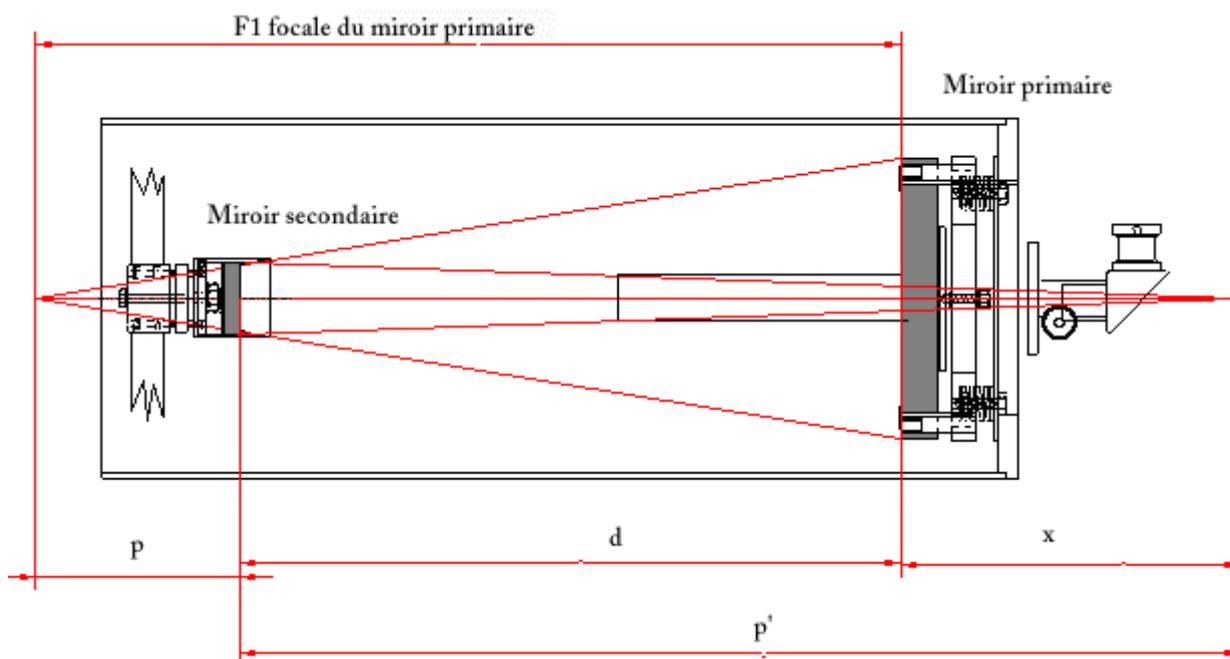


Département des Technologies Industrielles (TIN)
Module: Automatisation industrielle et optique (AIO)

Cours d'Optique - Orientation MI

SYSTÈMES OPTIQUES POUR L'IMAGERIE



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

Ce polycopié a été rédigé à l'usage exclusif des étudiant-e-s en ingénierie microtechnique de la HEIG-VD. Il résulte d'une compilation structurée de plusieurs sources: polycopiés préexistants à la HEIG-VD, Wikipédia et autres contributions disponibles librement sur Internet. Il n'a donc aucune prétention d'originalité.

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

	<u>PAGE</u>
1. INSTRUMENTS OPTIQUES.....	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 ELEMENTS CARDINAUX.....	2-2
2.4 FOYERS ET PLANS FOCaux.....	2-2
2.5 POINTS NODaux.....	2-2
2.6 PLANS ET POINTS PRINCIPAUX.....	2-3
2.7 DISTANCES FOCales.....	2-4
2.8 OBJETS ET PLANS DE FRONT.....	2-5
2.8.1 Construction de l'image d'un objet plan: objet dans un plan de front.....	2-5
2.8.2 Objet dans un plan focal.....	2-6
2.8.3 Objet à l'infini.....	2-6
2.8.4 Construction de l'émergent correspondant à un incident quelconque.....	2-7
2.9 FORMULES DE CONJUGAISON.....	2-7
2.10 ASSOCIATIONS DE DEUX SYSTEMES CENTRES.....	2-8
2.10.1 Cas général.....	2-8
2.10.2 Cas pour $n_1 = n_2 = n$.....	2-10
2.11 SYSTÈMES AFOCAUX.....	2-11
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
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'ŒIL	4-6
4.4	DÉFAUTS DE L'ŒIL.....	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
4.5	EXERCICES	4-9
5.	LOUPE ET MICROSCOPE.....	5-1
5.1	LA LOUPE.....	5-1
5.2	LE MICROSCOPE.....	5-2
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
7.	TÉLESCOPES.....	7-1
7.1	LES DÉBUTS	7-1
7.2	LES MIROIRS DES TÉLESCOPES	7-2
7.3	LES TYPES FONDAMENTAUX DE TÉLESCOPES	7-5
7.4	CARACTÉRISTIQUES ET PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES TÉLESCOPES	7-10
	Fonction d'étalement du point (PSF, point spread function).....	7-12
7.5	AUTRES TYPES DE TÉLESCOPES.....	7-14
7.6	LES MONTURES	7-16
7.7	LE BARILLET	7-21
7.8	EPAISSEUR ET POIDS DU MIROIR ET L'OPTIQUE ACTIVE.....	7-22
7.9	L'OPTIQUE ADAPTATIVE	7-24
7.10	L'AVENIR DES GRANDS TÉLESCOPES	7-27
7.11	EXERCICES	7-28
8.	SYSTÈMES DE LENTILLES ACHROMATIQUES.....	8-1
8.1	L'ABERRATION CHROMATIQUE.....	8-1
8.2	CORRECTION DES ABERRATIONS CHROMATIQUES AVEC UN DOUBLET ACCOLE.....	8-2
8.3	LE SPECTRE SECONDAIRE	8-3
8.4	DOUBLETS ACHROMATIQUES A LENTILLES SEPARÉES.....	8-4
8.5	EXERCICES	8-4
9.	OBJECTIFS.....	9-1
9.1	PROFONDEUR DE CHAMP	9-2
	9.1.1 Hypothèses générales pour les calculs.....	9-3
	9.1.2 Distance hyper focale.....	9-4
9.2	OBJECTIFS DE MICROSCOPE.....	9-7

9.2.1	Caractéristiques.....	9-7
9.2.2	Ouverture numérique.....	9-10
9.2.3	Resolution.....	9-11
9.2.4	Profondeur de champ.....	9-11
9.2.5	Les objectifs les plus simples.....	9-12
9.3	TELEOBJECTIF ZOOM.....	9-13
9.3.1	Exercice.....	9-13
10.	LES OCULAIRES.....	10-1
10.1	EXERCICES.....	10-3

1. INSTRUMENTS OPTIQUES



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 épiscopes (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.

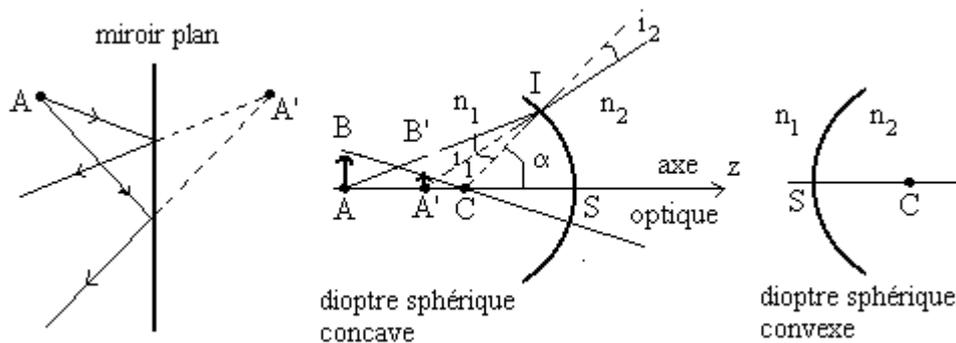
2. SYSTEMES CENTRES

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 axis with several dioptrés. An object B is in medium n on the left. The first dioptré forms an intermediate image A_1. This image A_1 acts as the object for the second dioptré, forming A_2. This process continues through dioptrés n_2, \dots, n_n, with intermediate images B_2, \dots, B_n and A_n. The final image B' is formed in medium n on the right. Rays are shown as purple arrows, and the axis is labeled with U and U'.</p>	<p>Le premier dioptré donne de A une image A_1 qui sert d'objet pour le second dioptré et ainsi de proche en proche jusqu'au dernier dioptré.</p>
---	---

2.3 ELEMENTS CARDINAUX

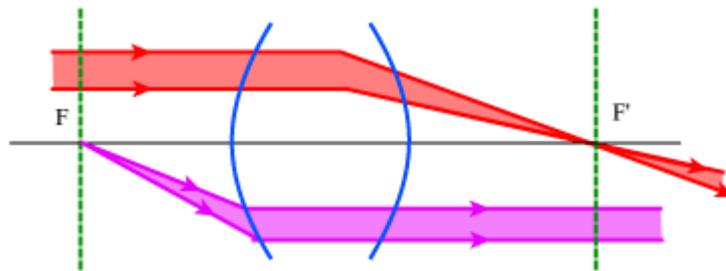
Il existe un certain nombre de points possédant des propriétés remarquables qui permettent de construire la marche de rayons lumineux ou de déterminer la position de l'image d'un objet par rapport au système centré: ce sont les **éléments cardinaux** du système centré qui comportent:

- les foyers
- les points nodaux
- les points principaux

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.

2.4 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.

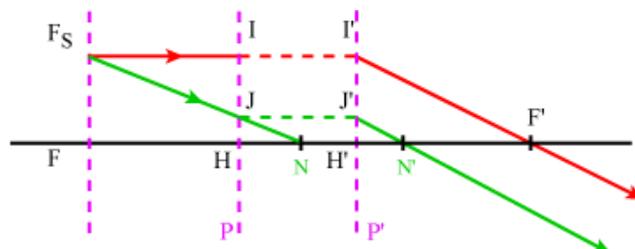


On appelle **foyer principal objet** le point F situé sur l'axe optique dont l'image se situe à l'infini sur l'axe optique; dans ce cas un faisceau de rayons lumineux, issus de F , émergera du système en un faisceau de rayons parallèles entre eux et à l'axe optique.

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**.

2.5 POINTS NODaux

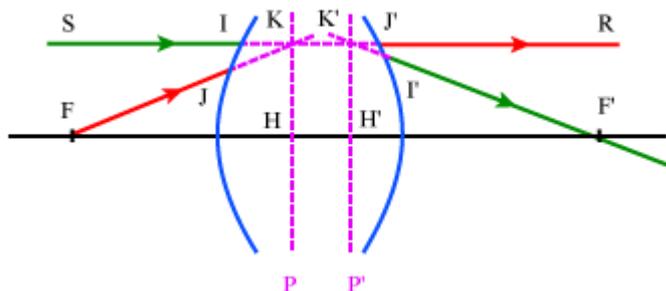


Les **points nodaux** N et N' sont deux points **conjugués**, situés sur l'axe, et tels qu'à tout rayon incident passant par le point nodal objet, corresponde un rayon émergent passant par le point nodal image et parallèle au rayon incident.

2.6 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.

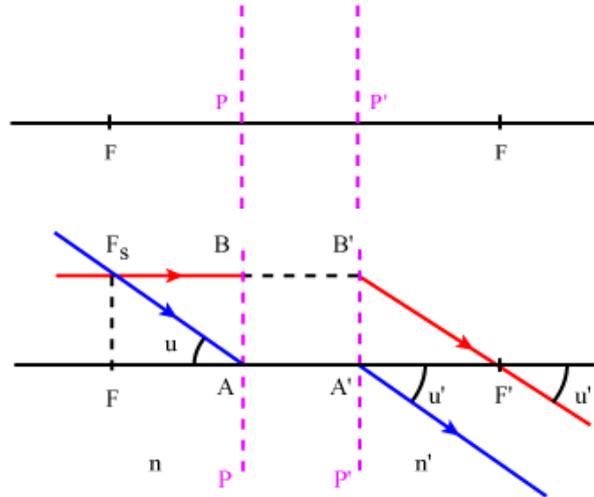
H et H' sont les **points principaux** de l'axe du système centré. La distance HH' mesure l'**interstice du système**.

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** est le lieu des points K intersections des incidents passant par le foyer objet 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 distance PF est appelée **distance focale objet** f tandis que la distance P'F' est appelée **distance focale image** f' .

Ainsi la relation qui existe entre f et f' est conventionnellement:

$$\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n} \quad (2-1)$$

Donc **dans cette convention**¹ la distance focale objet a le **même signe** que la distance focale image.

On déduit de cette relation que si les milieux extrêmes sont identiques (même indice) les distances focales objet et image sont égales.

La vergence d'un système centré sera défini par:

$$V = \frac{n'}{f'} = \frac{n}{f} \quad (2-2)$$

La distance focale s'exprime en mètres et la vergence en dioptries.

Le sens positif le long de l'axe étant pris selon le sens de propagation de la lumière, lorsque la vergence sera positive le système sera convergent alors qu'il sera divergent pour une vergence négative.

Aussi notons que quand on cite une distance focale non-autrement spécifiée on entend la distance focale image.

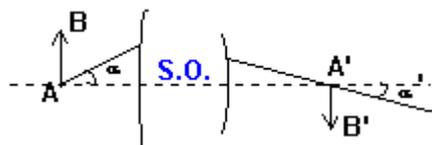
¹ Notons par contre qu'on peut aussi trouver d'autres conventions de signe dans la littérature, en particulier française où on donne un **signe négatif** à la distance focale objet.

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 (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.

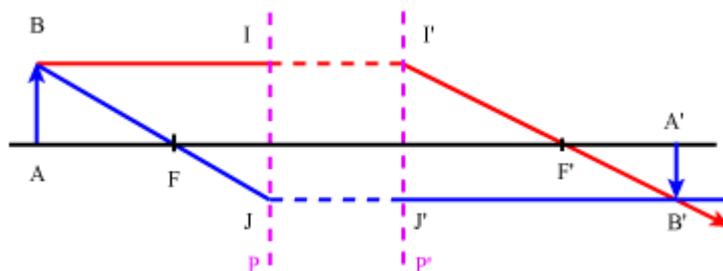
Exemple: sur cette figure, l'objet **AB** et l'image **A'B'** sont situés dans des plans de front.



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.

2.8.1 Construction de l'image d'un objet plan: objet dans un plan de front

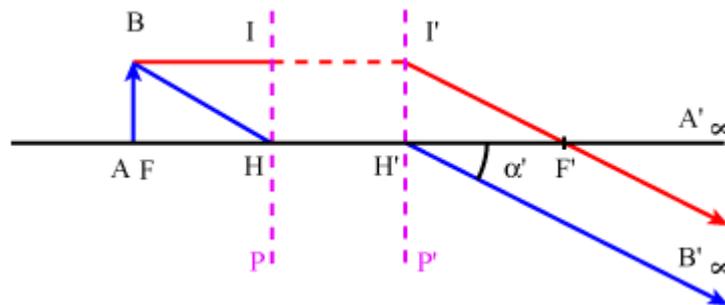
- L'objet **AB** étant dans un plan de front son image est également dans un plan de front et il suffit de chercher l'image du point **B**.
- Un rayon incident **BI** parallèle à l'axe émerge suivant **I'F'** en passant par le foyer image **F'** et un rayon incident **BJ** passant par le foyer objet 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'**.



2.8.2 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 IF'. Le rayon incident BH émerge à partir de H' (conjugué de H) suivant un rayon parallèle à IF'.
- 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:

$$\alpha' = \frac{I'H'}{H'F'} = \frac{AB}{f'} \quad (2-3)$$

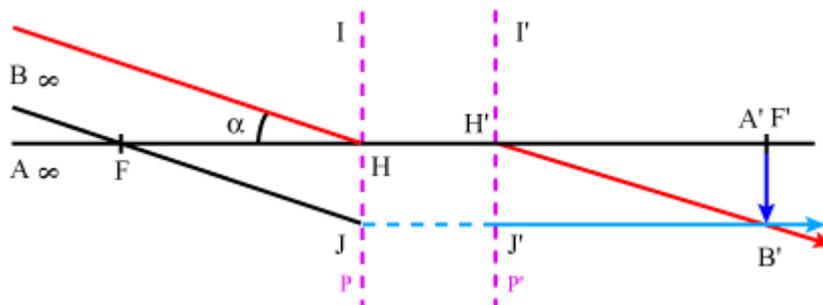


2.8.3 Objet à l'infini

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'.

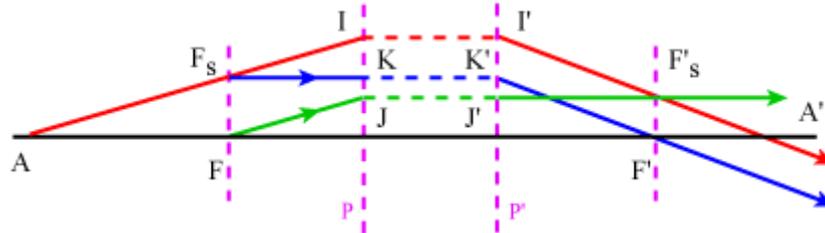
La grandeur de l'image est:

$$A'B' = HJ = f' \cdot \alpha \quad (2-4)$$



2.8.4 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'. 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'.

2.9 FORMULES DE CONJUGAISON

Considérons la figure suivante:

	<p>Posons: $\overline{HA} = p$ et $\overline{H'A'} = p'$</p> <p>Les triangles JFH et JBI étant semblables on peut écrire:</p> $\frac{\overline{JH}}{\overline{JI}} = \frac{\overline{HF}}{\overline{IB}} = \frac{\overline{HF}}{\overline{HA}} = \frac{f}{p}$
--	--

de même pour les triangles I'H'F' et I'J'B' on a: $\frac{\overline{H'I'}}{\overline{J'I'}} = \frac{\overline{HI}}{\overline{JI}} = \frac{\overline{H'F'}}{\overline{H'A'}} = \frac{f'}{p'}$

si l'on ajoute les deux égalités précédentes membre à membre on obtient:

$$\frac{\overline{JH} + \overline{HI}}{\overline{JI}} = 1 = \frac{f}{p} + \frac{f'}{p'}$$

d'où la **relation de conjugaison** générale:

$$\frac{f}{p} + \frac{f'}{p'} = 1 \tag{2-5}$$

si l'on tient compte de: $\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n}$

on peut écrire: $\frac{n'}{p'} + \frac{n}{p} = \frac{n'}{f'} = V \tag{2-6}$

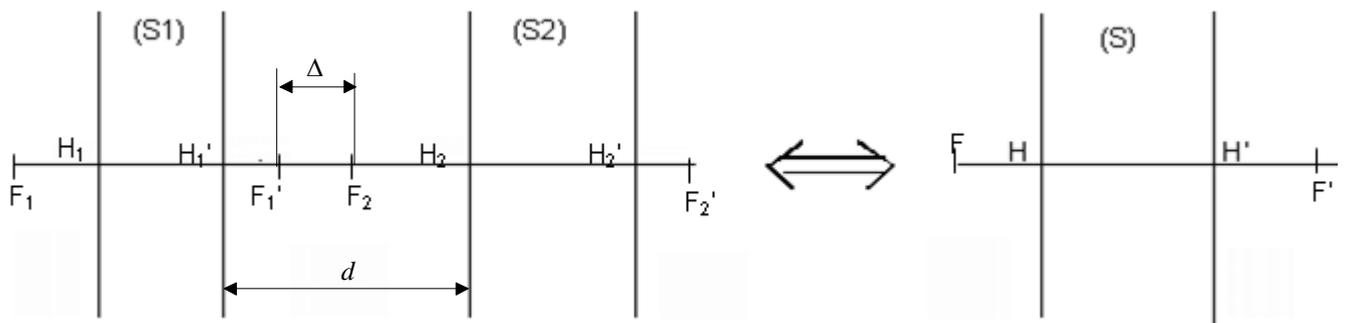
avec V vergence du système.

2.10 ASSOCIATIONS DE DEUX SYSTEMES CENTRES

2.10.1 Cas général

Deux systèmes centrés S_1 et S_2 de même axe principal constituent un nouveau système centré S .

- On affectera de l'indice 1 tous les symboles des éléments cardinaux du système S_1 (F_1, F'_1, H_1, H'_1) ainsi qu'aux distances focales objet f_1 et image f'_1 .
- On affectera de l'indice 2 ceux du système 2 (F_2, F'_2, H_2, H'_2) ainsi qu'aux distances focales objet f_2 et image f'_2 .
- Les indices de réfraction des milieux extrêmes sont n_1 et n_2 . L'indice du milieu compris entre S_1 et S_2 est n .



L'ensemble des deux systèmes est caractérisé par une distance définie par la distance entre le foyer objet de S_2 et le foyer image de S_1 :

$$\Delta = \overline{F'_1 F_2} \quad (2-7)$$

que l'on appelle **intervalle optique**². Δ est positive si F_2 se trouve après (à droite de) F'_1 , négative si F_2 devance F'_1 .

On trouve que la position du **foyer image** F' de l'association des deux systèmes centrés, comptée dans le sens de la lumière depuis celle du foyer image de S_2 est définie par:

$$\overline{F'_2 F'} = \frac{f_2 \cdot f'_1}{\Delta} \quad (2-8)$$

La position du **foyer objet** F de l'ensemble des deux systèmes, comptée dans le sens de la lumière depuis celle du foyer objet de S_1 est définie par:

$$\overline{F_1 F} = -\frac{f_1 \cdot f'_2}{\Delta} \quad (2-9)$$

La **distance focale image** f' du nouveau système S , comptée dans le sens de la lumière depuis le point principal image H' , est définie par:

$$f' = \overline{H' F'} = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{\Delta} \quad (2-10)$$

² A ne pas confondre avec la distance d entre le plan principal image de S_1 et le plan principal objet de S_2 , qui est aussi parfois utilisée dans les formules. On a donc $\Delta = d - f'_1 - f_2$

La **distance focale objet** f du nouveau système S, comptée vers la gauche depuis le point principal objet H, est définie par:

$$f = \overline{HF} = \frac{f_1 \cdot f_2}{\Delta} \quad (2-11)$$

On a d'autre part les relations suivantes:

$$\frac{f_1'}{f_1} = \frac{n}{n_1} \quad \text{et} \quad \frac{f_2'}{f_2} = \frac{n_2}{n}$$

dont on en déduit le rapport entre les distance focale image et objet du nouveau système S:

$$\frac{f'}{f} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-12)$$

2.10.2 Cas pour $n_1 = n_2 = n$

Si les indices de réfraction des milieux ambiants sont identiques, les **valeurs conventionnelles** des distances focales objet et image sont respectivement identiques pour chaque système et les expressions se simplifient un peu.

Il peut être plus pratique de définir et calculer les positions des foyers et plan principaux du nouveau système selon une coordonnée x orientée selon l'axe principal dans le sens de la lumière et sur laquelle les positions des points principaux $x_{H_1}, x_{H_1'}, x_{H_2}, x_{H_2'}$ sont comptées.

Considérons aussi la distance d entre H_2 et H_1' .

$$d = x_{H_2} - x_{H_1'}$$

Si f_1 et f_2 sont ici respectivement les distances focales image des deux systèmes (positives si le foyer image est à droite du plan principal image), l'intervalle optique devient donc:

$$\Delta = d - f_1 - f_2$$

La focale du nouvel ensemble est ainsi:

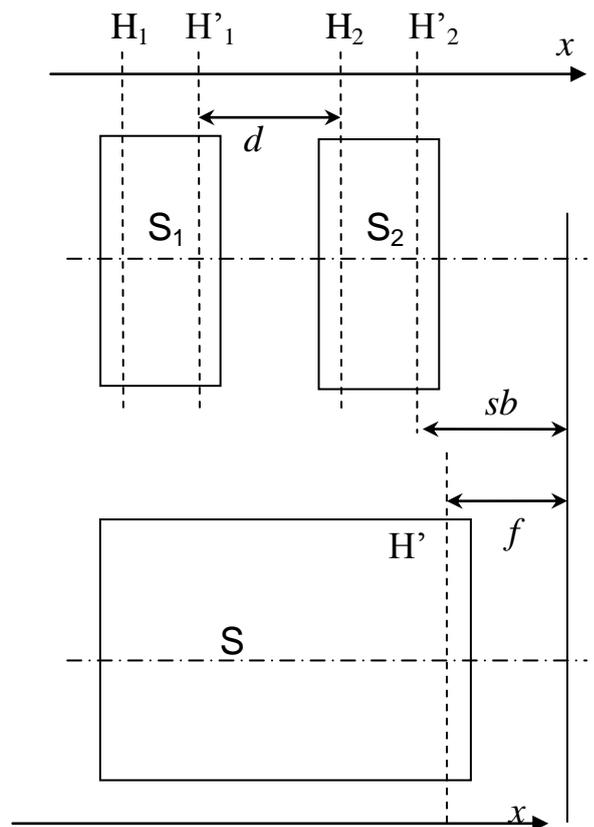
$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d} \quad (2-13)$$

La position des plans principaux de l'ensemble est:

$$\begin{aligned} x_H &= x_{H_1} + \frac{f \cdot d}{f_2} \\ x_{H'} &= x_{H_2} - \frac{f \cdot d}{f_1} \end{aligned} \quad (2-14)$$

La position du plan focal image du système associé mesuré à partir du plan H_2' est:

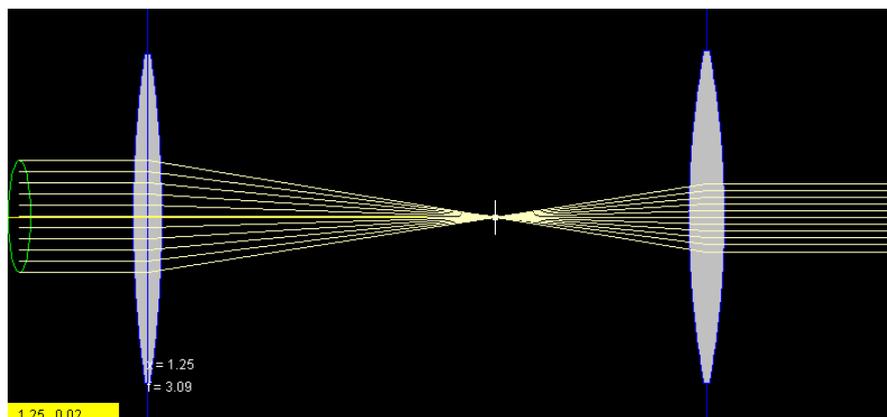
$$sb = \frac{f_2(f_1 - d)}{f_1 + f_2 - d} \quad (2-15)$$



2.11 SYSTÈMES AFOCAUX

Un cas particulier se présente si $f_1 + f_2 = d$.

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.



3. DIAPHRAGMES ET PUPILLES³

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, rappelons que les qualités optimales d'un système s'obtiennent dans les conditions de l'optique paraxiale (optique de Gauss), donc pour des rayons possédant de faibles angles d'incidence.

C'est pour cela qu'il est parfois 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. Insistons aussi sur le fait que 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 ici 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**.

³ Ce chapitre est en partie repris de « E. Hecht, *Optique*, Pearson Education, 2005 ».

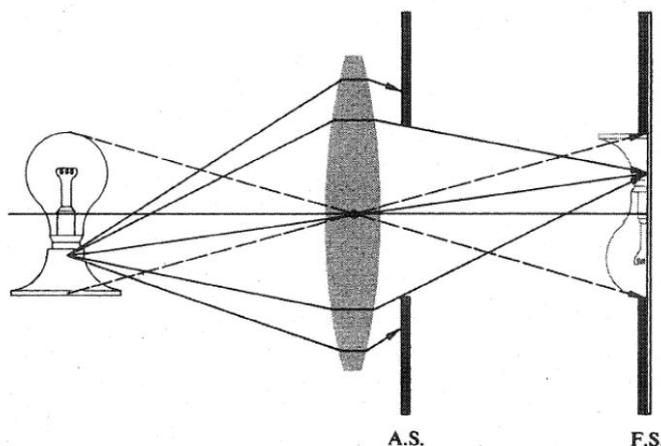


Figure 3-1 Diaphragme d'ouverture (A.S.) et diaphragme de champ (F.S.)

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 déterminer si un rayon peut traverser tout le système optique.

La **pupille** est simplement l'image du diaphragme d'ouverture. Il faut en revanche préciser ici dans quel espace on se place pour cette définition.

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 (tableau 5.3) 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.

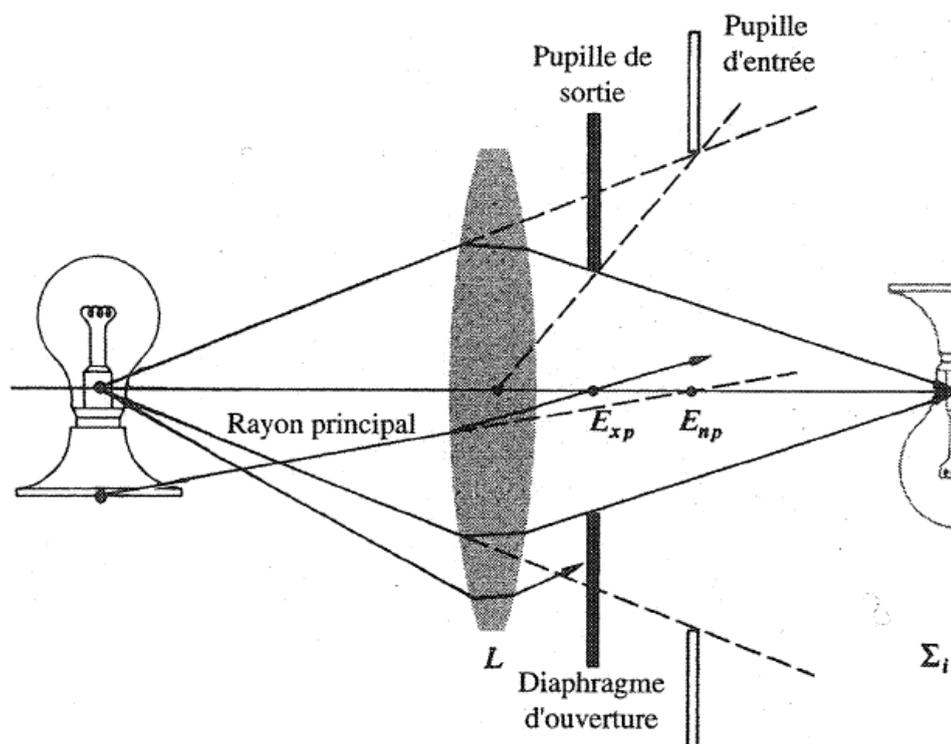


Figure 3-2 Pupilles d'entrée et de sortie

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 que présente par exemple 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.

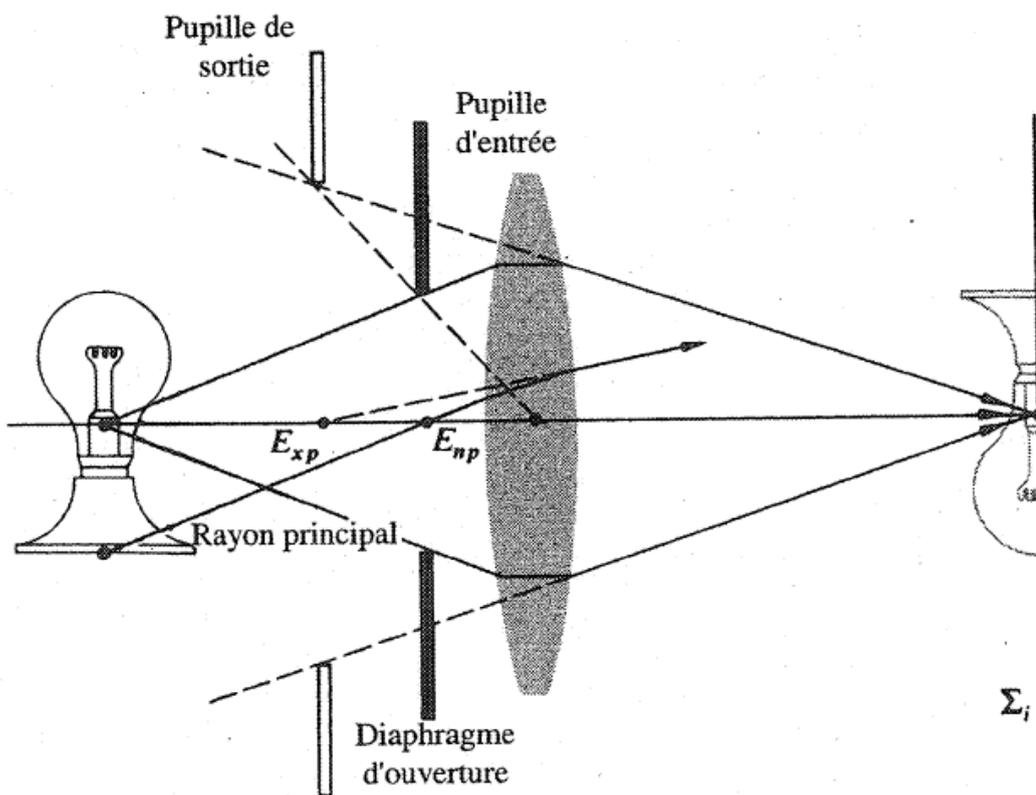


Figure 3-3 Exemple où le diaphragme d'ouverture est situé devant la lentille.

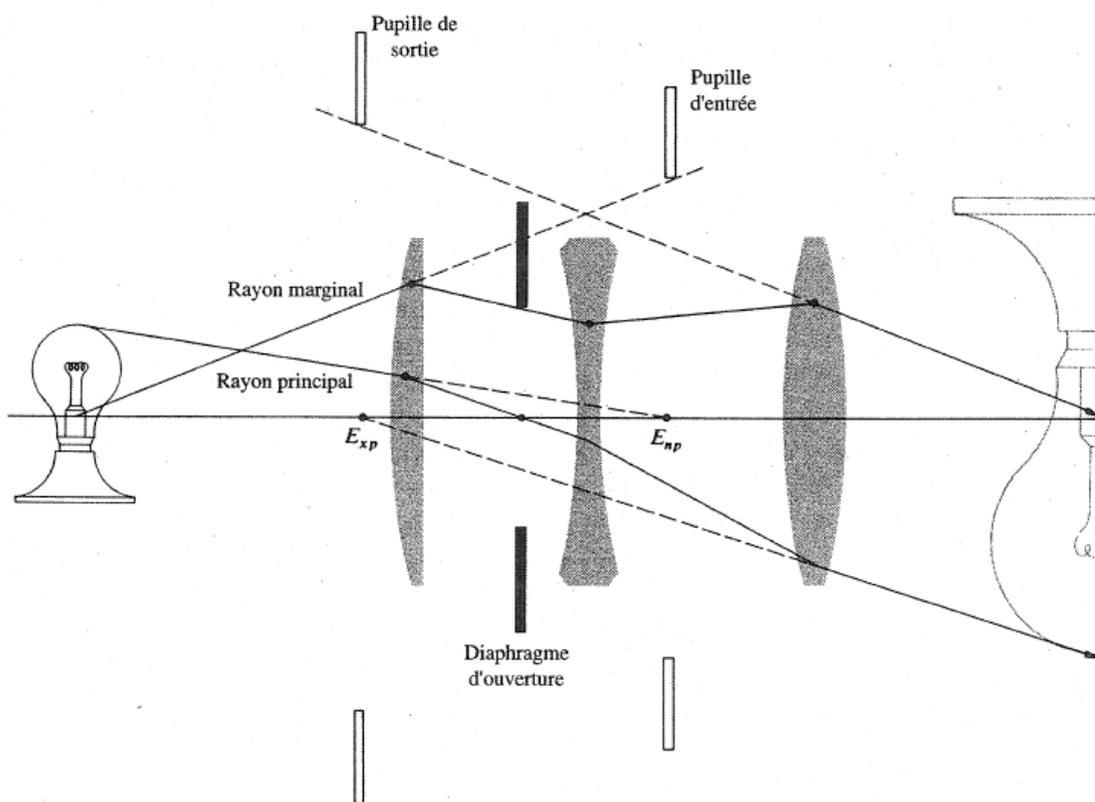


Figure 3-4 Diaphragmes et pupilles pour un système à trois lentilles

Les figures 5-2 à 5-4 font apparaître un rayon dénommé rayon principal.

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 5-5, 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**.

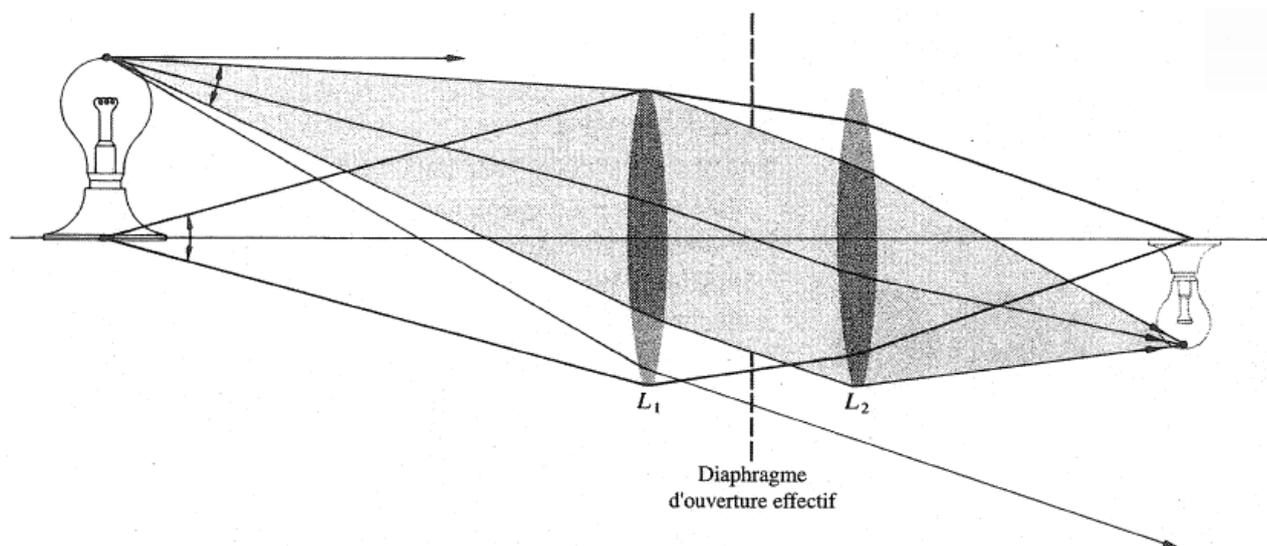


Figure 3-5 Vignelage



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'éclairement⁴ 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 image⁵ dépend de la distance focale image f du système et ainsi l'éclairement sera inversement proportionnel à f^2 .

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

$$\text{Eclairement} \approx \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (3-1)$$

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.

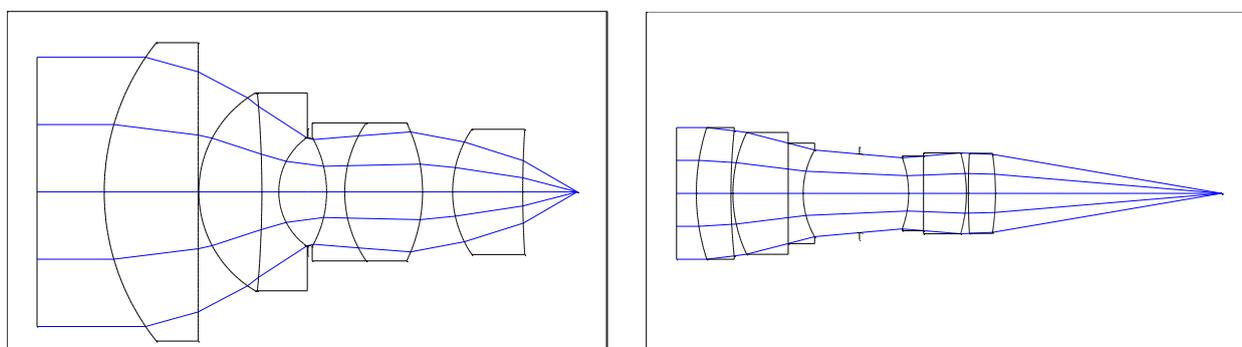


Figure 3-7: Objectif très ouvert (f/1 à gauche) et moyennement ouvert (f/3 à droite)

⁴Flux reçu par unité de surface réceptrice en lumen ou W/m²

⁵ $G_L = -f/z'$ - 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

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

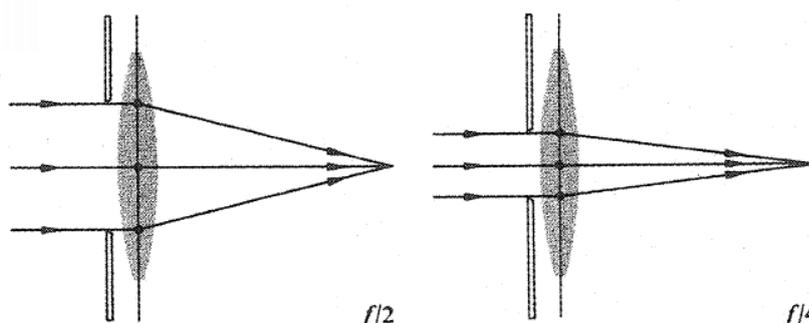


Figure 3-8. Le nombre d'ouverture $f/\#$ correspond à une situation standard où l'objet est à l'infini et son conjugué se trouve au foyer image F' .

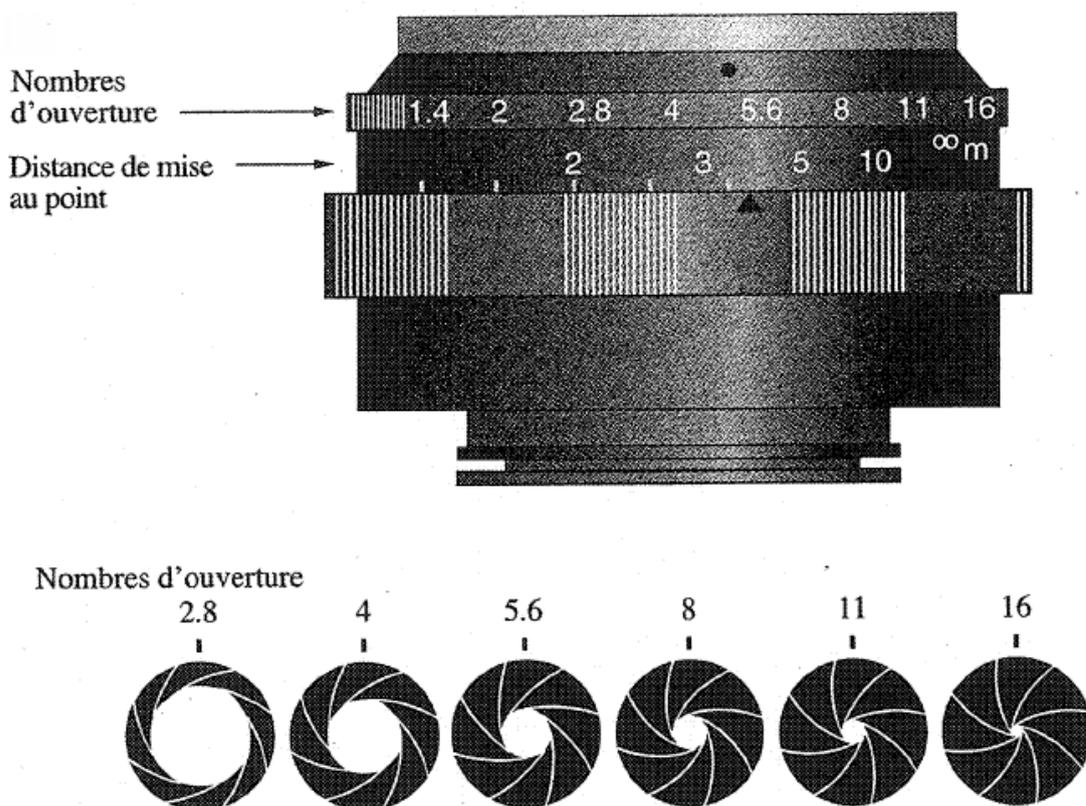
Les rapports D/f ou f/D font intervenir f , la distance focale image du système. Le plan focal image est l'endroit où se focalise l'image d'un objet placé à l'infini en amont du système. **L'ouverture relative et le nombre d'ouverture caractérisent donc un système dont l'un des conjugués est à l'infini.** 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).

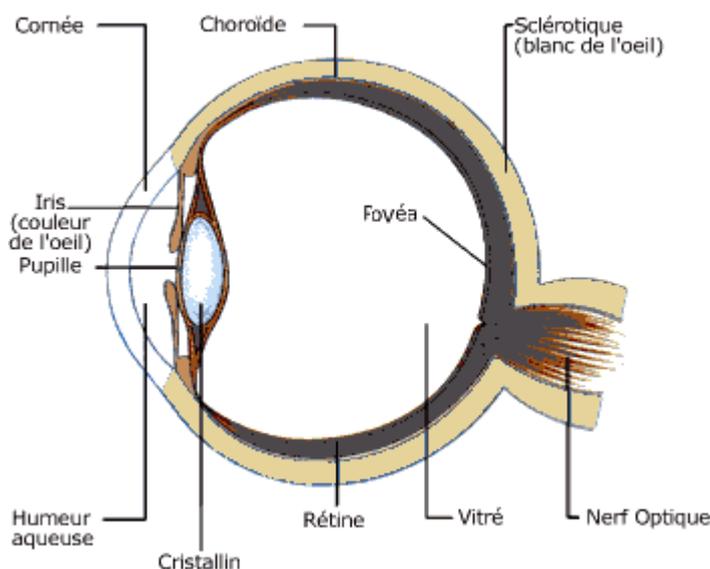
Cela correspond donc à un facteur $1/\sqrt{2}$ pour l'ouverture relative et à un facteur 1/2 pour l'éclairement. Ainsi, la même quantité de lumière atteint le film photographique si l'on a un nombre d'ouverture $f/1,4$ pour un temps d'exposition de 1/500 de seconde, $f/2$ pour 1/250 s, ou $f/2,8$ pour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



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'erythroopsine (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	-	-	1,337
crystallin	10 mm	6 mm	1,413
humeur vitrée	-	-	1,337

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

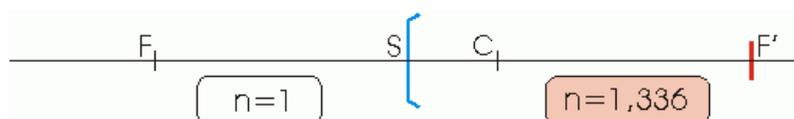
4.2.1 L'œil comme un dioptre sphérique

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

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



Rappelons l'équation du dioptre sphérique

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

Cette expression permet de définir deux distances focales distinctes:

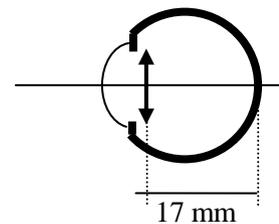
distance focale image: $f_i = \frac{r n}{n-1} = \frac{0,006 \cdot 1,337}{0,337} = 0,024 \text{ m}$

distance focale objet: $f_o = \frac{r}{n-1} = \frac{0,006}{0,337} = 0,018 \text{ m}$

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.

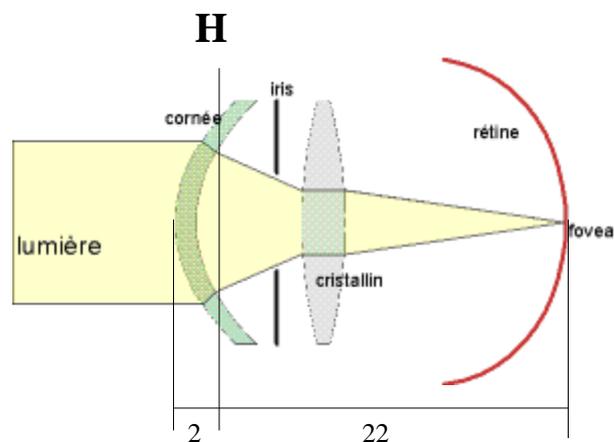
Dans une variante descriptive du modèle, on a une lentille mince située à 17 mm de la rétine – figure à droite. On tient compte ici de l'indice de réfraction de l'humeur vitrée (~1,34): ainsi l'image d'un objet situé à une distance ∞ de l'œil se forme à une distance $p' = 17$ mm.



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** avec les caractéristiques suivantes:

- 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.
- distance (foyer objet → face antérieure de la cornée): +15 mm
 - donc distance (face antérieure de la cornée → plans principaux): +2 mm
 - donc distance (face antérieure de la cornée → rétine): +24 mm
- rayon de courbure: +6 mm
- puissance [dioptries]: $D = +60 \cdot \delta$ (avec $\delta = 250$ mm)
- indice de réfraction: $n = 1,337$
- amplitude dioptrique (voir section 4.2.4, page suivante) = 4

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**.

L'**amplitude dioptrique d'accommodation** est:
$$\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\Delta} \quad [\text{m}^{-1}] \text{ ou } [\text{dioptrie}] \quad (8.1)$$

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

Acuité visuelle

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 mm) = 5,1 μm , 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.

Par exemple supposons qu'un myope ne voit plus nettement au-delà de 50 cm. Quelle est la vergence du verre correcteur (qu'on supposera ici accolé à l'œil) pour qu'il voie net à l'infini ?

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

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

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

4.4.2 L'hypermétropie

C'est le défaut contraire de la myopie: l'œil n'accommode 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.

Par exemple supposons qu'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.

4.5 EXERCICES

1. Une personne presbyte avec un PR de 120 cm utilise des lunettes de +2 dioptries pour voir de près.
 - a. Sans lunettes, quel est son PP ?
 - b. 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. 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 ; $G_{\infty} = 6,125$; $G_{PR} = G_{\infty} + 1 = 7,125$
6. Un myope peut voir nettement jusqu'à 5 cm. A partir de quelle vergence une loupe pourrait-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.
7. 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

5. LOUPE ET MICROSCOPE

5.1 LA LOUPE

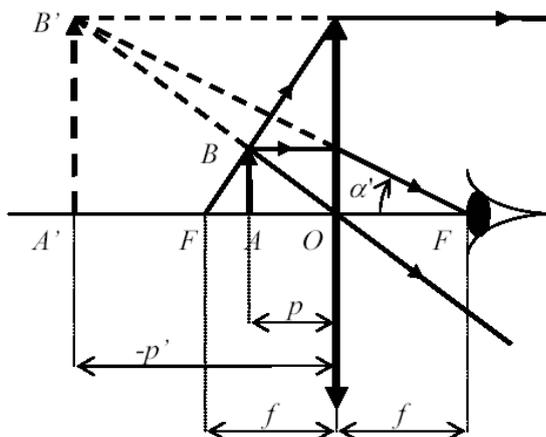
La loupe est le plus simple de tous les instruments d'optique. Elle permet de voir des détails dont le diamètre apparent est inférieur à $3 \cdot 10^{-4}$ radians, le pouvoir séparateur de l'œil normal.

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.

Pour une image à l'infini le grossissement sera:
$$G_{A_\infty} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\delta}{f} \tag{5.1}$$

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

Par exemple une loupe de 5 cm de focale (vergence⁶ de 20 dioptries) a

- Un grossissement commercial: $G_{com} = 0,25 / 0,05 = 5$
- Pour un personne myope voyant net à 10 cm, le grossissement réel 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*).

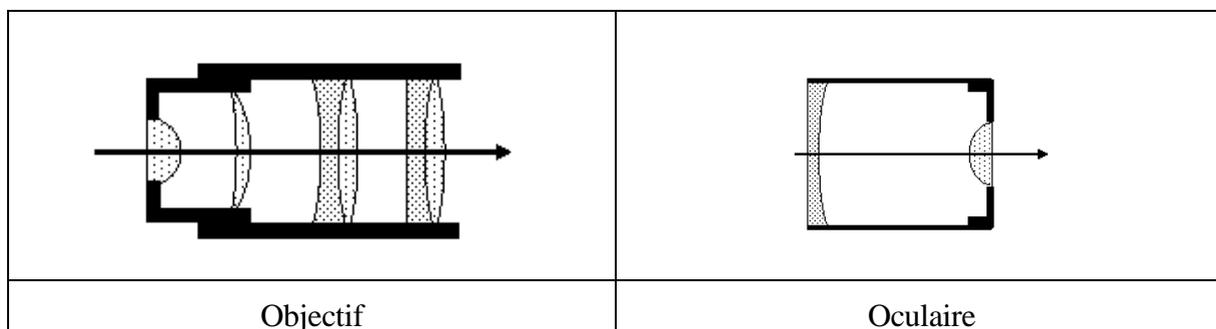
On profite ainsi d'un plus grand champ de vision et le grossissement est supérieur d'une unité au grossissement G_∞ et. En effet dans ce cas le grossissement est:

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

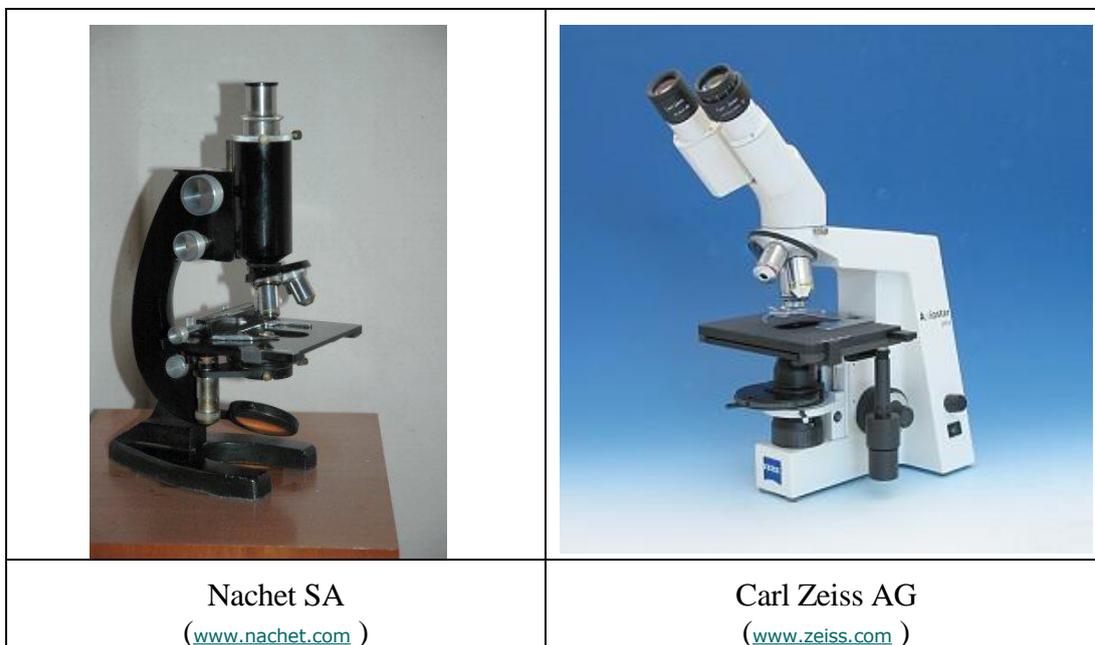
⁶ Dans le langage courant, on dit aussi « puissance de la loupe » au lieu de « vergence ». En anglais, on emploie le terme *power*.

5.2 LE MICROSCOPE

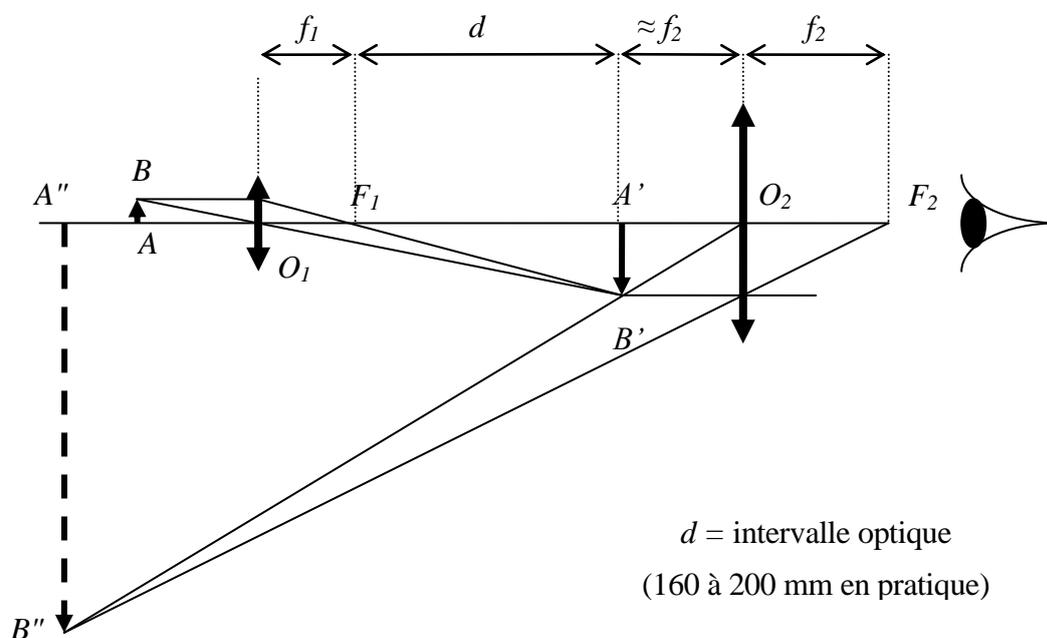
Tout comme la loupe, le microscope est destiné à l'observation d'objets très petits. Le principe est le suivant: au moyen d'un premier système de lentilles très convergent, l'**objectif**, on forme une image virtuelle, de plus grand diamètre apparent, qu'on examine ensuite avec un **oculaire**, qui joue 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**⁷ est

$$P = G_L \frac{1}{f_2} = \frac{d}{f_1 f_2} \quad [\text{dioptries}] \quad (5.2)$$

Par exemple si on prend $d = 180$ mm, $f_1 = 5$ mm, $f_2 = 20$ mm on obtient

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

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.

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{\alpha''}{\alpha} = \frac{A'B'/f_2}{AB/\delta} = G_L \frac{\delta}{f_2} \\ Gr &= G_L \frac{\delta}{f_2} = \frac{d}{f_1} \frac{\delta}{f_2} = P\delta \end{aligned} \quad (5.3)$$

Le **grossissement commercial** correspond à $\delta = 250$ mm dans la formule précédente.

⁷ 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** d'un microscope est très petite.

Prenons le cas d'un œil standard, qui voit net de $\delta = 250$ mm à l'infini, placé contre l'oculaire.

Quand l'œil observe à $\delta = 250$ mm, 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 $5,1389 - 5,1378$ mm = $0,0011$ mm = $1,1$ μm .

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) sera

$$\text{à l'œil nu:} \quad \rho_0 = \frac{3}{10000} \delta$$

$$\text{avec un microscope:} \quad \rho = \frac{\rho_0}{G} = \frac{3}{10000} \delta \frac{1}{P\delta} \quad (5.4)$$

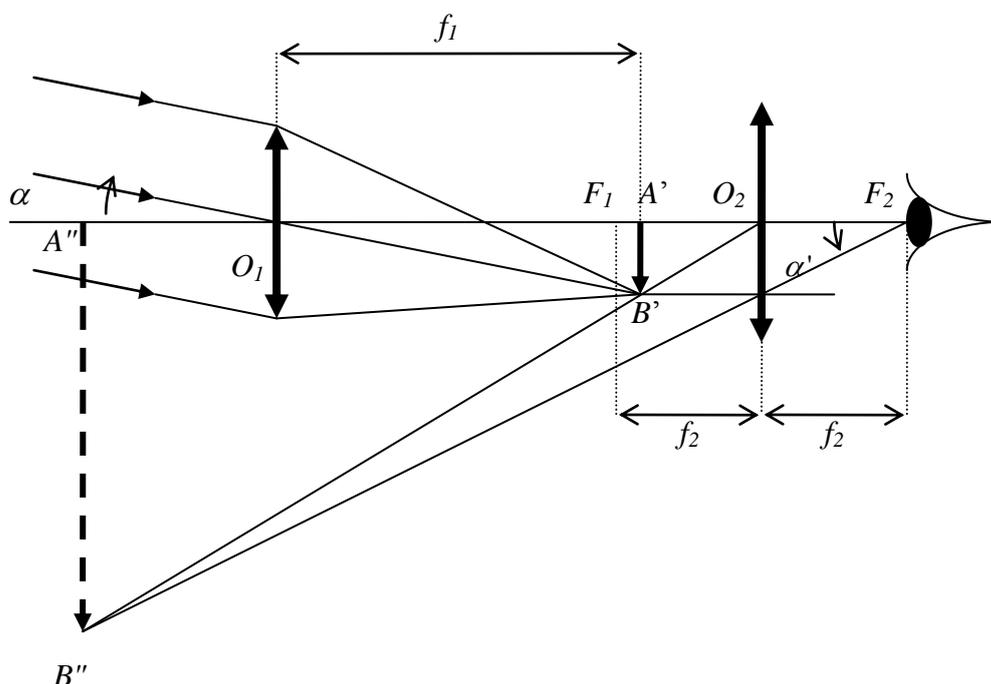
Avec les valeurs de l'exemple précédent, on aura $P = 1800$ et $\rho = 0,17$ μm .

Notons que le pouvoir séparateur effectif sera aussi limité par la diffraction qui donnera généralement une limite autour de $0,2$ μm . Une puissance plus grande du microscope ne donnera pas plus de détails, mais juste une image plus grande.

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 $\alpha \cdot f_1$, 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:

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A'B' / f_2}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2} \quad (6-1)$$

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 astronomique⁸ 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.

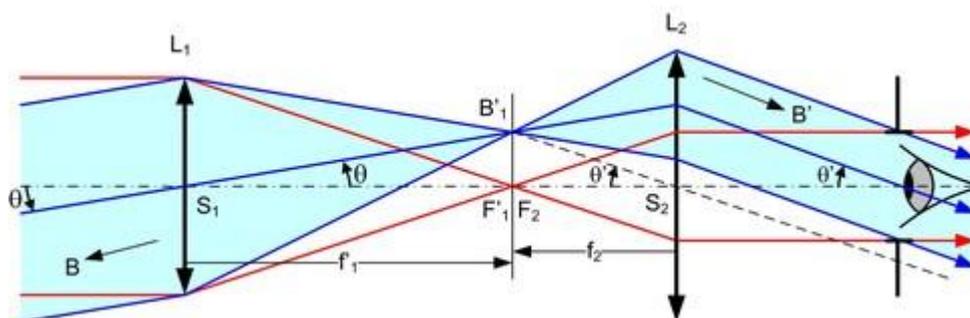


Figure 6-1: Lunette afocale, on a $d = f_1 + f_2$

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 aussi égal à cette valeur

$$G_A = f_1 / f_2 \quad (6-3)$$

avec ici f_1 = distance focale de l'objectif et f_2 = 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).

⁸ Note : En anglais, lunette se dit *refracting telescope*, et télescope, *reflecting telescope*.

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.

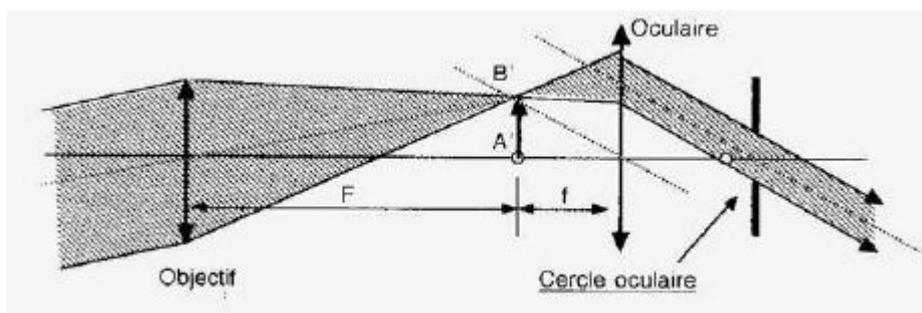
Pour que la vision puisse balayer tout le champ de la lunette, on comprend qu'il est nécessaire que **l'œil soit positionné au centre de la pupille de sortie** de la lunette. Dans ce cas, la ligne de visée principale correspond au rayon principal passant au centre de la pupille de sortie de l'instrument,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

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

$$\omega \approx \tan \omega = \frac{r_e}{f_1 + f_2} \quad (6-5)$$

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.

6.3 LUNETTES TERRESTRES ET JUMELLES

Tant que $d = f_1 + f_2$, l'instrument reste afocal, même si l'oculaire est négatif ($f_2 < 0$). Un bon exemple en est la lunette de Galilée. De fait historiquement la première lunette de Galilée comportait un oculaire divergeant et donnait donc une image droite.

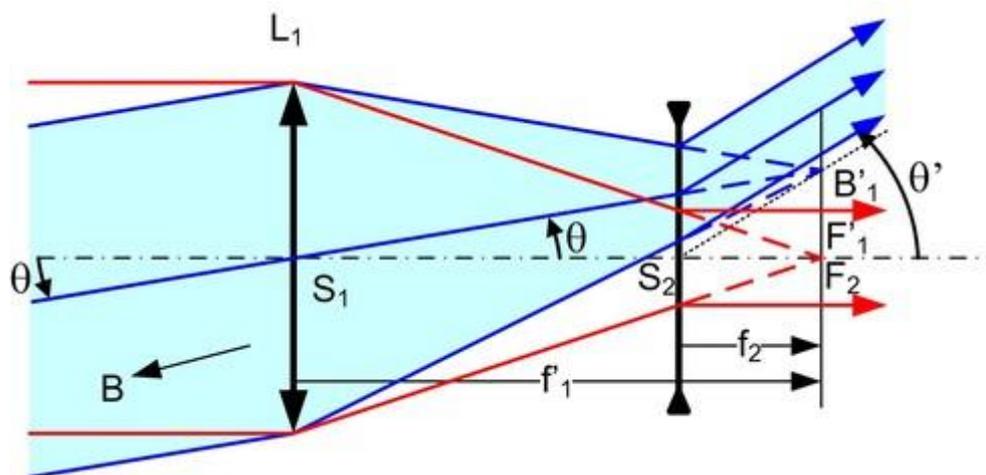
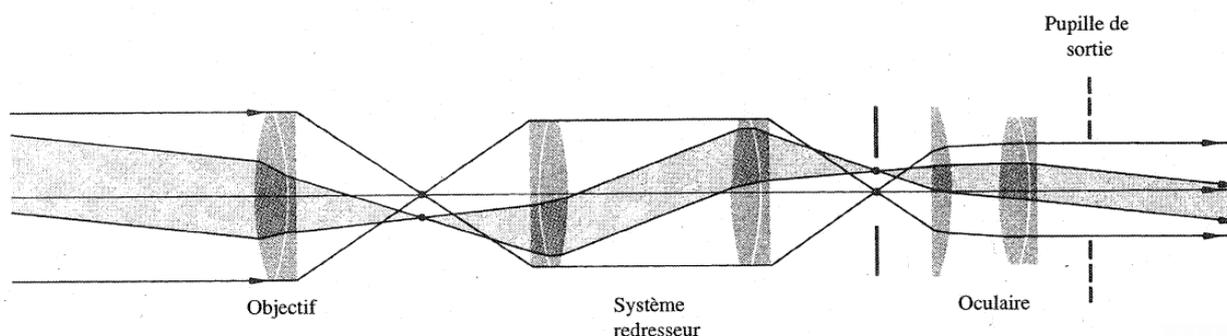


Figure 6-2: Schéma de la lunette de Galilée: elle est caractérisée par un deuxième système divergent, le grossissement est alors positif, les images sont droites mais le champ est très réduit. On les utilise avec des grossissements faibles comme dans les jumelles de théâtre.

Ce type de lunette convient donc à une utilisation terrestre où, à la différence des instruments astronomiques, la lunette (longues-vues) doit comporter un système permettant de redresser l'image.

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 série de deux chiffres, comme par exemple: 6 X 30, 7 X 50, ou 20 X 50. Le premier indique le grossissement; ici: 6X, 7X, ou 20X et le second le diamètre de la pupille d'entrée, c'est-à-dire le diamètre d'ouverture de l'objectif, en millimètres.

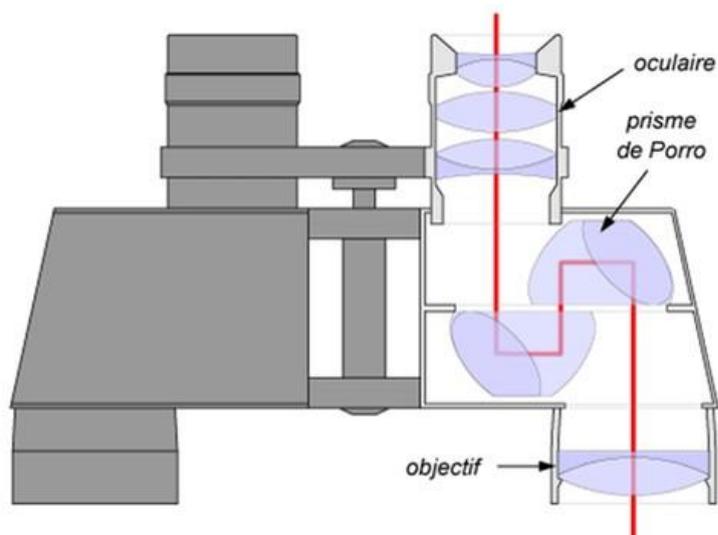


Figure 6-3: Dans un corps de jumelles un ensemble de deux prismes de « Porro » permet une rotation de 180° de l'image autour de l'axe optique et redresse ainsi les images.

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.

7. TÉLESCOPES

7.1 LES DÉBUTS

Peu de temps après l'invention de la lunette, Newton, Gregory et Cassegrain ont inventé le télescope. Ils ont créé trois formules optiques différentes, à peu près en même temps. C'est à Newton qu'on attribue généralement l'invention (publiée en 1670 à la Royal Society), mais Grégory et Cassegrain pourraient très bien l'avoir précédé (James Gregory, mathématicien écossais, a proposé sa formule en 1663).

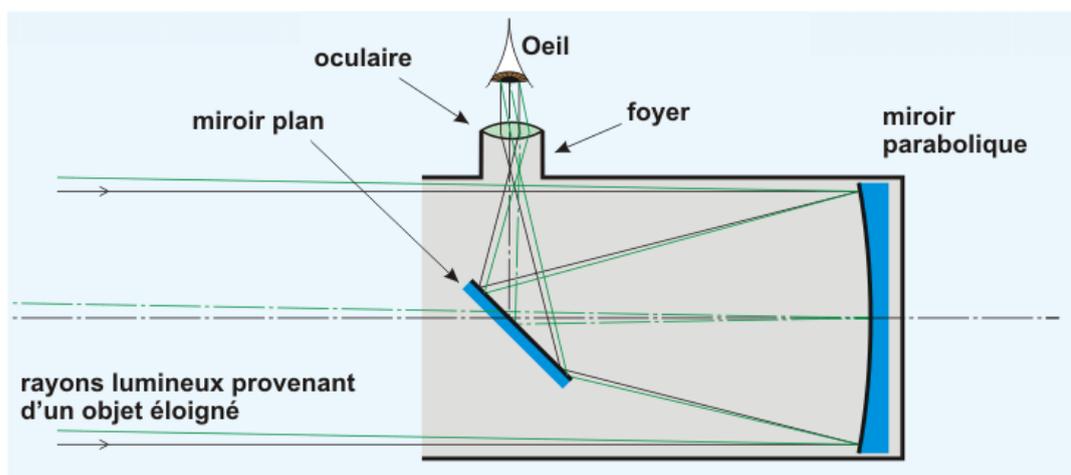


Figure 7.1 Schéma optique du télescope de Newton

Le principe est simple: il consiste à remplacer les lentilles par des miroirs. L'avantage des miroirs est double: la lumière ne traverse plus de verre; ils sont donc totalement exempts à la fois d'aberration chromatique, et d'absorption (il y tout de même une très légère perte de lumière, car le pouvoir réfléchissant de la surface n'est pas total). Sur un plan pratique, le télescope a encore un avantage de plus: la facilité de taille des miroirs.

Considérez le doublet achromatique constituant l'objectif d'une lunette; il est formé de deux lentilles collées, donc il comprend 4 surfaces sphériques à tailler. Le miroir d'un télescope n'en comprend qu'une seule.

Toutefois, on montre qu'une surface sphérique ne convient pas pour le miroir. Pour que tous les rayons convergent en un même point, la surface doit être parabolique, mais très proche d'une sphère. La modification est relativement plus facile à faire sur une surface de miroir que sur une lentille.

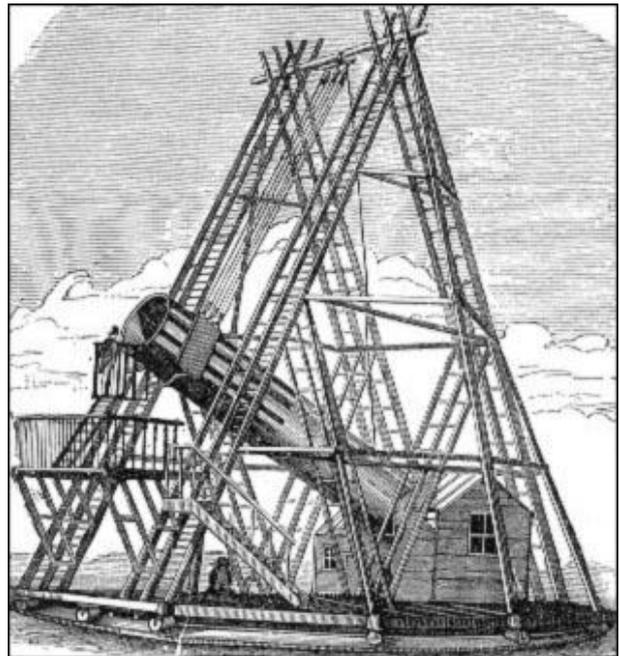
Il a donc été possible de construire des miroirs de télescope de plus grand diamètre que les objectifs de lunettes. Depuis le début du XX^{ème} siècle, les télescopes ont supplanté définitivement les lunettes dans l'astronomie.

Faute de mieux, ce sont des miroirs en bronze qu'utilisèrent Newton, Gregory et Cassegrain pour réaliser leurs télescopes. Par la suite, ces défauts n'ont pas empêché les astronomes de construire des télescopes de plus grand diamètre.

Aussi, l'absence d'aberration chromatique permet de les construire beaucoup plus courts que les lunettes. De nombreuses découvertes ont été faites avec ces instruments, en particulier celle de la planète Uranus par William Herschel en 1781.

Le plus grand télescope qu'il construisit était à miroir métallique de 1,22 m de diamètre et 12,20 m de focale. Il l'a achevé en 1789.

Celui-ci a marqué l'apogée des instruments de ce type. Il faut remarquer à son sujet qu'il n'y avait pas de miroir secondaire: le miroir principal était légèrement incliné sur son support, et l'observateur plaçait l'oculaire sur le bord du tube, à sa sortie (on le distingue sur le dessin). L'absence de secondaire évitait une perte de lumière supplémentaire, mais l'inclinaison produisait des aberrations.



7.2 LES MIROIRS DES TELESCOPES

Un miroir a deux fonctions:

- donner une forme parfaite pour la qualité des images ;
- réfléchir la lumière.

Dans un miroir de bronze, le métal réalise à lui seul ces deux fonctions. Mais il les réalise mal toutes les deux.

Les miroirs en verre

Un progrès capital a été fait par **Léon Foucault** en 1856. Il a montré que l'on pouvait remplacer le bronze par du verre. Ce matériau est plus dur et plus cassant, et se laisse polir aussi finement qu'on le souhaite (les petits défauts sont cassés par l'outil, les aspérités subsistant étant plus petites). La qualité du polissage est de ce fait bien supérieure et l'on peut fixer une limite encore plus exigeante, quant à la taille maximale admissible des défauts.

L'inconvénient du verre est son pouvoir réfléchissant très faible. Foucault a su pallier élégamment cet inconvénient en plongeant le miroir poli dans une cuve contenant une solution liquide de nitrate d'argent ammoniacal. Il ajoute de l'essence de clous de girofles (!); cette dernière contient un dérivé phénolique qui joue le rôle de réducteur. L'argent métallique se dépose à la surface du verre, en une couche très fine et très régulière, qui épouse parfaitement la forme du miroir, rendant ainsi le pouvoir réfléchissant excellent, de 92 % à 0,55 μm .

Dans ces miroirs, les deux fonctions (forme et réflexion) sont dissociées:

- le verre donne la forme, que l'argent épouse parfaitement;
- l'argent donne la réflexion.

La taille des miroirs de télescope est une opération délicate, mais cependant à la portée d'un amateur méticuleux, et parfaitement maîtrisée par les professionnels.

Mais au contact de l'air, l'argent est attaqué par des composés sulfurés présents en faibles quantités. Il forme un sulfure noir qui, rapidement, obscurcit le miroir, et le rend inutilisable. Cependant, ce problème n'est pas aussi grave qu'avec le bronze: il suffit de tremper le miroir dans une solution chimique qui dissout l'argent, pour retrouver la surface polie intacte. On peut alors le

réargenter pour le retrouver neuf. Cette opération peut se faire en une journée. Cette technique a été utilisée pendant à peu près un siècle.

Amélioration des verres

Les premiers miroirs étaient en verre ordinaire, et depuis de grands progrès ont été accomplis dans la composition des verres. L'une des améliorations importantes a été de trouver des mélanges à très faible coefficient de dilatation thermique (*zérodur*, *silice fondue*). En effet, si le miroir se dilate, sa surface se déforme, et ses propriétés optiques en pâtissent.

Le verre destiné aux lentilles et miroir a toute une histoire. Sa fabrication est très complexe, car les propriétés doivent être exactement les mêmes en tout point de la masse. L'une des difficultés tient à l'existence de deux formes de verre, nommées α et β , qui ne se forment pas à la même température. La variété β est stable à chaud, la variété α à froid. Lorsqu'un gros bloc de verre refroidit, il se forme un noyau de verre β entouré d'une carapace de verre α . Ceci est inutilisable. Pour éviter ce problème, il faut chauffer le bloc à une température de l'ordre de 600° , et le refroidir lentement. Cette opération s'appelle le **recuit**.

La composition du verre est aussi très importante, non seulement pour les qualités optiques, mais aussi pour le coefficient de dilatation, qui doit être le plus bas possible. Sur ce plan, les verres riches en silice (pyrex) sont de bons candidats. Le miroir du 5 m du Mont Palomar est en pyrex. Son épaisseur totale est de 70 cm. Mais pour l'alléger, il est creusé de 114 alvéoles qui ne diminuent pas sa résistance mécanique. La coulée a été un exploit, à une époque où on n'avait jamais manipulé de telles quantités de verre. Le moule a été chauffé à 1.350° avant la coulée.

Le premier disque n'a pas été réussi, il a fallu tout recommencer. Le recuit a duré 11 mois, en abaissant la température chaque jour de $0,8^\circ$ seulement. Les tensions résiduelles dans le verre sont extraordinairement faibles.

Un verre particulier est nommé **zerodur** (nom de marque, fabriqué par la société Schott). Son coefficient de dilatation est voisin de zéro (d'où son nom). Il permet une grande qualité de polissage, et ces qualités en ont fait pendant longtemps le verre de choix pour les miroirs. Par contre, il présente des inclusions, qui le rendent totalement impropre à la fabrication de lentilles.

Changement de métal

Au $xx^{\text{ème}}$ siècle, les progrès techniques ont permis de remplacer l'argent, déposé par voie chimique, par de l'aluminium déposé par évaporation sous vide: technique due à Strong, en 1931.

L'avantage de l'aluminium par rapport à l'argent tient dans son oxyde, l'alumine, qui est transparent et imperméable. La fine couche d'alumine qui recouvre l'aluminium, n'altère pas les propriétés optiques du miroir et de plus protège l'aluminium, à tel point que, une fois l'aluminium déposé, on produit une oxydation superficielle protectrice. Un miroir d'amateur ainsi traité ne nécessite pas de retouches pendant de longues années. Les miroirs professionnels, pour lesquels les tolérances sont bien plus faibles, est réaluminé régulièrement. Le pouvoir réfléchissant de l'aluminium est légèrement moins bon que celui de l'argent (89 % au lieu de 92 %), mais cet inconvénient est largement contrebalancé par la constance dans le temps des qualités du miroir, qui permet de comparer des clichés pris à des dates éloignées.

L'aluminium a un autre avantage sur l'argent: il réfléchit l'ultraviolet (UV), alors que l'argent lui est transparent. Avec les récepteurs modernes, l'UV a pris beaucoup d'importance, car il est émis en abondance par les étoiles chaudes. Cette caractéristique de l'aluminium est donc décisive. A $0,25 \mu\text{m}$, l'argent ne réfléchit que 33 %, l'aluminium 75 %.

La comparaison est facile à comprendre sur le graphique ci-dessous. On y voit très bien que l'aluminium, s'il est un peu moins bon que l'argent dans le visible, est bien moins mauvais dans l'ultraviolet, où ses performances ne chutent que très peu (à gauche). La pente des courbes, qui descendent vers la gauche, donc vers le bleu, montre que le coefficient de réflexion baisse dans

l'UV. L'aluminium permet d'observer dans le proche UV, l'argent ne le permettrait absolument pas. Pour le bronze, la chute est moins brutale, mais commence à grande longueur d'onde, dans le rouge. Le bleu étant faiblement renvoyé, donne sa couleur au métal.

Avec cette technique de fabrication, on a pu aller très au-delà du télescope de Herschell. Les télescopes du Mont Wilson ont marqué un progrès considérable: télescope de 1,52 m en 1909, puis de 2,54 m en 1917. Le diamètre a augmenté jusqu'aux 5 m du télescope *Hale* (Mont Palomar, USA), puis aux 6 m du télescope soviétique *Bolchoï*. Ce dernier marque la limite des miroirs traditionnels (épais).

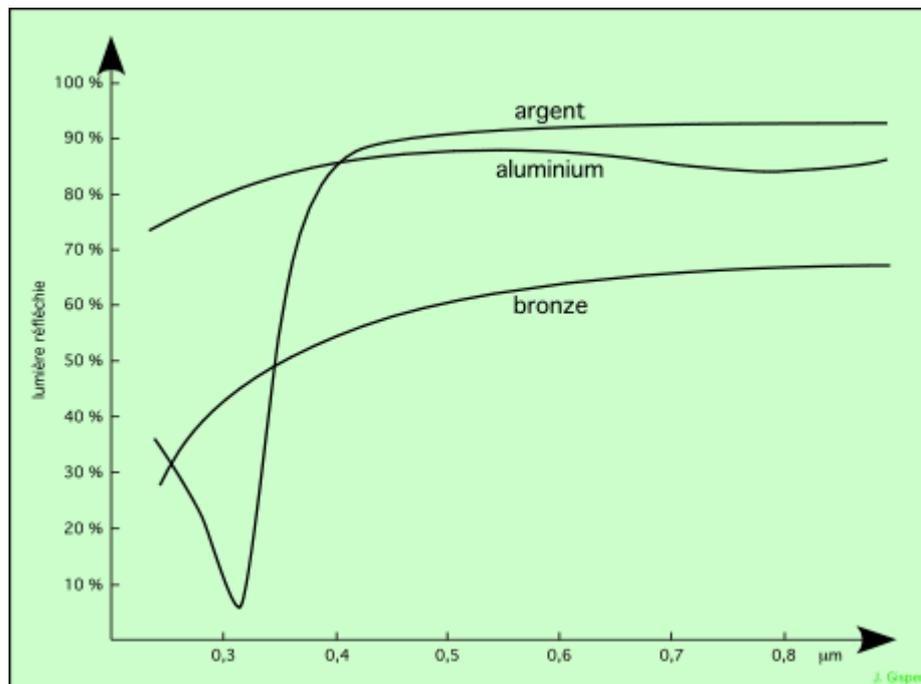


Figure 7.2 Réflectances des couches réfléchissantes

Aujourd'hui, avec les télescopes spatiaux, toutes les ondes électromagnétiques sont observables (non absorbées au-dessus de l'atmosphère). Pour l'infrarouge (IR), il faut disposer d'un miroir efficace dans ce domaine, et les trois métaux considérés ci-dessus ne conviennent pas. Par contre, l'or est excellent dans l'UV, et c'est donc lui qui est choisi pour les télescopes réservés à cette étude.

Le télescope Herschel, réalisé par l'ESA pour l'observation dans l'infrarouge lointain, sera équipé d'un miroir de technologie entièrement nouvelle: impossible d'envoyer un miroir de verre de 3,5 m de diamètre dans l'espace, il se briserait dans les vibrations du lancement. De plus, le poids d'un miroir de verre serait incompatible avec les possibilités de lancement. Alors, les concepteurs se sont orientés vers un miroir en **carbure de silicium**. Ce matériaux est extrêmement dur, se prête bien au polissage, et peut résister aux vibrations. Le seul ennui, c'est qu'on est incapable de fabriquer un bloc de carbure de silicium de 3,50 m de diamètre... On a donc dû développer une nouvelle technique consistant à fabriquer des pétales, assemblés par soudure. Le miroir ne fait que 3 mm d'épaisseur.

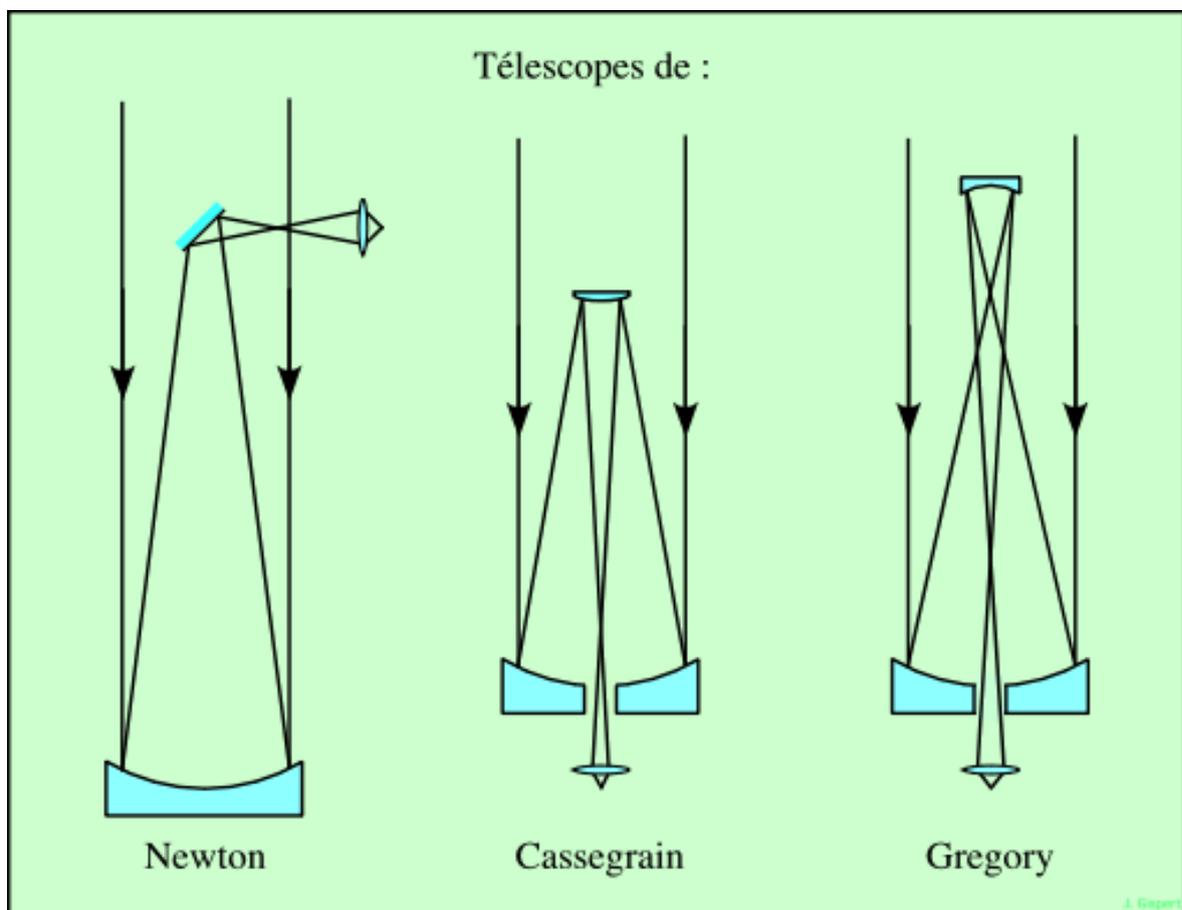
7.3 LES TYPES FONDAMENTAUX DE TÉLESCOPES

Nous avons déjà exposé la combinaison de **Newton**: un miroir primaire parabolique, et un secondaire plan.

La combinaison de **Cassegrain** comprend un primaire concave, et un secondaire convexe. On peut montrer que pour tout primaire concave, on peut trouver une forme du secondaire qui assure le stigmatisme. Mais on utilise pratiquement un primaire parabolique, car dans un tel télescope on peut retirer le secondaire, et utiliser le foyer primaire (pellicule photographique directement au foyer primaire). Une telle utilisation n'est possible qu'avec un paraboloïde.

La focale résultante est celle du primaire, multipliée par un facteur correspondant au grossissement de l'image par le secondaire. Ce facteur est toujours supérieur à 2, et souvent assez grand. Plus la focale est longue, plus petit est le champ. Cette combinaison est donc bien appropriée pour observer une petite région du ciel sous un fort grossissement. Ceci justifie l'usage de ce même primaire en solo, au foyer primaire, pour avoir un champ plus important.

La combinaison de **Gregory** est assez semblable à celle de Cassegrain, mais le secondaire est convexe et elliptique.



A caractéristiques égales (focale, diamètre), un télescope de Gregory est plus long qu'un télescope de Cassegrain. Leurs qualités étant équivalentes, le modèle de Gregory n'est pas utilisé.

Ces trois types d'instruments ont un primaire parabolique. Le miroir principal possède donc un axe de révolution et un seul. En conséquence, les images sont parfaites pour l'étoile alignée avec l'axe, et présentent des défauts hors de l'axe. Ces défauts sont de plus en plus importants en s'éloignant de l'axe, et ceci limite le champ de l'appareil.

Foyers d'un télescope

On appelle **foyer** l'endroit où les rayons convergent. Un miroir seul possède donc un foyer dit **foyer primaire**, celui où l'image se forme en l'absence de tout autre dispositif optique. Si on place un CCD au foyer primaire, il recueille simplement l'image donnée par le miroir. C'est la première façon de faire une image astronomique, en remplaçant l'oculaire du télescope par l'appareil photo sans objectif.

Mais dans certains cas, cette méthode n'est pas adaptée. Tout d'abord, le foyer primaire est devant le miroir ; tout objet placé au foyer primaire obstrue le télescope, et empêche la lumière d'y entrer en totalité (on parle d'**obstruction**). Pour l'observation visuelle, une première solution consiste à placer un miroir plan incliné à 45° sur l'axe du miroir, de façon à renvoyer le faisceau sur le côté, là où la tête de l'observateur ne gêne pas. C'est le **foyer Newton**.

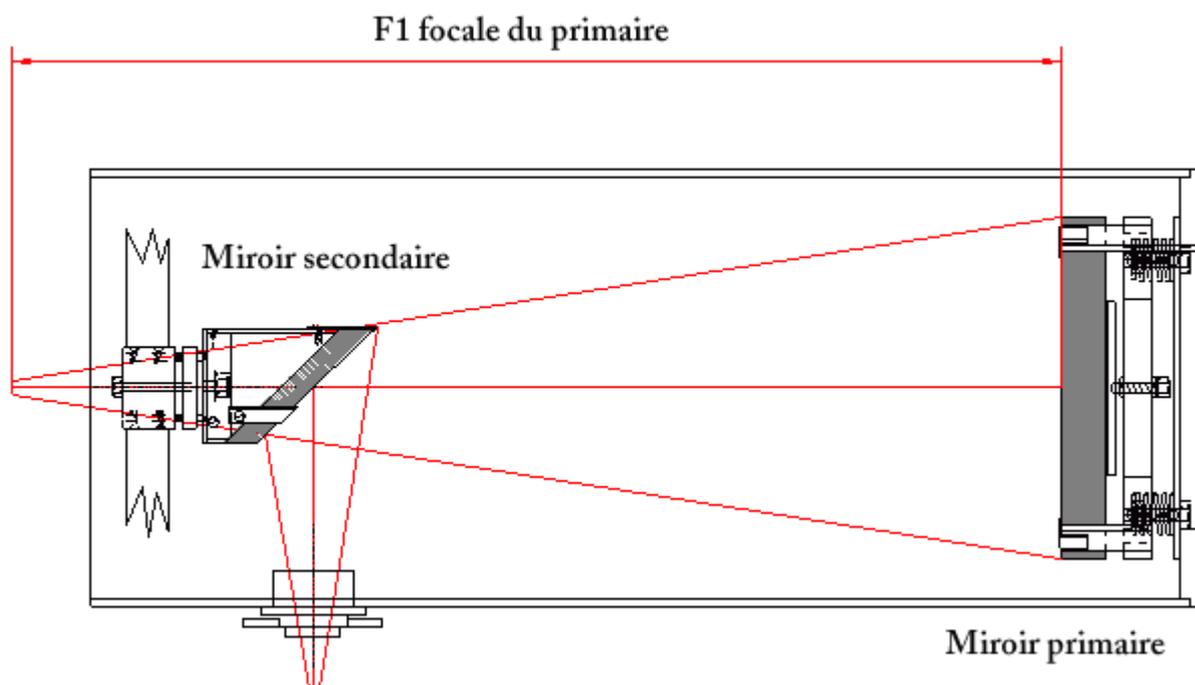


Figure 7.3 Télescope avec foyer Newton

La focale du miroir détermine la dimension de l'image au foyer primaire. Ainsi, le même télescope sera très adapté à la photo des grandes nébuleuses (grand champ), mais mal adapté à la photographie planétaire: l'image de la planète est toute petite.

Pour grossir l'image, il faudrait allonger la focale. Il existe un moyen de le faire, c'est de placer sur le faisceau émergent du miroir un dispositif optique divergent, qui va écarter le faisceau lumineux. Ceci peut se faire à l'aide de lentilles, en réintroduisant un chromatisme dans l'instrument, ou bien avec des miroirs, qui n'ont pas cet inconvénient. Dans le premier cas, la lentille se nomme **lentille de Barlow**; elle est divergente et s'adapte bien à la photographie planétaire.

Les instruments professionnels sont souvent conçus pour allonger la focale à l'aide d'un miroir. Dans ces conditions, le miroir principal est percé en son centre, de façon à laisser passer la lumière. Le faisceau qui arrive des étoiles est renvoyé vers la sortie du tube. Là où l'on place le miroir plan à 45° dans un Newton, on met un **miroir secondaire hyperbolique** (divergent), dont l'axe est aligné avec celui du miroir principal. Le faisceau est donc renvoyé vers le miroir principal, et allongé, de telle sorte qu'il va passer par le trou pour aller converger derrière le miroir

principal. Si le miroir secondaire est convexe, il s'agit du **foyer Cassegrain**, s'il est concave, c'est le **foyer Gregory** (peu usité).

Foyer Newton et foyer Cassegrain sont fixes par rapport au tube du télescope, et donc entraînés avec lui. Sur un grand instrument, on peut accrocher divers capteurs même assez lourds: appareil photo, petit spectrographe. Mais le poids admissible reste limité, et un spectrographe très dispersif (qui disperse fortement la lumière, et sépare nettement les différentes raies), ne peut être utilisé. Les instruments plus modernes pèsent des centaines de kilogrammes (en particulier, ils doivent être thermostatés). Il fallait donc trouver une solution pour renvoyer le faisceau produit par le télescope vers une direction fixe dans l'observatoire, où l'on pourrait placer les capteurs quel que soit leur poids et leur encombrement.

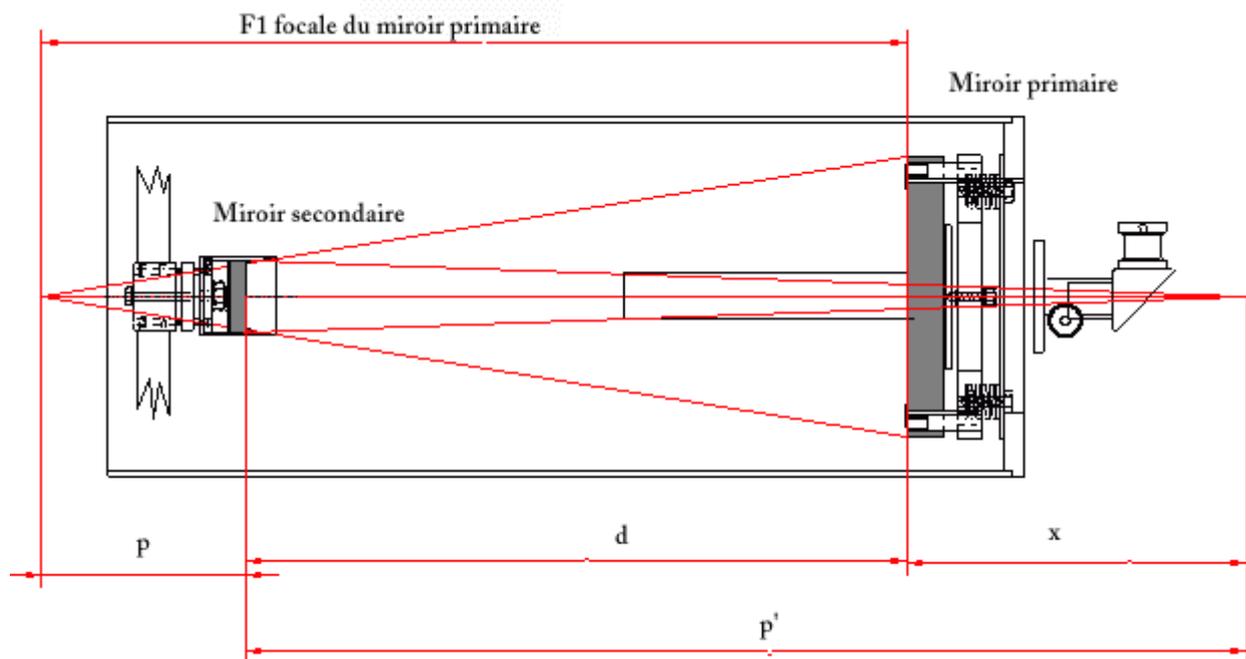


Figure 7.4 Télescope avec foyer Cassegrain

La solution est le **foyer Coudé** sur les montures équatoriales. Un miroir tertiaire plan est placé dans le tube, au niveau de l'axe de déclinaison creux. Le faisceau y est renvoyé. Un quatrième miroir renvoie l'image parallèlement à l'axe du monde. La lumière est renvoyée par le miroir tertiaire à travers l'axe de déclinaison, autour duquel tourne le tube. Là, un miroir quaternaire renvoie le faisceau dans l'axe polaire. Ainsi, le foyer final se trouve quelque part dans le pilier sud (à gauche en blanc) du télescope. On peut y placer des instruments bien plus lourds qu'au foyer Cassegrain. Parfois, on renvoie le faisceau sous la coupole. La situation fixe du spectrographe évite des flexions internes, qui pourraient produire une dérive des mesures.

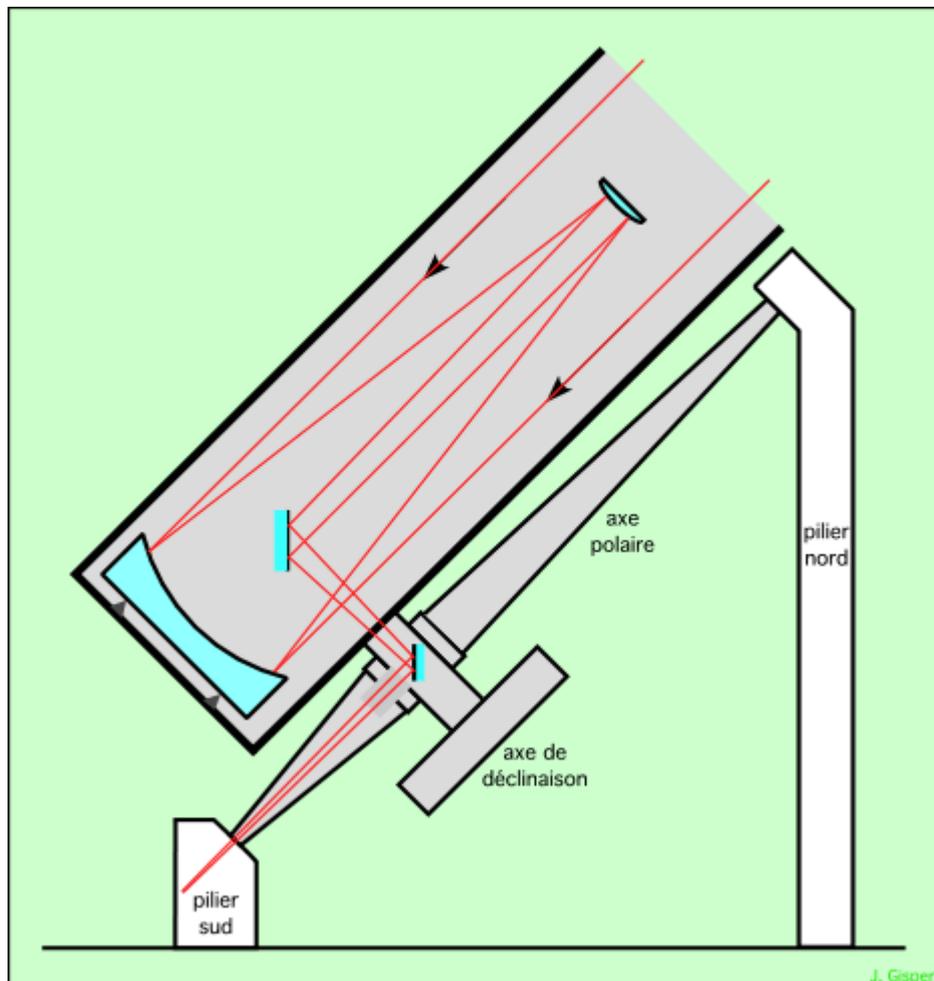


Figure 7.5 Foyer Coudé

Pour les montures alt-azimutales modernes (voir le chapitre suivant), le problème se pose en d'autres termes. On place un miroir plan dans le tube (miroir ternaire), de telle manière à renvoyer le faisceau dans l'axe horizontal creux (qui remplace l'axe de déclinaison). Le faisceau est alors accessible sur le bâti de l'instrument, qui tourne avec le télescope, mais est suffisamment robuste pour accueillir des instruments lourds. L'instrument est entraîné en azimut. Il s'agit du *foyer Nasmyth*.

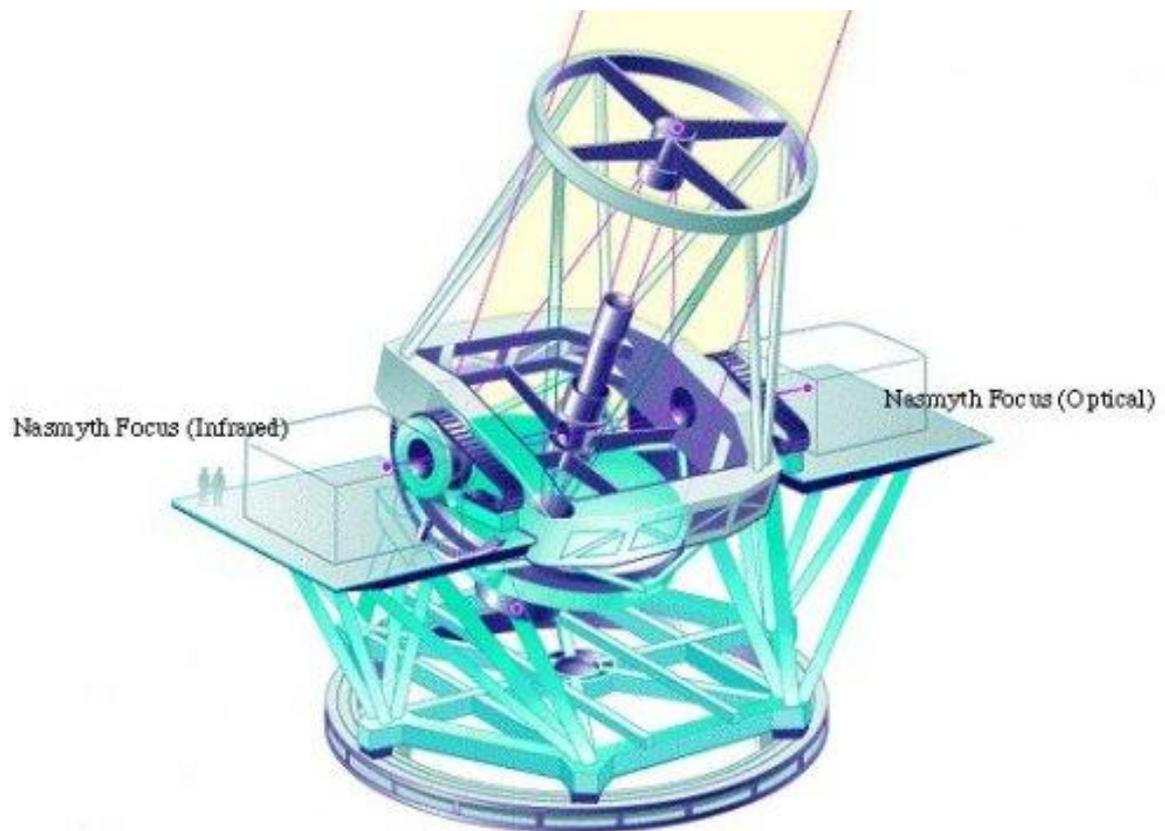
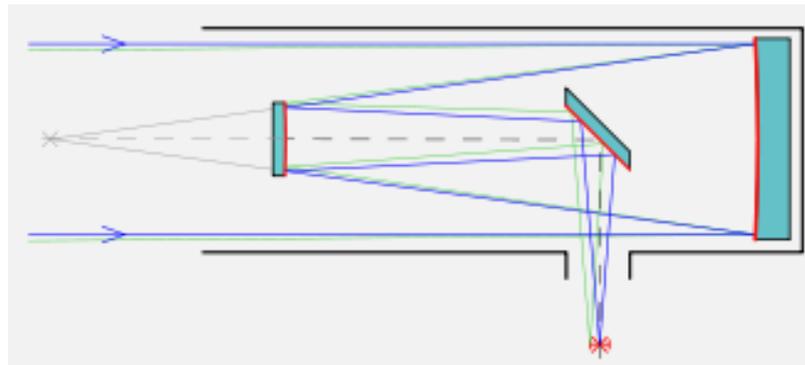


Illustration by Takaetsu Endo, taken from Nkkel Science 1996

Figure 7.6 Schéma d'un télescope avec foyer Nasmyth et implémentation de deux foyers sur un télescope alt-azimutal.

7.4 CARACTÉRISTIQUES ET PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES TÉLESCOPES

Le diamètre

Le diamètre de l'objectif, en l'occurrence le miroir primaire, est la caractéristique la plus importante de l'instrument car la plupart des propriétés optiques de l'instrument en dépendent. Plus il est grand, plus il autorise de forts grossissements et permet d'observer des étoiles lointaines. Le diamètre est généralement exprimé en millimètre pour les instruments du commerce, quelquefois en pouces (1" = 25,4 mm). Mais un télescope de grand diamètre ne suffit pas à faire un bon instrument d'observation, de nombreuses autres conditions relatives tant à la qualité qu'à la stabilité doivent être tenues.

La longueur focale

La longueur focale d'un télescope à proprement parler correspond à celle de l'objectif. Typiquement se sera le système formé par l'ensemble des miroirs primaire et secondaire, elle est exprimée en millimètre ou bien doit être calculée à partir du rapport f/D .

Le rapport f/D

Le rapport focale/diamètre est le rapport de la longueur focale du miroir primaire et de son diamètre, exprimés bien sûr dans la même unité. Un faible rapport f/D donne un instrument compact, donc stable et facile à manier et transporter. Néanmoins, la précision de collimation croît comme $(D/f)^2$.

En d'autres termes, un télescope ouvert à $f/D = 5$ sera deux fois plus difficile à collimer⁹ qu'un télescope ouvert à $f/D=7$. Un rapport supérieur ou égal à $f/D=5$ est très satisfaisant. Au-delà de $f/D = 10$, l'instrument a un champ limité mais une faible obstruction, ce qui est favorable en planétaire. En outre, les oculaires pouvant être de focale plus longue, le relief (recul) d'œil et donc le confort sera meilleur.

Le pouvoir de résolution et limite de diffraction

Quand la lumière d'une source ponctuelle éloignée est focalisée par une lentille ou un miroir, l'image formée sur un écran placé au plan focal est un disque circulaire entouré de plusieurs cercles secondaires de moins en moins intenses. Les pourtours de la lentille ou du miroir jouent le rôle d'une fente.

La figure de diffraction produite par une ouverture circulaire (lentilles, miroir, œil humain) est symétrique autour du centre de la figure. Il se produit une tache lumineuse circulaire, appelée **tache (ou disque) d'Airy** entourée d'un système d'anneaux concentriques d'intensité de plus en plus faible.

L'**angle** du premier anneau sombre, qui donc pratiquement définit le diamètre du spot central est donné par

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (7.1)$$

On peut montrer qu'une ouverture circulaire de diamètre D suivie par une lentille ou un miroir de distance focale f engendre une figure de diffraction sur un écran placé au plan focal avec une tache

⁹ La collimation est le réglage de l'alignement des différents éléments optiques d'un instrument les uns par rapport aux autres. Les livres d'optique nous présentent, pour chaque type de télescope, des principes de conception et des performances théoriques en supposant implicitement que cet alignement est parfaitement réalisé. En réalité les performances d'un télescope (résolution et qualité d'image) diminuent rapidement en cas de défauts d'alignement. Aussi, en fonction de sa conception mécanique, un instrument, même s'il a été bien réglé en usine, peut ne pas conserver longtemps une bonne collimation.

d'Airy de rayon r_a . Comme les angles sont petits, on peut approximer le demi angle d'ouverture θ en radians par

$$\theta \approx \sin \theta = r_a / f$$

et donc

$$r_a = 1.22 \frac{f \lambda}{D} \quad (7.2)$$

Le **pouvoir de résolution** est la capacité d'un système optique à révéler les détails, il gagne en finesse avec le diamètre de l'objectif. Le pouvoir de résolution mesure le plus petit **angle** séparant deux points que l'on parvient à voir comme distincts l'un de l'autre, soit environ 1 minute d'arc pour l'œil humain.

Ainsi les expressions (1.1) et (1.2) définissent la **limite de diffraction du télescope**. Par exemple, un télescope de 114 mm de diamètre a un pouvoir séparateur d'environ 1", un télescope de 200 mm a un pouvoir séparateur de 0,6".

Toutefois, cette limite ne tient pas compte d'effets divers, tels que les turbulences atmosphériques, la stabilité de l'instrument et la qualité de l'objectif qui **empêchent** généralement d'atteindre la limite théorique de résolution. Voir le chapitre 0 à la suite.

Le seeing

La lumière qui nous arrive des étoiles traverse l'atmosphère de la Terre avant de parvenir sur le miroir. Or l'atmosphère n'est pas parfaite optiquement, et son indice de réfraction varie au gré de la turbulence de l'air traversée. Ses défauts limitent le pouvoir séparateur d'un télescope, quel que soit son diamètre, à celui d'un instrument d'amateur de 30 cm de diamètre.

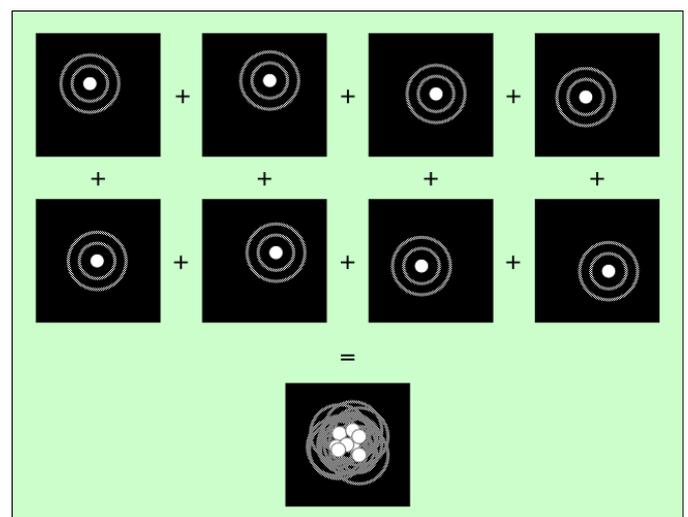
Le pouvoir séparateur réel est de l'ordre de 1" d'arc seulement (et au mieux 0,4" dans des conditions exceptionnelles). Cette limite imposée par l'atmosphère se nomme le **seeing**.

Cet effet est représenté par le **paramètre de Fried** r_0 . En termes simples, r_0 est le diamètre d'un faisceau de rayons issus d'une source à l'infini, qui traversent ensemble les couches atmosphériques et arrivent, toujours bien parallèles et en phase au télescope. r_0 est aussi fonction de la longueur d'onde λ avec r_0 proportionnel à $\lambda^{6/5}$. Dans le visible r_0 varie de 10 cm à 30 cm pour les meilleurs sites.

Donc si on a construit des instruments de plus de 30 cm de diamètre (beaucoup plus) c'était donc uniquement pour voir des objets moins lumineux, pas pour en distinguer plus de détail. L'explication du problème est simple dans son principe: la **tache de diffraction** est déplacée très rapidement par la turbulence.

Les figures à droite montrent cette tache avec les **anneaux de diffraction**, tels qu'ils apparaissent successivement. Les images sont séparées d'un dixième de seconde (de temps). La persistance rétinienne (ou l'intégration sur un certain temps dans un CCD) accumule ces images pour donner une tache plus grosse, empâtée (figure du bas):

Cela signifie aussi que les images de deux étoiles séparées d'un angle inférieur à 1 seconde d'arc ne forment qu'une tache indiscernable.



Pour évaluer le diamètre de la tache dans ce cas on utilise la **largeur à mi-hauteur** (*FWHM, full width half maximum*) qui est donné par

$$FWHM = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} \quad (7.3)$$

Dés que le diamètre du télescope est plus grand que r_0 , le *seeing* domine largement la limite en diffraction et le **pouvoir de résolution effectif** est donné par la relation (7.2).

Fonction d'étalement du point (*PSF, point spread function*)

En général l'image d'un objet ponctuel est donnée par la fonction de transfert de la chaîne de détection: diffraction, aberrations, seeing, ...

Cette fonction de transfert, dans ce cas précis, s'appelle **fonction d'étalement du point**, ou plus fréquemment *PSF* en anglais (*point spread function*).

Connaître ou estimer la fonction d'étalement du point est une étape indispensable pour le traitement d'image.

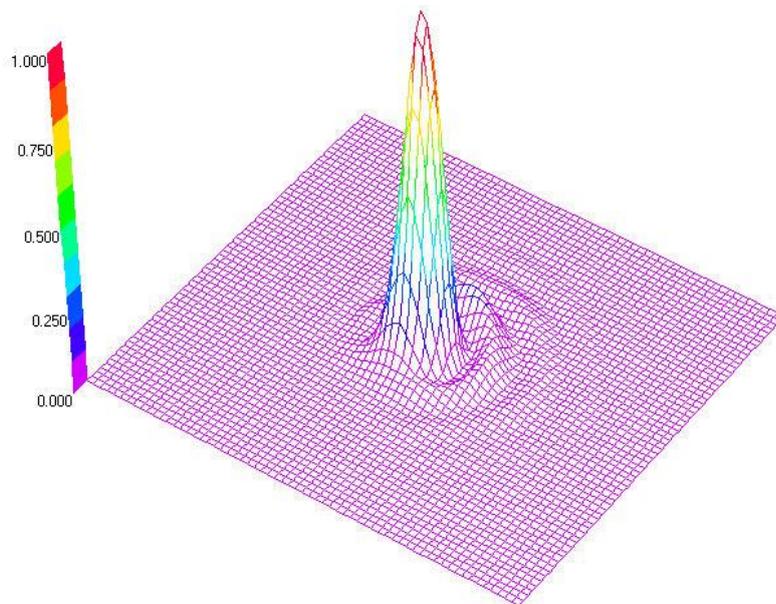


Figure 7.7 Exemple de PSF.

Le grossissement

Il correspond au rapport entre le diamètre apparent de l'image à la sortie de l'oculaire et le diamètre apparent de l'objet réel. Il peut se calculer en divisant la longueur focale du miroir primaire par celle de l'oculaire. Le grossissement ne révèle de détails supplémentaires que dans la mesure où il permet de surmonter le faible pouvoir de résolution de l'œil. Au-delà de la limite de résolution de l'instrument, le grossissement ne révèle plus d'autres détails que les défauts de l'image et induit une diminution de la clarté.

A contrario, un faible grossissement permet d'observer un large champ du ciel, ce qui peut être mis à profit si l'instrument a une clarté suffisante, ou pour l'observation de la Lune et du Soleil. Un faible grossissement nécessite un instrument de courte focale, préférable à l'utilisation d'oculaires de longue focale qui peut entraîner une perte de clarté.

La clarté

La clarté augmente avec le diamètre de l'objectif, elle est théoriquement proportionnelle à la surface de la section du télescope, diminuée de l'obstruction du miroir secondaire.

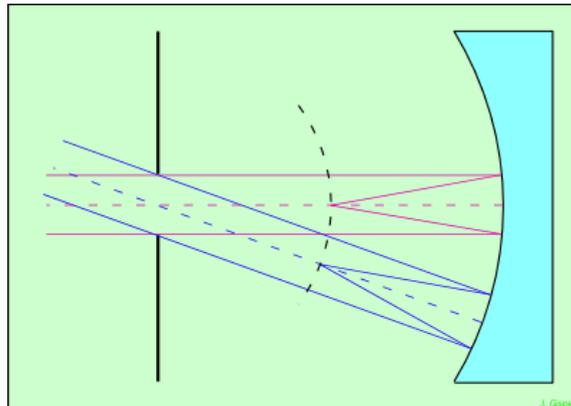
On peut calculer un facteur approximatif en divisant le carré du diamètre de l'objectif à celui de la pupille (environ 6 mm dans le noir). Par exemple, si un télescope a un diamètre de 114 mm, il collectera 361 fois plus de lumière que l'œil ($114^2/6^2$). Toutefois, la luminosité des images dépend aussi du grossissement, sauf pour les étoiles qui fournissent toujours une image ponctuelle. Les astres diffus, tels que les nébuleuses ou les galaxies, doivent donc être observés avec des instruments ayant un faible rapport f/D pour pouvoir appliquer de faibles grossissements.

L'œil humain n'est utilisé comme « capteur » direct que pour les télescopes d'amateurs. L'ancienne plaque photographique est remplacée par des capteurs électroniques dont le rendement est actuellement proche de 100 %.

7.5 AUTRES TYPES DE TÉLESCOPES

Un **télescope Schmidt** est un type de télescope construit de sorte à garantir un important champ de vue tout en limitant les aberrations optiques. Le principe du Schmidt est très simple: il consiste à utiliser un miroir sphérique, sur une grande partie de sa surface.

Pour limiter les aberrations, on sait qu'on ne peut pas utiliser les rayons loin de l'axe. Ainsi un diaphragme placé devant le miroir supprime ces rayons.



On sait aussi que le foyer d'un miroir sphérique se trouve à mi-chemin du centre de courbure. Comme les différents faisceaux ont chacun son axe, les différents foyers se trouvent sur un cercle de même centre que le miroir, et de rayon moitié. Par conséquent, les images se formeront sur une surface sphérique. Pour rétablir la situation, il faut modifier le trajet de ces différents rayons. Ceci se fait par interposition d'une lame transparente, d'épaisseur variable. On la nomme *lame de Schmidt*.

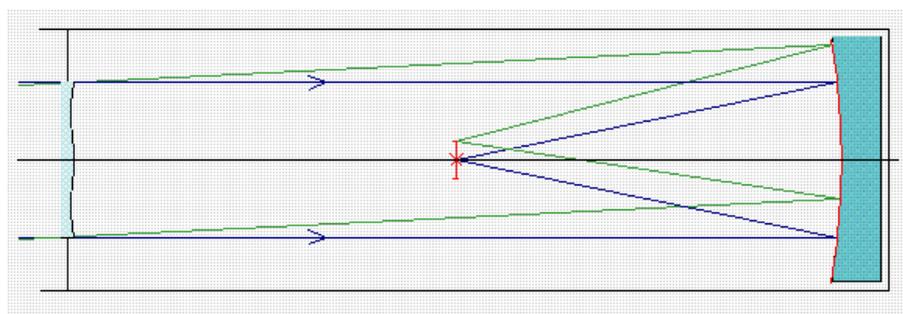


Figure 7.8 Schéma d'un télescope de Schmidt: on remarque le diaphragme et la lame d'épaisseur variable.

Le télescope **Schmidt-Cassegrain** est composé de deux miroirs, un miroir primaire concave et sphérique et un miroir secondaire convexe hyperbolique, ainsi que d'une lentille appelée lame de Schmidt.

Il s'agit d'une évolution du dispositif réflecteur de Cassegrain, développé en s'appuyant sur le télescope de Schmidt.

De conception proche du télescope de type Cassegrain, le télescope Schmidt-Cassegrain présente toutefois quelques particularités notables:

- le miroir primaire parabolique sur le télescope de Cassegrain devient un miroir sphérique, plus simple et moins coûteux à fabriquer;
- pour corriger les aberrations sphériques engendrées par le miroir primaire, une lame de Schmidt est placée en entrée du télescope.

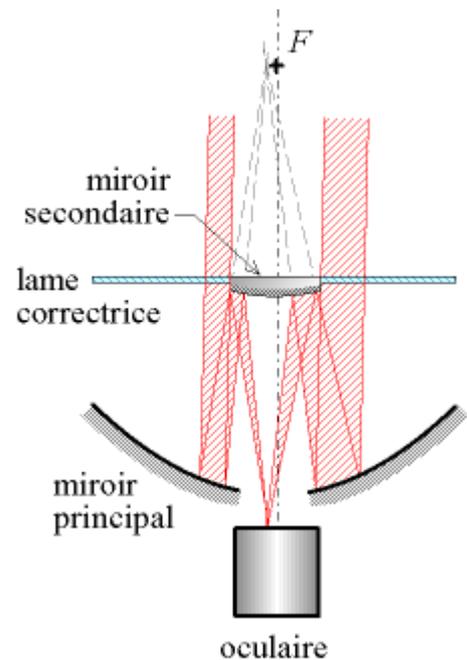


Schéma du télescope Schmidt-Cassegrain

Télescope de Maksutov. En lieu et place de la lame de Schmidt, on a un simple ménisque sphérique; c'est une lentille limitée par deux surfaces sphériques concentriques. La lumière traverse le ménisque, se réfléchit sur le miroir sphérique, repart vers le ménisque. Là, un miroir secondaire sphérique renvoie la lumière pour permettre l'observation.

Le miroir sphérique secondaire peut avoir la même courbure que le ménisque. Aussi, il suffit d'aluminiser le centre du ménisque pour réaliser le miroir secondaire. Ainsi, l'ensemble des deux miroirs et du ménisque nécessite de tailler au total trois surfaces sphériques. C'est bien plus facile que la réalisation d'un Schmidt.

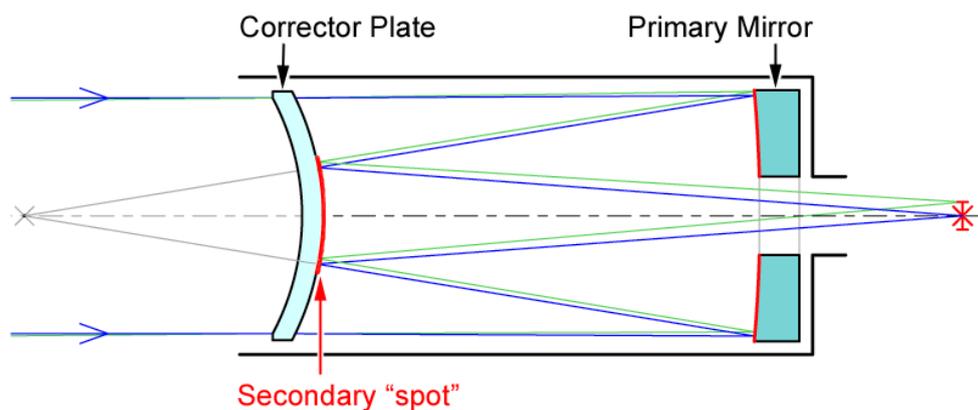


Schéma du télescope de Maksutov

7.6 LES MONTURES

La **monture** est la partie mécanique de la lunette ou du télescope, celle qui supporte l'instrument. Elle comprend un support (pied fixe) et une partie mobile permettant de diriger l'instrument vers l'objet à observer.

Depuis le début du $xx^{\text{ème}}$ siècle, on était capable de faire des photos du ciel, et cette technique a apporté des progrès immenses en astronomie. Mais la photo impose des contraintes. Pour capter l'image d'objets de faible luminosité, il faut faire une pose de longue durée (on a atteint des poses d'une dizaine d'heures). Comme la Terre tourne (elle nous entraîne en direction de l'est) et son mouvement fait tourner, en apparence, les étoiles dans le ciel en sens inverse (donc vers l'ouest). Si on laisse un télescope fixe, les étoiles défilent à grande vitesse dans son champ (vitesse multipliée par le grossissement). Il faut donc concevoir un support (la monture) qui permette de modifier sans cesse son orientation.

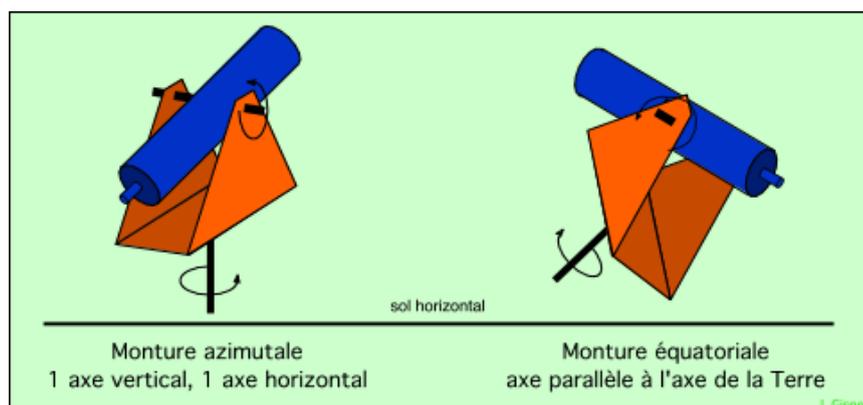
La solution la plus naturelle, pour orienter un instrument, consiste à utiliser un axe vertical et un axe horizontal. C'est la **monture alt-azimutale**. Elle est nommée ainsi car on repère la position d'un astre par l'angle qu'il fait, dans le plan horizontal, avec le méridien. Cet angle se nomme **azimut**. L'autre angle est l'**altitude**, ou distance angulaire entre l'étoile et l'horizon. Pour suivre une étoile, il faut agir sur les deux axes, ce qui présente des problèmes techniques.

Aussi, un autre problème se pose: le mouvement des astres autour des axes horizontal et vertical n'est donc pas uniforme. De plus, le champ observer présente une rotation. Si on veut faire une photo à longue pose d'un objet céleste, il va falloir faire tourner l'appareil photo autour de l'axe du télescope pour compenser ce mouvement (nommé **rotation du champ**), sinon les images successives se brouilleront. Cette rotation du champ est une difficulté supplémentaire pour l'utilisation de montures azimutales. Les trois mouvements à contrôler sur une monture azimutale ne sont pas réalisables mécaniquement.

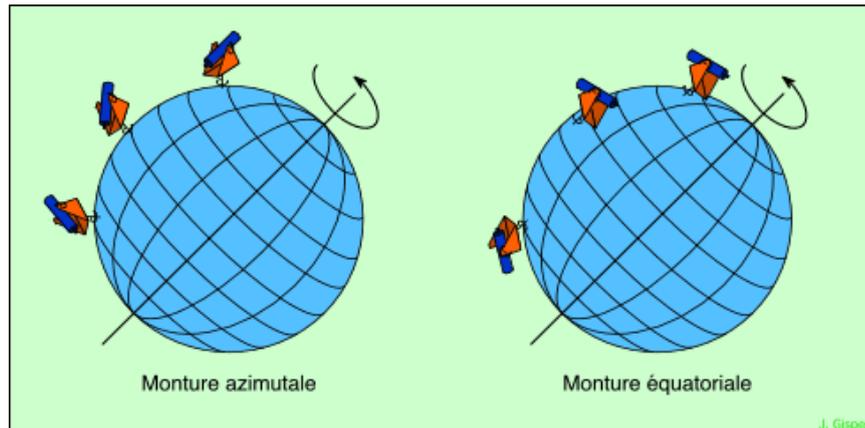
Les astronomes ont trouvé une parade: le mouvement de l'étoile étant dû à la rotation de la Terre sur son axe en 24 h (exactement 23 h 56 mn 4 s, il s'agit du temps sidéral), il suffit de faire tourner le télescope sur un axe parallèle, dans le même temps, et en sens inverse. C'est ce que fait une **monture équatoriale**.

Pour pouvoir faire des photos d'un objet précis, avec un long temps de pose, il suffit d'entraîner le télescope d'un mouvement circulaire uniforme: un mécanisme d'horlogerie (tel qu'on savait en construire dès le $XVII^{\text{ème}}$ siècle) fait parfaitement l'affaire. Sa simplicité d'entraînement a fait le succès de la monture équatoriale.

Le schéma suivant montre deux lunettes, utilisant des montures azimutale et équatoriale, dans la position qu'elles occupent par rapport au sol (le pied de la monture n'est pas représenté). A gauche, l'axe de la monture est vertical ; à droite, il est incliné suffisamment pour être parallèle à l'axe de rotation de la Terre:



Les deux types de montures



Position des lunettes en fonction de la latitude

Remarquez que les lunettes azimutales ont toutes leur axe dirigé vers le centre de la Terre, c'est-à-dire selon la verticale du lieu où elles se trouvent. Par contre, celles qui sont en monture équatoriale ont leur axe parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Enfin, aux pôles, une monture azimutale serait également équatoriale !

Sur le plan mécanique, la monture azimutale est bien plus stable. En effet, le poids du télescope repose sur l'axe vertical (verticale du lieu d'observation), par l'intermédiaire de la fourche, verticale elle aussi.

Par contre, dans la monture équatoriale, les bras de la fourche tiennent le télescope en porte-à-faux, et le poids a tendance à les faire plier. Cette position est mécaniquement très mauvaise. De plus, selon l'orientation du télescope, les contraintes mécaniques changent, et entraînent des déformations. On conçoit très facilement que le poids du télescope ne peut être trop élevé.

La monture équatoriale a été déclinée en diverses variantes, qui assurent plus ou moins bien la stabilité. Celle qui est présentée ci-bas est la **monture à fourche**.



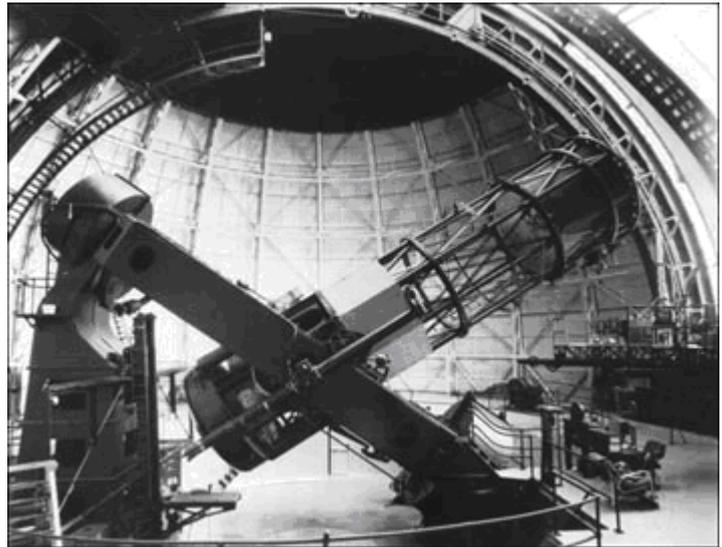
Figure 7.9 Petit télescope photographique de Maksutov (diamètre 10 cm, focale 1 m) en monture équatoriale à fourche. Le bâti est fixé sur un robuste pied de géodésie. L'entraînement est fait par secteur lisse et moteur synchrone (visibles en bas à gauche). Remarquez l'inclinaison de l'axe polaire, et le porte-à-faux de la fourche. Le poids de l'ensemble fourche-télescope est porté par les paliers de l'axe polaire, noyés dans la poutre dépassant du bâti.

Le premier télescope du Mont Wilson, de 1,5 m (60 pouces) et qui date de 1917, est en monture à fourche. Mais le miroir seul pèse 850 kg. La pression sur le palier nord serait trop forte. Le palier a donc été équipé d'un flotteur cylindrique centré sur l'axe. Ce flotteur baigne dans une cuve de mercure. Si on symétrise la fourche, on obtient la **monture à berceau**.

Le berceau est une double fourche, qui englobe le tube du télescope. L'axe polaire de l'instrument est composé de deux parties rigoureusement alignées. La première est tenue par le pilier sud (en bas et à droite sur la photo), la seconde par le pilier nord (en haut et à gauche).

L'axe polaire ayant ainsi deux appuis, est beaucoup plus stable. Mais en contrepartie, on perd la possibilité d'observer dans la région polaire, qui est obstruée par le pilier nord.

Enfin, la *monture allemande* (créée par Fraunhofer) tient le tube par un seul côté, et l'équilibre par un contre-poids. Le porte-à-faux est sur les deux axes.



Télescope *Hooker* de 2,5 m, observatoire du Mont Wilson



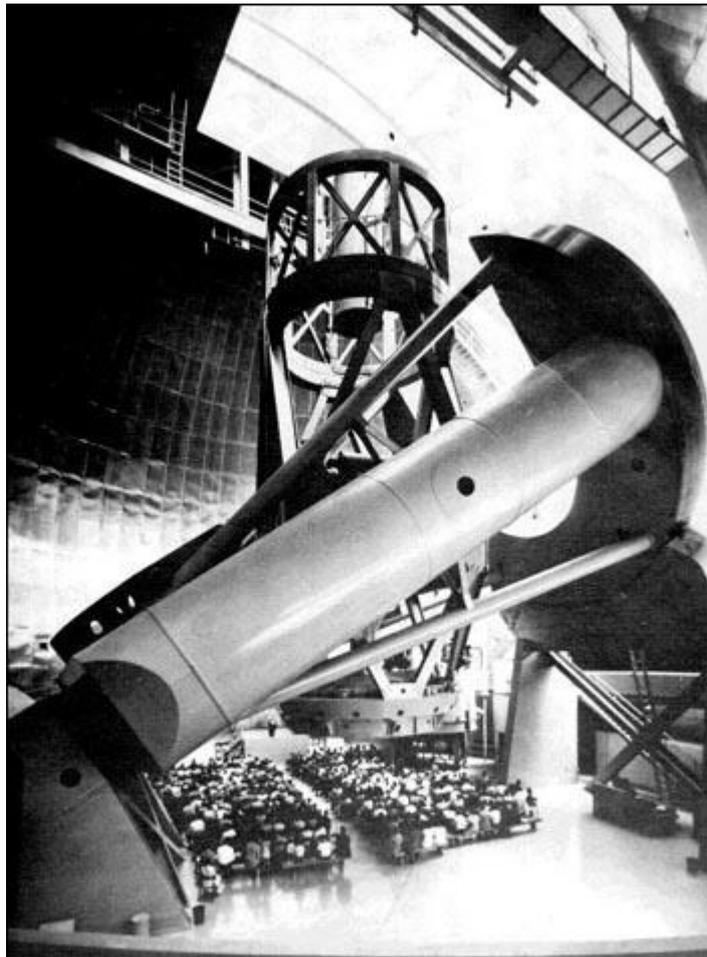
Lunette Merz-Eychens de l'Observatoire de Marseille.

Le télescope Hale (Mont Palomar)

Le télescope *Hale* est le plus grand construit avec un miroir rigide.

- son miroir est en verre rigide (épais),
- il est en monture équatoriale à berceau,
- l'entraînement est mécanique.

Il a été inauguré en 1948, et possède un pouvoir séparateur théorique de 0,024 secondes d'arc (qui n'est bien sûr pas atteint à cause de la turbulence atmosphérique). Son miroir fini pèse 14,5 tonnes (20 tonnes de pyrex brut, avant la taille) ; le tube pèse 530 tonnes. Il a fallu 8 mois de refroidissement pour éviter la formation de bulles et de pailles dans le disque de verre.



Le poids du miroir est inacceptable pour la monture, au-dessus de 5 m. C'est la raison pour laquelle le télescope du Mont Palomar est resté le plus grand du monde pendant 26 ans: il serait très difficile de réaliser un instrument plus important, en utilisant les mêmes principes. Pour réduire le poids du miroir, celui-ci a été creusé derrière, par des alvéoles en nid d'abeille (diminuant la masse en conservant la rigidité).

Remarquez la monture en *fer à cheval*, qui est une modification de la monture à berceau. Cet évidemment du berceau côté nord (à droite) permet l'observation du pôle. Mais pour l'obtenir, il a fallu supprimer le demi-axe polaire nord, et le remplacer par un roulement. La photo a été prise pendant la conférence donnée sous le télescope pour son inauguration: l'assistance, une centaine de personnes, y trouve place sans difficulté, et donne l'échelle de l'instrument.

Dernière particularité: le tube évidé (pour réduire le poids) permet de voir la cage située en haut. Un astronome peut s'y tenir pour effectuer des observations directement au foyer primaire !

Les montures alt-azimutale

En 1975, les soviétiques ont construit le télescope *Bolchoï* à Zelentchouk, de 6 mètres de diamètre. Le miroir pèse 42 tonnes. Pour résoudre les problèmes mécaniques, ils ont utilisé une **monture alt-azimutale**. Se pose alors le problème des 3 mouvements à contrôler (le troisième pour compenser la rotation du champ): mais depuis l'installation du Palomar, l'informatique avait été inventée, et l'ordinateur a été utilisé pour les piloter. Il est parfaitement capable de calculer à tout instant la vitesse à donner à chaque moteur. C'est la première révolution informatique pour l'astronomie instrumentale.

Après cette date tous les grands télescopes ont été conçus avec une monture alt-azimutale. Ce qui est aujourd'hui également le cas pour les télescopes d'amateur.

Les progrès de l'électronique permettent maintenant de produire, à des prix très accessibles, des instruments en monture azimutale pilotés par ordinateur. Un microprocesseur délivre largement assez de puissance pour assurer le suivi des deux axes.



Télescope Meade (amateur) à monture alt-azimutale.

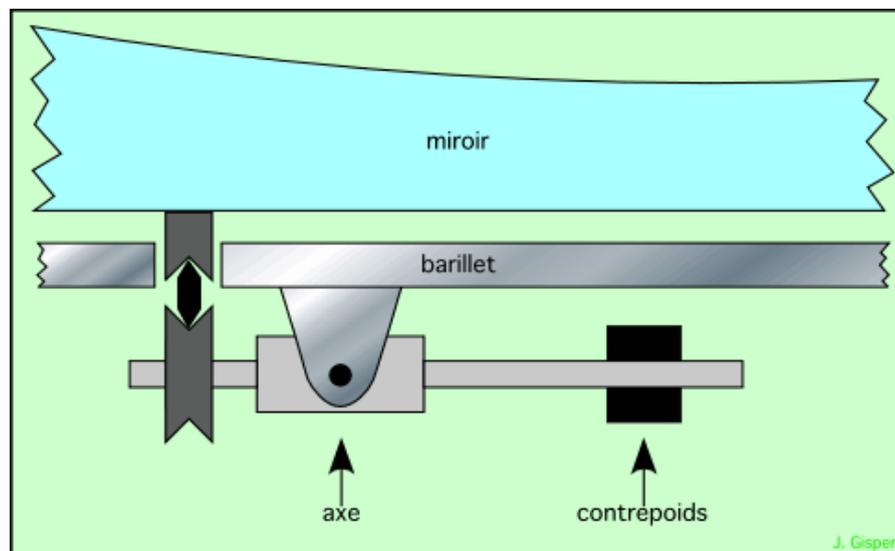
7.7 LE BARILLET

Une pièce importante d'un télescope est le barillet, support du miroir principal. Invisible, il est facilement oublié, mais son rôle est capital. Le miroir poli à grand peine à $\lambda/20$ (ou même mieux), perdra toutes ses qualités s'il n'est pas maintenu sur un support parfaitement rigide.

Pour un petit miroir, typiquement jusqu'à 30 cm, la solution est simple. Il suffit de la placer sur une surface suffisamment rigide, facile à obtenir dans ce petit diamètre. Pour des instruments plus importants, le support lui-même ne sera pas assez rigide pour garantir la forme parfaite. Le télescope devant s'orienter pour viser l'astre à étudier, le miroir ne reposera que rarement à plat sur le barillet. On peut dire qu'il sera dans une position allant d'horizontale à verticale. Et quelle que soit cette position, il faudra que les forces appliquées à l'inverse du miroir soient égales sur toute sa surface.

La première solution qui a été utilisée est un coussin d'air. Cette méthode à été utilisée en premier par Léon Foucault au milieu du XIX siècle. L'observateur dispose d'un petit tuyau communiquant avec le coussin, dans lequel il soufflait plus ou moins fort pour équilibrer les pressions. Pour être astronome, il fallait avoir du coffre!

Une autre solution est mécanique. Au lieu d'appuyer le miroir sur toute sa surface, on le pose sur des *leviers astatiques*, comme le montre la figure ci-dessous:



Bien entendu, le miroir étant assez rigide par lui-même, les pressions de deux leviers adjacents se transmettant par les propriétés mécaniques du verre. Le contrepoids est réglable ; il définit la pression sur le miroir, qui est maximale lorsque le miroir est horizontal, et nulle s'il est vertical. Il est clair que la position et le nombre de ces leviers sont déterminants pour assurer le bon équilibre du miroir, et doivent être calculés très précisément. Le miroir du télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute Provence repose sur trente leviers astatiques, qui lui assurent une stabilité parfaite.

7.8 ÉPAISSEUR ET POIDS DU MIROIR ET L'OPTIQUE ACTIVE

Le poids du miroir se justifie par la nécessité d'avoir une grande raideur et donc une surface optique parfaite, au 100'000ème de millimètre près. Pour maintenir une telle précision en cours d'utilisation (dans toutes les positions possibles), il faut que le miroir soit très rigide, donc très épais. Mais l'épaisseur augmente plus vite que le diamètre.

Soit un miroir de rayon R et d'épaisseur e .

Les déformations d s'expriment par:

$$d = c R^4 / e^2$$

où c est un facteur dépendant de la configuration et des références de position.

Si on veut obtenir la même déformation pour un miroir de rayon double kR , il faut lui donner une épaisseur e' telle que:

$$c R^4 / e^2 = c (kR)^4 / e'^2 = k^2 c R^4 / e'^2$$

d'où

$$e' = k e$$

Si le diamètre du miroir est multiplié par k , son épaisseur doit être multipliée par k^2 . Pour passer de 5 m (Mont Palomar), à 10 m, il faudrait multiplier l'épaisseur par 4. Le volume du miroir serait donc multiplié par $2 \times 2 \times 4 = 16$ fois. Donc son poids également, ce qui donnerait 230 tonnes pour le seul miroir de 10 m de diamètre. On voit bien la limite.

Mais il y en a une autre: il faut, pour constituer le disque de verre dans lequel on taillera le futur miroir, une quantité de verre énorme, qui sera coulée dans un moule à une température de l'ordre de 1.000° . Première difficulté: il se forme de petites bulles d'air dans le liquide, qui seront emprisonnées dans le verre durci. Au moment de la taille, on risque d'avoir des trous dans le miroir. Pour éviter cela, il faut que le refroidissement soit assez lent pour permettre aux bulles de monter à la surface.

Il y a encore pire: en supposant le refroidissement assez lent pour éviter les bulles, il sera encore beaucoup trop rapide. Etant donnée la grande épaisseur du disque, sa surface, en contact avec l'air ambiant, va refroidir et durcir, alors que le cœur est encore liquide. On aura alors une croûte dure, contenant un noyau liquide qui, en se refroidissant, va se contracter et diminuer de volume. Les tensions mécaniques que cela entraîne risquent de briser le disque, au mieux ; au pire, le disque résistera et se brisera pendant la taille.

Pour éviter ces tensions, il faut que toute la masse du verre se durcisse en même temps, donc que la température soit la même partout. Pour atteindre cet objectif, il faut que le refroidissement soit de moins d'un degré par jour. Le temps de refroidissement pour les 20 tonnes (brutes) du miroir de Palomar a été de 8 mois. Bien évidemment, plus la masse du miroir est grande, plus le refroidissement doit être lent. Avec ce principe de construction des miroirs, il faudrait une dizaine d'années pour refroidir un miroir de 8 mètres.

La solution à cette impasse a été trouvée en renonçant à la raideur propre du miroir, ce qui est compensé par un système de vérins actifs. Ceci a été réalisé pour la première fois en 1989 par l'ESO (European Southern Observatory), avec le *N.T.T. (New Technology Telescope)*, équipé d'un miroir de 3,6 mètres qui ne fait que 24 cm d'épaisseur, c'est donc un miroir mince et relativement souple. La révolution se place dans le support de ce miroir, qui est constitué de 75 vérins commandés en temps réel par un ordinateur. Toute altération très légère de la forme du miroir, mesurée par une méthode optique précise, est immédiatement corrigée par une action sur les vérins, qui modifient la pression exercée sur le verre.

Cette technique, nommée **optique active**, est maintenant utilisée sur tous les grands télescopes, le coût de l'ordinateur de contrôle étant négligeable devant les économies faites par ailleurs. En particulier, citons le *V.L.T.* (*Very Large Telescope*, européen). C'est un ensemble de 4 télescopes de 8,20 m de diamètre chacun.

Le réglage des vérins n'est pas fait une fois pour toute; lorsqu'on déplace l'orientation du télescope, les forces changent; s'il y a un peu de vent, les forces changent. Chaque vérin doit être réglé au moins une fois par seconde. Le problème est alors de savoir comment calculer les forces. Ceci se fait en observant une étoile du champ: on prélève l'image de cette étoile par un petit miroir en haut du tube du télescope, et on l'envoie vers une camera CCD. Une telle caméra est une grille de minuscules cellules photoélectriques, disposées comme une grille de mots croisés (chaque cellule produit un pixel de l'image). A un instant donné, l'image de l'étoile se trouve sur la cellule D5 par exemple. Une fraction de seconde plus tard, elle passe sur la cellule D6. L'ordinateur auquel est connectée cette caméra détecte ce changement, et calcule les pressions à exercer par les vérins pour ramener l'image en D5.

Miroirs composites

Une autre solution est envisageable pour la construction de grands miroirs. Au lieu de couler un disque de la taille requise, il s'agit de juxtaposer de petits miroirs pour en composer un grand. On le réalise donc par pavage. La difficulté est d'ajuster les composants, de telle manière qu'ils forment une seule surface optique. C'est un système de supports et vérins de type optique active qui permet d'y parvenir.

Les américains l'ont adopté pour construire deux télescopes qui surpassent ceux du VLT en diamètre, et qui ont pris le nom du sponsor Keck (*Keck Foundation*). Leurs miroirs ont 10 m de diamètre, et sont constitués chacun de 36 miroirs hexagonaux de 1,80 m.

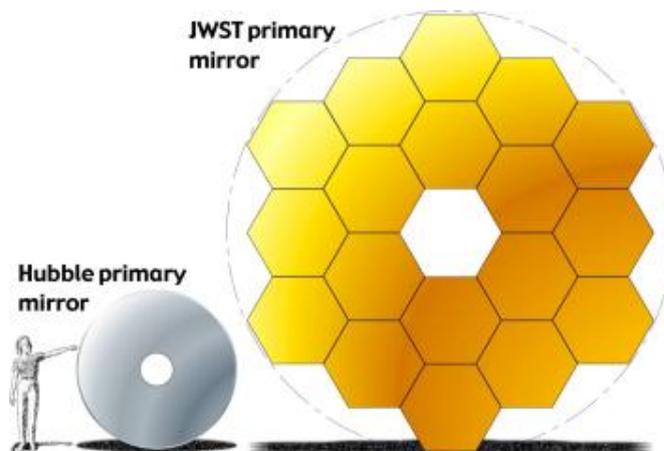


Figure 7.10 Le successeur du télescope spatial Hubble aura un miroir primaire composite de 18 segments hexagonaux.

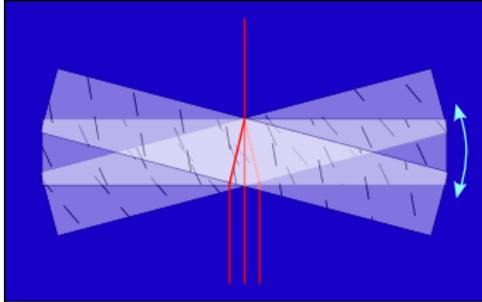
Pour atteindre le pouvoir séparateur théorique des instruments, une solution évidente vient à l'esprit: supprimer l'atmosphère en plaçant le télescope en orbite autour de la Terre: c'est ce qui a été fait avec le *H.S.T.* (*Hubble Space Telescope*). Son miroir de seulement 2,4 m de diamètre nous a donné les images les plus fines que nous ayons jamais eues, car il atteint 0,05" d'arc de pouvoir séparateur: c'est dix fois meilleur que les meilleures images que l'on puisse obtenir au sol.

7.9 L'OPTIQUE ADAPTATIVE

Faut-il donc désormais envoyer les instruments dans l'espace, avec les difficultés de construction, de maintenance, et le prix que cela entraîne ? La réponse était *oui* il y a quelques années.

Mais maintenant, on peut dire *non* (presque). C'est encore l'électronique et l'informatique qui viennent à notre secours, avec une méthode semblable à l'optique active qu'on a vue plus haut.

La turbulence atmosphérique et ses effets optiques, contre lesquels il faut lutter, ont été modélisés par Kolmogorov dès 1941, à partir de la structure de l'atmosphère et des échanges d'énergie entre les différentes couches, et aux différentes échelles.



Représentons ici l'atmosphère de manière très simplifiée, sous la forme d'une couche unique oscillant autour d'un point. On la représente par une plaque de verre assez épaisse. Lorsque la plaque est horizontale, le faisceau la traverse sans déviation. Lorsqu'elle est inclinée, le faisceau est dévié du côté de l'inclinaison.

L'image de l'étoile donnée par ce faisceau oscille donc de part et d'autre de la position centrale.

Ce schéma montre deux lames de verre identiques: la lame supérieure modélise l'atmosphère, et oscille aléatoirement comme on l'a vu plus haut.

La lame inférieure a été ajoutée, et on la force à osciller comme la première, mais en opposition de phase: lorsque la lame supérieure penche à droite, la lame inférieure doit pencher à gauche d'un même angle.

La déviation du faisceau produite par la lame supérieure est exactement annulée par une déviation opposée en bas. Au bout du compte, le faisceau reste stable pour l'observateur qui se situe en bas.

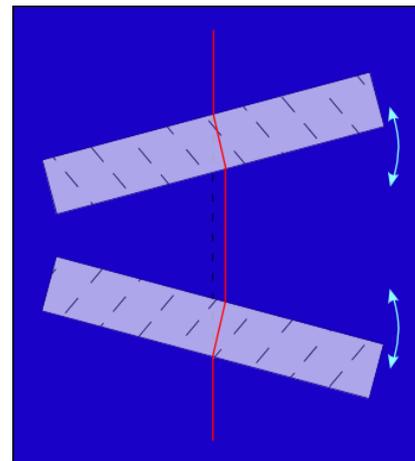
Ce n'est pas la seule déformation due à la turbulence: l'atmosphère se comporte aussi comme si la plaque de verre se gondolait. Il faut donc, en plus, imposer à la plaque inférieure des déformations semblables et opposées.

On peut considérer que l'onde nous arrivant d'une étoile est plane. La turbulence atmosphérique (le *seeing*) que nous venons de décrire cabosse cette onde, et l'optique adaptative la décabosse.

L'**optique adaptative** (*AO, Adaptive Optics*) a donc pour but la correction en temps réel des déformations du front d'onde incident, dues à la turbulence atmosphérique, en leur opposant la contre-déformation d'un **miroir déformable**.

Un système d'optique adaptative comprend les éléments suivants:

1. **Miroir plan orientable**: il corrige les défauts de pointage et le basculement de l'image
2. **Miroir déformable**: il corrige jusqu'à un certain ordre les perturbations du front d'onde



3. **Boucle d'asservissement:** électronique et ordinateur rapide assurant la commande des miroirs déformables, avec une fréquence de l'ordre de la centaine de Hz.

L'optique adaptative permet de retrouver une tache de diffraction, de diamètre angulaire défini par le collecteur primaire. Cette performance dépend du nombre d'éléments d'images analysés sur le front d'onde, du nombre d'actuateurs mis en œuvre, ainsi que de la fréquence de correction.

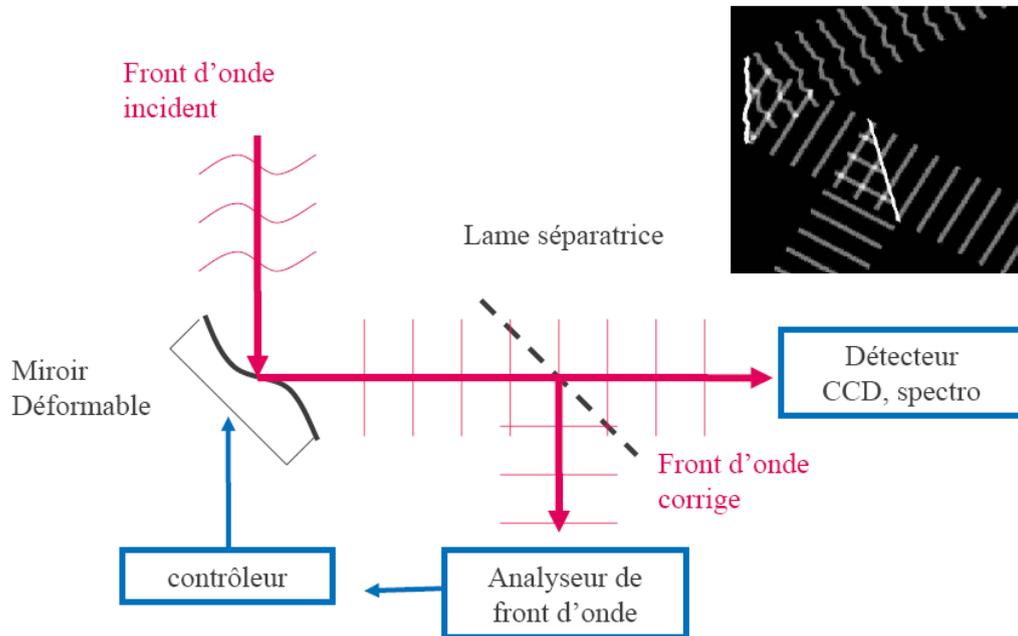


Figure 7.11 Eléments fonctionnels d'un système d'optique adaptative. On place une caméra (analyseur de front d'onde) sur le bord de l'image obtenue par le télescope; l'image d'une étoile brillante qui servira de guide tombe sur l'un des éléments sensibles de la caméra. L'ordinateur détecte cette image. Une fraction de seconde plus tard, l'image se déplace à cause de la turbulence atmosphérique. Elle tombe sur un autre élément sensible. L'ordinateur le détecte, et commande une pression des vérins pour déformer le miroir afin de ramener l'image à l'endroit où elle était avant.

Bien que le principe soit le même (déformer un miroir par des vérins, commandés par ordinateur), la différence entre optique active et optique adaptative tient dans la nature des déformations corrigées:

- **l'optique active** s'applique au miroir principal, et corrige ses déformations provoquées par le vent, par sa position par rapport à la verticale etc.; la fréquence des ajustements est de l'ordre de dix par seconde ;
- **l'optique adaptative** corrige les effets de l'atmosphère, qui sont plus rapides: il faut agir sur le miroir 100 fois par seconde. Cette fois, c'est un miroir successif dans le train optique du télescope (par exemple le miroir secondaire) qui est contrôlé.

Sans optique adaptative, un miroir de 8,2 m situé au Cerro Paranal ne donnerait pas de détails plus fins qu'un télescope d'amateur de 45 cm...

L'optique adaptative ne fait pas partie de la structure principale des télescopes. Ceci permet de modifier les systèmes au cours du temps. Un système nommé *MACAO (Multi-Application Curvature Adaptive Optics)* a été installé au foyer Coudé de chacun des 4 grands télescopes (le foyer Coudé est réservé pour l'interférométrie).

La performance d'un système d'optique adaptative est indiquée par le **rapport** (ou **ratio**) de **Strehl**, qui est le rapport entre la hauteur de la **PSF** totale (inclus l'effet de l'atmosphère) et celle

de qu'on aurait uniquement à cause de la diffraction provoqués par l'ouverture. La PSF est étalée par la turbulence, et l'optique adaptative la remet en forme. Un ratio de 100 % serait une correction parfaite. Le système MACAO atteint 55 %.

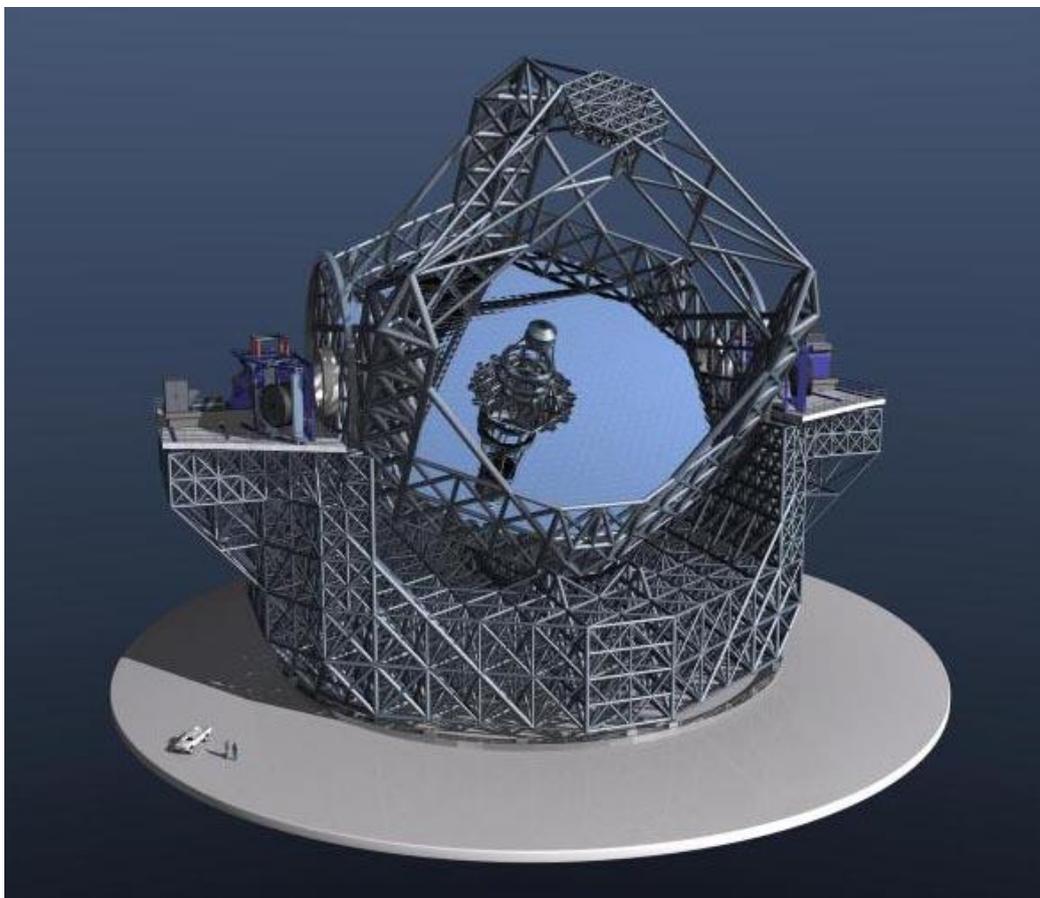
Un autre système d'optique adaptative a été installé à la fin de 2001 sur un des télescopes du VLT: c'est le système NAOS (*Nasmyth Adaptive Optics System*), au foyer Nasmyth comme son nom l'indique. Le pouvoir séparateur atteint est de 0,015" d'arc, prenant avantage du diamètre de 8 mètres du miroir primaire, alors que le télescope spatial, dont le miroir fait 2,5 m, n'atteint que 0,05".

7.10 L'AVENIR DES GRANDS TÉLESCOPES

Un projet européen nommé *E-ELT* (*European Extremely Large Telescope*), est actuellement en développement, concernant un télescope d'environ 42 mètres de diamètre. Naturellement, il n'est pas question de réaliser un miroir monolithique, et ce grand miroir devait être composite.

Le but premier de ces projets est l'étude des planètes extrasolaires, domaine qui a été ouvert en 1995 avec la découverte de 51 Pegasi B, et qui a littéralement explosé depuis, à tel point que l'on connaît maintenant plus de 200 planètes autour d'autres étoiles. Mais elles ont été découvertes par des moyens indirects, qui ne permettent pas d'en connaître les propriétés physiques. C'est à cette tâche que l'on doit s'atteler maintenant, avec bien évidemment des outils adaptés à créer. L'étude d'une exoplanète nécessite l'observation en infrarouge, qui permet d'augmenter considérablement le contraste avec l'étoile centrale. Pour cette raison, l'E-ELT sera adapté au visible et à l'infrarouge.

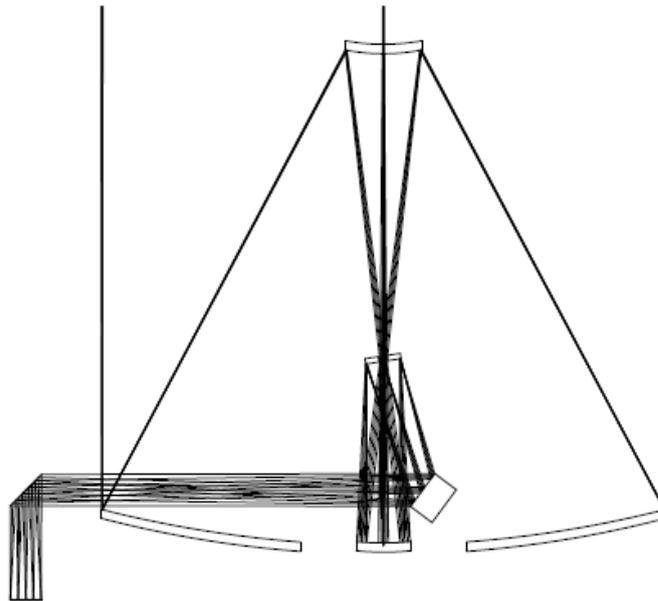
L'E-ELT sera constitué d'un système complexe de 5 miroirs. Le **primaire** fera environ 42 mètres de diamètre, et sera composé de 906 segments de 1,45 m ajustés par la méthode d'optique active. Le miroir **secondaire** mesurera 6 m et sera monolithique. La masse mobile de l'ensemble est de 5.500 tonnes. Toute la construction demande une **mécanique de très haute précision**.



Le projet du télescope E-ELT, montrant son miroir principal de 42 mètres et sa structure. Une voiture et deux personnes donnent l'échelle.

Les deux plateformes visibles sur les côtés permettront d'installer des instruments lourds et performants, comme par exemple des spectrographes. Les instruments à placer derrière le télescope seront facilement interchangeables, permettant d'adapter rapidement le télescope à des observations de type nouveau.

Pour atteindre le pouvoir séparateur théorique de l'instrument, l'optique adaptative est indispensable. Un miroir tertiaire relaiera l'image vers le système adaptatif ; ce miroir ne fera plus que 4,20 m de diamètre. Le système adaptatif lui-même est constitué de deux miroirs. Le premier miroir adaptatif (quatrième du télescope) mesurera 2,50 m de diamètre, et sera soutenu par plus de 5.000 vérins, dont la pression sera actualisée 100 fois par seconde par l'ordinateur de contrôle. Le cinquième miroir aura pour rôle de parfaire la correction de la turbulence.



La complexe combinaison à cinq miroirs permettra une parfaite correction des diverses aberrations, pour obtenir un instrument quasi parfait.

A côté du projet européen, les américains ont deux projets en cours: le *TMT* (*Thirty Meter Telescope*) qui comme son nom l'indique devrait avoir un miroir de 30 mètres, et le *GMT* (*Giant Magellanic Telescope*), un télescope de 21,50 m.

7.11 EXERCICES

Un télescope de type Cassegrain est constitué d'un miroir primaire avec une focale de 1,2 m. Le miroir secondaire se trouve à 1 m du primaire et forme l'image d'un objet distant au vertex du primaire. Une ouverture dans le primaire permet de voir l'image avec un oculaire de 33 mm de focale. Calculer la focale du secondaire, celle du télescope, ainsi que le grossissement de l'instrument.

8. SYSTÈMES DE LENTILLES ACHROMATIQUES

8.1 L'ABERRATION CHROMATIQUE

La distance focale d'une lentille mince d'indice n et dont les faces ont pour rayons R_1 et R_2 est donnée par la relation

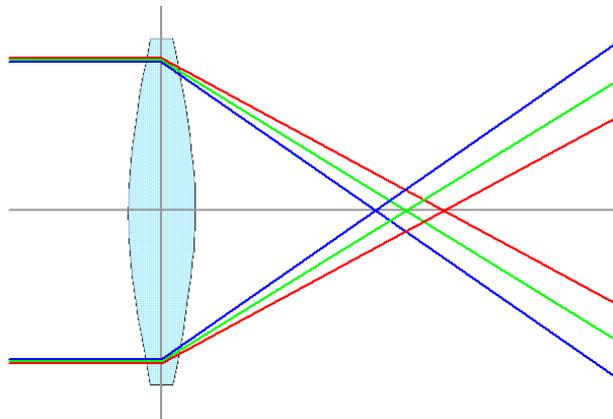
$$D = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

La vergence peut donc être prise comme

$$D = \frac{1}{f} = \rho (n-1) \quad (8.1)$$

où ρ est une constante dépendante de la géométrie (les rayons de courbure) de la lentille.

Comme l'indice est fonction (non linéaire) de la longueur d'onde, la distance focale varie avec la couleur de la lumière. Cette aberration est fonction du matériau constituant la lentille et ne peut être diminuée en diaphragmant celle-ci.



Pour définir le pouvoir dispersif d'un verre, on mesure l'indice pour trois radiations caractéristiques:

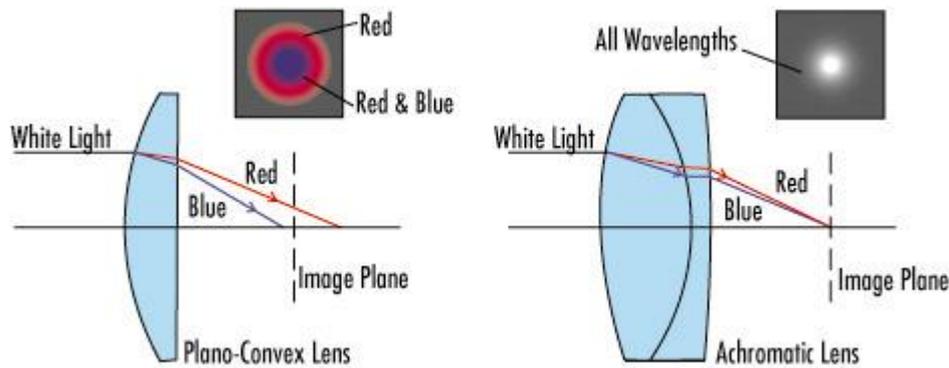
- raie C de l'hydrogène 656,3 nm (rouge),
- raie D de l'hélium 587,6 nm (jaune),
- raie F de l'hydrogène à 486 (bleu), 1 nm.

On définit le nombre d'Abbe V par le rapport:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (8.2)$$

8.2 CORRECTION DES ABERRATIONS CHROMATIQUES AVEC UN DOUBLET ACCOLE

On peut effectuer une très bonne correction en utilisant deux lentilles minces accolées, constituées de **deux matériaux différents**. Le principe est d'égaliser les focales de ce doublet pour les deux couleurs extrêmes rouge et bleu.



La vergence d'un tel ensemble est:

$$D = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = D_1 + D_2 = \rho_1(n_1 - 1) + \rho_2(n_2 - 1) \quad (8.3)$$

La variation de vergence pour les raies F et C est donc

$$\Delta D_{F-C} = r_1(n_{1F} - n_{1C}) + r_2(n_{2F} - n_{2C}) \quad (8.4)$$

De plus les vergences moyennes (raie D) sont:

$$D_{1D} = r_1 \cdot (n_{1D} - 1)$$

$$D_{2D} = r_2 \cdot (n_{2D} - 1)$$

on a donc

$$r_1 = D_{1D} / (n_{1D} - 1)$$

$$r_2 = D_{2D} / (n_{2D} - 1)$$

et ensuite

$$\Delta D_{F-C} = D_{1D} / (n_{1D} - 1) \cdot (n_{1F} - n_{1C}) + D_{2D} / (n_{2D} - 1) \cdot (n_{2F} - n_{2C})$$

et en introduisant les nombres de Abbe, on obtient:

$$\Delta D_{F-C} = D_{1D} / V_1 + D_{2D} / V_2$$

Les distances focales pour les raies C et F seront identiques si

$$D_{1D} / V_1 + D_{2D} / V_2 = 0$$

Par ailleurs on a aussi

$$D_D = D_{1D} + D_{2D}$$

La solution du système de ces deux équations donne:

$$D_{1D} = D_D V_1 / (V_1 - V_2) \quad (8.5)$$

$$D_{2D} = - D_D V_2 / (V_1 - V_2)$$

On trouve ainsi que les deux lentilles accolées

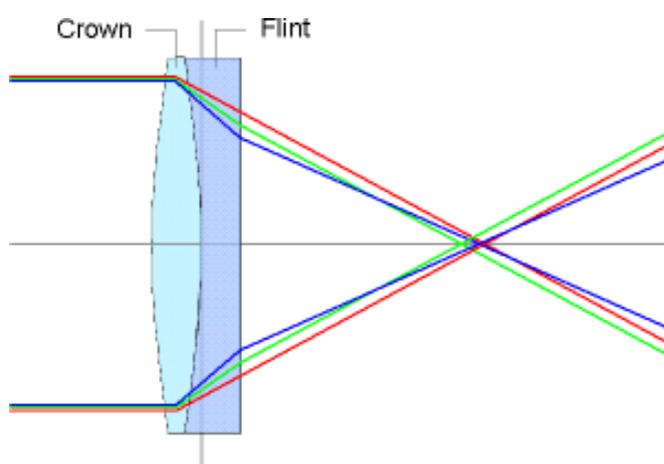
1. doivent être **faites avec des verres différents** pour que V_1 soit $\neq V_2$,
2. être de natures différentes (**convergente et divergente**).

8.3 LE SPECTRE SECONDAIRE

Dans l'analyse précédente, seuls les rayons C et F étaient focalisés au même point, et la raie d a été introduite pour établir la focale du doublet.

Il n'est pas possible pour toutes les longueurs d'onde traversant un achromat d'être focalisées au même point. Le chromatisme résiduel est appelé **spectre secondaire**.

Éliminer le spectre secondaire peut s'avérer particulièrement pénible si l'on impose l'utilisation de verres courants. La combinaison de la fluorine (CaF₂) et d'un verre approprié permet d'achromatiser un doublet pour trois longueurs d'onde et de réduire fortement le spectre secondaire. Plus souvent, on utilisera des triplets pour corriger trois ou même quatre longueurs d'onde.



Dans cette illustration on a fait coïncider les focales pour les couleurs extrêmes rouge et bleu. Toutefois le vert et le jaune, pourtant intermédiaires, sont moins corrigés. (la marche des rayons est un peu exagérée à propos).

8.4 DOUBLETS ACHROMATIQUES A LENTILLES SEPARÉES

Il est aussi possible d'achromatiser un doublet comportant **deux lentilles non accolées, constituées d'un même verre**.

Rappelons que la focale d'un tel ensemble est donnée par

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{d}{f_1 f_2}$$

Retournons à l'équation (8.1) et écrivons

$$D = \frac{1}{f} = \rho_1(n-1) + \rho_2(n-1) - d\rho_1(n-1)\rho_2(n-1) = (\rho_1 + \rho_2)(n-1) - d\rho_1\rho_2(n-1)^2 \quad (8.6)$$

On peut ainsi connaître la focale du doublet pour le rouge (f_C) et celle pour le bleu (f_F) en introduisant les valeurs appropriées des indices, c'est-à-dire n_{1C} , n_{1F} , n_{2C} , et n_{2F} , respectivement.

On veut avoir $f_C = f_F$, c'est dire

$$\frac{1}{f_C} = \frac{1}{f_F} = (\rho_1 + \rho_2)(n_C - 1) - d\rho_1\rho_2(n_C - 1)^2 = (\rho_1 + \rho_2)(n_F - 1) - d\rho_1\rho_2(n_F - 1)^2$$

En prenant comme référence le jaune (raie D, couleur médiane), pour lequel on a

$$\frac{1}{f_{1D}} = \rho_1 (n_D - 1)$$

$$\frac{1}{f_{2D}} = \rho_2 (n_D - 1)$$

On peut remplacer ρ_1 et ρ_2 dans (8.6) et on obtient pour d

$$d = \frac{(f_{1D} - f_{2D})(n_D - 1)}{n_F + n_C - 2}$$

En supposant $n_D = (n_C + n_F)/2$ on a finalement

$$d = \frac{f_{1D} + f_{2D}}{2} \quad (8.7)$$

On trouve ainsi que le doublet devient achromatique si f_1 et f_2 sont comptés à la même couleur médiane et la **séparation** entre les deux lentilles est égale à la **moyenne des focales**.

8.5 EXERCICES

1. Dimensionner un doublet achromatique accolé de focale 20 cm en utilisant les verres 517/645 et 620/380. Supposer la lentille en crown biconvexe. Déterminer les rayons de courbures et les focales du doublet pour les raies D, C et F.
2. Dimensionner un doublet achromatique accolé de focale -10 cm en utilisant les verres 573/574 et 689/312. Supposer la lentille en crown biconcave. Déterminer les rayons de courbures et les focales du doublet pour les raies D, C et F.

9. OBJECTIFS

Un **objectif** est un système optique constitué d'un ensemble de lentilles optiques simples ou composées (doublets ou triplets) en verre minéral ou organique qui forment une succession de dioptries sphériques, asphériques ou plans qui caractérise le premier élément de l'instrument d'optique qui reçoit les rayons lumineux émanant de l'**objet** (d'où l'origine étymologique du mot).

Par définition, dans un instrument d'optique, les rayons lumineux entrent toujours par l'objectif. Les rayons lumineux, issus de cet objet observé distant traversent l'objectif et en forment une image réelle.

Quand l'objet est situé à grande distance, voire à l'infini, l'image se forme au foyer image de l'objectif. Dans le cas d'un objectif simple et peu épais, la focale est sensiblement égale à la distance qui sépare le foyer du centre de l'objectif (distance frontale image). Pour un même objet observé, plus la focale est longue et plus l'image obtenue est grande.



Objectif à focale fixe Nikon 50 mm $f/1.8$

9.1 PROFONDEUR DE CHAMP

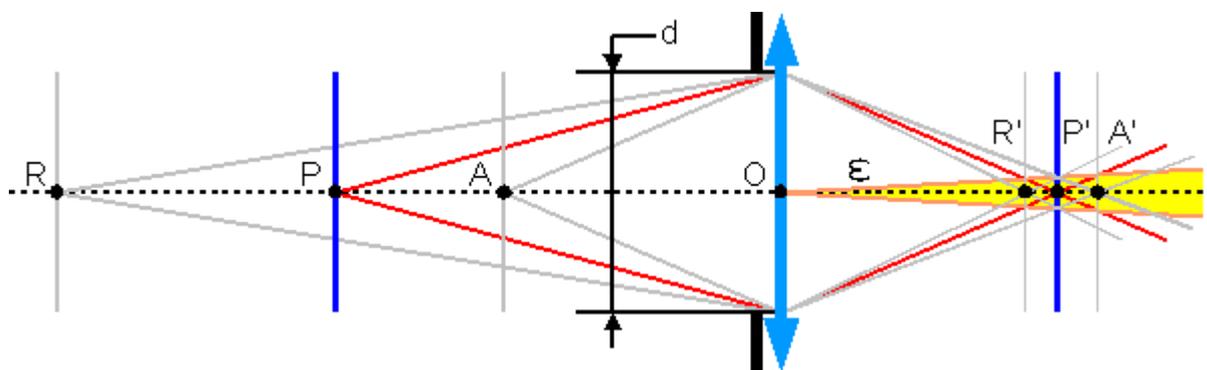
La profondeur de champ correspond à la zone de l'espace dans laquelle doit se trouver le sujet à photographier pour que l'on puisse en obtenir une image que l'œil (ou un autre système optique) acceptera comme nette.

L'étendue de cette zone dépend de nombreux paramètres qui interviennent au moment de la prise de vue (notamment la distance de mise au point, l'ouverture du diaphragme et le format de la surface sensible). En photographie la maîtrise de la profondeur de champ est absolument indispensable pour la réussite des prises de vues, en particulier pour le portrait, la macrophotographie, le paysage, la publicité, etc.. Un objectif avec une grande profondeur de champ peut donc capturer de manière nette une cible qui se déplace vers l'objectif.

Conventions et notations

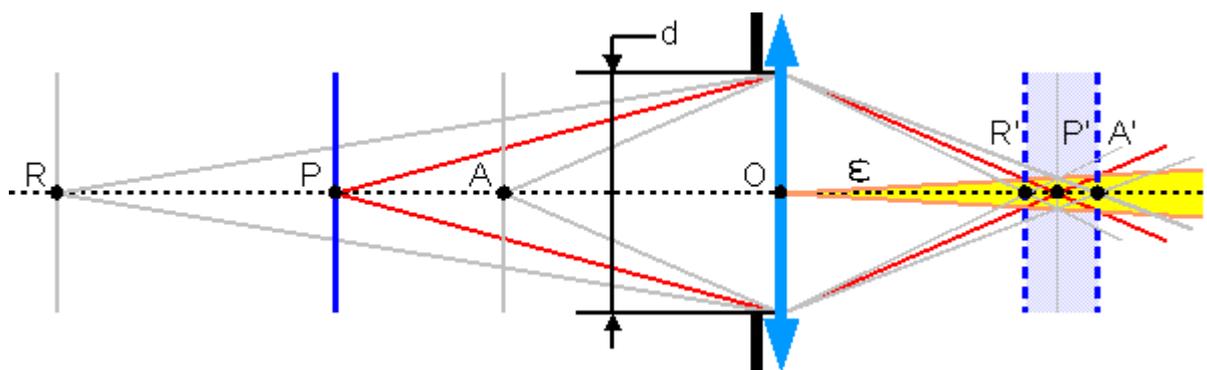
Un objectif parfait muni d'un diaphragme de diamètre d fait correspondre aux points R , P et A leurs images respectives R' , P' et A' .

Le cône d'ouverture ϵ indique la limite angulaire de netteté admise: les détails des images vus depuis O sous un angle inférieur ou égal à ϵ sont considérés comme nets.



Les points R' , P' et A' sont les conjugués respectifs des points R , P et A .

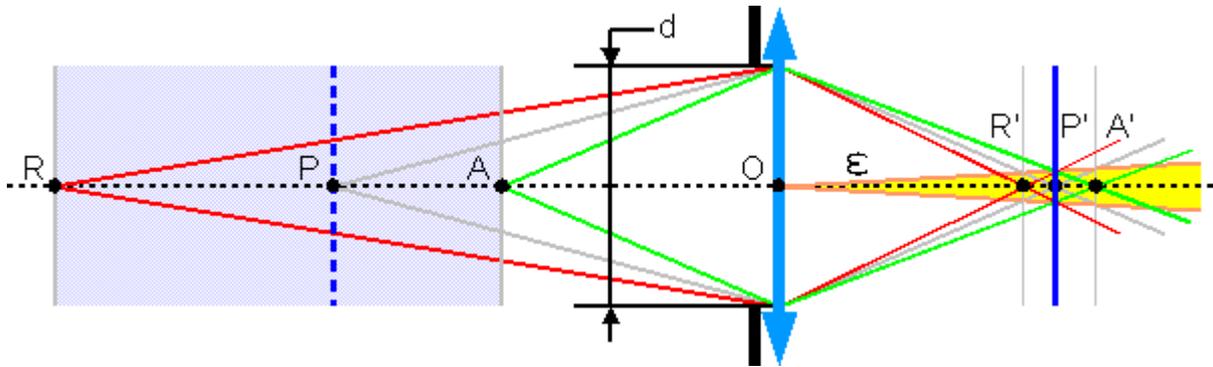
La mise au point est faite sur P où se trouve l'objet. La surface sensible devrait théoriquement se trouver en P' mais en fait elle peut occuper n'importe quelle position entre A' et P' sans que le diamètre de la tache-image dépasse la limite choisie.



La profondeur de foyer est généralement très faible et il faut donc respecter des tolérances de fabrication très précises au niveau des boîtiers et des montures d'objectifs. Dans les appareils reflex elle intervient deux fois, pour la mise en position de la surface sensible et pour celle du

dépoli de visée. Les constructeurs doivent également prendre des dispositions pour assurer le maintien du film dont les défauts de planéité provoqueraient l'apparition de zones floues, s'ils étaient supérieurs à la profondeur de foyer.

La mise au point est faite sur **P** et la surface sensible se trouve donc en **P'** mais l'objet n'est plus plan. Des points de cet objet tels que **A** et **R** donnent des taches-images dont le diamètre reste acceptable ; l'image de tout objet à trois dimensions situé entre les plans perpendiculaires à l'axe optique passant par **A** et **R** sera nette.



Si le diamètre du diaphragme diminue, les cônes formés par les faisceaux lumineux sont moins ouverts, la profondeur de foyer **A' R'** et la profondeur de champ **A R** augmentent ensemble. Le diaphragme est donc un **organe de mise au point** puisqu'il agit directement sur l'étendue de la zone de netteté. Nous n'allons pas tarder à y revenir.

9.1.1 Hypothèses générales pour les calculs

- Nous ne considérerons ici que les causes de flou qui interviennent au moment de la prise de vue et relèvent des lois de l'optique géométrique. Il est bien entendu qu'en pratique, les causes de dégradation des images sont cumulatives ; toute perte de netteté équivaut une réduction apparente de la profondeur de champ.
- L'objectif sera considéré comme une lentille mince parfaite à toutes les ouvertures et donc capable de donner, d'une source ponctuelle, une image elle aussi ponctuelle. Les lecteurs courageux retrouveront exactement les mêmes résultats en utilisant non plus le centre optique d'une lentille mince, mais les points nodaux d'un système centré. Notons aussi que plus la qualité d'un objectif est élevée, plus les calculs de profondeur de champ sont fiables.
- Pour les images numériques, nous supposons en outre que le capteur est d'une qualité suffisante pour utiliser au mieux l'image fournie par l'objectif et que par ailleurs les images n'ont subi aucun traitement susceptible de modifier leur netteté apparente.

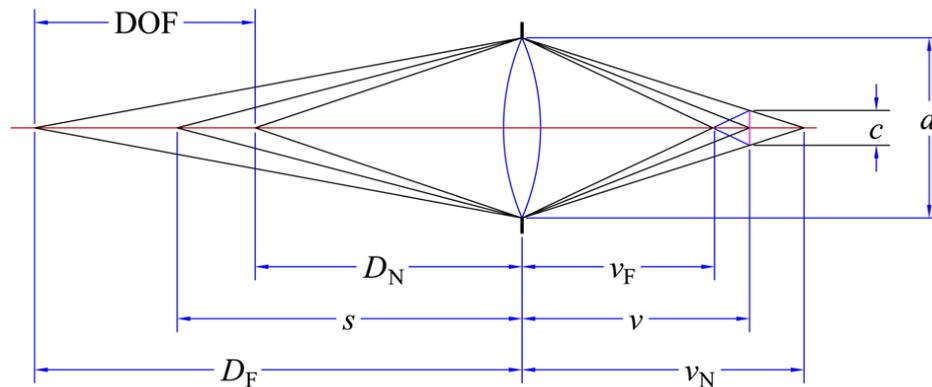


Figure 9.1 Illustration de la profondeur de champ (ici notée DOF, *depth of field*)

A partir de la similarité des triangles on a:

$$\frac{v_N - v}{v_N} = \frac{c}{d}$$

avec l'introduction du **nombre-f** N :

$$N = \frac{f}{d};$$

on obtient donc:

$$v_N = \frac{fv}{f - Nc} \quad v_F = \frac{fv}{f + Nc}$$

- Plus la distance focale est réduite, plus la profondeur de champ est élevée.
- Plus l'objectif est éloigné de l'objet, plus la profondeur de champ est élevée. Des bagues de gros-plan et un macro objectif réduisent la profondeur de champ.
- Plus l'ouverture est petite, plus la profondeur de champ est élevée. Une petite ouverture et un éclairage intense facilitent la mise au point.

9.1.2 Distance hyperfocale

La profondeur de champ s'étend normalement entre une limite proche et une limite lointaine. Que se passe-t-il lorsque la seconde se trouve rejetée à l'infini ?

En reprenant les formules,

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{p} + \frac{\epsilon n}{f} \quad \text{et} \quad \frac{1}{r} = \frac{1}{p} - \frac{\epsilon n}{f}$$

Si r tend vers l'infini, la seconde donne:

$$\frac{1}{r} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{1}{p} = \frac{\epsilon n}{f} \quad \rightarrow \quad p = \frac{f}{\epsilon n}$$

Le report de p dans la première fournit la relation avec a :

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{p} + \frac{\epsilon n}{f} = \frac{2\epsilon n}{f} \quad \rightarrow \quad 2a = \frac{f}{\epsilon n}$$

Finalement:

$$p = 2a \quad \text{et} \quad n = \frac{f}{2a\epsilon}$$

Il en résulte que si la netteté doit s'étendre d'une distance a jusqu'à l'infini:

- la première chose à faire est de régler la mise au point sur $2a$;
- la seconde est de déterminer l'ouverture du diaphragme en fonction du degré de netteté souhaité.

Avec un objectif de 50 mm de focale (0,05 m), une profondeur de champ s'étendant de 5 m à l'infini et une limite de netteté de 1/1500, la mise au point sera faite sur 10 m et le diaphragme à prendre sera:

$$n = \frac{0,05 \cdot 1500}{10} = 7,5 \approx 8$$

C'est bien ce qui est indiqué sur l'échelle de profondeur de champ:



En passant au diaphragme 16, les distances peuvent être divisées par 2 et, avec une mise au point sur 5 m, la netteté obtenue s'étendra de 2,5 m jusqu'à l'infini.



Par convention, on appelle **distance hyperfocale** la quantité:

$$h = \frac{f}{\epsilon n}$$

Contrairement à la focale, l'hyperfocale ne caractérise pas un objectif donné, mais un ensemble de trois paramètres que sont la focale, l'ouverture du diaphragme et le degré de netteté choisi arbitrairement.

Lorsque l'on met au point sur l'infini, la netteté commence à l'hyperfocale. Sur l'échelle de profondeur de champ de notre objectif, h se lit directement en face des graduations du diaphragme.



On lit 5 m à 16, 10 m à 8 et, en prolongeant la série, on déduit 20 m à 4 ou 40 m à 2, ouverture maximale de cet objectif.

Au diaphragme 16, mise au point faite sur l'infini, la netteté commence à 5 m. En mettant au point sur 5 m, elle s'étend de 2,5 m à l'infini. Le fait de mettre au point sur l'infini est presque toujours une erreur et constitue, d'une certaine manière, un « gaspillage » des possibilités de l'objectif. Pour un paysage, par exemple, l'œil est très exigeant pour la netteté des objets situés à quelques mètres ou dizaines de mètres mais beaucoup plus tolérant pour celle des lointains, ce qui rend encore plus logique une mise au point au voisinage de l'hyperfocale.

Une mise au point *a priori* sur l'hyperfocale a permis à beaucoup de grands photographes, par le passé, de gagner un temps précieux lorsqu'ils faisaient des photos sur le vif: ils n'avaient ainsi plus besoin de se préoccuper de la mise au point. Aujourd'hui, cette notion est toujours utile aux photographes qui ont l'habitude d'opérer avec un appareil non automatique ou avec un automatisme à priorité diaphragme: même si l'appareil se charge de la mise au point, le fait de fixer le diaphragme pour disposer dans tous les cas d'une profondeur de champ suffisante améliore les chances de réussite.

Les appareils à mise au point fixe sont réglés une fois pour toute sur l'hyperfocale qui correspond à la plus grande ouverture de leur diaphragme. Il faut donc s'attendre à ce qu'ils donnent leurs moins mauvais résultats à des distances de l'ordre de 3 à 5 m.

Enfin, en fonction de h , les formules de la profondeur de champ s'écrivent sous une forme qui n'est pas sans rappeler la formule de Snell-Descartes:

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{p} + \frac{1}{h} \quad \text{et} \quad \frac{1}{r} = \frac{1}{p} - \frac{1}{h}$$

ou si l'on préfère:

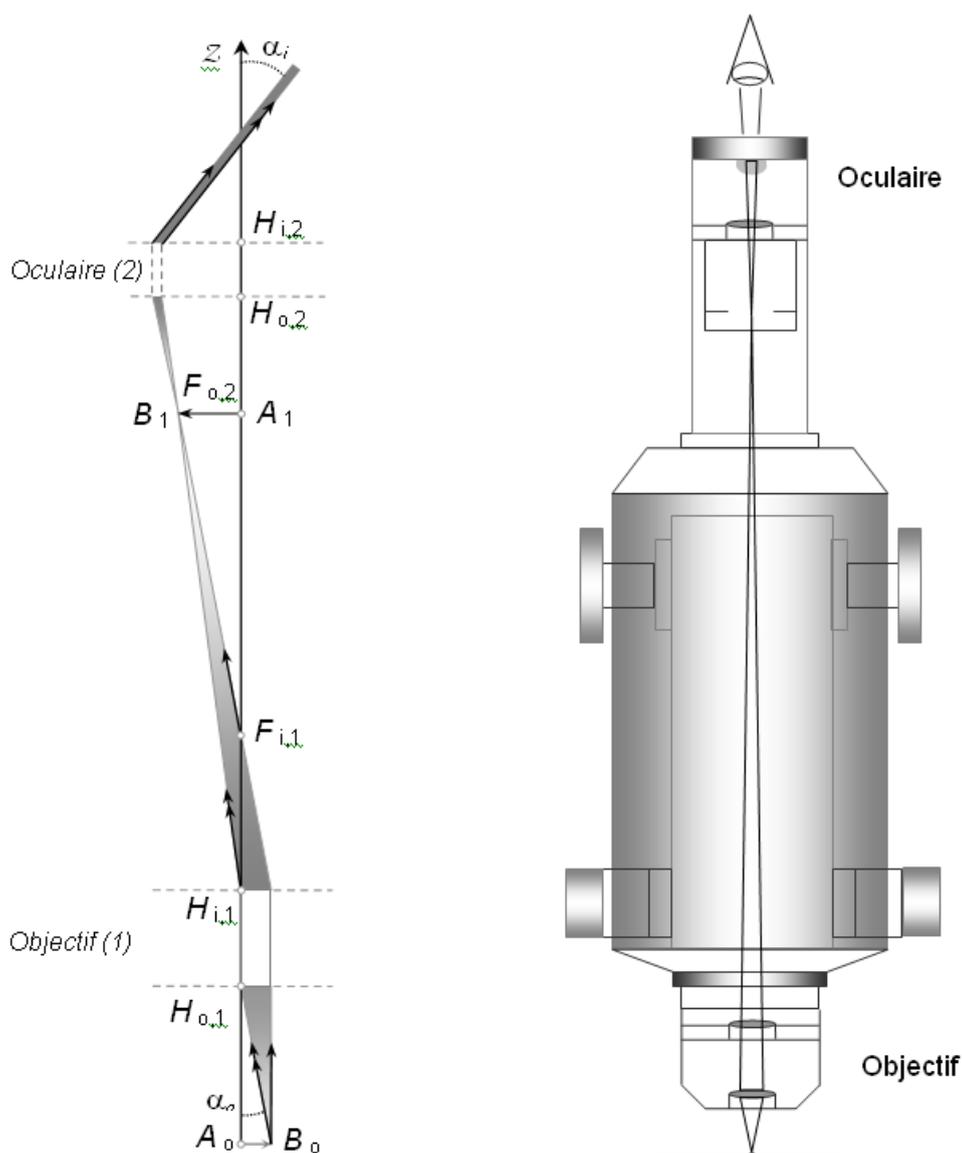
$$a = \frac{ph}{h+p} \quad \text{et} \quad r = \frac{ph}{h-p}$$

9.2 OBJECTIFS DE MICROSCOPE

9.2.1 Caractéristiques

L'objectif du microscope en est l'élément essentiel. En général l'instrument en est équipé d'un ensemble, chacun d'eux étant repéré par la gravure de son grandissement et de son ouverture numérique sur sa monture.

Dans les microscopes l'objectif fournit une image soit à une distance standard (généralement 160 ou 170 mm) ou à l'infini (l'objectif étant alors dit «corrigés à l'infini» et l'objet dans le plan focal objet). Une lentille de tube (le tube du microscope) ou lentille de Telen, solidaire du statif, reforme l'image dans le plan focal de l'oculaire.



L'approximation de Gauss ne pouvant être retenue pour la conception de l'objectif, celui-ci ne peut être constitué d'une seule lentille, qui présenterait des aberrations inacceptables.

Les effets de ces diverses aberrations sont corrigés en multipliant le nombre de lentilles constituant l'objectif afin d'en obtenir la puissance recherchée à l'aide de composants de faible puissance individuelle de façon à réduire les angles d'incidence des rayons lumineux sur les dioptries. Le fait de multiplier ces éléments pour constituer un système centré impose au concepteur de prendre en compte la possibilité d'apparition d'autres aberrations dites d'excentrement provenant de défauts de construction ou suite à des erreurs de manipulation. Ceci fixe des tolérances d'exécution et de montage très strictes, ces défauts provoquant des termes de coma et d'astigmatisme intolérables.

Les aberrations géométriques ne sont pas les seules à entacher la qualité de l'image. Les verres qui constituent l'essentiel des systèmes optiques dispersent la lumière, leurs indices de réfraction variant avec la longueur d'onde de la lumière qui les traverse. Les images bleue, verte ou rouge données d'un objet par une lentille ne sont pas situées dans un même plan et ne sont pas de même dimension.

La correction de ces aberrations chromatiques, dont l'influence croît en même tant que l'ouverture augmente, nécessite l'association de verres d'indices et de dispersions différents pour constituer chacun des éléments de l'objectif. Le degré de correction des aberrations est conditionné par l'emploi auquel l'objectif est destiné, c'est-à-dire par la qualité de l'observation requise. Cela contribue à l'existence de classes d'objectifs, de qualités différentes car de corrections différentes et bien entendu de coûts pouvant être fort différents.

Les différentes caractéristiques d'un **objectif** sont gravées par le constructeur sur la monture de l'objectif: grandissement ou grossissement, ouverture numérique, type de correction de l'objectif (longueur du tube), correction d'aberration, épaisseur de la lamelle couvre-objet, milieu d'immersion, distance de travail... Par exemple, une monture d'objectif portant les inscriptions suivantes

60X/1,40 oil
 ∞ /0,17 WD 0,21

signifie que

1. le grossissement est de 60,
2. l'ouverture numérique de 1,4,
3. le milieu d'immersion est l'huile (optique),
4. l'objectif est corrigé à l'infini,
5. l'épaisseur de la lamelle couvre-objet doit être de 0,17 mm,
6. La distance de travail (WD pour *working distance*) est de 0,21 mm.

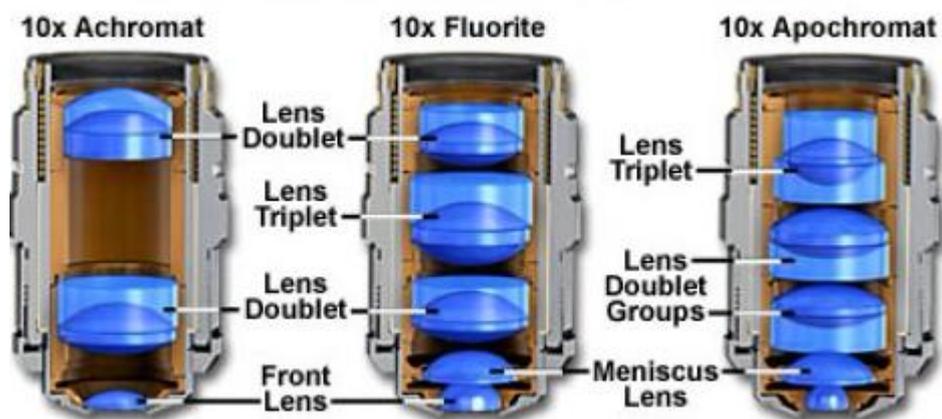
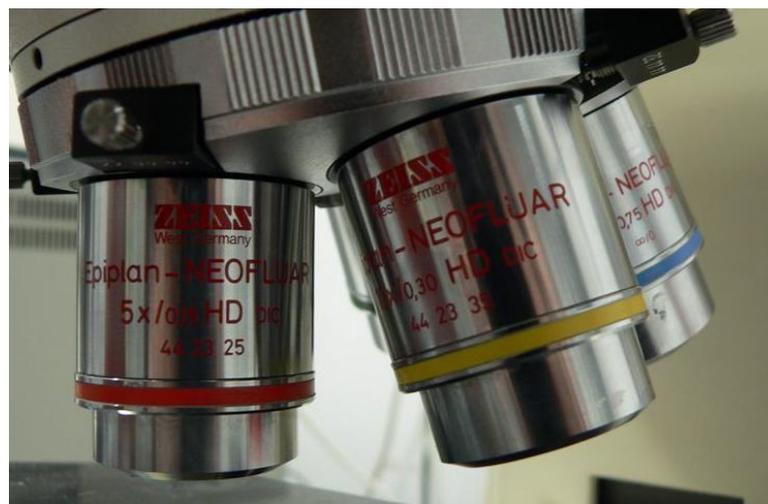
Objective Specifications



L'**ouverture numérique** est définie comme le produit de l'indice de réfraction de l'échantillon par la moitié de l'angle d'ouverture de la lentille frontale. La résolution axiale et latérale de l'objectif est proportionnelle à cette valeur.

La distance de travail est la distance entre la lentille frontale de l'objectif et le plan focal moins l'épaisseur de la lamelle.

Certains objectifs de microscope sont à immersion (de leur lentille frontale baignant dans un liquide d'indice de réfraction proche de celui du verre comme l'huile de cèdre ou une huile de synthèse), d'autres sont sensibles aux lumières fluorescentes ou comportent des filtres de phase, améliorant ainsi les qualités et performances optiques dans des conditions particulières (comme l'impossibilité de colorer les organismes vivants observés). La multiplicité des objectifs (grandissement, type de lumière) les font se rassembler sur une tourelle les rendant interchangeables pendant les observations successives.



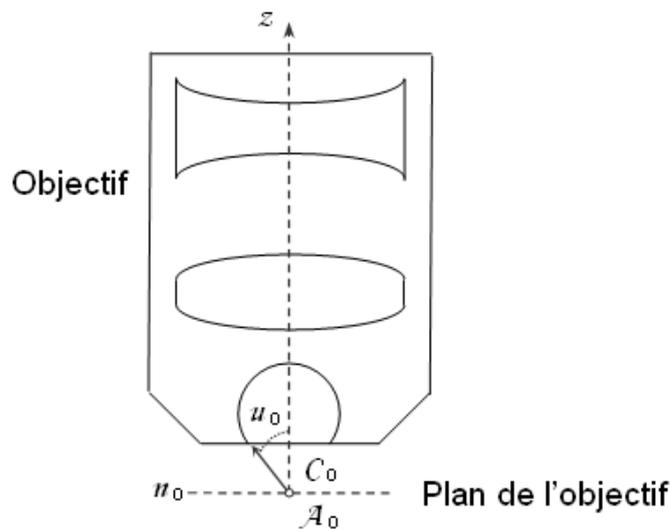
Coupe d'objectifs de microscope montrant la lentille frontale, ainsi que les autres éléments, généralement des doublets accolés.

9.2.2 Ouverture numérique

Comme l'image observée dans un microscope est très agrandie, la quantité de lumière envoyée dans l'œil par chaque élément de surface est faible. Aussi est-il nécessaire d'éclairer l'objet à l'aide d'un système optique annexe, réfracteur ou réflecteur, appelé **condenseur**, et de travailler avec une forte ouverture. Rappelons que l'ouverture numérique est:

$$\text{O.N.} = n_o \sin u_o$$

Où u_o est le demi-angle du cône de lumière qui tombe sur l'instrument (figure ici-bas).



La valeur de O.N. est en général limitée par les écarts à l'approximation linéaire que sont les aberrations géométriques.

O.N. = 0.8 est cependant une valeur courante, car la première lentille de l'objectif a été étudiée pour travailler à grande angle; cette lentille utilise généralement le couple de points d'Young (ou Weierstrass) associé au premier dioptré; l'objet est alors immergé dans un liquide d'indice voisin de celui de la lentille. Aussi distingue-t-on les objectifs à immersion et les objectifs secs (dans l'air).

L'ouverture numérique de l'objectif d'un microscope composé est l'une de ses caractéristiques. On peut lire sur sa monture métallique, outre des symboles concernant la qualité des verres, quatre nombres groupés deux à deux qui représentent:

- le grandissement transversal et l'ouverture numérique (par exemple, 60X et 0.8) ;
- l'intervalle optique et l'épaisseur de la lamelle couvre-objet exprimés en mm (par exemple, 160 et 0.17).

9.2.3 Resolution

La résolution d'un microscope désigne sa capacité à séparer des détails très voisins. Indépendamment du capteur utilisé et des aberrations ou imperfections des lentilles, la résolution du microscope optique est fondamentalement limitée par la **diffraction** de la lumière.

En effet, du fait de la diffraction, l'image d'un point n'est pas un point, mais une tache (la **tache d'Airy**). Ainsi, deux points distincts mais voisins auront pour images deux taches dont le recouvrement peut empêcher de distinguer les deux points images: les détails ne sont alors plus résolus.

La limite de résolution (transverse) d d'un microscope, c'est-à-dire la plus petite distance en-dessous de laquelle deux points voisins ne seront plus distingués, peut être exprimée simplement à l'aide de la longueur d'onde d'illumination λ , de l'indice de réfraction n en sortie d'objectif, et du demi angle du cône de lumière maximum accessible α .

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha} = \frac{\lambda}{2 \text{ O.N.}}$$

où $O.N.$ désigne le produit $n \cdot \sin \alpha$, ou **ouverture numérique** de l'objectif.

On peut donc augmenter la résolution de plusieurs manières:

- Augmenter l'indice de réfraction. Ceci peut être réalisé en utilisant un objectif à immersion: on immerge la frontale de l'objectif dans un liquide dont l'indice de réfraction est proche du maximum de 1,5 - celui du verre.
- Augmenter α , en construisant des objectifs à focale très courte, que l'on approche très près.
- En diminuant la longueur d'onde. Toutefois, si on reste dans la lumière visible, il n'est pas possible de descendre en-dessous de 400 nm.

La limite de résolution d'un microscope photonique classique est d'environ 0,2 μm .

9.2.4 Profondeur de champ

La profondeur de champ est la distance entre le point le plus haut et le point le plus bas de la préparation qui donne une image nette. C'est donc l'épaisseur de la tranche d'espace dans laquelle tous les points de l'objet donnent une image nette.

La profondeur de champ Δz dépend de l'ouverture numérique: la profondeur de champ diminue lorsque l'ouverture numérique augmente.

$$\Delta z = \frac{\lambda}{4n \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\text{O.N.}^2}{n^2}} \right)}$$

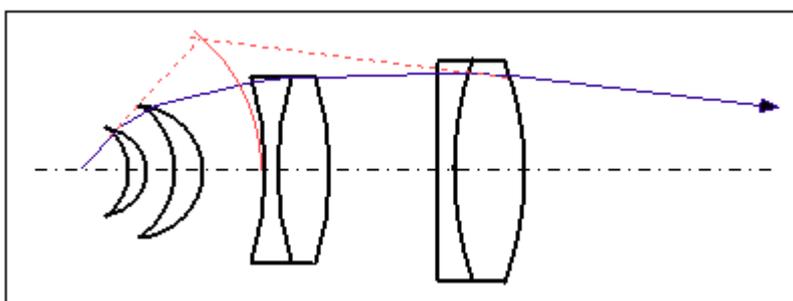
En conséquence: si on ferme le diaphragme d'ouverture, on diminue $O.N.$ et on augmente la profondeur de champ. En raison de la très faible profondeur de champ, le microscope permet de repérer avec une excellente précision la position d'un objet sur l'axe optique. Il donne des images relatives à des tranches de l'objet. Aussi l'échantillon observé est-il généralement très mince, ce qui permet de l'éclairer par transmission.

Ce résultat explique le soin avec lequel on doit faire la mise au point car on peut très facilement franchir sans la voir la région dans laquelle l'image est visible; le plus commode consiste à placer d'abord l'objectif presque en contact avec la lame qui couvre l'objet, puis à l'éloigner lentement de la préparation.

9.2.5 Les objectifs les plus simples

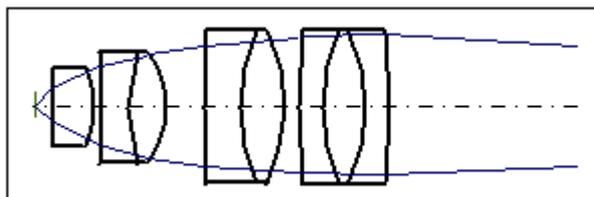
Ils sont constitués d'un seul doublet, association de deux lentilles collées convergente et divergente d'indices et de dispersions différents, les objectifs les plus simples sont les objectifs achromatiques ou achromats corrigés du chromatisme pour deux longueurs d'onde. Leurs images bleue et rouge sont confondues. Pour une longueur d'onde intermédiaire, ils sont corrigés de l'aberration sphérique.

Il est possible ainsi d'atteindre une ouverture numérique de 0,10, pouvant être portée à 0,25 par association de deux doublets du même type. Pour atteindre une ouverture de 0,60, on ajoute un ou deux ménisques aplanétiques, lentilles dont la première face est centrée au point de Weierstrass objet de la seconde, point pour lequel il n'y a ni aberration sphérique ni coma.



Cette solution présente un grave inconvénient provenant de la lentille frontale fragile aux chocs, difficile à nettoyer; en outre, pour une utilisation en immersion homogène on remplace le premier ménisque par une lentille plan convexe, ce qui permet d'atteindre une ouverture numérique de 0,85.

Pour réduire le chromatisme, on remplace, selon les solutions de Abbe, les doublets par des triplets. Ces objectifs apochromatiques ou apochromats (figure ici-bas), sont corrigés du chromatisme pour trois longueurs d'onde (les images se forment dans le même plan), de l'aberration sphérique et de la coma pour deux de ces longueurs d'onde et peuvent atteindre une ouverture de 0,90.

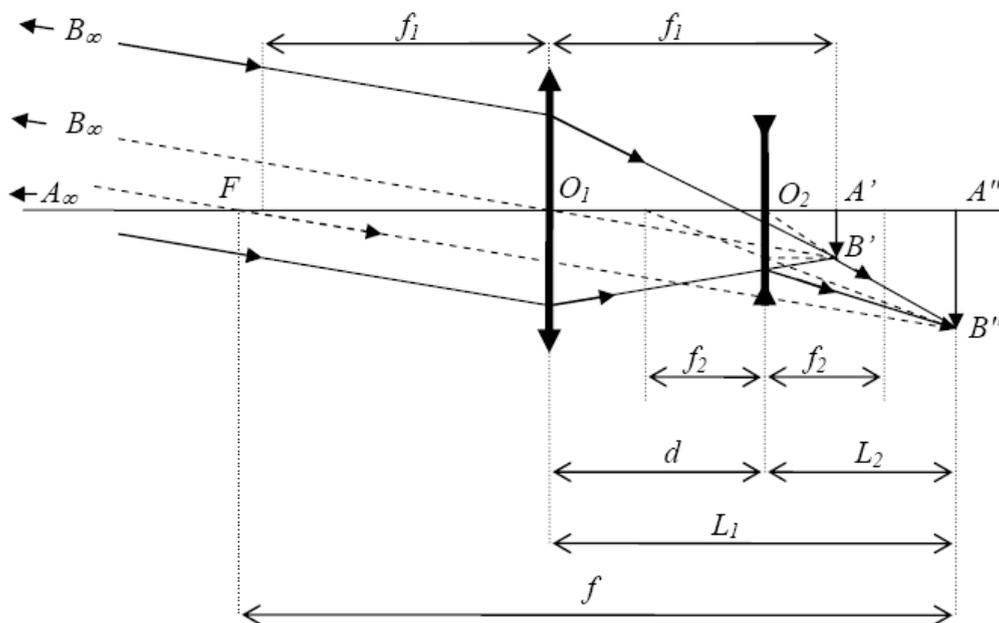


S'ils sont bien corrigés du chromatisme de position, les apochromats conservent, comme les achromats, du chromatisme de grandeur, l'image bleue étant plus grande que l'image rouge. On y remédie par l'emploi d'**oculaires compensateurs** permettant la vision des images sous le même angle corrigeant le chromatisme apparent ou perspectif de l'ensemble.

9.3 TELEOBJECTIF ZOOM

Un téléobjectif zoom est constitué, dans sa forme la plus simple par un système constitué de deux lentilles, l'une convergente, l'autre divergente.

Cette configuration permet d'obtenir un objectif de longue focale sur une longueur physique limitée.



La première lentille donne une image en $A'B'$ d'un objet AB situé à l'infini.

La seconde lentille renvoie cette image sur l'écran (film, CCD) situé à une distance L_2 de la seconde lentille.

La focale équivalente f est:

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d}$$

En pratique, on "cadre" l'objet, ce qui revient à choisir f en variant l'écartement d des lentilles.

9.3.1 Exercice

On a un système avec: $f_1 = 60$ mm, $f_2 = -25$ mm.

1. Calculer d dans pour deux cas: $f = 150$ mm et $f = 75$ mm.
2. Calculer L_2 dans ces 2 cas.

Que se passe-t-il si l'objet AB n'est pas situé à l'infini, mais à une distance p_1 de la première lentille? (Supposer $p_1 \gg f_1$)

10. LES OCULAIRES

Un oculaire est un système optique complémentaire de l'objectif. Il est utilisé dans les instruments tels que les microscopes ou les télescopes pour agrandir l'image produite au plan focal de l'objectif.

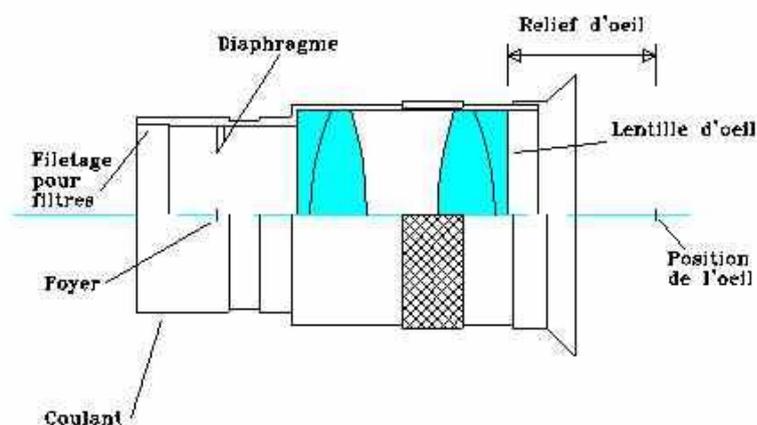
Un oculaire est en fait une loupe perfectionnée pour fournir une image à l'infini, c'est-à-dire une image nette sans accommodation de l'œil, et avec le moins d'aberration optique possible. En effet lorsque la puissance d'une loupe atteint des valeurs élevées (20 dioptries par exemple) la qualité de l'image devient médiocre et pour l'améliorer tout en réduisant les aberrations on remplace les loupes par des oculaires composés c'est-à-dire des associations de lentilles.

L'oculaire étant, fondamentalement, une lentille, est soumis aux mêmes aberrations que l'objectif d'une lunette. Mais elles ne jouent pas le même rôle, car l'objectif et l'oculaire sont employés dans des conditions très différentes. En particulier, l'aberration chromatique doit être corrigée par l'emploi de plusieurs verres.

Caractéristiques:

- La longueur **focale** est la distance qu'il y aurait entre le foyer image de l'oculaire et une lentille de vergence équivalente.
- Le **champ apparent** est l'angle de vue apparent à travers l'oculaire. Il est directement limité par la focale de l'oculaire et par la taille du **diaphragme de champ** placé dans son plan focal. Le champ réel dépend du grossissement et du champ apparent.
- Le **relief d'œil**, traduction impropre de l'anglais *eye relief* (littéralement: soulagement oculaire), aussi appelé **tirage d'anneau** est la distance qui sépare la pupille de sortie de la **lentille d'œil** (lentille la plus proche de l'œil de l'observateur). Si le relief d'œil est trop petit, il peut provoquer une sensation d'inconfort (les cils peuvent toucher l'oculaire); s'il est trop grand et que l'**œilleton** n'est pas bien dimensionné, le placement de l'œil peut ne pas être bon.

Éléments d'un oculaire



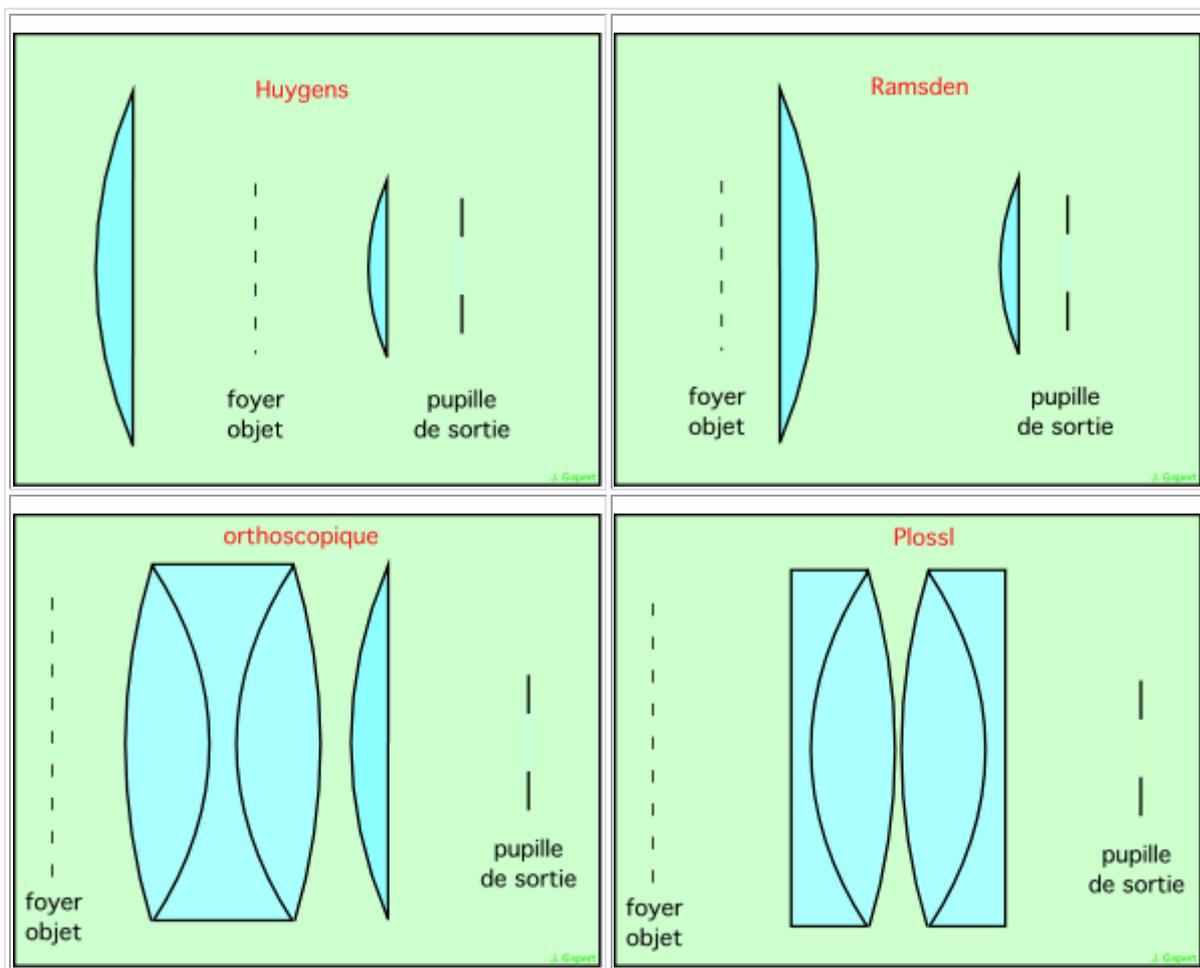
Le **coulant** est la partie métallique lisse qui vient se placer dans le porte-oculaire. En général une vis vient appuyer sur cette partie afin de maintenir l'oculaire. On trouve parfois une gorge sur le coulant. Elle permet que la vis puisse appuyer sans marquer la partie lisse qui sert au guidage de l'oculaire. Sur le coulant à l'entrée de l'oculaire, on trouve un filetage permettant de visser des filtres.

Le **diaphragme** est un trou qui limite la portion de l'image observée. L'image est volontairement limitée car plus on s'écarte de l'axe de l'oculaire, plus l'image se dégrade. Ce diaphragme se situe généralement dans le coulant, mais il peut- être aussi à l'intérieur de l'oculaire entre deux lentilles, cela dépend de la formule optique de l'oculaire. Le diaphragme fixe donc le champ apparent de l'oculaire. C'est l'angle que l'on peut observer entre les bords du diaphragme.

La **pupille de sortie** est l'endroit où l'on doit placer l'œil afin d'observer dans les meilleures conditions de confort. Le relief d'œil ou relief d'oculaire est la distance qui sépare la dernière lentille de l'oculaire, de la pupille de sortie. Cette distance est surtout importante pour les porteurs de lunettes qui ont besoin d'un relief d'œil important.

La **lentille de champ** est la première lentille traversée par la lumière tandis que la lentille d'œil est la dernière lentille traversée par la lumière.

Il existe divers types d'oculaire, qui sont nommé d'après celui qui les a le premier décrits (sauf l'oculaire orthoscopique). Leurs caractéristiques dépendent de la formule optique choisie, et le champ, le grossissement, la clarté diffèrent selon les cas.



Les deux premiers, Huygens et Ramsden, sont assez semblables. Il s'agit de formules dans lesquelles

$$f_1 + f_2 = 2 e$$

où f_1 est la focale du premier verre, f_2 celle du second, et e la distance qui les sépare. Cette condition donne en principe une combinaison achromatique.

L'**oculaire de Huygens** est formé de deux lentilles plan-convexes dont les caractéristiques sont liées par les relations:

$$\frac{f_1}{3} = \frac{e}{2} = f_2$$

Dans la pratique ces facteurs peuvent varier autour de ces valeurs. C'est un oculaire convergent; il est dit négatif car le foyer objet est virtuel. Cet oculaire ne pourra être utilisé que pour l'observation d'objets virtuels constitués par les images réelles fournies par un système optique tel un objectif et dont l'interposition de l'oculaire empêche la formation de cette image réelle.

L'**oculaire de Ramsden** est formé de deux lentilles **plan-convexes** comme indiqué dans la figure plus haut, dont les caractéristiques sont typiquement liées par les relations:

$$\frac{f_1}{3} = \frac{e}{2} = \frac{f_2}{3}$$

Comme dans le cas de l'oculaire de Huygens, dans la pratique ces facteurs peuvent varier autour de ces valeurs. C'est un oculaire convergent; il est dit positif car le foyer objet est réel.

L'oculaire de Huygens a un champ de 30° , alors que le Ramsden atteint les 20° seulement. Ces oculaires conviennent mieux à des lunettes qu'à des télescopes, qui sont en général bien plus ouverts (rapport f/D plus petit). Ils ne sont pas adaptés aux objets étendus.

10.1 EXERCICES

Un oculaire de type Ramsden est fait de deux lentilles de rayon de courbure de 1 cm, de diamètre 2 cm, séparées de 2 cm. Calculer son grossissement pour une image à l'infini. **Rep.** 12,5 X

Cet oculaire est utilisé pour une lunette dont l'objectif a une focale de 30 cm et un diamètre de 4,5 cm. Calculer le grossissement de la lunette et la position et diamètre de la pupille de sortie. **Rep.** 15 X, 1,3 mm, 3 mm

Calculer le champ de vision de la lunette. **Rep.** $3,8^\circ$