-toriques* : C'est l'association d'une lentille sphérique avec une lentille torique.

11- Méthodes d'examen de l'œil :

Il existe des techniques qui permettent d'évaluer l'état de réfraction de l'œil et la correction qui lui convient. Il existe des méthodes subjectives et des méthodes objectives.

- *Le trou sténopéique* : Si nous plaçons un trou de faible dimension devant un œil ayant un trouble de la réfraction, la tache qui se forme sur sa rétine diminue. Ceci permet de nous renseigner sur l'origine du trouble. Si le trou améliore la vision, l'origine du trouble est dioptrique. Sinon l'origine du trouble est rétinienne ou nerveuse.
- *Les optotypes* : Cette méthode ne mesure pas l'amétropie mais cherche directement la valeur de la correction en améliorant l'image rétinienne par des verres correcteurs. Pour reconnaître un objet il faut que l'angle sous lequel l'objet est vu par l'œil soit supérieur au minimum séparable de cet œil.

$$\alpha > \alpha_{\min}$$

On définit alors l'acuité visuelle V par :

$$V = \frac{5}{\alpha_{\min}}$$

Pour mesurer l'acuité visuelle, on utilise des *optotypes*, le plus souvent des lettres d'imprimerie de différentes tailles que l'on observe à une distance d'environ 5m.

ABHRTL

$$V = \frac{1}{10} ; \alpha_{\min} = 50'$$

KDGTAMPMPPOXCVTQ

.....
SHTEYDBCNOPMXNAEQYNSRTP

.....
CZRSUIDPLMLKNHTYDVGXTSDEFKLPYTREDA

$$V = \frac{10}{10} ; \alpha_{\min} = 5'$$

⁴ Voir le cours.

La correction à l'aide de cette méthode est de ramener l'acuité visuelles à 10/10. Bien sûr l'appréciation du sujet est essentielle et la méthode **est subjective**.

- *Le cadran horaire de Parent* : C'est un cadran composé de droite à 15° les unes des autres et repéré comme l'heure d'une horloge. le sujet est placé à 5m. on lui demande s'il voit tous les rayons également nets. Les méridiens principaux correspondent à deux lignes perpendiculaire entre elles. La droite la plus nette correspond au méridien le moins amétrope et la droite la moins nette au méridiens le plus amétrope. Des verres cylindriques dont les axes correspondent aux méridiens principaux sont utilisées pour obtenir une vision nette de toutes les lignes. L'inconvénient est toujours la subjectivité de cette méthode.

Il existe des méthodes objectives qui permettent de mesurer la valeur des amétropies tels que la skiascopie pour les amétropies sphérique et le kératomètre de Javal pour l'astigmatisme.

Bibliographie :

1. physique générale 2. thermodynamique, optique., M. Renaud, D. Silhouette, R. Fourne, édition Academic Press.
2. Comprendre et appliquer l'optique. 1° :optique géométrique, cours et exercices, M. Gabriel, C. Ernst, J. Grange. Collection Comprendre et appliquer, édition Masson.
3. Physique générale 3, ondes, optique et physique moderne, D.C. Giancoli, édition DeBoeck université.
4. Biophysique PCEM 1, D. Farhi & R. Smadja, édition ESTEM.
5. Biophysique, 2. utilisation médicale des rayonnements, vision, audition, A. Bertrand, D. Ducassou, J.C. Healey, J. Robert, édition Masson.

Fin du second chapitre