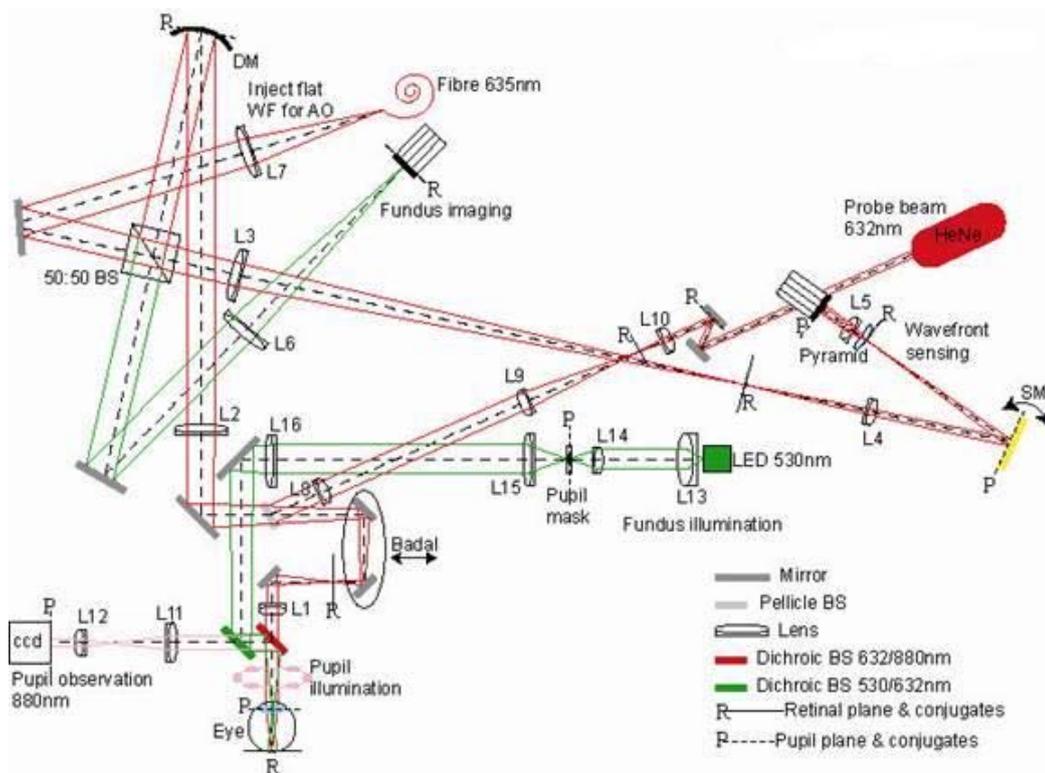


*Département des Technologies Industrielles (TIN)
Module: Automatisation industrielle et optique (AIO)*

Cours d'Optique - Orientation MI

SYSTÈMES OPTIQUES POUR L'IMAGERIE (1)



Prof. Lorenzo Zago,
Prof. André Perrenoud,
Wikipédia et nombreux autres contributeurs

T A B L E D E S M A T I E R E S

	<u>PAGE</u>
1. INSTRUMENTS D'OPTIQUE.....	1-1
1.1 GENRES.....	1-1
1.2 QUALITÉS.....	1-2
2. SYSTEMES CENTRES.....	2-1
2.1 ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN SYSTEME CENTRE.....	2-1
2.2 CONDITIONS D'ETUDE.....	2-1
2.3.....	2-1
2.4 ELEMENTS CARDINAUX.....	2-2
2.5 FOYERS ET PLANS FOCaux.....	2-2
2.6 PLANS ET POINTS PRINCIPAUX.....	2-2
2.7 DISTANCES FOCales.....	2-3
2.8 OBJETS ET PLANS DE FRONT.....	2-3
2.9 FORMULES DE LAGRANGE-HELMHOLTZ.....	2-4
2.10 CONSTRUCTION DE L'IMAGE D'UN OBJET PLAN:.....	2-5
2.10.1 Objet dans un plan de front.....	2-5
2.10.2 Objet dans un plan focal.....	2-5
2.10.3 Objet à l'infini.....	2-6
2.10.4 Construction de l'émergent correspondant à un incident quelconque.....	2-6
2.11 POINTS NODaux.....	2-7
2.12 ASSOCIATIONS DE SYSTEMES CENTRES.....	2-8
2.13 EXERCICES.....	2-9
3. DIAPHRAGMES ET PUPILLES.....	3-1
3.1 FAISCEAU UTILE, DIAPHRAGMES D'OUVERTURE ET DE CHAMP.....	3-1
3.2 PUPILLE D'ENTRÉE ET PUPILLE DE SORTIE.....	3-2
3.3 OUVERTURE RELATIVE ET NOMBRE D'OUVERTURE.....	3-7
3.3.1 Ouverture relative.....	3-8
3.3.2 Nombre d'ouverture ou f/#.....	3-8
3.3.3 Ouverture numérique.....	3-10
3.4 EXERCICES.....	3-11
4. L'OEIL.....	4-1
4.1 ANATOMIE DE L'OEIL.....	4-1

4.2	MODÈLE OPTIQUE DE L'OEIL.....	4-3
4.2.1	L'œil comme un dioptré sphérique.....	4-3
4.2.2	L'œil comme une lentille.....	4-4
4.2.3	L'œil comme un système de deux lentilles.....	4-4
4.2.4	L'accommodation.....	4-5
4.3	AUTRES CARACTÉRISTIQUES DE L'OEIL.....	4-6
4.4	DÉFAUTS DE L'OEIL.....	4-7
4.4.1	La myopie.....	4-7
4.4.2	L'hypermétropie.....	4-7
4.4.3	La presbytie.....	4-8
4.4.4	L'astigmatisme.....	4-8
4.4.5	Mise en évidence de la tache aveugle de l'œil.....	4-8
4.5	EXERCICES.....	4-9
5.	LOUPE ET MICROSCOPE.....	5-1
5.1	LA LOUPE.....	5-1
5.2	LE MICROSCOPE.....	5-2
5.3	EXERCICES.....	5-5
6.	LES LUNETTES.....	6-1
6.1	LE PRINCIPE DE LA LUNETTE ASTRONOMIQUE.....	6-1
6.2	LUNETTE AFOCALE.....	6-2
6.3	LUNETTES TERRESTRES ET JUMELLES.....	6-4
6.4	EXERCICE.....	6-6

1. INSTRUMENTS D'OPTIQUE



Une lunette d'approche

Un **instrument d'optique** est un instrument formant une image d'un objet. Un instrument d'optique est généralement l'association de plusieurs systèmes optiques (ex: objectif et oculaire).

- Quand ils nécessitent la présence d'un œil humain pour l'observer, ils sont dits subjectifs, comme le télescope, le microscope, la loupe, etc. et donne une image virtuelle.
- Les instruments ne nécessitant pas la présence de l'œil humain sont dit a contrario objectifs : le projecteur, la chambre photographique, etc. et donne une image réelle.

L'œil est un instrument d'optique donnant une image réelle de l'objet sur la rétine.

De manière plus générale on désigne par "instrument optique" tout instrument utilisant l'optique dans son fonctionnement.

1.1 GENRES

- Certains sont principalement d'observation, comme les jumelles, la loupe, etc.
- D'autres de mesure, comme les instruments géodésiques : le télémètre, le théodolite, le niveau à bulle, le goniomètre, etc. Voir aussi les instruments de métrologie.

D'une façon générale, ils combinent assez souvent les deux destinations, entre étude qualitative et étude quantitative.

- N'oublions pas ceux de **projection** : diasopes comme le projecteur (de diapositive), celui cinématographique, ou épiscopos (pour les documents opaques) comme le rétroprojecteur, etc.

1.2 QUALITÉS

Ils nécessitent pour définir leur qualité :

- Les études de focométrie pour l'obtention d'une image correcte par focalisation des rayons lumineux.
- Les études de photométrie pour la prise en compte des flux de l'énergie transportée (flux, intensité).
- La prise en compte des aberrations et leurs corrections (géométriques, chromatiques, de diffraction).
- La compréhension des qualités et exigences de l'œil humain (acuité, pouvoir séparateur, défauts et corrections).
- L'apport de solutions techniques supplémentaires : diaphragme de champ, d'ouverture, prise en compte des champs.
- La prise en compte de l'optique physique, des aspects ondulatoire et corpusculaire de la lumière.

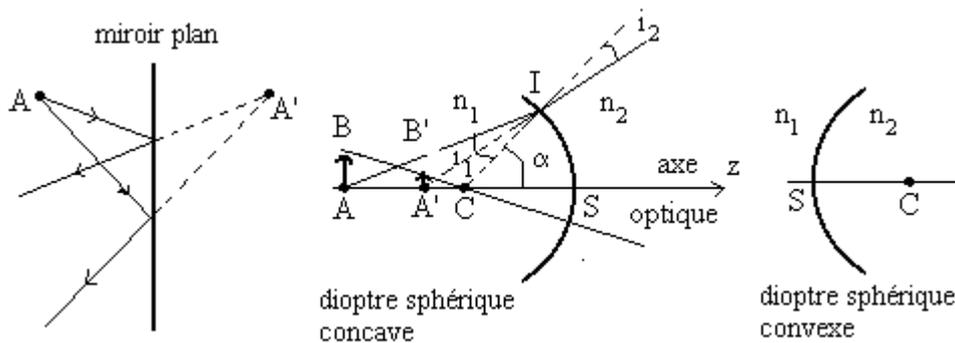
2. SYSTEMES CENTRES

2.1 ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN SYSTEME CENTRE

Un système centré est constitué par des suites de milieux transparents, séparés par des dioptrés (plans ou sphériques) et éventuellement des miroirs, et qui est de symétrie de révolution autour d'un axe appelé axe optique ou axe principal.

Si le système ne contient que des dioptrés il sera dit dioptrique; s'il contient un ou plusieurs miroirs le système centré sera dit catadioptrique.

Les éléments constitutifs sont : les miroirs plans, les miroirs sphériques, les dioptrés plans et les dioptrés sphériques.



2.2 CONDITIONS D'ÉTUDE

Dès qu'un système centré comporte plus d'un dioptré il est, en général, impossible d'obtenir un système rigoureusement stigmatique. Ainsi notre étude des systèmes centrés sera réalisée dans le cadre du stigmatisme approché, c'est à dire:

- Les objets sont plans, perpendiculaires à l'axe et de petites dimensions (aplanétisme)
- Les rayons lumineux sont peu inclinés par rapport à l'axe du système (approximation de Gauss)
- Les images sont planes et perpendiculaires à l'axe.

Un système pourra toujours être considéré comme formé uniquement de dioptrés (plans ou sphériques) séparant des milieux d'indices n, n_1, n_2, \dots, n_n , chacun étant considéré dans les conditions de Gauss.

<p>The diagram shows a horizontal optical axis with several dioptrés. From left to right: a medium with index n containing object point A and image point A1; a dioptré separating n and n_1; a medium with index n_1 containing image point A1 and object point A2; a dioptré separating n_1 and n_2; a medium with index n_2 containing image point A2 and object point A3; a dioptré separating n_2 and n_n; a medium with index n_n containing image point A3 and object point An; a dioptré separating n_n and n; and finally a medium with index n containing image point An and object point A'. Vertical arrows represent object points B, B2, Bn and image points B', B2', Bn'. A ray path is shown starting from A, passing through A1, A2, ..., An, and finally reaching A'.</p>	<p>Le premier dioptré donne de A une image A1 qui sert d'objet pour le second dioptré et ainsi de proche en proche jusqu'au dernier dioptré.</p>
--	--

2.3

2.4 ELEMENTS CARDINAUX

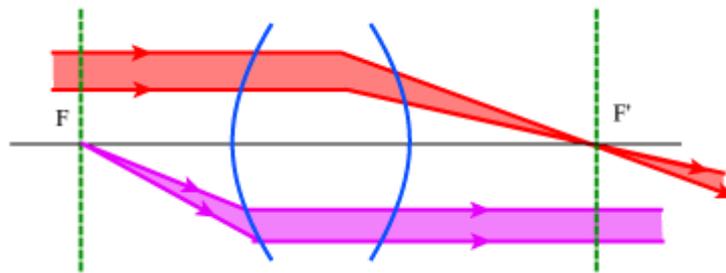
Il existe un certain nombre de points possédant des propriétés remarquables qui permettent de construire la marche de rayons lumineux ou de déterminer la position de l'image d'un objet par rapport au système centré: ce sont les **éléments cardinaux** du système centré qui comportent:

- **les foyers,**
- **les points principaux,**
- **les points nodaux.**

Lorsque pour un système centré donné on connaît deux couples d'éléments cardinaux ou un couple et une distance focale alors le système centré est parfaitement défini.

2.5 FOYERS ET PLANS FOCaux

Un faisceau cylindrique incident parallèle à l'axe optique convergera en un point F' sur l'axe, point appelé foyer principal image du système centré et conjugué d'un point source objet situé à l'infini sur l'axe.



On appelle foyer principal objet le point F situé sur l'axe optique dont l'image se situe à l'infini sur l'axe optique; dans ce cas un faisceau de rayons lumineux, issus de F , émergera du système en un faisceau de rayons parallèles entre eux et à l'axe optique.

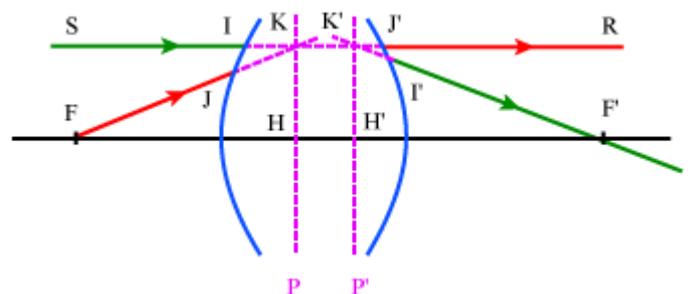
Le plan de front passant par F est appelé plan focal objet et admet comme conjugué le plan situé à l'infini. De même le plan de front passant par F' sera appelé plan focal image et constituera le conjugué d'un plan objet situé à l'infini.

Si les foyers objet et image sont à distance finie on dira que le système est **à foyers**, tandis que s'ils sont rejetés à l'infini le système sera dit **afocal**.

2.6 PLANS ET POINTS PRINCIPAUX

Les **plans principaux** sont deux plans de front conjugués: le plan principal objet et le plan principal image pour lesquels le grandissement linéaire (ou transversal) est égal à $+1$.

Supposons que les foyers F et F' soient à distance finie. Considérons deux rayons, l'un parallèle à l'axe et l'autre provenant du foyer objet.



Les points de rencontre K et K' des deux rayons incidents et de leurs émergents sont deux points conjugués situés à distance finie. On constate que ces deux points correspondent à un grandissement relatif égal à +1.

L'ensemble des couples de points des plans de front de K et K' conduiront au même grandissement +1: ce sont donc des plans principaux. Le plan P est le plan principal objet tandis que le plan P' est le plan principal image.

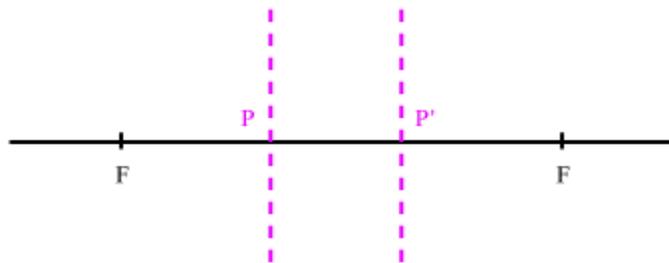
H et H' sont les **points principaux** de l'axe du système centré. La distance HH' mesure l'interstice du système.

La manière dont nous avons introduit les points K et K' nous conduit à énoncer une propriété importante:

- **Le plan principal image est le lieu des points K' intersection des incidents parallèles à l'axe et des émergents correspondants.**
- **Le plan principal objet P est le lieu des points K intersection des incidents passant par F et des émergents correspondants parallèles à l'axe.**

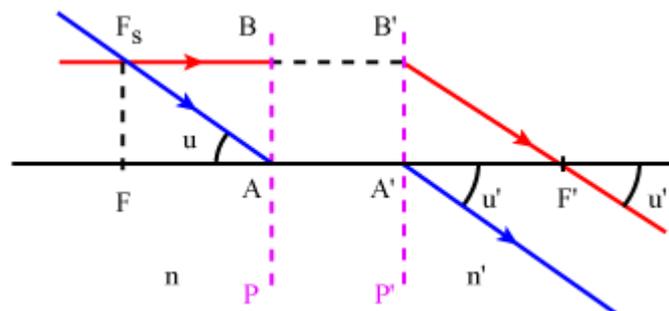
2.7 DISTANCES FOCALES

Considérons un système centré caractérisé par ses foyers objet F et image F' et par ses plans principaux P et P'.



La valeur algébrique du segment PF est appelée distance focale objet f tandis que la valeur algébrique du segment P'F' est appelée distance focale image f' . La relation qui existe entre f et f' est :

$$\frac{f'}{f} = - \frac{n'}{n}$$

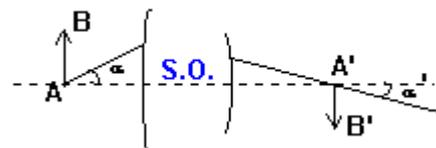


2.8 OBJETS ET PLANS DE FRONT

En optique, on appelle objet tout ensemble de points lumineux. Il peut s'agir d'une source primaire qui produit de la lumière (ex : soleil, étoiles, filament de lampe allumée, écran de télévision ou d'ordinateur en fonction), ou d'une source secondaire qui diffuse une partie de la lumière qu'elle reçoit (ex : lune, planètes, la plupart des objets qui nous entourent lorsqu'ils sont éclairés). On considère, en général, des objets plans situés dans des plans de front de systèmes optiques.

Etant donné un système optique centré, on appelle **plan de front** tout plan perpendiculaire à l'axe principal qui est un axe de symétrie de révolution pour le système optique. Etant donné un système optique centré, on appelle plan de front tout plan perpendiculaire à l'axe principal qui est un axe de symétrie de révolution pour le système optique.

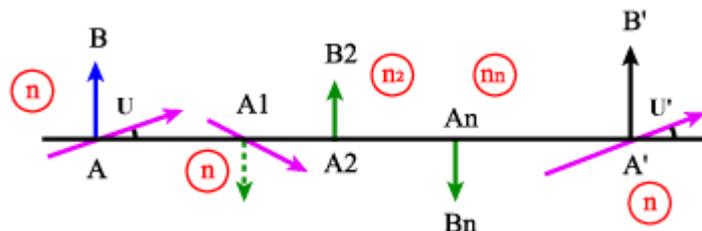
Exemple: sur cette figure, l'objet **AB** et l'image **A'B'** sont situés dans des plans de front.



Dans des systèmes composés on pourra considérer qu'une image produite par une première partie du système est un objet pour le reste du système.

2.9 FORMULES DE LAGRANGE-HELMHOLTZ

- Si l'on considère un objet AB dans un plan de front avec A situé sur l'axe, on obtient les images successives A1B1, A2B2, AnBn et finalement A'B' à travers les différents dioptries.



- Ainsi un rayon passant par A passera successivement par les points A1, A2, An et A' en vérifiant pour chacun des dioptries traversés la relation de Lagrange-Helmholtz:

$$n \overline{AB} u = n_1 \overline{A_1B_1} u_1 = n_2 \overline{A_2B_2} u_2 = \dots = n_n \overline{A_nB_n} u_n = \dots = n' \overline{A'B'} u'$$

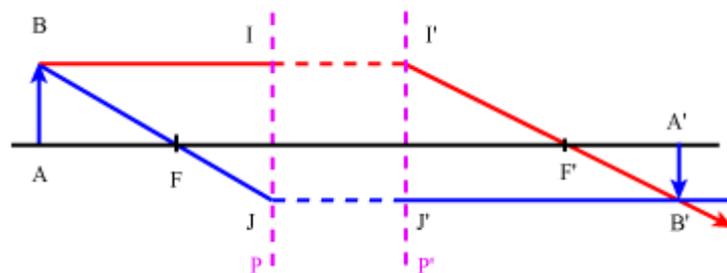
- D'où la relation de Lagrange-Helmholtz entre l'objet AB et son image A'B', en fonction des indices n et n' et des angles u et u'.

$$n \overline{AB} u = n' \overline{A'B'} u' \tag{2.1}$$

2.10 CONSTRUCTION DE L'IMAGE D'UN OBJET PLAN:

2.10.1 Objet dans un plan de front

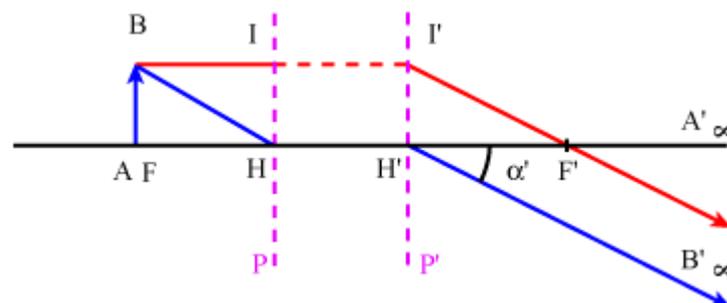
- L'objet AB étant dans un plan de front son image est également dans un plan de front et il suffit de chercher l'image du point B.
- Un rayon incident BI parallèle à l'axe émerge suivant I'F' en passant par le foyer image F' et un rayon incident BJ passant par le foyer objet émerge parallèlement à l'axe principal suivant J'B'.
- L'intersection des deux rayons émergents définit le point image B' et l'on en déduit l'image A'B'.



2.10.2 Objet dans un plan focal

- Si l'objet AB est dans le plan focal objet alors l'image est rejetée à l'infini avec A' dans la direction de l'axe et B' dans la direction I'F'. Le rayon incident BH émerge à partir de H' (conjugué de H) suivant un rayon parallèle à I'F'.
- On rencontre ce cas de figure dans les instruments d'optique tels la loupe ou le microscope quand ils sont réglés pour une vision à l'infini.
- L'objet AB est alors vu sous le diamètre apparent:

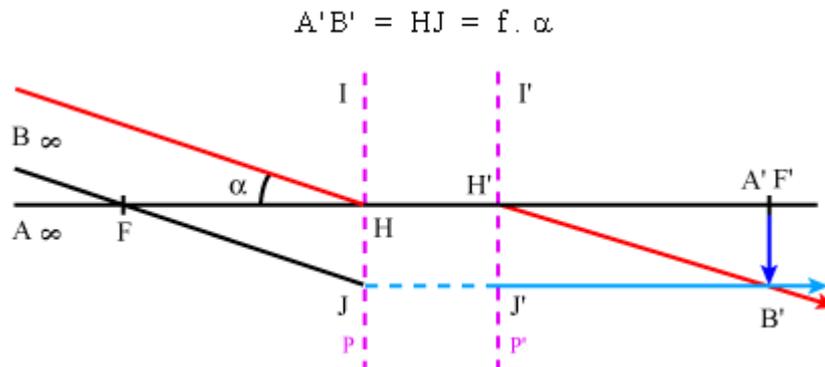
$$\alpha' = \frac{I'H'}{H'F'} = \frac{AB}{f'}$$



2.10.3 Objet à l'infini

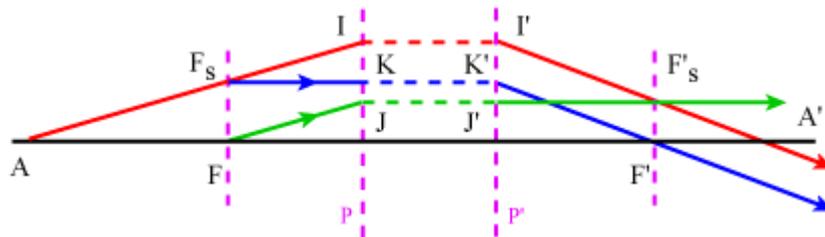
Si l'objet est à l'infini avec un diamètre apparent égal à α l'image se forme alors dans le plan focal image et un rayon incident issu de B à l'infini donnera naissance à un émergent parallèle à l'axe et coupant le plan focal image en B'.

La grandeur de l'image est:



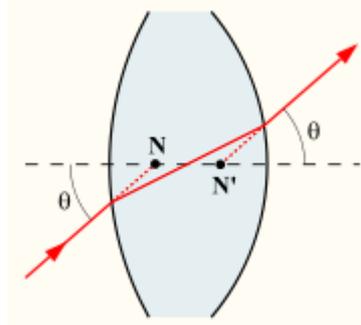
2.10.4 Construction de l'émergent correspondant à un incident quelconque

Un rayon incident quelconque AI coupe le plan principal objet en I et émerge en passant par le point I' situé à la même hauteur que I. Il reste à trouver un second point pour pouvoir tracer l'émergent issu de I'.



- Un faisceau de rayons parallèles à AI émergera en un faisceau de rayons convergents en un point du plan focal image et, en particulier, le rayon FJ, parallèle à AI, et passant par le foyer objet F, émergera suivant un rayon parallèle à l'axe qui coupera le plan focal image en F's. L'émergent correspondant à AI sera donc le rayon I' F's.
- Un rayon incident parallèle à l'axe et passant par le foyer secondaire objet F_s déterminé par l'intersection de AI avec le plan focal objet donnera naissance à un rayon émergent passant par le foyer image F'. Pour obtenir l'émergent correspondant à AI, il suffira de tracer à partir de I' une parallèle au rayon K' F'.

2.11 POINTS NODAUX



Les **points nodaux** N et N' sont deux points **conjugués**, situés sur l'axe, et tels qu'à tout rayon incident passant par le point nodal objet, corresponde un rayon émergent passant par le point nodal image et parallèle au rayon incident.

2.12 ASSOCIATIONS DE SYSTEMES CENTRES

Soit un système centré S_a avec focale f_a et plans principaux localisés à $x_{H1,a}$, et $x_{H2,a}$

On veut y ajouter un deuxième système S_b avec focale f_b et plans principaux localisés à $x_{H1,b}$ et $x_{H2,b}$ distant de

$$d = x_{H1,b} - x_{H2,a}$$

La focale du nouvel ensemble S_a+S_b est:

$$\boxed{f_{a+b} = \frac{f_a f_b}{f_a + f_b - d}} \quad (2-2)$$

Cette équation de la focale est aussi connue sous la forme de la **formule de Gullstrand**, qui donne la vergence du système complet en fonction des vergences V_a et V_b des deux systèmes qui le composent, de l'indice n du milieu qui les sépare et de la distance optique d entre leurs plans principaux:

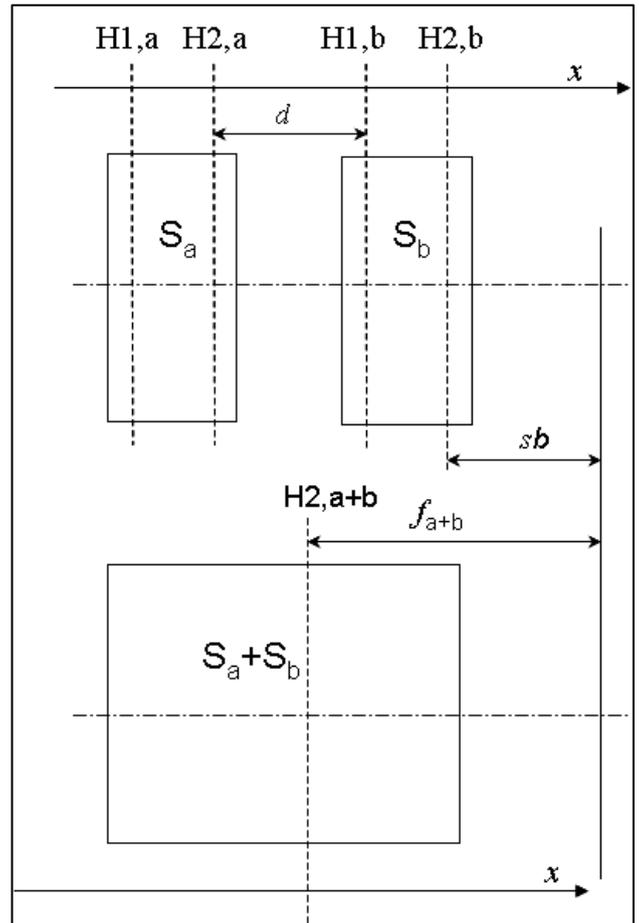
$$\boxed{V = V_a + V_b - \frac{d \cdot V_a V_b}{n}} \quad (2-3)$$

La position des plans principaux de l'ensemble est:

$$\boxed{\begin{aligned} x_{H1,a+b} &= x_{H1,a} + \frac{f_{a+b} d}{f_b} \\ x_{H2,a+b} &= x_{H2,b} - \frac{f_{a+b} d}{f_a} \end{aligned}} \quad (2-4)$$

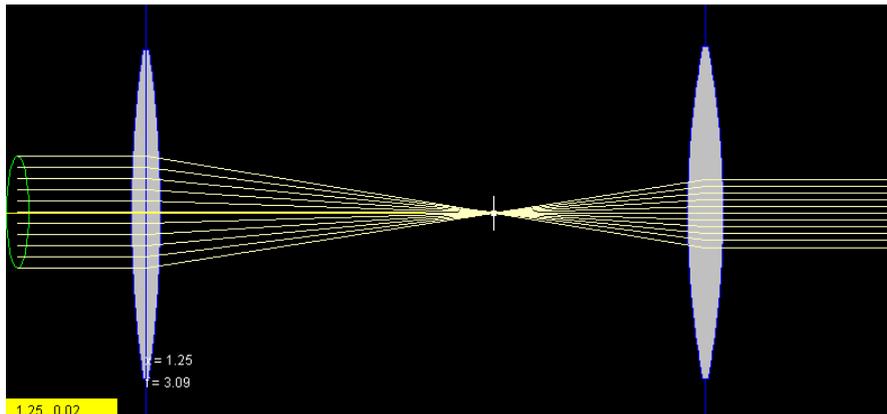
La position du plan focal image du système associé mesuré à partir du plan $H2,b$ est:

$$\boxed{sb = \frac{f_b (f_a - d)}{f_a + f_b - d}} \quad (2-5)$$



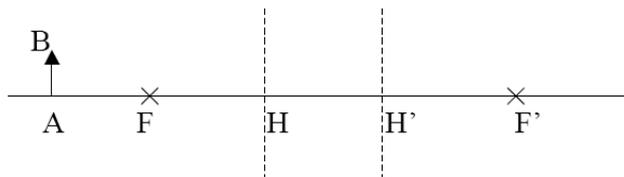
Un cas particulier se présente si $f_a + f_b = d$.

Un tel système est dit **afocal**: c'est un système optique dont la vergence est nulle (ou la focale infinie). Il a notamment comme propriété de laisser ressortir parallèle un faisceau de rayons qui étaient parallèles entre eux avant le système.

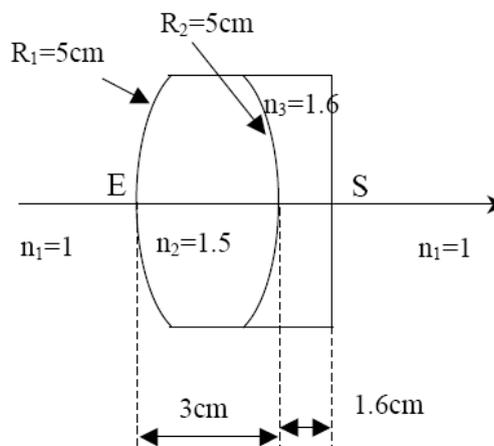


2.13 EXERCICES

1. A partir des points cardinaux représentés sur les 3 figures ci-dessous, tracer l'image de l'objet.



2. Déterminer les points cardinaux du doublet achromate ci-dessous.



3. La lentille précédente est utilisée comme objectif d'une lunette astronomique. A quelle distance de la face de sortie de l'objectif se forme l'image d'une étoile située à l'infini? L'étoile a un diamètre apparent égal à $1'$ (1 arcsec). Quel est le diamètre de son image?

3. DIAPHRAGMES ET PUPILLES¹

3.1 FAISCEAU UTILE, DIAPHRAGMES D'OUVERTURE ET DE CHAMP

Le champ d'un instrument d'optique est la partie de l'espace dont cet instrument fournit une image acceptable. Un diaphragme, c'est par définition ce qui limite un faisceau. En pratique, les montures des pièces optiques, la taille d'un détecteur sont des diaphragmes.

La géométrie finie des lentilles fait qu'elles ne peuvent bien sûr collecter qu'une fraction de l'énergie émise par un point source. La limitation physique est déterminée par la périphérie de la lentille qui définit les rayons qui peuvent entrer dans le système et former une image.

En général, tout objet obstruant, comme le dispositif de maintien de la pièce optique (monture) ou un diaphragme séparé, détermine donc le **faisceau utile** des rayons pouvant participer à l'image finale. Pour un système optique, l'élément de ce type est appelé le **diaphragme d'ouverture**, noté dans la figure Figure 3-1 A.S. (pour le terme anglais *Aperture Stop*).

C'est par exemple le cas du diaphragme à iris que l'on trouve dans les objectifs d'appareils photo. Comme le montre l'exemple de la Figure 3-1, des rayons possédant un fort angle d'incidence peuvent entrer dans une lentille. Bien qu'il soit toujours intéressant d'avoir le maximum de luminosité sur l'image, donc de lumière pénétrant dans le système, les performances optimales en termes de stigmatisme d'un système s'obtiennent dans les conditions de l'optique paraxiale (conditions de Gauss), donc pour des rayons possédant de faibles angles d'incidence.

Pour cela il est souvent intéressant de disposer d'un élément à part, délimitant les rayons arrivant sur une lentille. Signalons cependant qu'un système optique, simple ou composé, a **toujours** un diaphragme d'ouverture, que ce soit une monture de lentille ou un diaphragme indépendant. Aussi pour un système composé de plusieurs lentilles, il y a plusieurs diaphragmes (par exemple les montures des lentilles) mais il n'y a qu'un **seul diaphragme d'ouverture** pour tout le système.

Un diaphragme d'ouverture limite l'éclairement. Il est essentiellement dimensionné pour assurer le niveau d'éclairement voulu. Il joue sur l'extension linéaire du faisceau: un grand diaphragme nécessite des pièces optiques de grande taille ... dont la qualité doit suivre.

De la même manière, l'élément qui limite la taille de l'image dans le plan d'observation est appelé le **diaphragme de champ**, noté dans la figure F.S. (pour le terme anglais *Field Stop*). Celui-ci détermine le champ que peut voir l'instrument. Le détecteur, de taille finie, peut jouer le rôle de diaphragme de champ. Si le diaphragme d'ouverture contrôle le nombre de rayons qui atteignent le point image d'un point objet qui est vu par le système, c'est le diaphragme de champ qui sélectionne les points qui sont vus ou non. Il est aussi généralement dimensionné pour assurer un **éclairement uniforme**.

¹ Ce chapitre est en partie repris de « E. Hecht, *Optique*, Pearson Education, 2005 ».

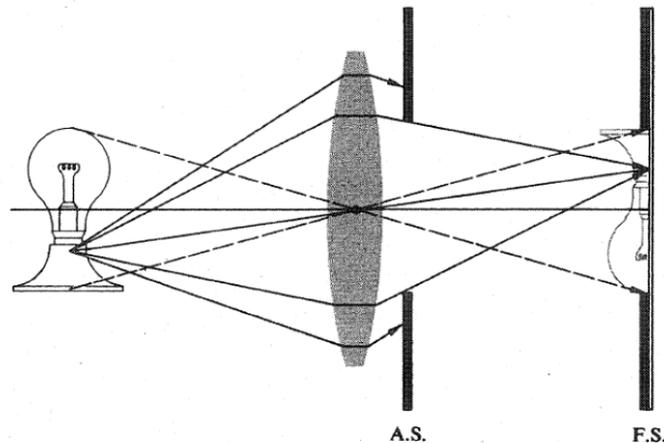


Figure 3-1 Diaphragme d'ouverture (A.S.) et diaphragme de champ (F.S.)

Tout objet situé en dehors du champ de l'appareil (la zone délimitée par le diaphragme de champ) ne peut donc être imagé par le système.

Finalement, on peut dire que le **diaphragme d'ouverture** limite l'angle d'ouverture du faisceau provenant de l'objet et **contrôle donc la luminosité** de l'image. Plus il est ouvert, plus l'énergie lumineuse pénétrant dans le système est grande.

En revanche, le **diaphragme de champ contrôle l'angle de champ** du système, donc l'extension de la zone pouvant être imagée. Augmenter le champ permet au système d'observer des zones plus importantes en périphérie. C'est d'ailleurs le principe des objectifs panoramiques ou « grand angle ».

3.2 PUPILLE D'ENTRÉE ET PUPILLE DE SORTIE

La notion de pupille représente un autre concept important pour le dimensionnement d'un système optique.

La **pupille d'entrée** d'un système optique est l'image du diaphragme d'ouverture vue depuis le point sur l'axe de l'objet au travers des éléments optiques qui précèdent le diaphragme (s'il y en a). S'il n'y a pas de lentilles entre l'objet et le diaphragme d'ouverture, c'est ce dernier qui constitue la pupille d'entrée du système.

Pour illustrer ce point, examinons la figure 3-2 représentant une lentille dont le diaphragme d'ouverture est à la sortie. Cette lentille fait du diaphragme d'ouverture une image L virtuelle et agrandie. Celle-ci peut être localisée en traçant quelques rayons partant des bords du diaphragme d'ouverture, de la manière habituelle.

De la même manière, on définit la **pupille de sortie** d'un système comme étant l'image du diaphragme d'ouverture vue depuis le point sur l'axe de l'image au travers des éléments optiques situés à la suite du diaphragme (s'il y en a). Sur la figure 3-2, il n'y a pas de lentilles à la suite du diaphragme d'ouverture et celui-ci est donc la pupille de sortie.

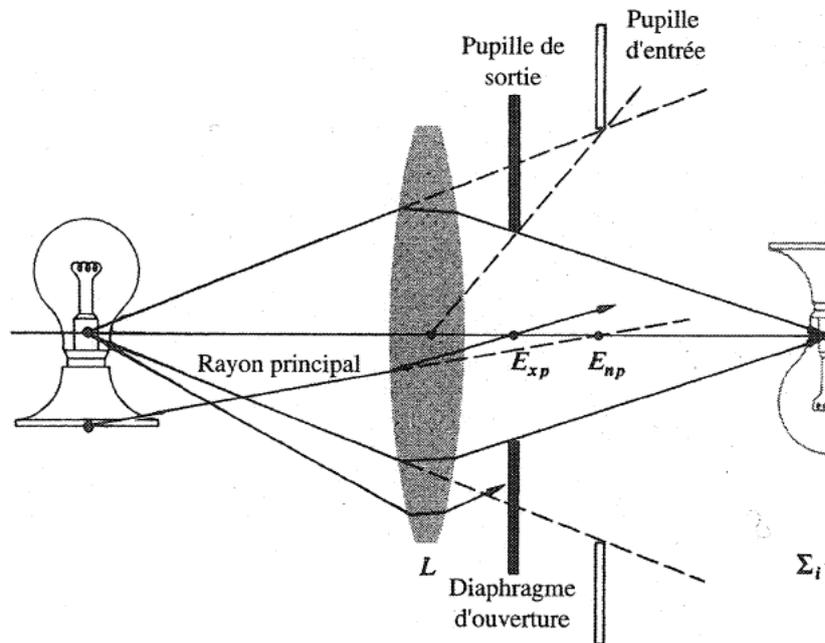


Figure 3-2 Pupilles d'entrée et de sortie

La notion de pupille détermine pratiquement le cône de lumière (faisceau) qui entre dans le système (déterminé par le point source et les bords de la pupille d'entrée) et celui qui sort du système (déterminé par le point image et les bords de la pupille de sortie). Tout autre rayon partant du point source mais extérieur à ces deux cônes (faisceaux) **ne peut pas atteindre** son point image conjugué.

Pour utiliser une lentille en guise d'objectif photographique, on doit lui adjoindre un diaphragme d'ouverture externe, afin de contrôler l'exposition. C'est la configuration illustrée par exemple à la Figure 3-3.

Dans le cas où l'on ne sait pas exactement quel élément est le diaphragme d'ouverture, on doit faire l'image de chaque composant possible par l'ensemble des optiques se trouvant à sa gauche.

La pupille d'entrée est l'image qui, vue depuis le point axial de l'objet, sous-tend le plus petit angle. L'élément dont l'image est la pupille d'entrée est alors le diaphragme d'ouverture du système pour ce point objet.

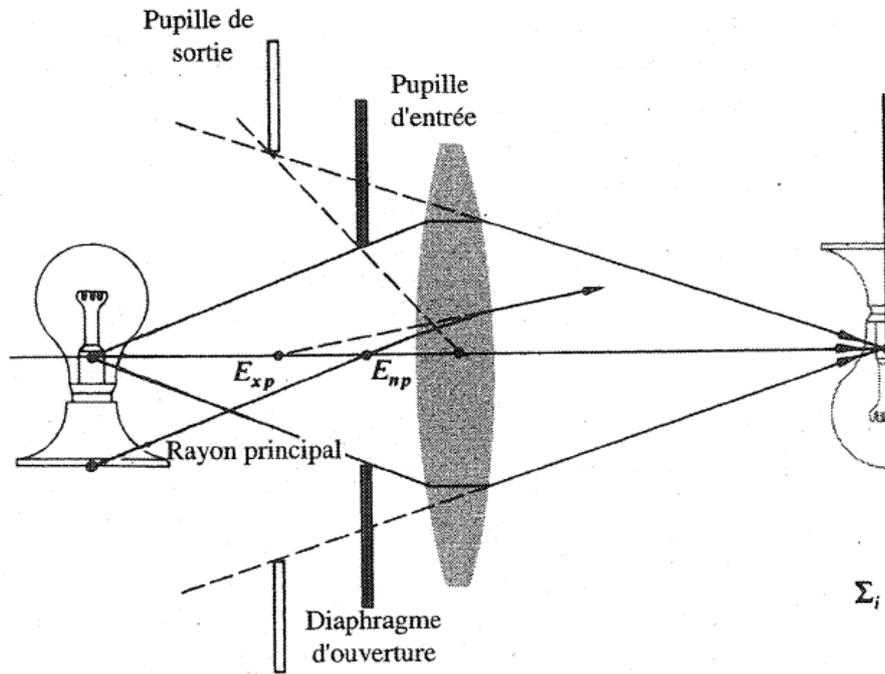


Figure 3-3 Exemple où le diaphragme d'ouverture est situé devant la lentille.

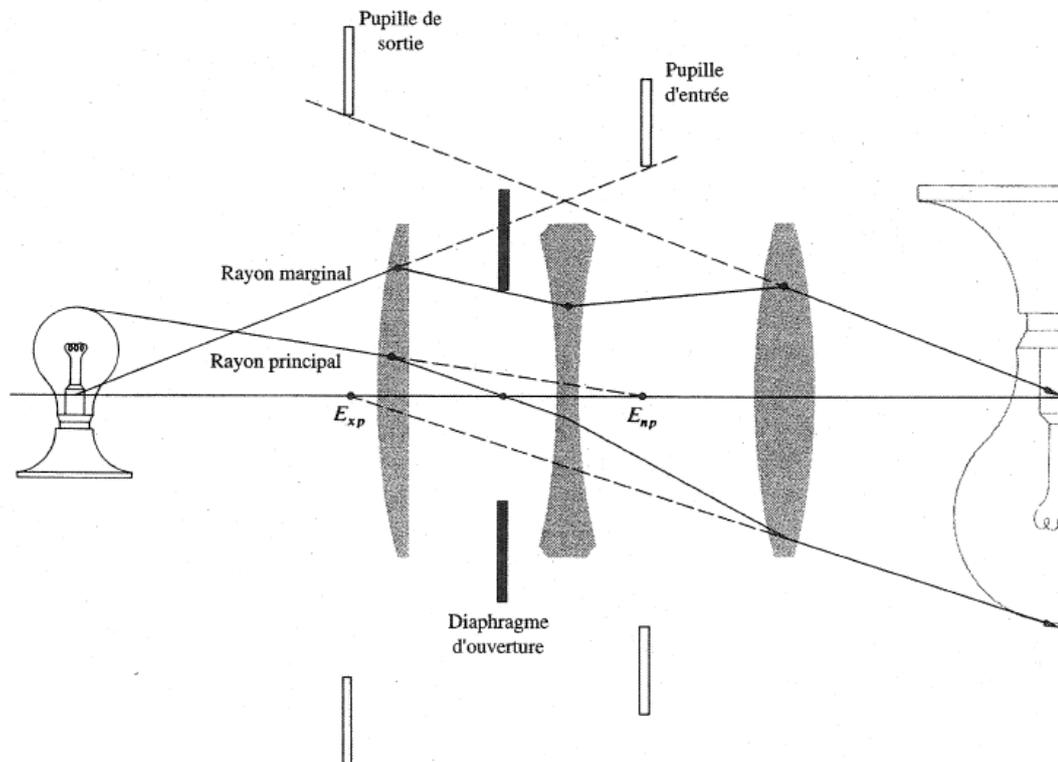


Figure 3-4 Diaphragmes et pupilles pour un système à trois lentilles

Le **rayon principal** désigne un rayon issu d'un point objet hors axe qui passe par le **centre du diaphragme d'ouverture**. Il pénètre alors dans le système optique en passant par le centre E_{np} , de la pupille d'entrée et sort du système par le centre E_{xp} , de la pupille de sortie.

Le rayon principal constitue ainsi le **rayon central du cône** des rayons issus d'un point-objet donné. Il y a donc autant de rayons principaux que de point-objets considérés (en général un nombre infini...).

L'axe optique représente un rayon principal particulier pour les systèmes centrés. En effet, c'est le seul rayon principal qui passe par le centre de toutes les ouvertures du système. Si, dans un système, nous fermons presque complètement le diaphragme d'ouverture, le faisceau utile contient de moins en moins de rayons lumineux. Le dernier rayon du faisceau qui peut encore juste passer avant la fermeture totale du diaphragme est précisément le rayon principal. Les schémas optiques comprennent toujours le rayon principal partant d'un point objet pour aboutir à l'image finale correspondante.

Un **rayon marginal** est un rayon issu d'un point objet axial et qui passe par le bord du diaphragme d'ouverture et bien évidemment, par le bord correspondant des pupilles d'entrée et de sortie.

Une dernière notion à aborder est ce qu'on appelle le **vignelage**, qui est une perte d'énergie reçue par les points images situés vers le bord du champ visuel d'un système, par rapport aux points situés près du centre du champ.

On voit bien, sur la figure 3-5, que le cône de rayons qui peut atteindre le plan image se rétrécit lorsque le point objet s'éloigne de l'axe. Le diaphragme d'ouverture effectif (qui était déterminé par les bords de L_1 pour le point sur l'axe) vu depuis un point hors axe est en effet une surface de plus en plus réduite, à mesure que le point s'éloigne de l'axe.

Le résultat est un assombrissement progressif des bords de l'image ou **vignelage**.

On peut évidemment limiter ce phénomène avec un **diaphragme de champ**.

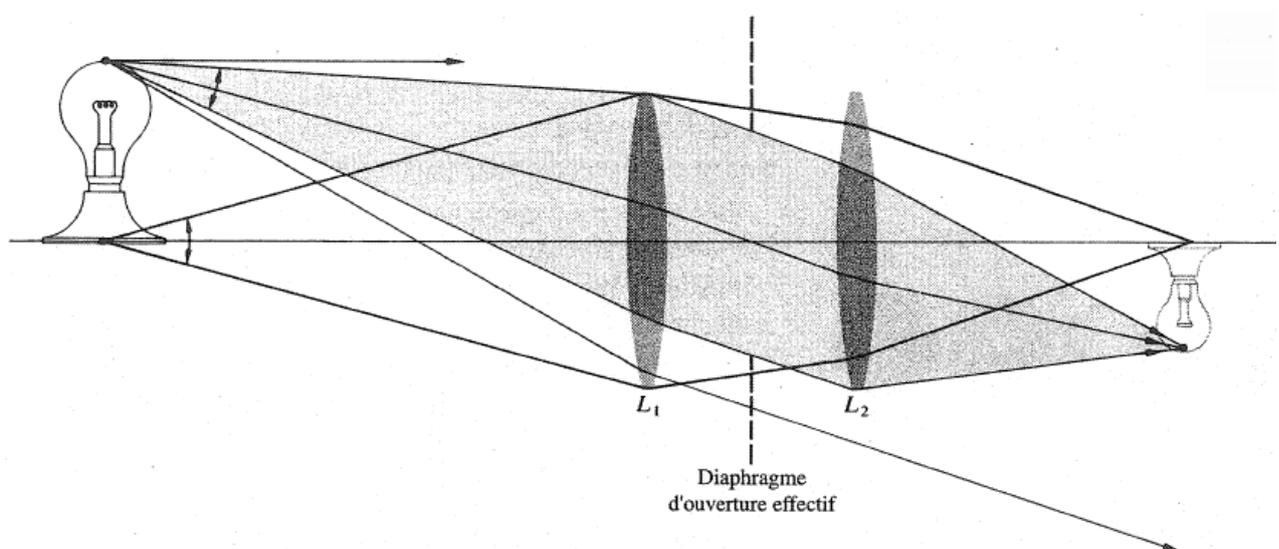


Figure 3-5 Vignelage



Figure 3-6 Effet de vignetage particulièrement visible sur le fond du ciel.

3.3 OUVERTURE RELATIVE ET NOMBRE D'OUVERTURE

Soit un système donnant une image d'un objet étendu. Le flux énergétique émis (par une surface élémentaire de l'objet ou, à la limite, par un point de l'objet) est collecté par la *pupille d'entrée* de diamètre D . Le flux est directement proportionnel à l'**aire** de passage offerte par la pupille, donc proportionnel à D^2 .

Au niveau de l'image, l'éclairement² est aussi inversement proportionnel à la surface de l'image qui varie avec le carré de la dimension latérale de l'image. Or, le grandissement d'une image³ dépend de la distance focale image f' du système et ainsi l'éclairement sera inversement proportionnel à f'^2 .

$$\text{Eclairement} \propto \frac{D^2}{f'^2} \quad (3-1)$$

Ainsi, le carré du rapport de ces deux grandeurs donne une mesure de l'éclairement énergétique dans le plan de l'image.

En optique, on utilise le terme **ouverture** pour exprimer deux grandeurs différentes. Dans le cas le plus trivial, on parle d'ouverture en se référant au diamètre de l'ouverture en question. On parle d'une «ouverture de 40 mm», par exemple.

Mais on utilise aussi le terme d'ouverture pour désigner la **convergence** (ou la divergence) d'un faisceau. Un faisceau « **très ouvert** » désigne un faisceau dont le cône de convergence est peu pentu (donc très rapidement convergent). Un faisceau « **fermé** » en revanche est un faisceau qui converge lentement. Pour quantifier cette convergence on utilise les unités suivantes :

- Ouverture relative
- Nombre d'ouverture (N ou $f/\#$)
- Ouverture numérique ou N.A. (*Numerical Aperture*)

Il existe donc plusieurs manières de caractériser l'ouverture d'un système optique et chacune est adaptée à une situation déterminée que nous allons décrire.

Le calcul des ouvertures s'effectue toujours à partir d'un point axial.

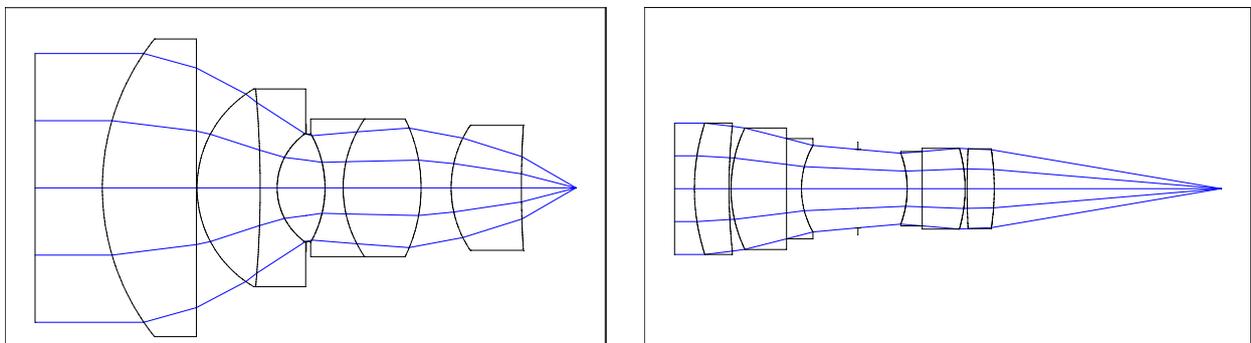


Figure 3-7 : Objectif très ouvert ($f/1$ à gauche) et moyennement ouvert ($f/3$ à droite)

²Flux reçu par unité de surface réceptrice en W/m^2

³ $G_L = -f/z'$ - voir les formules de Newton, z' étant la distance entre le foyer image et l'objet.

3.3.1 Ouverture relative

L'**ouverture relative** d'un système est le rapport entre le diamètre d'ouverture de la pupille d'entrée et la distance focale image du système optique.

$$\text{Ouverture relative} = \frac{D}{f} \quad (3-2)$$

D et f sont exprimés dans les mêmes unités (de longueur). Pour être précis le terme exact est « **ouverture de la pupille d'entrée relative à la distance focale f** »

Un système dont la distance focale est de 150 mm et le diamètre de la pupille d'entrée de 50 mm a une ouverture relative de $50/150 = 1/3 = 0.33$.

3.3.2 Nombre d'ouverture ou $f/\#$

Les professionnels utilisent le nombre d'ouverture qui est l'inverse l'ouverture relative. Cette grandeur est notée N ou $f/\#$, (*f-number* en anglais).

Un système dont la distance focale est de 150 mm et le diamètre de la pupille d'entrée de 50 mm a un nombre d'ouverture $N=3$. On dit très fréquemment que le système est « ouvert à $f/3$ ». Cela signifie que sa distance focale f est 3 fois plus grande que le diamètre D de sa pupille d'entrée

$$N = f/\# = \frac{f'}{D} \quad (3-3)$$

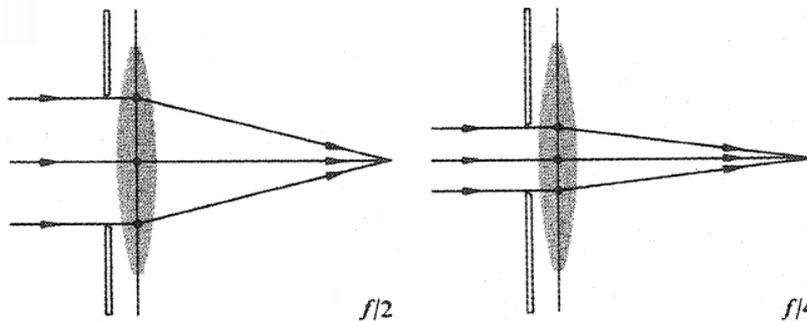


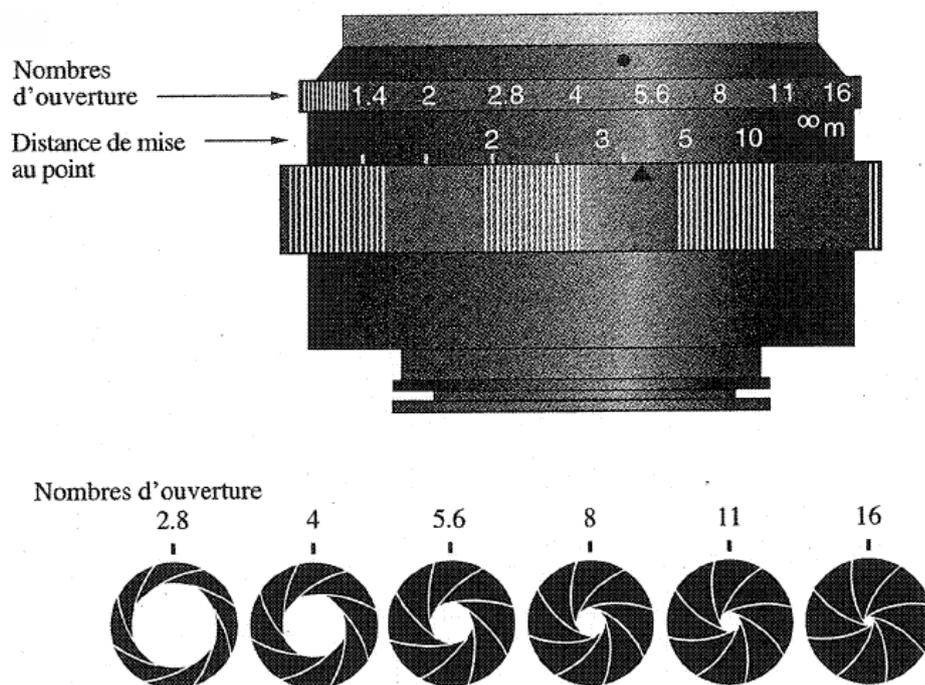
Figure 3-8. Le nombre d'ouverture $f/\#$ correspond à une situation standard où l'objet est à l'infini et son conjugué se trouve au foyer image F' .

Les rapports D/f' ou f'/D font intervenir f' , la distance focale image du système. Le plan focal image est l'endroit où se focalise l'image d'un objet placé à l'infini en amont du système. **L'ouverture relative et le nombre d'ouverture caractérisent donc un système dont l'un des conjugués est à l'infini.** Le conjugué à l'infini est donc toujours utilisé pour définir le nombre d'ouverture $f/\#$, même si le système fait intervenir un conjugué qui n'y est pas. Un objectif de photographie ou un télescope sont deux exemples d'un tel système.

Les objectifs photographiques sont habituellement spécifiés par leur distance focale et par leur ouverture la plus grande (ou nombre d'ouverture le plus petit). On peut par exemple lire sur un objectif: « 50 mm, $f/1,4$ ». Comme le temps d'exposition est proportionnel au carré du nombre d'ouverture, $f/\#$ est parfois qualifié de **vitesse** de l'objectif. On dit par exemple qu'un objectif $f/1,4$ est deux fois plus rapide qu'un objectif $f/2$.

Habituellement, les marquages sur les objectifs photographiques ont les valeurs: 1, 1,4, 2, 2,8, 4, 5,6, 8, 11, 16, 22, et ainsi de suite. L'ouverture la plus large dans ce cas correspond à $f/1$, ce qui est très ouvert: $f/2$ est plus courante. On voit donc que l'on passe d'un nombre d'ouverture particulier au suivant en le multipliant par un facteur $\sqrt{2}$ (arrondi numériquement).

Cela correspond donc à un facteur $1/\sqrt{2}$ pour l'ouverture relative et à un facteur 1/2 pour l'éclairement. Ainsi, la même quantité de lumière atteint le film photographique si l'on a un nombre d'ouverture $f/1,4$ pour un temps d'exposition de 1/500 de seconde, $f/2$ pour 1/250 s, ou $f/2,8$ pour 1/125 s.



3.3.3 Ouverture numérique

Pour certaines classes de systèmes (les objectifs de microscope, fibres optiques) on utilise plus volontiers l'**ouverture numérique** N.A. (*Numerical Aperture*) pour décrire le cône d'ouverture des faisceaux. Cette ouverture numérique N.A. est définie de la manière suivante :

$$N.A. = n' \sin \alpha' \quad \text{Ouverture numérique image}$$

$$N.A. = n \sin \alpha \quad \text{Ouverture numérique objet}$$

Elle exprime la valeur de la divergence du cône énergétique issu de l'objet et s'appuyant sur le bord de la pupille d'entrée ou la convergence du cône limité par la pupille de sortie reçu par l'image. Il est donc nécessaire de préciser s'il s'agit de l'ouverture numérique dans l'espace objet ou l'espace image.

Les indices de réfraction à considérer sont ceux des milieux où sont mesurés les angles α et α' .

Un faisceau collimaté (i.e. parallèle) à une N.A. nulle.

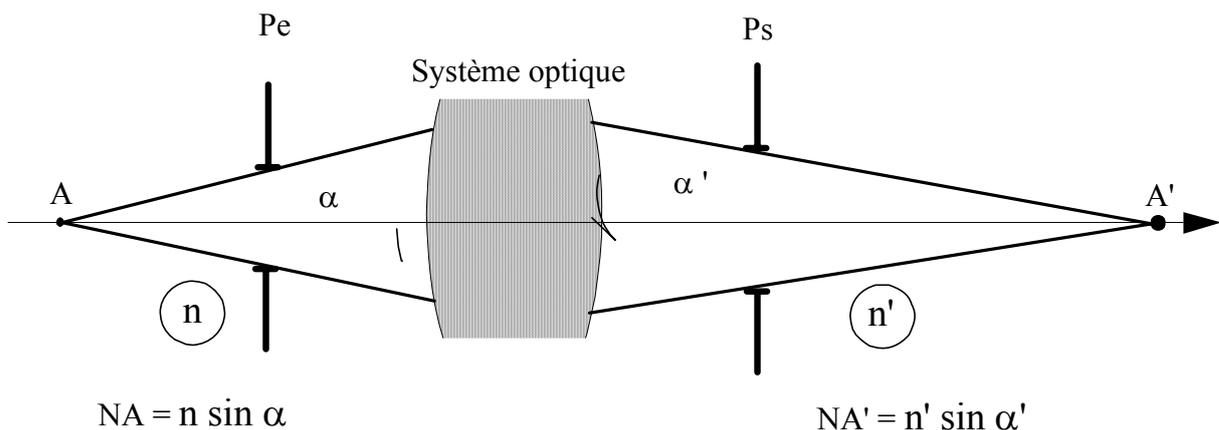


Figure 3-9. Ouverture numérique dans les espaces objet et image.

α représente l'angle entre le rayon marginal passant par le bord du diaphragme (pupille d'entrée) Pe et l'axe optique à partir d'un point objet A situé à distance finie sur l'axe. Même situation pour l'espace image

3.4 EXERCICES

1. Un objet mesure 20 mm depuis l'axe et se trouve 80 mm d'un système optique consistant d'un diaphragme de 20 mm et d'une lentille de focale 50 mm et diamètre 50 mm. La lentille se trouve 20 mm derrière le diaphragme. Calculer la position et taille de la pupille de sortie et de l'image. Dessiner le rayon principal ainsi que les rayons extrêmes partants du sommet de l'objet.

Rep. pupille de sortie 33,3 mm, 33,3 mm, image 100 mm, 20 mm

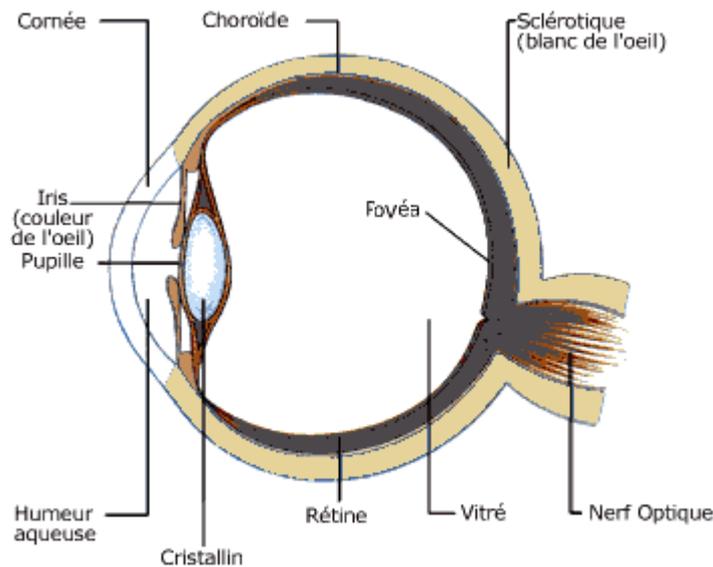
2. Un objet mesure 40 mm depuis l'axe et se trouve 140 mm d'un système optique consistant d'une lentille de focale 60 mm et diamètre 50 mm et d'un diaphragme de 20 mm. La lentille se trouve 25 mm **devant** le diaphragme. Calculer la position et taille de la pupille de sortie et de l'image. Dessiner le rayon principal ainsi que les rayons extrêmes partants du sommet de l'objet.

Rep. pupille de sortie 42,9 mm, 34,3 mm, image 105 mm, 30 mm

4. L'OEIL

4.1 ANATOMIE DE L'OEIL

La majorité des instruments d'optique ayant pour but d'aller au-delà des possibilités de l'œil humain, il est essentiel de comprendre son anatomie, ses caractéristiques et ses défauts. La fonction de l'œil est de recevoir et de transformer les vibrations électromagnétiques de la lumière en influx nerveux qui sont transmis au cerveau. L'œil fonctionne comme un appareil photographique. Le globe oculaire ressemble à une petite balle d'un diamètre de 2,5 cm, d'une masse d'environ 7 grammes et d'un volume de 6,5 cm³.



Anatomie de l'œil (© ophtasurf.free.fr)

- La lumière pénètre dans l'œil par l'**iris** (arc-en-ciel en grec). Il s'agit du diaphragme de l'œil percé en son centre par la **pupille**. C'est un muscle qui fait varier l'ouverture de la pupille (entre 2,5 et 7 mm) afin de modifier la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil pour éviter l'aveuglement en plein soleil ou capter le peu de rayons la nuit. La couleur de l'iris est déterminée par la présence d'un pigment, la mélanine, le même composé chimique qui donne aussi leur couleur aux cheveux et à la peau. L'iris est bleu si la mélanine est peu concentrée, il est plus foncé quand la concentration augmente.
- La **cornée** est une membrane solide et transparente de 11 mm de diamètre qui protège la pupille. La cornée est privée de vaisseaux sanguins (sinon notre vision serait troublée), elle est donc nourrie par un fluide: l'humeur aqueuse. La cornée contient 78% d'eau et pour maintenir cette humidité, sa surface est constamment recouverte de larmes alimentées en continu par les glandes lacrymales et réparties par le battement des paupières. La cornée est la principale lentille de l'œil, elle assure environ 80% de la réfraction.
- Le **cristallin**: C'est une lentille biconvexe molle et composée de fines couches superposées. Il se déforme sous l'action du muscle ciliaire, ce qui permet l'**accommodation** de l'œil.

-
- L'**humeur vitrée** : elle occupe 80% du volume de l'œil, elle est constituée d'une gelée qui donne à l'œil sa consistance.
 - La **rétine**: c'est la couche sensible à la lumière grâce aux photorécepteurs qui sont de deux types : les bâtonnets et les cônes.
 - Les **bâtonnets**: de forme allongée, ils doivent leur nom à leur forme. Ils sont environ 130 millions. Ils sont absents de la fovéa et se logent à la périphérie. Ils ont une très grande sensibilité à la lumière, d'où leur capacité à percevoir de très faibles lueurs la nuit. Ainsi ils ont une très faible perception des détails et des couleurs car plusieurs dizaines de bâtonnets ne sont liés qu'à une seule fibre du nerf optique. Ils contiennent une substance chimique appelée rhodopsine ou pourpre rétinien. Quand la lumière frappe une molécule de rhodopsine, celle-ci génère un faible courant électrique. Les signaux ainsi recueillis forment un message qui est transmis aux cellules nerveuses de la rétine.
 - Les **cônes**: d'un diamètre moyen de 4 μm , ils sont environ 5 à 7 millions à se loger dans la fovéa. Leur sensibilité à la lumière est très faible mais leur perception des détails est très grande pour deux raisons : il y a une densité très élevée de cônes dans la fovéa et surtout chaque cône de la fovéa transmet son information à plusieurs fibres du nerf optique. Adaptés à la vision de jour, ils ont une très bonne sensibilité aux couleurs. Ils sont de trois types selon le pigment qu'ils contiennent et ont donc une sensibilité à des ondes lumineuses de longueurs différentes : cônes contenant de l'erythropsine (sensibles au rouge), de la chloropsine (vert), de la cyanopsine (bleu).
 - La couche externe, la **sclérotique**, est une enveloppe de protection. Elle recouvre environ les cinq sixièmes de la surface de l'œil. Elle donne à l'œil sa couleur blanche et sa rigidité.
 - La **choroïde**: c'est une couche vasculaire de couleur noire qui tapisse les trois cinquièmes postérieurs du globe oculaire. Elle absorbe les rayons lumineux inutiles pour la vision, elle est très riche en vaisseaux sanguins afin de nourrir les photorécepteurs de la rétine.

4.2 MODÈLE OPTIQUE DE L'OEIL

Tous les milieux transparents de l'œil forment une succession de dioptries, donnant sur la rétine une image réelle et inversée des objets.

Abordons quelques données optiques (moyennes) de l'œil :

Structures	Rayon de courbure antérieur	Rayon de courbure postérieur	Indice de réfraction
cornée	7,8 mm	6,8 mm	1,377
humeur aqueuse	-	-	1,336
crystallin	10 mm	6 mm	1,413
humeur vitrée	-	-	1,336

Il existe plusieurs simplifications de ce système optique définissant ce qu'on appelle **l'œil réduit**.

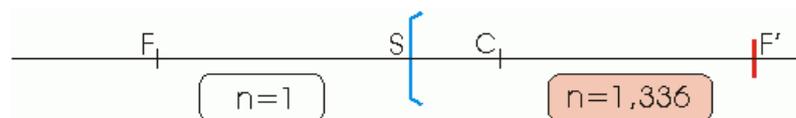
4.2.1 L'œil comme un dioptre sphérique

La plus simple modélisation de l'œil, consiste à le considérer comme un **dioptre sphérique**, muni d'un diaphragme et permettant de se placer dans les conditions de Gauss permettant le stigmatisme approché.

Pour un œil "moyen" normal la distance focale image f_i est voisine de 24mm tandis que la distance focale objet f_o est voisine de 18 mm. Quand un œil normal observe un objet éloigné (on dit à **l'infini** par commodité pour les calculs correspondants) le foyer image F' est sur la rétine.

Avec une bonne approximation, en optique, l'œil est équivalent à un dioptre sphérique de sommet S et de centre C tel que

$$r = SC = 6 \text{ mm} \text{ séparant l'air et le milieu d'indice } 1,337$$



Rappelons l'équation du dioptre sphérique

$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r}}$$

Cette expression permet de définir deux distances focales distinctes:

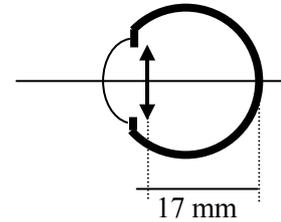
$$\text{distance focale image: } f_i = \frac{r n}{n-1} = \frac{0,006 \cdot 1,336}{0,336} = 0,024 \text{ m}$$

$$\text{distance focale objet: } f_o = \frac{r}{n-1} = \frac{0,006}{0,336} = 0,018 \text{ m}$$

4.2.2 L'œil comme une lentille

Un autre modèle très simple de l'œil est composé d'une seule lentille mince de 23~24 mm de focale nominale. Dans ce modèle, toute la convergence est assurée par cette lentille placée dans un milieu d'indice 1. La focale varie évidemment avec l'accommodation – voire section 4.2.4 suivante.

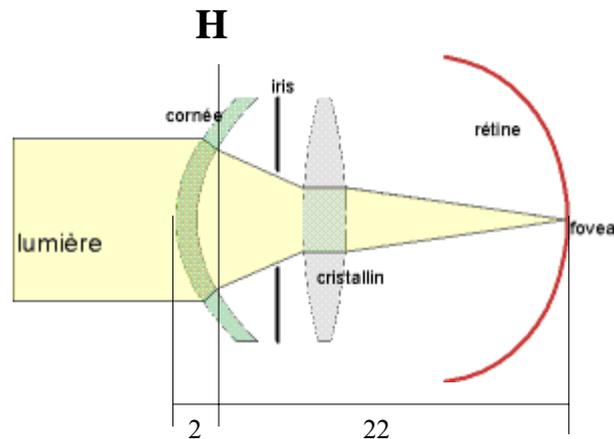
Dans une variante descriptive du modèle, on a une lentille mince située à 17 mm de la rétine – figure à droite. On tient compte ici de l'indice de réfraction de l'humeur vitrée (~1,34) : ainsi l'image d'un objet situé à une distance ∞ de l'œil se forme à une distance $p' = 17$ mm.



Œil réduit composé d'une seule lentille

4.2.3 L'œil comme un système de deux lentilles

Un modèle à peine plus complexe représente l'œil par deux lentilles comme illustré à la figure ci-bas.



En pratique pour la plupart des calculs l'œil peut être réduit à un **système centré** dont les caractéristiques suivent:

- distance focale image: 22 mm
- distance focale objet: 17 mm
- plans principaux objet et image confondus et se trouvant 2 mm derrière la face antérieure de cornée.
- rayon de courbure: +6 mm
- puissance : $D = +60 \cdot [\text{dioptries}]$
- indice de réfraction: $n = 1,337$
- amplitude dioptrique (voir section 4.2.4, page suivante) = 4 ~6

4.2.4 L'accommodation

Le cristallin est plus qu'une simple lentille à focale fixe. En effet il se déforme pour adapter sa focale, donc la puissance dioptrique à la distance de l'objet. Il fournit ainsi une image nette. C'est l'**accommodation** de l'œil.

Notre cerveau analyse les images fournies par l'œil et dirige en permanence l'accommodation du cristallin. Ce processus est inconscient.

Un œil normal est dit emmétrope. Sans accommodation (au repos), il perçoit une image nette d'un point éloigné à l'infini. Avec l'accommodation l'œil peut percevoir une image nette aussi d'objets beaucoup plus proches.

La distance Δ la plus éloigné pour une vision nette, est appelé **punctum remotum**.

La distance δ la plus proche qui puisse être vu nettement est le **punctum proximum**. Pour un jeune adulte, il est habituellement à une vingtaine de centimètres de l'œil.

La différence $\Delta - \delta$ est le **parcours de vision nette**.

Amplitude dioptrique d'accommodation:	$\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\Delta}$	[m ⁻¹] ou [dioptrie]	(8.1)
---------------------------------------	---------------------------------------	----------------------------------	-------

Un œil normal voit nettement de 25 cm à l'infini, ce qui correspond à une amplitude de 4 dioptries. Chez les enfants le PP est situé à une distance plus proche, de l'ordre de 10 cm.

4.3 AUTRES CARACTÉRISTIQUES DE L'OEIL

L'acuité visuelle est la principale qualité de l'œil. Elle représente la faculté que possède l'œil de percevoir les détails, c'est-à-dire, d'une façon plus précise, de percevoir comme distincts deux points rapprochés. Pour que l'œil distingue séparément deux points distincts, il faut que leurs images se forment sur deux cellules différentes.

Le pouvoir séparateur de l'œil est défini comme le plus petit diamètre apparent de deux points que l'on voit distinctement.

Pouvoir séparateur de l'œil: 3/10 000 radians (dans de bonnes conditions)

Le pouvoir séparateur dépend de l'éclairage et de la fatigue.

Au foyer, 3/10 000 radians correspondent à $3/10\,000 (17\text{ mm}) = 5,1\ \mu\text{m}$, soit une valeur proche de la dimension des cônes. (Leurs tailles varient entre 1,5 et 5 μm .)

Champ de vision nette

La fovéa, tapissée de cônes sensibles aux couleurs, a un diamètre de 3 mm.

L'angle l'ouverture vaut donc $3/17 \approx 1,76 \cdot 10^{-1}$ radians, soit 10° environ.

Grâce à la mobilité du globe oculaire, le champ de vision directe (sans tourner la tête) est de $\pm 35^\circ$.

Sensibilité lumineuse spectrale

En moyenne entre 400 et 750 nm.

Maximum de sensibilité lumineuse spectrale

Vision diurne : autour de $\lambda = 550\text{ nm}$

Vision nocturne : autour de $\lambda = 505\text{ nm}$

Vision stéréoscopique

Grâce à la vision binoculaire (avec les deux yeux), nous sommes capables de "voir en relief" et d'estimer la distance des objets.

La persistance rétinienne

On constate qu'une image persiste environ un dixième de seconde après que l'on ferme les yeux. La persistance dépend de la luminosité. Cette caractéristique est exploitée par le cinéma et la télévision pour donner la sensation du mouvement.

4.4 DÉFAUTS DE L'OEIL

4.4.1 La myopie

L'œil myope est trop convergent. Au repos, il ne voit pas nettement les objets situés à l'infini. La distance focale étant trop courte, les images d'objets éloignés se forment en avant de la rétine. En revanche, il peut, en général, voir des objets plus rapprochés que 25 cm.

$$\text{Œil myope:} \quad \delta \ll 25 \text{ cm} \quad \Delta < \infty$$

Pour corriger l'œil myope, il faut diminuer sa convergence, donc utiliser un verre divergent.

Exemple :

Un myope ne voit plus nettement au-delà de 50 cm. Quelle est la vergence du verre correcteur pour qu'il voie net à l'infini ?

$$\text{Œil myope, avec objet à 50 cm:} \quad \frac{1}{0,5} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_{\text{oeil}}^{PR}} \quad (\text{formule des lentilles})$$

$$\text{Œil myope corrigé avec objet à l'infini:} \quad \frac{1}{\infty} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_{\text{oeil}}^{PR}} + \frac{1}{f_{\text{corr}}}$$

(addition des vergences, on néglige ici la distance verres-œil)

$$\text{Il en résulte: } V_{\text{corr}} = \frac{1}{f_{\text{corr}}} = -\frac{1}{0,5} = -2 \text{ dioptries.}$$

4.4.2 L'hypermétropie

C'est le défaut contraire de la myopie : l'œil n'accommoder pas suffisamment pour voir nettement de près. La distance focale est trop longue, les images d'objets proches se forment en arrière de la rétine. En théorie, un hypermétrope pourrait voir nette une image virtuelle derrière sa tête.

$$\text{Œil hypermétrope:} \quad \delta \gg 25 \text{ cm} \quad (\Delta < 0)$$

Pour corriger l'œil hypermétrope, il faut augmenter sa convergence, donc utiliser un verre convergent.

Exemple :

Un hypermétrope commence à voir nettement de près à partir de 80 cm. Quelle est la vergence du verre correcteur pour qu'il voie nettement à 25 cm ?

$$\text{Œil hypermétrope, avec objet à 80 cm:} \quad \frac{1}{0,8} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_{\text{oeil}}^{PP}}$$

$$\text{Œil hypermétrope corrigé avec objet à 25 cm:} \quad \frac{1}{0,25} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_{\text{oeil}}^{PP}} + \frac{1}{f_{\text{corr}}}$$

$$\text{Il en résulte : } V_{\text{corr}} = \frac{1}{f_{\text{corr}}} = \frac{1}{0,25} - \frac{1}{0,8} = 2,75 \text{ dioptries.}$$

4.4.3 La presbytie

La presbytie résulte d'une diminution inéluctable de la souplesse du cristallin avec l'âge et par conséquent d'une réduction du parcours d'accommodation. Pour corriger ce défaut, il faut des lunettes à double foyer, pour rapprocher le PR et éloigner le PP.

4.4.4 L'astigmatisme

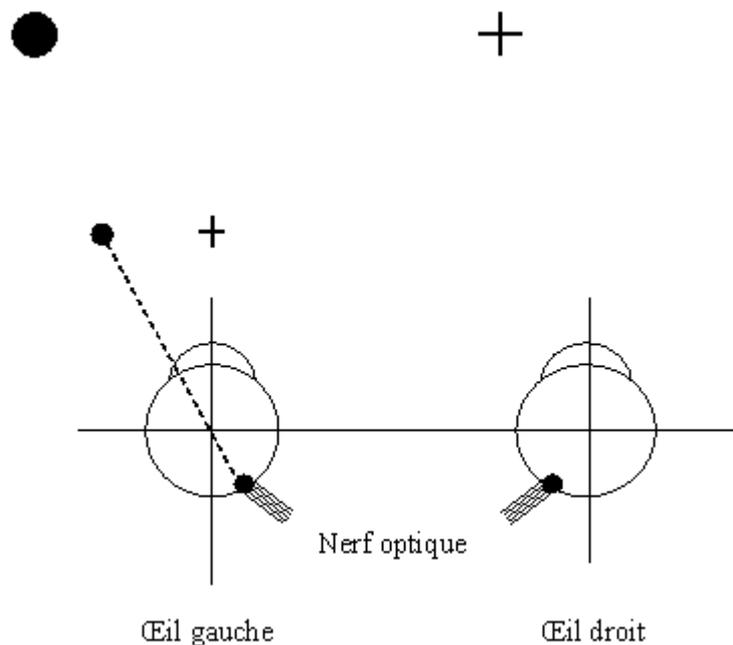
Suite à un défaut de la cornée, la convergence de l'œil n'est pas la même dans toutes les directions. Un cercle parfait sera vu comme un ellipse. On corrige ce défaut au moyen de verres de forme torique ; les rayons de courbures selon deux plans orthogonaux ont des valeurs différentes.

De nos jours, la correction des défauts de l'œil se fait aussi par laser. Par photoablation d'une partie de la cornée, on modifie sa courbure, donc sa vergence.

4.4.5 Mise en évidence de la tache aveugle de l'œil

Il existe une zone insensible de l'œil, correspondant au départ du nerf optique⁴, qu'on peut mettre en évidence par l'expérience suivante.

Se placer à environ 10 cm de la feuille. Avec l'œil gauche, fixer la croix et reculer lentement la tête. A un certain moment le point noir disparaît.



⁴ Découverte en 1660 par Edme Mariotte (1620 – 1684).

4.5 EXERCICES

1. Une personne presbyte avec un PR de 120 cm utilise des lunettes de +2 dioptries pour voir de près. Sans lunettes, quel est son PP ? Avec ses lunettes, jusqu'à quelle distance voit-elle nettement ?
2. Un enfant voit net de 8 cm à l'infini. Quelle est son amplitude dioptrique ?
3. Deux phares d'une automobile sont écartés de 120 cm. A partir quelle distance peut-on les distinguer ?
4. Lorsqu'on regarde la Lune à l'œil nu, combien de détails peut-on distinguer sur un diamètre ?

5. LOUPE ET MICROSCOPE

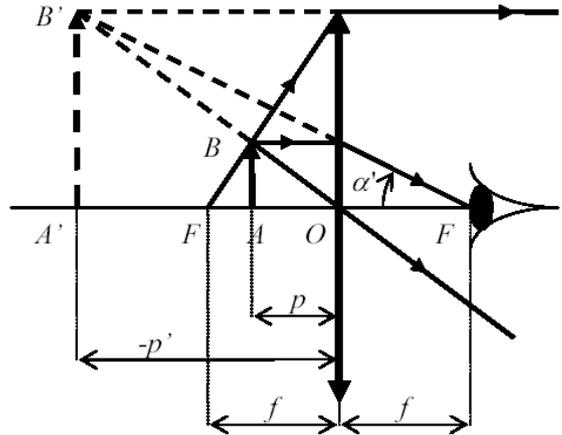
5.1 LA LOUPE

La loupe est le plus simple de tous les instruments d'optique. Elle permet de voir des détails dont le diamètre apparent est inférieur à $3 \cdot 10^{-4}$ radians, le pouvoir séparateur de l'œil normal. Le principe est le suivant: on place l'objet à étudier entre le foyer et la loupe, puis on regarde l'image virtuelle produite par la loupe.

Supposons l'œil placé au foyer image de la loupe. L'angle sous lequel l'œil voit l'image $A'B'$ est égal à $\alpha' \approx AB / f$ (approximation de Gauss).

Cet angle ne dépend pas de la position de AB . Si AB est au foyer objet, l'image est rejetée à l'infini, mais l'angle sous lequel l'œil la voit est toujours égal à α' .

Rappelons que **sans la loupe**, l'angle le plus grand sous lequel l'œil peut voir l'objet AB est obtenu quand l'objet est situé au punctum proximum (δ). Cet angle est égal à : $\alpha \approx AB / \delta$.



Le grossissement est donc le rapport des diamètres apparents avec et sans loupe.

Grossissement, image à l'infini	$G_{A\infty} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\delta}{f}$	(5.1)
---------------------------------	---	-------

Le grossissement est généralement indiqué come $G_A \mathbf{X}$ (ex. $4\mathbf{X}$ pour un grossissement de 4).

Le **grossissement commercial** correspond à $\delta = 0,25$ m : $G_{com} = \frac{0,25}{f}$.

Exemple : Loupe de 5 cm de focale (vergence⁵ de 20 dioptries)

- Grossissement commercial : $G_{com} = 0,25 / 0,05 = 5$
- Pour un personne voyant net à 10 cm, le grossissement est de $G_\infty = 10/5 = 2$

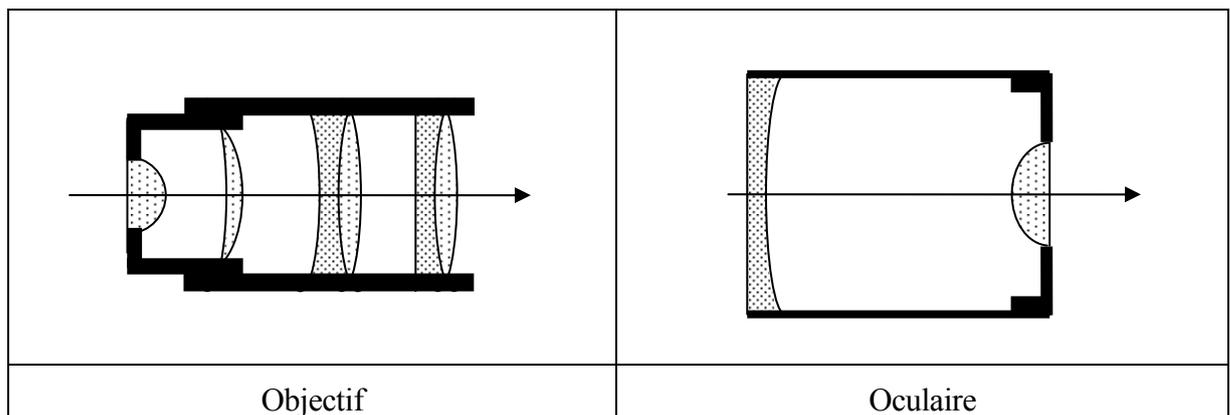
La meilleure façon d'utiliser la loupe consiste à mettre l'œil tout contre la loupe et à accommoder de près (au punctum proximum). On profite ainsi d'un plus grand champ de vision et le grossissement est supérieur d'une unité au grossissement G_∞ et. En effet :

$$G_{A_{max}} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A'B' / (-p')}{AB / \delta} = -\frac{A'B'}{AB} \frac{\delta}{p'} = \frac{p'}{p} \frac{\delta}{p'} = \frac{\delta}{p} = \delta \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{\delta} \right) = \frac{\delta}{f} + 1 = G_{A\infty} + 1$$

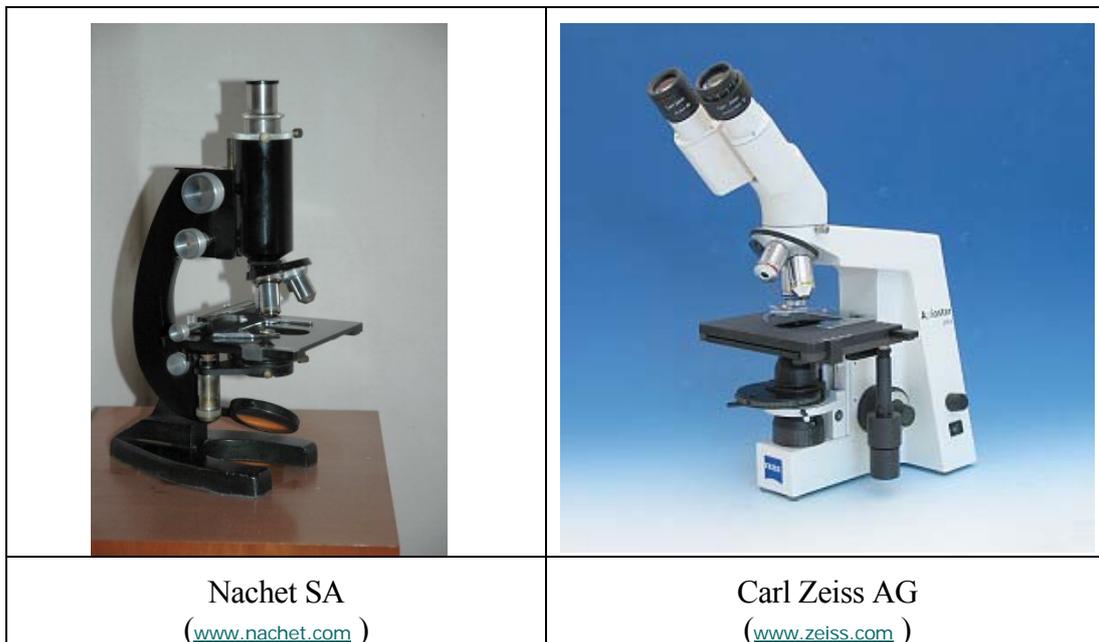
⁵ Dans le langage courant, on dit aussi « puissance de la loupe » au lieu de « vergence ». En anglais, on emploie le terme « power ».

5.2 LE MICROSCOPE

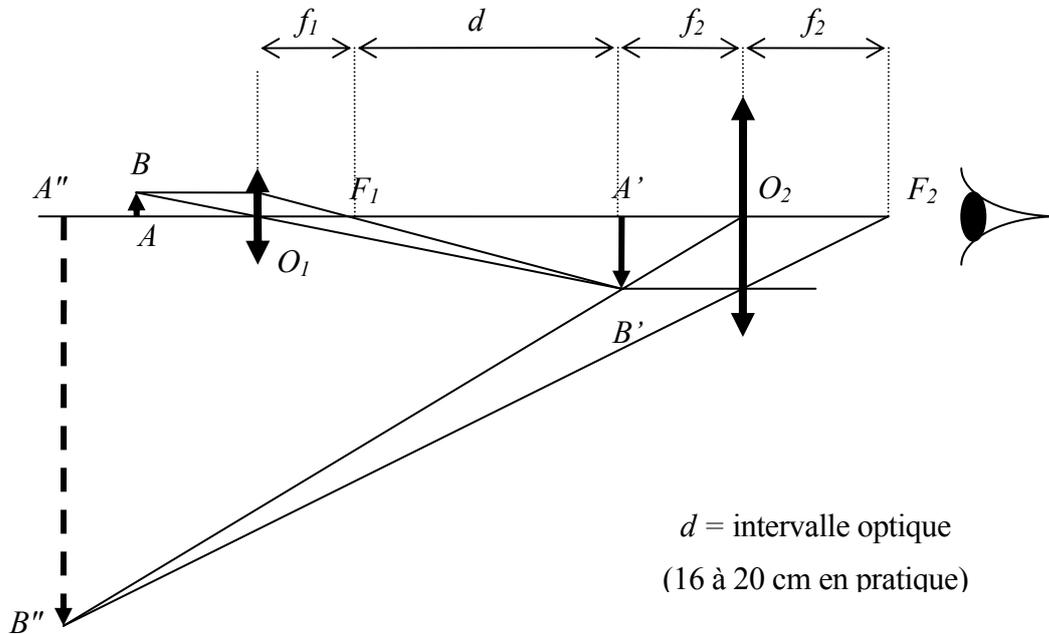
Tout comme la loupe, le microscope est destiné à l'observation d'objets très petits. Le principe est le suivant : au moyen d'un premier système de lentilles très convergent, l'**objectif**, on forme une image virtuelle, de plus grand diamètre apparent, qu'on examine ensuite avec un **oculaire**, qui joue le rôle de loupe.



Exemples de microscopes



Pour étudier le principe du microscope, nous représenterons l'objectif par une seule lentille de très courte distance focale. De même pour l'oculaire.



Soit AB l'objet à observer. L'objectif O_1 forme une image réelle intermédiaire $A'B'$ avec un grandissement latéral G_L . Ainsi cette image intermédiaire est G_L fois plus grande, mais renversée.

L'oculaire O_2 sert ensuite de loupe pour observer l'image intermédiaire $A'B'$. Dans le cas où $A'B'$ est au foyer objet de l'oculaire, l'image $A''B''$ est rejetée à l'infini.

La puissance (vergence) du microscope est donc G_L fois la puissance de l'oculaire, qui est égale à $1/f_2$.

On peut démontrer à partir de la formule de Gauss que le grandissement G_L est égal à d/f_1 .

Donc la **puissance du microscope** est

Puissance du microscope ⁶	$P = G_L \frac{1}{f_2} = \frac{d}{f_1 f_2}$	[dioptries]	(5.2)
---	---	-------------	-------

Exemple : Prenons $d = 18 \text{ cm}$, $f_1 = 5 \text{ mm}$, $f_2 = 2 \text{ cm}$.

$$P = \frac{d}{f_1 f_2} = \frac{0,18}{(0,005) \cdot (0,02)} = 1800 \text{ dioptries}$$

⁶ Attention: toutes les distances dans cette formule doivent être exprimées dans la même unité, de plus rappelons que d n'est pas la distance entre les lentilles, mais entre les foyers.

La **latitude de mise au point** est très petite.

Prenons le cas d'un œil standard, qui voit net de $\delta = 25$ cm à l'infini, placé contre l'oculaire.

Quand l'œil observe à $\delta = 25$ cm, avec les valeurs numériques de l'exemple ci-dessus, l'image intermédiaire $A'B'$ est située à une distance p_2 telle que

$$\frac{1}{p_2} - \frac{1}{\delta} = \frac{1}{f_2} \quad \text{soit} \quad p_2 = \frac{\delta f_2}{\delta + f_2} = \frac{250 \cdot 20}{250 + 20} = \frac{500}{27} = 18,519 \text{ mm}$$

$$\text{L'image } A'B' \text{ est à une distance } p_1' = d + f_1 + f_2 - p_2 = 205 - \frac{500}{27} = \frac{5035}{27} \text{ mm}$$

L'objet AB est situé à une distance p_1 telle que

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_1'} = \frac{1}{f_1} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1'} = \frac{1}{5} - \frac{27}{5035} = \frac{980}{5035} \quad \text{d'où } p_1 = 5,1378 \text{ mm.}$$

Quand l'œil observe à l'infini, l'image intermédiaire $A'B'$ est située au foyer objet de l'oculaire, qui est à une distance $p_1' = d + f_1 = 185$ mm de l'oculaire.

L'objet AB est situé à une distance p_1 telle que

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_1'} = \frac{1}{f_1} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1'} = \frac{1}{5} - \frac{1}{185} = \frac{36}{185} \quad \text{d'où } p_1 = 5,1389 \text{ mm.}$$

Soit une **latitude** de $5,1389 - 5,1378 \text{ mm} = 0,0011 \text{ mm} = 1,1 \mu\text{m}$.

Le **grossissement d'un microscope** se définit comme pour la loupe, sauf qu'on omet le signe moins dû au renversement de l'image.

Le grossissement est le **rapport des diamètres apparents avec et sans microscope**, dans les meilleures conditions.

$$G = \frac{\alpha''}{\alpha} = \frac{A'B'/f_2}{AB/\delta} = G_L \frac{\delta}{f_2} = \frac{d}{f_1} \frac{\delta}{f_2} = P\delta$$

Grossissement d'un microscope	$G = P\delta$	(5.3)
--------------------------------------	---------------	-------

Le **grossissement commercial** correspond à $\delta = 0,25$ m.

Avec un **pouvoir séparateur** de $3/10'000$ de radian, la taille du **plus petit objet** que l'œil peut distinguer lorsqu'il est placé au punctum proximum (δ).

$$\text{Œil nu :} \quad \rho_0 = \frac{3}{10000} \delta$$

$$\text{Avec microscope :} \quad \rho = \frac{\rho_0}{G} = \frac{3}{10000} \delta \frac{1}{P\delta}$$

Taille du plus petit objet visible au microscope :	$\rho = \frac{3}{10000 \cdot P}$	[m]	(5.4)
---	----------------------------------	-----	-------

Avec les valeurs de l'exemple précédent, $P = 1800$ et $\rho = 0,17 \mu\text{m}$.

Note: à cause de la nature ondulatoire de la lumière, on ne pourra pas distinguer des objets plus petits que $0,2 \mu\text{m}$. Une puissance plus grande ne donnera pas plus de détails, mais juste une image plus grande.

5.3 EXERCICES

1. Un œil normal voit nettement de 25 cm à l'infini. Calculer la latitude de mise au point (l'écart entre les distances de l'objet à la loupe auxquelles on voit bien l'image) pour une loupe de 25 dioptries, l'œil étant placé contre la loupe. Calculer le grossissement dans chaque cas.

Rép. 1,1 cm ; $G_\infty = 6,125$; $G_{PR} = G_\infty + 1 = 7,125$

2. Un myope peut voir nettement jusqu'à 5 cm. A partir de quelle vergence une loupe pourra-t-elle lui être utile ?

Rép. $V > 20$ dioptries s'il place l'œil au foyer ; $V > 0$ s'il place l'œil contre la loupe.

3. Quelle est la plus petite distance de deux points du plan objet que l'œil normal peut séparer en utilisant une loupe de 2 cm de distance focale ?

Rép. 6 μm

4. L'objectif d'un microscope a une focale de 5 mm et forme l'image intermédiaire 160 mm derrière son foyer image.

Quel est le grossissement total avec un oculaire marqué 10X ?

A quelle distance se trouvera l'image finale ?

Rep. 320X, 5.16 mm

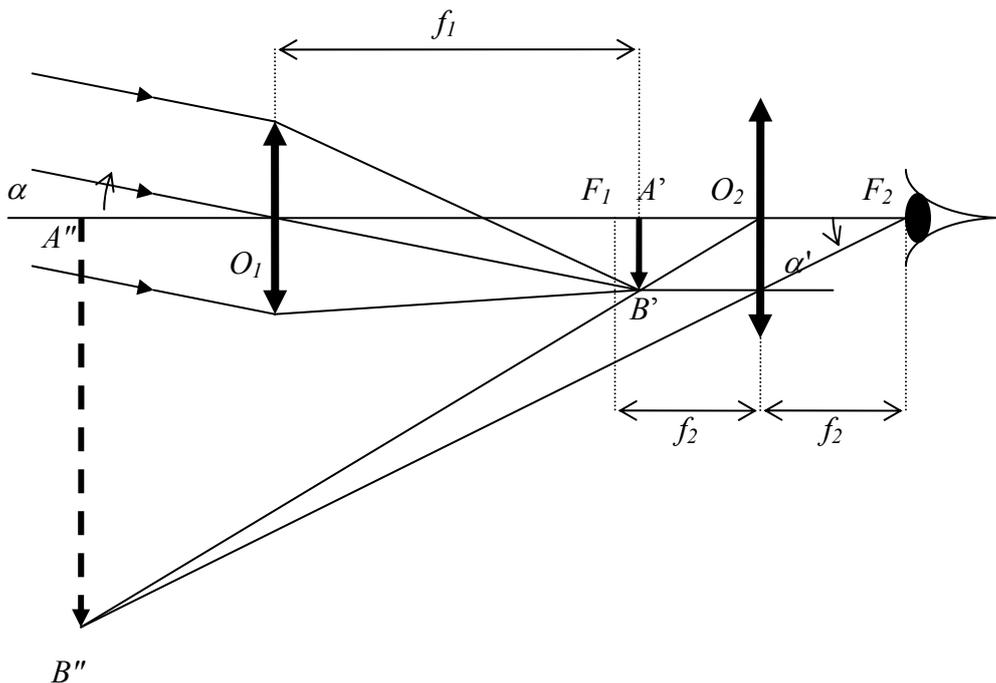
5. Un simple microscope bricolé a comme objectif et oculaire des lentilles minces de focale respective 10 et 30 mm. Un objet se trouve 12 mm devant l'objectif. Si l'image finale virtuelle est produite 25 cm devant l'œil de l'observateur, calculer le grossissement du microscope et la séparation des lentilles.

Rep. 46,7X, 86,8 mm

6. LES LUNETTES

6.1 LE PRINCIPE DE LA LUNETTE ASTRONOMIQUE

La lunette astronomique est destinée à l'observation des astres. Le principe est le suivant: au moyen d'une première lentille, l'**objectif**, on forme une image réelle que l'on examine ensuite avec un **oculaire** qui joue le rôle de loupe.



Soit α le diamètre apparent d'un astre.

La taille de l'image intermédiaire $A'B'$ est égale à αf_1 , où f_1 est la focale de l'objectif.

L'oculaire O_2 sert ensuite de loupe pour observer l'image intermédiaire $A'B'$.

Si $A'B'$ est au foyer objet de l'oculaire, l'image $A''B''$ est rejetée à l'infini. Dans ce cas, le diamètre apparent sous lequel l'œil voit $A''B''$ est égal à $A'B'/f_2$ où f_2 est la focale de l'oculaire.

Il en résulte que le grossissement de la lunette est égale à:

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A'B'/f_2}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2}$$

Grossissement de la lunette	$G = \frac{f_1}{f_2}$	(6-1)
-----------------------------	-----------------------	-------

On a donc intérêt à choisir la focale f_1 la plus longue possible et la focale f_2 la plus courte possible. Pratiquement, ce sont des considérations technologiques qui limitent la focale et par conséquent la taille de l'objectif. Au-delà de 1 m de diamètre, la déformation due au poids de la lentille devient prohibitive.

6.2 LUNETTE AFOCALE

Une lunette astronomique est dite afocale lorsque le foyer image de l'objectif est à la même position que le foyer objet de l'oculaire.

L'objet observé se trouvant à l'infini son image se trouve dans le plan focal image de l'objectif. Or le plan focal image de l'objectif est aussi le plan focal objet de l'oculaire, l'image fournie par celui-ci se trouve à l'infini.

L'œil humain étant fait pour observer un objet situé à l'infini, il n'a pas besoin d'accommodation particulière lorsqu'il observe une image à travers une lunette astronomique afocale.

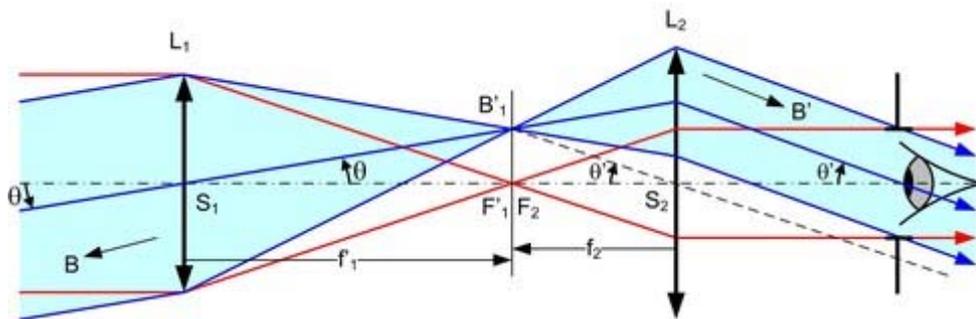


Figure 6-1: Lunette afocale, on a $d = f_1 + f_2$

Un **système afocal** est un système optique dont la vergence est nulle. Il a notamment comme propriété de laisser ressortir parallèle après le système un faisceau de rayons parallèles entre eux avant le système.

Un système afocal peut-être réalisée avec deux lentilles. Il suffit alors de faire coïncider le point focal image de la première lentille avec le point focal objet de la seconde. Dans ce cas la première lentille est appelée objectif et l'autre oculaire.

Typiquement un système afocal regroupera une lentille convergente et une lentille divergente dont le foyer image de l'une est confondu avec le foyer objet de l'autre est possible. Selon la combinaison des lentilles, le diamètre d'un faisceau parallèle sera réduit ou augmenté.

Si les rayons entrent parallèles entre eux sous un angle α , ils ressortent également parallèles entre eux mais sous un autre angle α' mesuré par rapport à l'axe optique des 2 lentilles, on peut alors définir le **grandissement angulaire** du système afocal

$$G_A = \alpha' / \alpha \quad (6-2)$$

L'**élargissement du faisceau** à travers le système afocal est

$$G_A = f_o / f_e \quad (6-3)$$

avec ici f_o = distance focale de l'objectif et f_e = distance focale de l'oculaire.

La monture de l'objectif constitue généralement le diaphragme d'ouverture du système, ainsi que sa pupille d'entrée (étant donné qu'il n'y a pas de lentille à la gauche de l'objectif).

Si la lunette pointe des objets à distance astronomique, l'axe visuel est pratiquement colinéaire avec l'axe optique de l'instrument. Pour des conditions d'observation optimales, la position de la pupille d'entrées de l'œil (i.e. la pupille, au sens physiologique) doit coïncider avec la pupille de sortie (cercle oculaire) de l'instrument.

L'œil n'est cependant pas immobile. Le regard balaye instinctivement tout le champ visuel, en s'arrêtant localement sur les objets intéressants, c'est-à-dire en orientant les rayons provenant de ces objets sur la fovéa. La direction déterminée par le rayon principal qui relie le centre de la pupille d'entrée à la fovéa constitue la ligne de visée principale. Le croisement des différentes lignes de visée, obtenues pour toutes les orientations possibles de l'œil, détermine un point d'intersection de visée, fixe par rapport à la tête de l'observateur.

Pour que la vision puisse balayer tout le champ de la lunette, on comprend qu'il est nécessaire que **l'œil soit positionné au centre de la pupille de sortie** de la lunette. Dans ce cas, la ligne de visée principale correspond au rayon principal passant au centre de la pupille de sortie de l'instrument, quelle que soit l'orientation instantanée de l'œil.

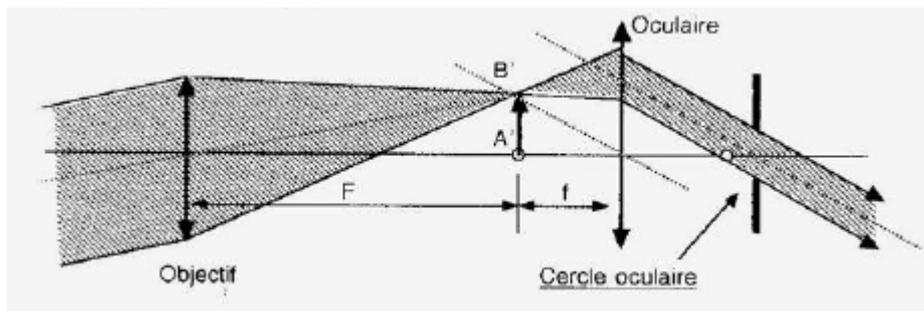
La distance entre la l'oculaire et l'œil est appelé **relief d'œil** (en anglais *eye relief*)

De plus il est utile que le **diamètre de la pupille de sortie**, qui est appelé **cercle oculaire**, soit en rapport avec celui de la pupille d'entrée de l'œil (ou de la caméra le cas échéant), ce qui peut être obtenu par un choix opportun des focales:

$$G_A = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_o}{D_{ep}} \quad (6-4)$$

avec D_o = diamètre de l'objectif

D_{ep} = cercle oculaire: diamètre de la pupille de sortie



Le **champ de vision** de la lunette astronomique est l'ensemble des points visibles dans l'instrument.

Il est défini comme étant l'espace compris dans un cône de révolution dont l'axe est l'axe optique de la lunette et dont l'angle au sommet est 2ω . Le champ est déterminé par l'angle sous lequel on voit du centre optique O_1 de l'objectif le diamètre $2r_e$ de la lentille de l'oculaire. Le demi-angle ω est donc défini comme

$$\omega \approx \tan \omega = \frac{r_e}{f_o + f_e} \quad (6-5)$$

Un problème important de la lunette astronomique est l'aberration chromatique de la lentille. La dispersion des couleurs limite la résolution de l'instrument. Chaque couleur a en fait une focale différente. Suite à ses travaux sur la décomposition de la lumière blanche, Newton comprit qu'il s'agissait d'une limite fondamentale et construisit un télescope à miroir.

Note : En anglais, lunette se dit *refracting telescope*, et télescope, *reflecting telescope*.

6.3 LUNETTES TERRESTRES ET JUMELLES

À la différence des instruments astronomiques, les lunettes terrestres (longues-vues) doivent comporter un système permettant de redresser l'image.

De fait historiquement la première lunette de Galilée comportait un oculaire divergeant et donnait donc une image droite.

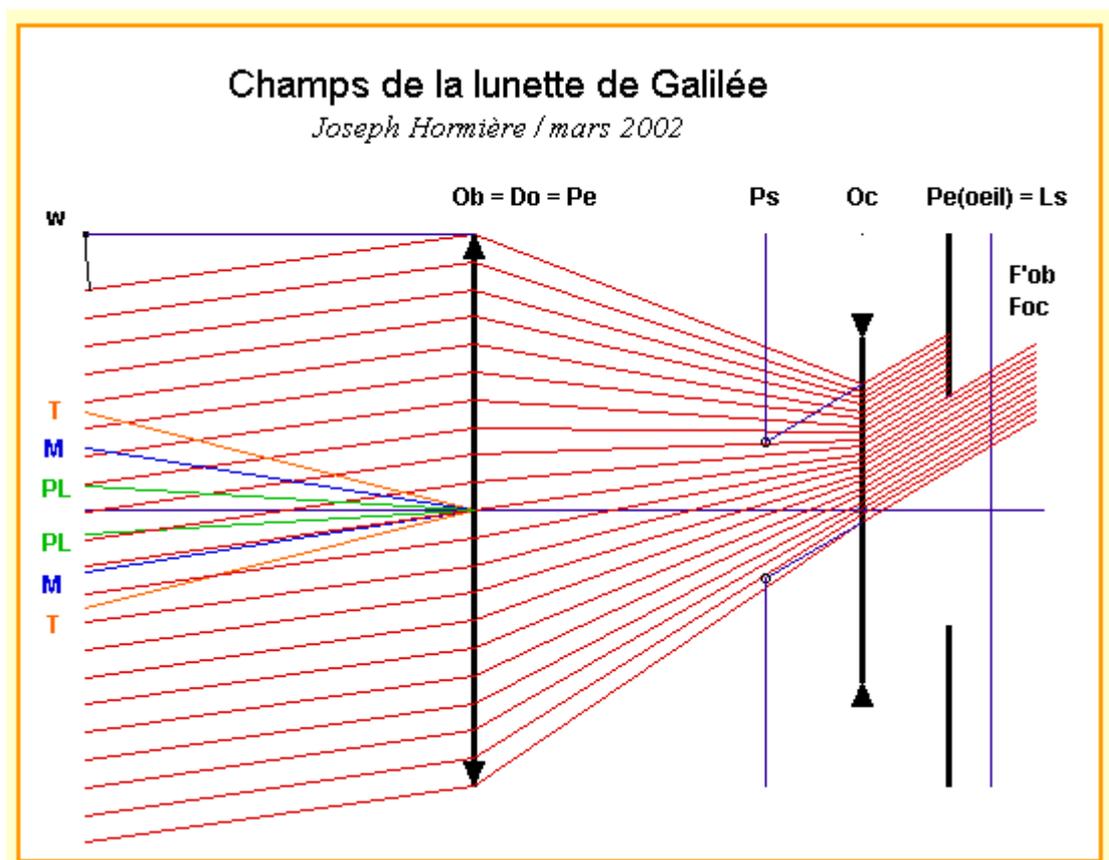
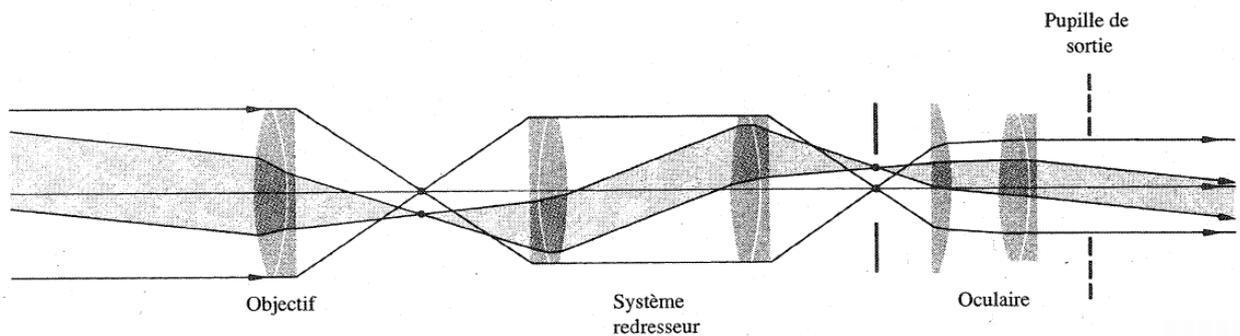


Figure 6-2 : Schéma de la lunette de Galilée: elle est caractérisée par un deuxième système divergent, le grossissement est alors positif, les images sont droites mais on ne peut pas avoir la pupille de sortie de la lunette confondue avec la pupille d'entrée de l'œil et donc le champ est très réduit. On les utilise avec des grossissements faibles comme dans les jumelles de théâtre.

Mais plus souvent, une ou plusieurs lentilles de redressement sont alors disposées entre l'objectif et l'oculaire, ce qui permet d'avoir l'image finale dans le même sens que l'objet de départ. La figure ici-bas montre un tel système utilisant un objectif en doublet collé, le système de redressement et un oculaire. Un tel dispositif nécessite une grande longueur de tube: c'est typiquement la longue-vue télescopique que l'on voit dans les films de pirates.



C'est aussi pour réduire l'encombrement que les jumelles comprennent des systèmes de redressement à prismes (prismes redresseurs). Ceux-ci permettent d'obtenir le même effet dans un espace plus réduit. L'utilisation de prismes redresseurs permet aussi une plus grande séparation entre l'objectif de l'œil droit et celui de l'œil gauche, ce qui accroît la vision stéréoscopique (en relief). La plupart du temps, de tels systèmes utilisent des prismes de Porro, comme dans la figure.

Les jumelles comportent généralement une **désignation de type 6 X 30, 7 X 50, ou 20 X 50**.

Le premier indique le grossissement (grandissement angulaire); ici : 6 X, 7 X, ou 20 X et le second le diamètre de la pupille d'entrée, c'est-à-dire le diamètre d'ouverture de l'objectif, en millimètres.

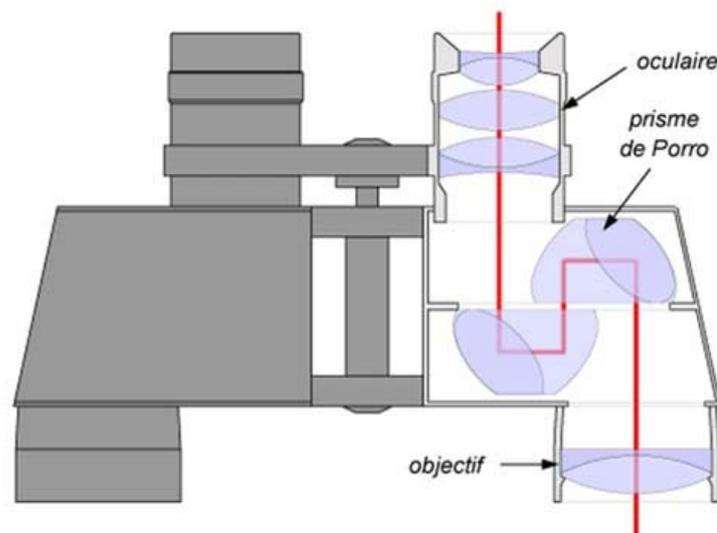


Figure 6-3 : Dans un corps de jumelles un ensemble de deux prismes de « Porro » permet une rotation de 180° de l'image autour de l'axe optique et redresse ainsi les images.

D'après l'équation (5.84), le diamètre de la pupille de sortie est donc donné par le rapport du second chiffre par le premier, dans le cas présent: 5, 7,1 et 2,5 millimètres.

En tenant l'instrument à bout de bras, on peut en effet voir le disque lumineux entouré d'une zone sombre, correspondant à la pupille de sortie. Pour la mesurer, on peut focaliser l'instrument à l'infini et pointer un ciel lumineux. On observe alors un disque de lumière, qu'on peut mesurer à l'aide d'un papier et d'une règle.

6.4 EXERCICE

Une paire de jumelles est marqué « 7 X 35 ». La focale de l'objectif est 140 mm et le diamètre de l'oculaire est de 18 mm. Calculer la focale de l'oculaire, le cercle oculaire, le relief d'œil et le champ de vision.

Rep. 20mm, 5 mm, 23 mm, 0.337 rad