

Instruments de Travaux Pratiques d'optique.

I- Sources de lumière

Avant d'étudier plus en détail les instruments de T.P., il faut avoir quelques informations sur les sources de lumières qu'on utilise. C'est le but de ce paragraphe.

1. Dispositif expérimental de visualisation des spectres par projection

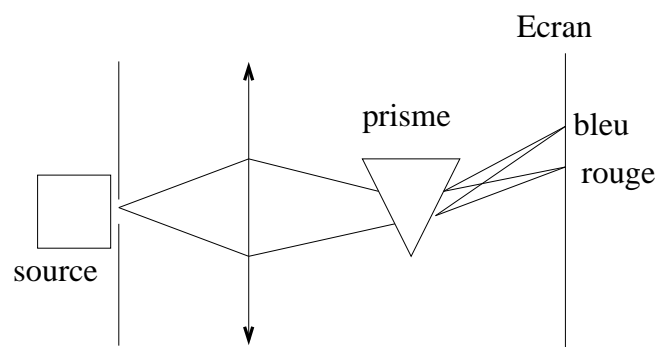


FIG. 1 –

Une lumière contient en général des radiations de longueurs d'onde différentes. On peut décomposer la lumière en la faisant passer à travers un système dispersif, par exemple un prisme. En effet, en raison de la loi de Cauchy citée ($n = a + \frac{b}{\lambda^2}$), le prisme dévie la lumière plus ou moins en fonction de la longueur d'onde: **le bleu est plus dévié que le rouge**. La figure obtenue est appelée spectre.

Dans le montage proposé sur la figure 1, on réalise l'image d'une fente sur l'écran, à l'aide d'une lentille convergente. En l'absence de prisme, on obtiendrait sur l'écran une image unique de la fente, de la couleur de la source. Le prisme décompose la lumière et donne une image de la fente pour chaque couleur présente dans la lumière émise par la source.

2. Source de lumière blanche

Il s'agit des **lampes à incandescence**. Un filament de tungstène chauffé émet une onde électromagnétique dont une partie importante se trouve dans le spectre visible. **On parle de rayonnement thermique**. Le spectre d'émission est continu (à opposer aux spectres de raies des sources présentées ultérieurement). En fait la lumière n'est pas parfaitement blanche (bien qu'elle le paraisse), c'est-à-dire que toutes les longueurs d'ondes ne sont pas émises avec la même intensité. La longueur d'onde λ_{max} du maximum d'émission peut être obtenue approximativement par la loi de Wien :

$$\lambda_{max} T = 2,987 \cdot 10^{-3} \text{ K m} \quad (1)$$

où T est la température du corps exprimée en kelvins.

On distingue deux types de lampes :

- les lampes classiques,
- les lampes halogènes.

Dans le cas des lampes classiques, la température du filament est de 2 900 K. L'atmosphère dans laquelle baigne le filament est neutre (par exemple du krypton). D'après la relation (1), le maximum d'émission est dans l'infrarouge. Beaucoup d'énergie est perdue sous forme de chaleur (rayonnée dans l'infrarouge) et la lumière apparaît plutôt jaune. Le rendement d'une telle lampe est donc faible.

Pour translater le maximum d'émission de l'infrarouge au visible et le rapprocher du maximum d'émission solaire ($0,56 \mu\text{m}$), il faut d'après la loi de Wien (1) augmenter la température du filament. Mais dans ce cas le tungstène se sublime (passage de l'état solide à l'état gazeux), de nombreux atomes de tungstène sont perdus par le filament et ont tendance à se déposer sur la paroi de l'ampoule et le filament finit par casser rapidement.

Aussi, dans le cas des lampes halogènes, l'atmosphère dans laquelle baigne le filament n'est pas inerte (en général de l'iode). Le tungstène vaporisé se combine alors avec l'iode puis se redépose sur le filament et le régénère. La température pouvant être atteinte par l'ampoule est supérieure à la précédente, l'enveloppe en verre doit alors être remplacée par du quartz (plus résistant à la chaleur) : on parle d'ampoule **quartz-iode**.

3. Lampes spectrales (tube à décharge)

Les électrons d'un atome ne peuvent se trouver dans un état d'énergie quelconque. Les niveaux d'énergie sont quantifiés (figure 2).

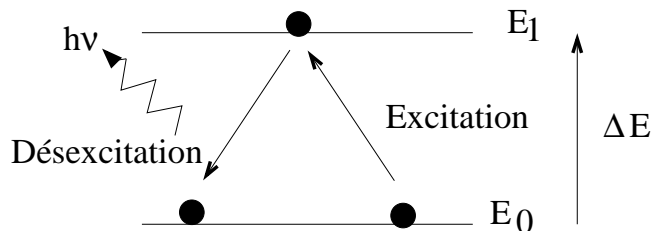


FIG. 2 –

À l'équilibre, les électrons se trouvent dans une configuration telle que l'énergie de l'atome est minimale, appelée état fondamental. Si l'on communique de l'énergie à un gaz, par exemple sous forme électrique dans un tube à décharge, les atomes du gaz passent à un état d'énergie supérieure, appelé état excité. Cet état n'est cependant pas stable, et l'atome revient spontanément à l'état fondamental en rendant l'énergie excédentaire sous forme de lumière (émission d'un photon). C'est ce qu'on appelle l'émission spontanée. Si on utilise les notations suivantes :

- E_0 : énergie du niveau fondamental,
- E_1 : énergie du niveau excité,
- h : constante de Planck ($h = 6,62610^{-34}$ J.s),
- ν : fréquence du photon émis,

on a la relation suivante :

$$\Delta E = E_1 - E_0 = h\nu \quad (2)$$

On obtient un spectre de raies (non continu), caractéristique du gaz. Par exemple :

- Hydrogène : série de Balmer (voir cours de chimie) ;
- Sodium : principalement : doublet jaune à 589 et 589,6 nm ;
- Mercure : raies les plus visibles :
 - rouge : 623,4 nm
 - doublet jaune : 579,1 et 577 nm
 - vert : 546,1 nm
 - bleu 435,8 nm
 - violet : 404,7 nm
- Cadmium : raies les plus visibles :
 - rouge : 643,8 nm
 - vert : 508,6 nm
 - bleu 480 nm

4. L.A.S.E.R.

Il s'agit de l'abréviation de *Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation* (amplificateur de lumière par émission stimulée). On a parlé précédemment d'émission spontanée ; il est possible aussi de provoquer une émission

par une onde incidente rencontrant les atomes : on parle **d'émission stimulée**. Dans ce cas, la longueur d'onde émise est celle de l'onde incidente. On obtient une **lumière quasi monochromatique**, ce qui n'est pas le cas de l'émission spontanée. D'autre part, on utilise des systèmes optiques tels que le faisceau obtenu soit très peu divergent.

Le principe du laser à gaz est le suivant :

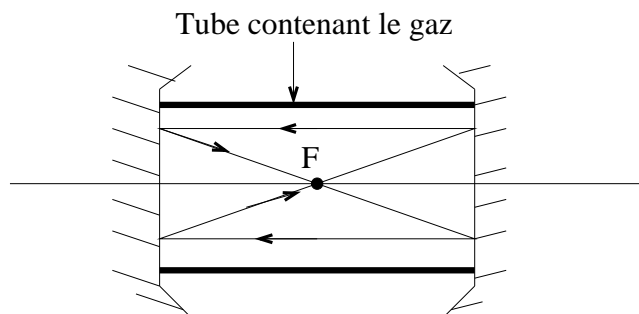


FIG. 3 –

On fabrique une cavité afocale (Figure 3) à l'aide de deux miroirs sphériques, dont les foyers sont confondus, et entourant un tube à décharge. Grâce à ce système, un rayon revient sur lui-même après quatre réflexions, et stimule l'émission du gaz. L'un des miroirs est légèrement transparent, pour qu'une partie de la lumière puisse sortir de la cavité et être utilisée.

Pour réaliser une émission stimulée, il est nécessaire que les atomes soient dans un état excité. Il faut pour cela réaliser une **inversion de population**, c'est à dire peupler des milieux excités et dépeupler le niveau fondamental; on dit qu'on effectue un **pompage**. Il ne s'agit pas ici de décrire tous les lasers, mais par exemple l'un des plus courants : Hélium Néon. Historiquement, c'est d'ailleurs le premier laser à gaz réalisé par Javan en 1960 peu de temps après le laser à rubis.

On provoque une décharge électrique dans le mélange des deux gaz. La décharge fait passer un certain nombre d'atomes d'hélium dans un état excité métastable, c'est-à-dire un état excité à partir duquel les transitions radiatives sont pratiquement impossibles, et qui de ce fait a une très longue durée de vie.

L'énergie de ce niveau métastable de l'hélium coïncide pratiquement avec l'énergie de plusieurs niveaux excités très voisins du néon; cette coïncidence permet le transfert d'énergie d'un atome d'hélium métastable à un atome de néon lorsqu'ils interagissent dans une collision. On parvient ainsi à peupler de manière préférentielle ces quelques niveaux excités du néon, à l'exclusion des autres.

Comme on vient de le signaler, les lasers à gaz les plus courants sont les lasers Hélium Néon (rouge) dont la longueur d'onde est 632,8 nm, mais il en existe des verts, jaunes et oranges. On rencontre aussi d'autres types de lasers : à colorant (toutes couleurs), diodes laser (solide), utilisées par exemple dans les lecteurs de disques compacts.

II- L'œil

Avant d'étudier les instruments utilisés en T.P., il est nécessaire d'avoir quelques connaissances sur le fonctionnement et la modélisation de l'œil. Il n'est pas question ici d'aborder des notions de biologie mais plutôt d'étudier l'optique de l'œil.

1. Description

Une coupe de l'œil est présentée sur la figure 4.

- L'iris (partie colorée) est percé de la pupille, dont le diamètre est variable (de 2 à 8 mm) et qui joue le rôle de diaphragme, c'est-à-dire qui limite l'intensité lumineuse qui pénètre dans l'œil.
- Le cristallin est un muscle assimilable à une lentille mince biconvexe dont la distance focale est variable selon sa contraction. Il donne d'un objet une image renversée sur la rétine.
- La rétine est constituée de cellules sensibles à la lumière (les cônes et les bâtonnets).
- La fovéa est une petite dépression non située sur l'axe optique et entourée de la macula (tâche jaune) sur laquelle on observe au mieux les petits détails de l'image. D'ailleurs, les astronomes amateurs savent que pour observer des objets de faible intensité à l'œil nu il ne faut pas les regarder de face, mais légèrement de côté.
- Le corps vitreux est formé d'une substance gélatineuse d'indice de réfraction $n = 1,336$.

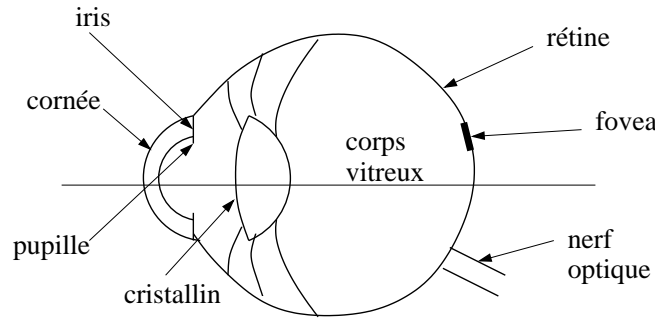


FIG. 4 – Structure de l'œil

- L'ensemble rétine-nerf optique code l'image sous forme d'influx nerveux et l'envoie au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique. Le cerveau interprète le message (retournement de l'image, correction de la distorsion, vision stéréoscopique, c'est-à-dire impression de relief par combinaison des informations provenant des deux yeux). En ce qui concerne la vision stéréoscopique, on peut douter de l'utilité des deux yeux, car lorsqu'on se cache un œil on a toujours l'impression de voir les objets en relief. Cela vient de la mémoire que l'on a des objets. Si on ne possédait qu'un œil, on ne pourrait voir en relief.

L'ensemble de l'œil sera modélisé par une lentille mince convergente formant une image sur la rétine modélisée par un écran. Il faut être conscient que ceci est une approximation.

2. Caractéristiques

On imagine un cône partant de la pupille tel que tout objet se trouvant dans ce cône pourra avoir une image nette sur la rétine. On appelle **champ angulaire** l'angle de ce cône de vision. Le champ angulaire a une valeur importante (40 à 50°), cependant la zone de perception des détails est beaucoup plus réduite (1°), car l'image doit alors se former sur la fovéa.

L'œil ne distingue deux détails différents de l'objet que si **leur image se forme sur deux cellules différentes de la rétine** (Cf. le grain d'une pellicule photo). Dans de bonnes conditions d'éclairage (ni trop sombre, ni trop lumineux), l'œil distingue des détails d'environ 1' d'arc, soit $3 \cdot 10^{-4}$ rad. Cette valeur constitue la limite de résolution ou pouvoir séparateur de l'œil. La résolution pratique dépend fortement des conditions d'éclairage et du contraste, si bien que la limite précédente est rarement atteinte.

L'œil ne peut voir une image nette que si elle se forme sur la rétine. Un œil au repos (cristallin non contracté) voit à une distance maximale D_m . Le point situé à cette distance porte le nom de **Punctum Remotum (P.R.)**. Pour voir des objets plus proches, le cristallin doit se contracter pour être plus convergent (sa vergence augmente), on dit que l'œil **accommode**. Le point le plus proche que peut voir net un œil est appelé **Punctum Proximum (P.P.)**. Il correspond à la distance minimale de mise au point. La zone située entre le P.P. et le P.R. est appelé **champ en profondeur de l'œil**.

Pour un œil normal, le P.R. est à l'infini, et le P.P. à environ 25 cm pour un adulte. Le P.P. est plus proche pour un enfant, c'est pour cela que souvent les enfants lisent avec " le nez sur leur livre ".

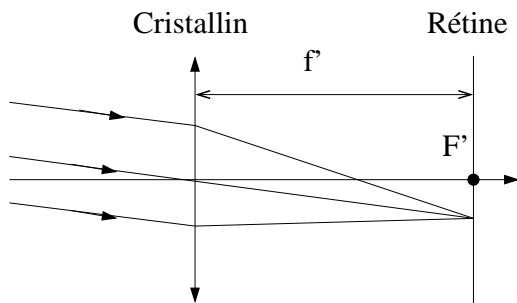


FIG. 5 –

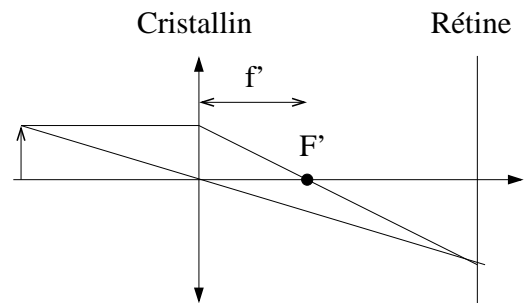


FIG. 6 –

Les figures 5 et 6 représentent respectivement la formation de l'image d'un objet au P.R. et au P.P..

3. Les défauts de l'œil

Un œil normal est dit **emmétrope**. Voici quelques défauts principaux des yeux couramment rencontrés :

a) La myopie

Un œil myope possède un cristallin trop **convergent**. Par conséquent, le P.P. est plus proche que pour l'œil normal et le P.R. n'est plus à l'infini. On s'aperçoit sur la figure 7 que l'image d'un objet ponctuel à l'infini se forme avant la rétine et l'observateur ne voit qu'une tache floue (le myope sans ses lunettes voit flou de loin). Il faut rendre l'œil moins convergent, donc la correction se fait par l'utilisation d'une lentille divergente.

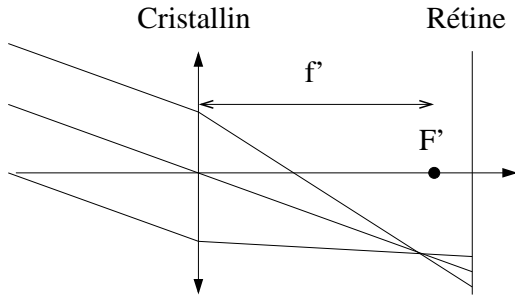


FIG. 7 -

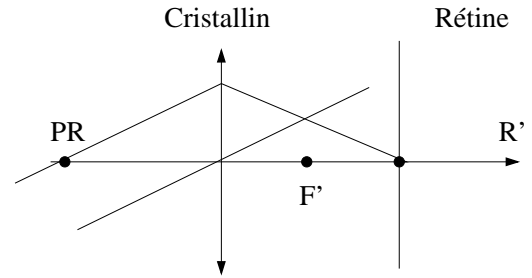


FIG. 8 -

Pourquoi voit-on les yeux d'un myope plus petits derrière ses lunettes que sans ses lunettes ? L'œil du myope joue alors le rôle d'objet réel pour la lentille de la lunette. Si l'on se réfère aux constructions du paragraphe sur les lentilles, on s'aperçoit que dans ce cas, l'image est virtuelle et plus petite, ce que l'on observe.

La figure 8 montre comment on détermine la position du P.R., d'un myope. On cherche l'antécédent d'une image R' se formant sur la rétine dans le cas de l'œil au repos. Pour cela on cherche le rayon incident croisant l'axe dont l'émergent arrive en R' . On trace le rayon parallèle passant par le centre optique, les deux rayons se croisent dans le plan focal image.

b) L'hypermétropie

Un œil hypermétrope possède un cristallin **pas assez convergent**. L'œil doit donc accommoder pour voir à l'infini, sinon l'image se forme derrière la rétine (Figure 9) et l'observateur observe une tache floue. Le P.P. est plus éloigné que pour l'œil normal. Il faut rendre l'œil plus convergent donc la correction se fait par l'utilisation d'une lentille convergente.

Au contraire des myopes, pourquoi voit-on les yeux des hypermétropes plus grands derrière leurs lunettes que sans leurs lunettes ? C'est le cas de la loupe : l'image est virtuelle et plus grande, ce que l'on observe.

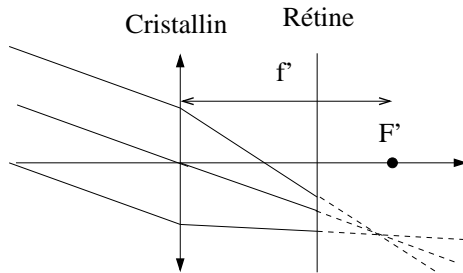


FIG. 9 -

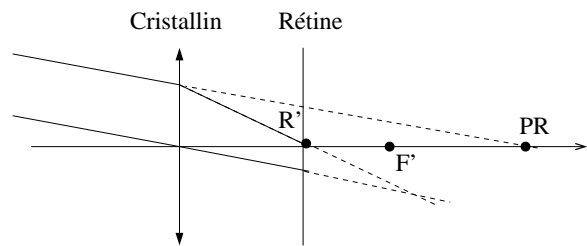


FIG. 10 -

Comme pour le myope, on peut déterminer la position du P.R. de l'hypermétrope (Figure 10). Il se trouve derrière l'œil, ce qui fait dire qu'un hypermétrope " peut voir derrière lui sans se retourner ". C'est bien sûr faux, la construction montre seulement qu'un faisceau qui convergerait au P.R. donne une image nette sur la rétine.

c) L'astigmatisme

L'œil astigmatique ne possède pas la symétrie de révolution. La correction se fait par des lentilles non sphériques. On peut simuler un œil astigmatique en inclinant une lentille par rapport à l'axe optique. Cette expérience sera décrite dans le paragraphe sur les aberrations.

d) La presbytie

L'œil presbyte a des difficultés à accommoder. C'est un problème qui est dû au vieillissement, le cristallin perdant progressivement sa plasticité. Les objets proches sont moins bien vus. La correction se fait soit avec des verres multifocaux (une correction pour la vision de loin et une correction pour la vision de près), soit avec des verres progressifs (c'est-à-dire de focale variable selon la distance œil-objet).

III- Reconnaissance rapide du caractère d'une lentille ou d'un miroir

Avant toute mesure, il est nécessaire de savoir à quel type de système on a affaire :

- lentille convergente ou divergente ;
- miroir plan, concave ou convexe.

Certaines règles permettent de déterminer rapidement de quel système il s'agit.

1. Miroirs

La première chose à faire est d'observer la surface du miroir, il est alors possible de déterminer sa forme. Sinon, il faut se regarder dans le miroir en commençant près du miroir puis en reculant.

a) Miroir plan

Chacun a l'habitude de se regarder dans un miroir plan. L'image est droite et de même grandeur.

b) Miroir concave

On commence par se regarder en étant proche du miroir, puis on recule. Les trois positions possibles sont récapitulées sur les figures 11 à 13. On se trouve à la place de l'objet AB en gras sur les figures.

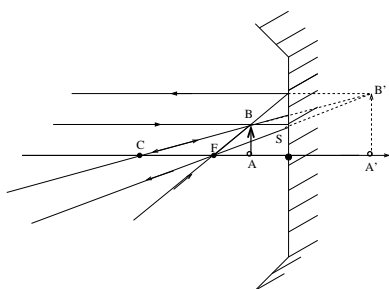


FIG. 11 – Entre F et S

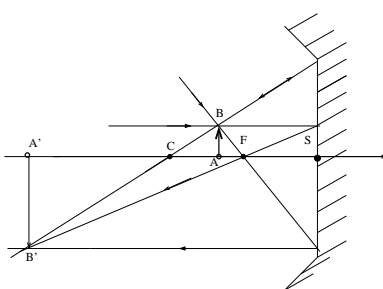


FIG. 12 – Entre C et F

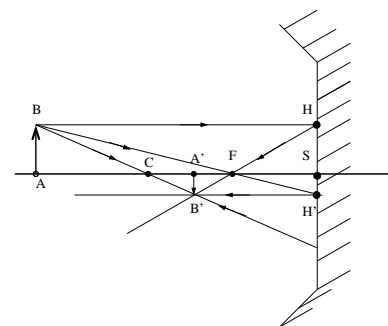


FIG. 13 – Avant C

1. Si l'on est près du miroir (entre F et S), l'image est virtuelle, droite et plus grande (figure 11). Le miroir est grossissant, on se voit donc dans le miroir, plus grand. C'est le cas des petits miroirs de maquillage.
2. Si l'on se trouve entre C et F, l'image est réelle renversée derrière C (figure 12). On ne peut observer l'image qui est derrière soi. On ne voit qu'une image floue.
3. Lorsqu'on se trouve avant C, l'image est réelle, renversée et plus petite devant soi (figure 13). On se voit donc plus petit et à l'envers.

c) Miroir convexe

Dans ce cas, une seule position d'objet réel est possible, puisque C et F sont virtuels. On se voit droit, plus petit et dans le miroir (figure 14).

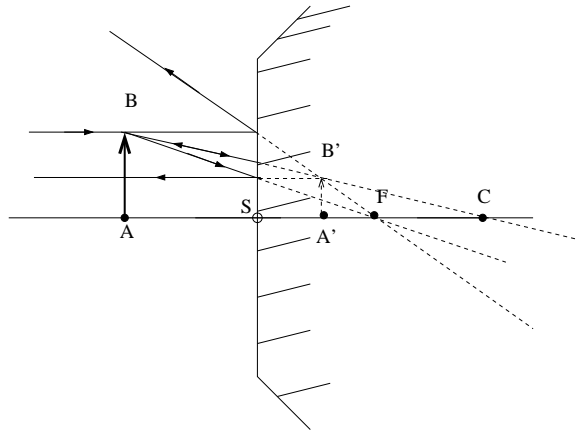


FIG. 14 – Miroir convexe

2. Lentilles

Contrairement aux miroirs, on ne peut être à la fois l'objet et l'observateur par une lentille. On observe alors d'abord un objet proche, puis un objet lointain.

a) Lentilles convergentes

Les deux cas d'objets réels sont redonnées sur les figures 15 et 16.

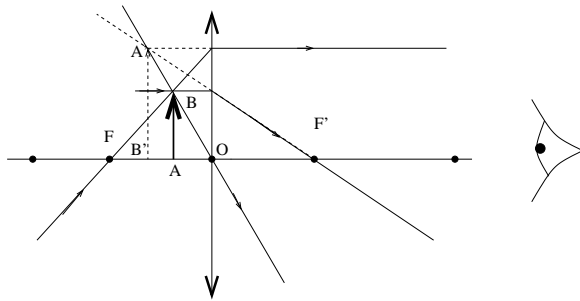


FIG. 15 – Objet proche

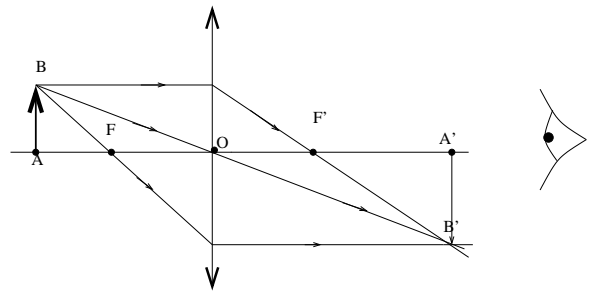


FIG. 16 – Objet lointain

Si l'objet est proche, la lentille agit comme une loupe : on voit donc l'objet plus gros et virtuel.

Si l'objet est lointain, on voit une image renversée. Si l'objet est suffisamment lointain, l'image se forme dans le plan focal image. Pour la voir nette, il est nécessaire qu'elle soit au-delà du P.P. de l'œil. Il est préférable de tenir la lentille à bout de bras, surtout dans le cas de grande distance focale. Dans le cas contraire, on verra une image renversée floue.

b) Lentille divergente

Il n'y a qu'une seule possibilité : objet réel (proche ou lointain), image virtuelle droite plus petite (figure 17).

IV- Mise en œuvre d'objets et d'image

1. Objet à distance finie

On dispose d'une lentille convergente de distance focale $f' = 10$ cm. On utilise comme objet une diapositive (par exemple un "F") dont on veut obtenir une image réelle à 40 cm. On se pose alors deux questions :

1. Où doit-on placer la lentille ?
2. Dans quel sens doit-on placer la diapositive pour que l'image présente le "F" à l'endroit ?

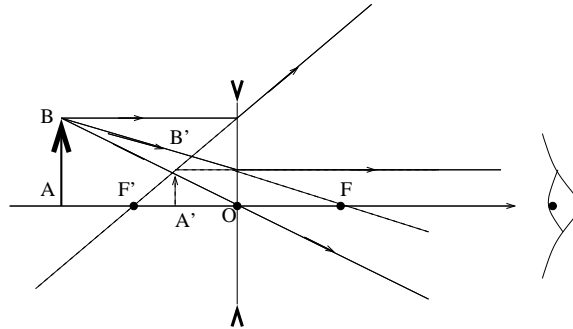


FIG. 17 -

On nomme O , le centre optique de la lentille, A l'objet, A' l'image, et on pose : $x = \overline{OA} < 0$, $x' = \overline{OA'} > 0$ et $D = \overline{AA'} > 0$. On cherche donc la condition pour avoir une image réelle à partir d'un objet réel. La relation de conjugaison de Descartes donne :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \Rightarrow (\overline{OA} - \overline{OA'})f' = \overline{OA} \overline{OA'}$$

or $\overline{OA} = \overline{OA'} + \overline{A'A}$, soit :

$$x^2 + xD + Df' = 0$$

On calcule le discriminant qui doit être positif puisqu'on cherche des solutions réelles :

$$\Delta = D^2 - 4f'D = D(D - 4f') \geq 0 \Rightarrow D \geq 4f' \text{ car } D > 0$$

Pour avoir une image réelle, il faut donc que $D \geq 4f'$. Dans le cas particulier où $D = 4f'$ (ce qui est le cas ici), alors $\Delta = 0$ et il y a une seule solution à l'équation, donc une seule image telle que $x = \overline{OA} = -D/2$. Ainsi la lentille est à mi-chemin entre l'objet et l'image.

Dans ce cas, le grandissement vaut $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -1$. Il faut donc placer la diapositive à l'envers pour avoir une image à l'endroit.

2. Manipulations

a) Réalisation du dispositif

Pour réaliser le dispositif du paragraphe précédent, placer l'écran à 40 cm de la diapositive (placée à l'envers). Intercaler la lentille L_1 de distance focale $f' = 10$ cm et la déplacer jusqu'à voir l'image nette sur l'écran. La lentille doit alors se trouver à mi-distance de la diapositive et de l'écran.

On se sert dans la suite de l'image obtenue comme objet pour les montages suivants. Repérer sa position puis retirer l'écran.

b) Vérification des constructions

On utilise une lentille convergente L_2 de distance focale $f' = 20$ cm et une lentille divergente L_3 de vergence $V = -3 \delta$.

Les constructions de la lentille convergente :

- Objet réel avant F. Former la nouvelle image sur un écran : elle doit être à l'envers.
- Objet réel entre F et O. Rapprocher L_2 de l'objet : l'image s'éloigne jusqu'à ce qu'on ne puisse plus la recueillir sur un écran. Regarder dans la lentille, on voit l'image à l'endroit, plus grande que l'objet : c'est la loupe.
- Objet virtuel. Rapprocher encore L_2 de L_1 jusqu'à ce que l'objet devienne virtuel. On peut de nouveau recueillir l'image sur un écran. Elle est réelle et droite.

Les constructions de la lentille divergente :

- Objet réel. Placer L_3 après l'objet et constater que l'image est virtuelle droite.
- Objet virtuel entre O et F. Rapprocher L_3 de L_1 jusqu'à avoir un objet virtuel. Recueillir l'image réelle droite sur un écran.
- Objet virtuel après F. Oter L_3 de son support en laissant le support sur le banc. Rapprocher L_1 de la diapositive de manière à éloigner l'objet jusqu'à ce qu'il soit à plus de 33 cm du support de L_2 . Replacer L_3 et vérifier que l'image est virtuelle renversée.

3. Objet à l'infini

Il suffit de placer un objet dans le plan focal objet d'une lentille convergente et d'utiliser l'image à l'infini comme nouvel objet.

La méthode utilisée porte le nom **d'autocollimation**.

a) Explication

On place un miroir plan devant la lentille convergente (Figure 18). L'objet A va donner une image A' à travers le système lentille-miroir.

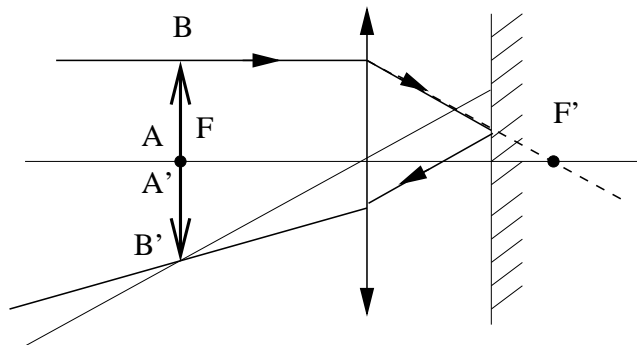


FIG. 18 – Autocollimation

Appelons A_1 et A_2 les images intermédiaires :

$$A \xrightarrow{\text{lentille}} A_1 \xrightarrow{\text{miroir}} A_2 \xrightarrow{\text{lentille}} A'$$

Attention, puisque la lumière change de sens, il faut penser dans les raisonnements à inverser les foyers objet et image, sachant que les deux foyers sont symétriques par rapport à la lentille.

On suppose que A est dans le plan focal objet de la lentille, alors A_1 est à l'infini, de même que A_2 , et A' est alors dans le plan focal devenu le plan focal image. Ainsi $A = A'$: l'objet et l'image sont dans le même plan et on les voit **simultanément nets**. D'autre part si l'on note O le centre optique de la lentille, et que l'on dispose d'un objet AB , le grandissement est -1 (image renversée) puisque :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -1$$

b) Manipulation

On place la lentille convergente et on tient le miroir plan derrière la lentille, à la main en l'inclinant légèrement ce qui ne change pas grand chose. On cherche la position de la lentille donnant une image nette sur le cache de l'objet.

On peut alors mesurer la distance lentille-objet ℓ qui est égale à la distance focale f' de la lentille.

V- Loupes et oculaires

On raisonne dans toute la suite avec l'œil emmétrope.

1. La loupe

Plus on approche un objet du P.P. de l'œil, plus ce dernier se fatigue rapidement. Or, pour pouvoir observer les détails d'un objet, il est nécessaire de placer cet objet au P.P.. D'autre part, il a été vu que le pouvoir de résolution angulaire de l'œil moyen est au maximum de $3 \cdot 10^{-4}$ rad, ce qui permet d'observer au mieux des détails d'environ $1/10$ de mm à 30 cm dans des conditions idéales d'éclairage.

Pour observer des détails plus petits ou pour éviter de fatiguer l'œil rapidement, il est nécessaire d'utiliser un instrument grossissant. Le plus simple est de prendre une lentille convergente et de placer l'objet entre le foyer objet et la lentille. Dans ce cas, comme le montre la figure 19, on obtient une image virtuelle droite plus grande que l'objet. Si l'on place l'œil au foyer image de la lentille, on se rend compte sur la figure 19 que si l'on déplace l'objet, l'image sera toujours observée sous le même angle α .

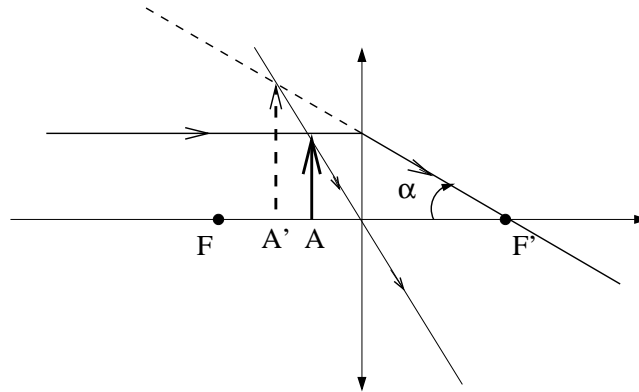


FIG. 19 – Image par une loupe

2. L'oculaire

Chacun a pu cependant se rendre compte, en utilisant une loupe, que le champ d'observation est assez limité et que l'image est fortement distordue sur les bords. Ainsi, pour les instruments d'optique plus sophistiqués, on a recours à un oculaire qui est formé de plusieurs lentilles (souvent deux). Parmi les oculaires à deux lentilles L_1 de centre O_1 et de distance focale image f'_1 et L_2 de centre O_2 et de distance focale image f'_2 les plus couramment utilisés on peut citer :

- l'oculaire de Ramsden avec $\frac{f'_1}{3} = \frac{O_1O_2}{2} = \frac{f'_2}{3}$;
- l'oculaire d'Huygens avec $\frac{f'_1}{3} = \frac{O_1O_2}{2} = f'_2$.

L'oculaire d'Huygens a un foyer objet virtuel situé entre les deux lentilles alors que celui de l'oculaire de Ramsden est réel (avant la première lentille).

L'oculaire permet d'obtenir une qualité d'image meilleure qu'avec une seule lentille. L'association de plusieurs lentilles permet d'atténuer les aberrations chromatiques, d'obtenir une distorsion plus faible et un champ plus grand.

Comme son nom l'indique, dans un instrument d'optique, **l'oculaire est la partie de l'instrument qui est du côté de l'œil** tandis que **l'objectif est du côté de l'objet que l'on veut observer**. Ainsi l'oculaire est le dernier système optique que rencontrent les rayons avant de pénétrer dans l'œil. On étudiera plus en détails dans un paragraphe ultérieur l'instrument en entier, mais il est utile de préciser dès maintenant, que l'objectif donne de l'objet observé une image intermédiaire qui elle, sert d'objet pour l'oculaire.

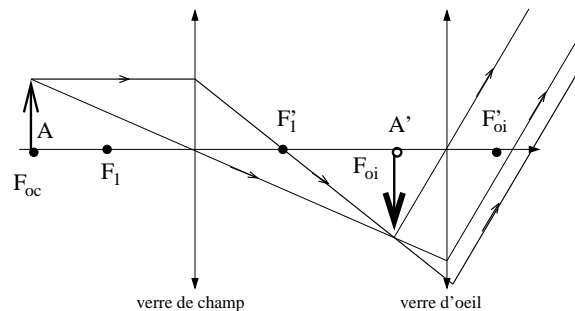


FIG. 20 – Image par un oculaire

La première lentille de l'oculaire (du côté de l'objectif) est appelée lentille ou verre de champ alors que la dernière lentille (du côté de l'œil) est appelée lentille ou verre d'œil. On nomme F_{oi} , le foyer objet de la lentille d'œil et F_{oc} , le foyer objet de l'oculaire complet. Un objet AB placé dans le plan focal objet de l'oculaire aura une image finale à l'infini de même qu'un objet placé dans le plan focal de la lentille d'œil. D'autre part, comme le montre le schéma de la figure 20 réalisé avec deux lentilles, l'image intermédiaire $A'B'$ de AB se trouve dans le plan focal objet de la lentille d'œil, puisque l'image finale est à l'infini :

$$AB \xrightarrow{\text{verre champ}} A'B' \xrightarrow{\text{verre œil}} \infty$$

Ce résultat est généralisable au cas de plus de deux lentilles.

Ainsi, un objet placé dans le plan focal objet de l'oculaire et un objet placé dans le plan focal objet de la lentille d'œil auront leurs images superposées à l'infini.

Comment régler l'oculaire pour éviter une fatigue de l'œil? Pour éviter toute accommodation, il est nécessaire que l'image finale donnée par l'oculaire soit au P.R. de l'œil, donc à l'infini pour un œil emmétrope. L'objet observé par l'oculaire (image intermédiaire de l'instrument) est alors au foyer objet de l'oculaire. **On dit dans ce cas que l'oculaire est réglé à l'infini.**

Si l'on veut superposer une règle à l'image pour effectuer des mesures, on place cette règle soit dans le plan focal de l'oculaire, soit d'après ce qui a été vue précédemment dans le plan focal du verre d'œil.

VI- Lunettes et viseurs

Comme cela a été précisé précédemment, un instrument réglé correctement évite toute accommodation de l'œil. L'image finale donnée par l'instrument doit être au Punctum Remotum de l'œil, donc à l'infini pour un œil emmétrope.

Aussi dans toute la suite, on considérera que l'image finale est à l'infini.

Il existe trois types de mesures en travaux pratiques:

- Les mesures d'angles pour lesquelles l'objet est à l'infini. On utilise une **lunette afocale appelée aussi lunette de visée à l'infini** donnant d'un objet à l'infini une image à l'infini. C'est le principe d'une lunette astronomique.
- Les mesures de distances longitudinales, c'est-à-dire le long de l'axe optique. On utilise une lunette appelée **viseur ou lunette à frontale fixe**, qui d'un objet à distance finie donne une image à l'infini.
- Les mesures de distances transversales (mesures de grandissement), c'est-à-dire perpendiculairement à l'axe optique. On utilise soit un viseur avec une règle micrométrique ou millimétrique placée dans l'oculaire comme expliqué au paragraphe précédent, soit un viseur monté sur une crémaillère perpendiculaire à l'axe optique.

Dans la suite, l'objectif sera modélisé par une lentille unique.

1. Lunette de visée à l'infini ou afocale

a) Schéma de principe

L'objet à l'infini a une image intermédiaire $A_i B_i$ dans le plan focal image de l'objectif. Pour que l'image de $A_i B_i$ par l'oculaire soit à l'infini, il faut que $A_i B_i$ soit dans le plan focal objet de l'oculaire (Figure 21). **La lunette est donc réglée à l'infini si le foyer objet de l'oculaire est confondu avec le foyer image de l'objectif :**

$$\text{lunette afocale} \Leftrightarrow F_{oc} = F'_{obj}$$

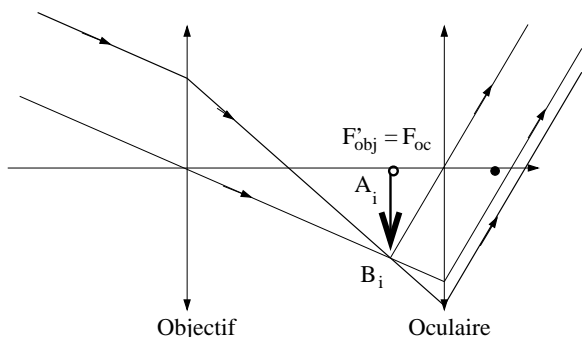


FIG. 21 – Image par une lunette

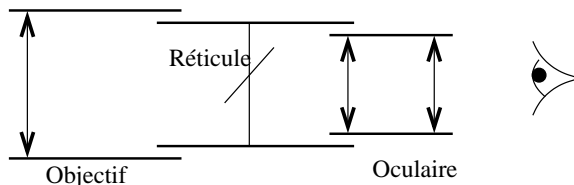


FIG. 22 – Structure d'une lunette

On peut remarquer sur la figure 21 que, sans la lunette, l'œil aura l'impression que les rayons proviennent du haut, et qu'avec la lunette, il verra les rayons provenir du bas: **l'image est donc renversée.**

Une lunette est formée de trois tubes (Figure 22): le premier contenant l'objectif, le dernier l'oculaire (représenté ici avec ses deux lentilles). Ces deux tubes sont mobiles par rapport au tube du milieu contenant un repère en forme de croix que l'on nomme **réticule**, ici représenté en perspective.

2. Réglage d'une lunette afocale

Le réglage de la lunette a pour but de faire coïncider le plan focal objet de l'oculaire et le plan focal image de l'objectif donc de réaliser $F_{oc} = F'_{obj}$. Pour cela il faut disposer d'un repère qui n'est autre que le réticule. Le réglage s'effectue en deux étapes :

	But du réglage	Mode opératoire
Réglage de l'oculaire.	Faire correspondre le plan du réticule et le plan focal objet de l'oculaire, de manière à ce que l'image du réticule par l'oculaire soit à l'infini.	Tourner la bague de l'oculaire jusqu'à voir le réticule net. On vérifie que le réglage est correct en approchant rapidement l'œil de l'oculaire celui-ci doit voir immédiatement le réticule net. S'il y a un léger temps d'accommodation, le réglage est à refaire.
Réglage de l'objectif.	Faire correspondre le plan du réticule et le plan focal image de l'objectif, de manière à ce que l'image de l'objet par l'objectif soit dans le plan du réticule (qui est aussi plan focal objet de l'oculaire).	Viser un objet à grande distance. Tourner la bague de l'objectif jusqu'à voir l'image et le réticule net simultanément. Pour vérifier le réglage, effectuer un léger hochement de tête devant l'oculaire. Si l'image observée reste immobile par rapport au réticule, le réglage est correct. Si l'image semble se déplacer par rapport au réticule, parfaire le réglage.

Le réglage est alors terminé, et la lunette se trouve dans la configuration représentée sur la figure 21.

On peut se poser trois questions :

- Pourquoi ne pas effectuer le réglage une fois pour toute au moment de la fabrication de l'instrument et rendre solidaires les trois tubes ?
- Faut-il modifier le réglage quand l'utilisateur change ?
- Pourquoi faut-il hocher la tête pour vérifier le réglage ?

La deuxième question répond en partie à la première. Si la lunette était réglée à l'infini une fois pour toute, son réglage ne conviendrait qu'à un utilisateur emmétrope. De plus, les manipulations risqueraient au fil du temps de modifier les positions relatives des tubes et de dérégler la lunette.

Quand l'utilisateur change, **il ne faut absolument pas toucher au réglage de l'objectif mais on modifie le réglage de l'oculaire**. Il suffit de conjuguer le plan du réticule (qui est celui de l'image intermédiaire) avec le P.R. de l'œil, donc de tourner la bague de l'oculaire jusqu'à voir le réticule net sans accommodation.

En ce qui concerne le hochement de tête, c'est une méthode qui permet de corriger l'erreur dite de **parallaxe**. On veut que l'image intermédiaire soit exactement dans le plan du réticule. Mais l'œil peut voir simultanément nets des objets qui sont dans des plans proches mais différents : c'est ce qu'on appelle **la latitude de mise au point**. Cependant si l'on bouge la tête, on se rendra compte que les objets ne sont pas dans le même plan s'ils se déplacent l'un par rapport à l'autre, ce qui n'est pas le cas s'ils sont dans le même plan. Le lecteur peut s'en convaincre en regardant autour de lui deux objets dans des plans différents et en remuant la tête.

3. Lunettes de visée autocollimatrices

Dans le mode opératoire proposé précédemment, il est nécessaire de pouvoir viser un objet à grande distance pour effectuer le réglage de la lunette. Ce n'est pas toujours possible quand on se trouve dans un laboratoire. Pour pallier à ce problème, une lunette dite **autocollimatrice** existe avec la possibilité de fabriquer un objet à l'infini.

En plus d'une lunette classique, cette lunette dispose d'une ampoule et d'une lame semi-réfléchissante dans le tube intermédiaire (Figure 23). Une telle lame réfléchit une fraction de la lumière mais laisse passer l'autre fraction. Si la lame est descendue comme sur la figure, l'ampoule éclaire le réticule, qui peut cependant toujours être vu à travers la lame puisqu'elle est semi-réfléchissante.

On a dit précédemment que l'objectif est réglé lorsque le réticule se trouve dans son plan focal image. On utilise un mode opératoire permettant de déterminer rapidement le plan focal d'un système convergent : **c'est l'autocollimation** qui a déjà été décrite au paragraphe a).

Une fois l'oculaire réglé, on éclaire le réticule grâce à la lame semi-réfléchissante et on place un miroir plan devant l'objectif. Le réticule \mathcal{R} éclairé sert d'objet qui va donner une image \mathcal{R}' à travers le système objectif-miroir. On

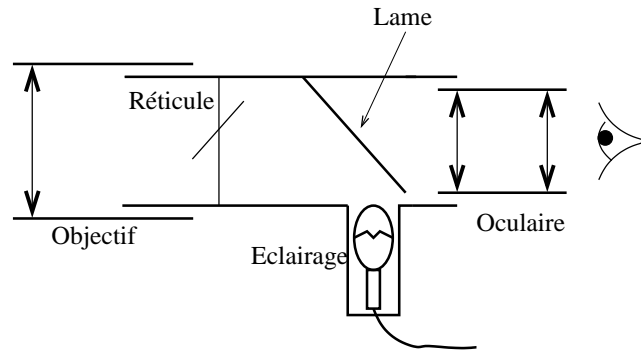


FIG. 23 – Structure d'une lunette autocollimatrice

appelle \mathcal{R}_1 et \mathcal{R}_2 les images intermédiaires :

$$\mathcal{R} \xrightarrow{\text{objectif}} \mathcal{R}_1 \xrightarrow{\text{miroir}} \mathcal{R}_2 \xrightarrow{\text{objectif}} \mathcal{R}$$

Attention, puisque la lumière change de sens entre \mathcal{R}_2 et \mathcal{R} , il faut penser dans les raisonnements à inverser les foyers objet et image, sachant que, puisque l'objectif est assimilable à une lentille mince, les deux foyers sont symétriques par rapport à la lentille.

On suppose que \mathcal{R} est dans le plan focal objet de l'objectif, alors \mathcal{R}_1 sera à l'infini, de même que \mathcal{R}_2 , et \mathcal{R}' sera alors dans le plan focal devenu le plan focal image. Ainsi \mathcal{R} et \mathcal{R}' seront dans le même plan et on les verra **simultanément nets**.

On peut donc récapituler le réglage d'une lunette autocollimatrice :

	But du réglage	Mode opératoire
Réglage de l'oculaire. Figure 24	Faire correspondre le plan du réticule et le plan focal objet de l'oculaire, de manière à ce que l'image du réticule par l'oculaire soit à l'infini.	Tourner la bague de l'oculaire jusqu'à voir le réticule net. On vérifie que le réglage est correct en approchant rapidement l'œil de l'oculaire celui-ci doit voir immédiatement le réticule net. S'il y a un léger temps d'accommodation, le réglage est à refaire.
Réglage de l'objectif par autocollimation. Figure 25	Faire correspondre le plan du réticule et le plan focal image de l'objectif, de manière à ce que l'image de l'objet par l'objectif soit dans le plan du réticule (qui est aussi plan focal objet de l'oculaire).	Abaissier la lame semi-réfléchissante et éclairer le réticule. Placer un miroir plan devant l'objectif. Tourner la bague de l'objectif jusqu'à voir le réticule net et son image nets simultanément. Pour vérifier le réglage, effectuer un léger hochement de tête devant l'oculaire. Si l'image observée reste immobile par rapport au réticule, le réglage est correct. Si l'image semble se déplacer par rapport au réticule, parfaire le réglage.

Pour la plupart des lunettes, la lame semi-réfléchissante est escamotable. Une fois la lunette réglée, on peut relever cette lame pour éviter d'avoir des réflexions parasites lors des observations.

Lorsque l'utilisateur est myope ou hypermétrope il suffit de modifier le réglage de l'oculaire. Pour un myope, le P.R. étant devant l'œil, il faut que l'oculaire donne une image virtuelle, comme une loupe : il faut donc rapprocher l'oculaire du réticule. Par contre, pour un hypermétrope, le P.R. étant derrière l'œil, il faut que l'oculaire donne une image réelle : il faut donc éloigner l'oculaire du réticule.

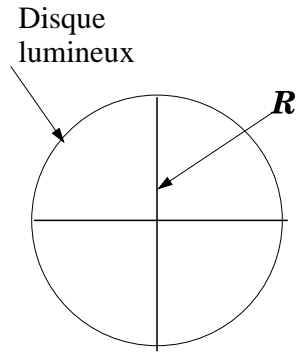


FIG. 24 – Observation de l'oculaire réglé

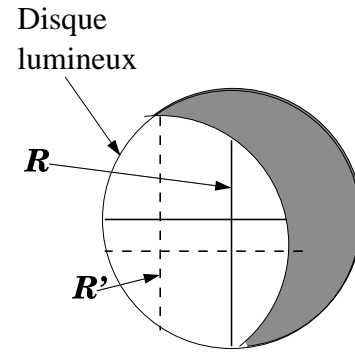


FIG. 25 – Observation de la lunette réglée

4. Viseurs ou lunettes à frontale fixe

Le viseur est une lunette donnant d'un objet à distance finie une image à l'infini. Comment peut-on transformer une lunette afocale en viseur? L'image intermédiaire ne peut plus se trouver dans le plan focal image de l'objectif puisque l'objet est à distance finie. Deux solutions existent :

- ou bien on rend l'objectif plus convergent en ajoutant une lentille convergente supplémentaire qu'on appelle une **bonnette** ;
- ou bien on éloigne l'objectif du plan du réticule où se forme l'image.

En général, un viseur n'est formé que de deux tubes : l'un contenant l'objectif et le réticule et le deuxième l'oculaire.

La distance objectif-réticule est donc en général fixée et c'est pour cela qu'on parle de **lunette à frontale fixe** (Figure 26). L'oculaire est réglable, pour pouvoir l'adapter à chaque utilisateur.

Le réglage d'un viseur est donc plus simple que celui d'une lunette à l'infini :

Il suffit de régler l'oculaire de manière à voir net le réticule. Puis déplacer le viseur sur le banc d'optique jusqu'à voir net l'objet visé.

Ce qu'il est important de retenir, c'est que, puisque la distance objectif-image est constante, la distance objet-viseur est constante elle-aussi.

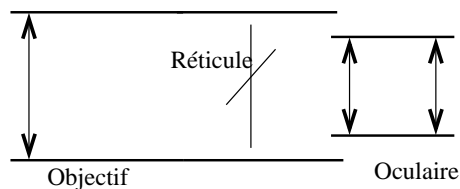


FIG. 26 – Structure d'un viseur

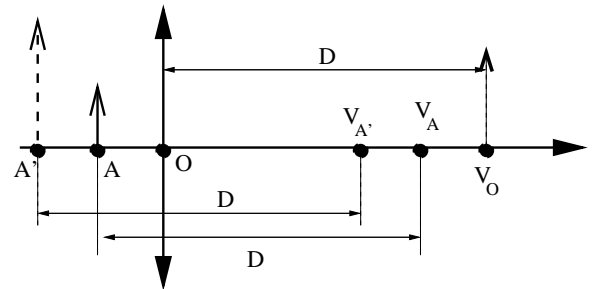


FIG. 27 – Méthode de visée

a) Comment faire une mesure relative avec un viseur ?

On étudie le cas d'une lentille de distance focale $f' = 20$ cm, et d'un objet placé à 5 cm avant la lentille. On désire vérifier la relation de conjugaison de Descartes :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$$

Pour cela, on vise d'abord l'objet A et on repère la position du viseur V_A . On place la lentille en une position qu'on appelle O et on la vise en repérant par exemple des traces à sa surface ou une pointe de crayon que l'on tient à proximité immédiate; la position du viseur est alors V_O . Enfin, on déplace le viseur jusqu'à voir l'image (placée en A') nette et on appelle $V_{A'}$ la position du viseur. Puisque la distance entre le viseur et ce qu'il vise est constante, comme le montre la figure 27, les positions relatives des points V_A , $V_{A'}$ et V_O sont les mêmes que celles des points A , A' et O et **il n'y a pas besoin de connaître la distance de visée D** . Pour vérifier la relation de conjugaison,

il suffit de remplacer les points A , A' et O par V_A , $V_{A'}$ et V_O :

$$\frac{1}{\overline{V_O V_{A'}}} - \frac{1}{\overline{V_O V_A}} = \frac{1}{f'}$$

Utiliser un viseur est le seul moyen de déterminer la position d'une image virtuelle puisqu'on ne peut pas la recueillir sur un écran.

b) Manipulation

Placer la lentille de distance focale $f' = 20$ cm et la diapositive l'une contre l'autre en accolant les cavaliers. Mesurer les positions $V_{A'}$ et V_O . Enlever la lentille et mesurer V_A . Calculer la vergence de la lentille avec la formule de conjugaison.

VII- Collimateur

Le collimateur sert à fabriquer un objet à l'infini. Il est formé de deux tubes (Figure 28) :

- l'un contenant une lentille convergente ;
- l'autre contenant un objet et une ampoule ou seulement une fente que l'on peut éclairer avec une source extérieure.

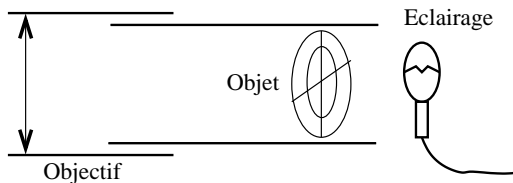


FIG. 28 – Structure d'un collimateur

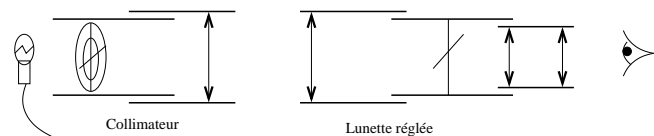


FIG. 29 – Réglage d'un collimateur

Pour régler le collimateur, il suffit d'amener l'objet ou la fente objet dans le plan focal objet de la lentille en faisant coulisser l'un des tubes par rapport à l'autre. Mais comment savoir si le collimateur est bien réglé ?

Le réglage à l'œil n'est pas possible car l'œil accommode et verra l'image nette même si elle n'est pas à l'infini.

Pour régler un collimateur on le vise avec une lunette réglée à l'infini et on tourne la bague de réglage du collimateur jusqu'à voir nette l'image (Figure 29). Comme la lunette ne permet d'observer que les objets à l'infini, cela signifie alors que l'image donnée par le collimateur et servant d'objet à la lunette est à l'infini.

Attention, pour éviter l'erreur de parallaxe, il ne faut pas oublier le hochement de tête.

VIII- Projection d'image et aberrations

On va décrire dans ce paragraphe la méthode pour projeter correctement une image, ainsi que quelques aberrations dues à l'utilisation de lentilles en dehors des conditions de Gauss.

1. Projection d'image

a) Montage théorique: choix de la lentille

On dispose, par exemple, d'un banc de 1,5 m et d'un objet de 5 cm × 5 cm (en fait souvent une diapositive 2,4 cm × 3,6 cm), ainsi que de deux lentilles convergentes de distance focale $f' = 10$ cm et $f' = 20$ cm. On veut obtenir un grandissement supérieur à 4 en valeur absolue : quelle lentille choisir ?

On considère une lentille convergente de distance focale image f' et de centre optique O . Soit un objet A réel, on cherche la condition pour obtenir une image A' réelle. On note $x = \overline{OA'} > 0$ et $D = \overline{AA'} > 0$. La relation de conjugaison de Descartes donne :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \Rightarrow (\overline{OA} - \overline{OA'})f' = \overline{OA} \overline{OA'}$$

or $\overline{OA} = \overline{OA'} + \overline{A'A}$, soit :

$$x^2 - xD + Df' = 0$$

On calcule le discriminant qui doit être positif puisqu'on cherche des solutions réelles :

$$\Delta = D^2 - 4f'D = D(D - 4f') \geq 0 \Rightarrow D \geq 4f' \text{ car } D > 0$$

Pour avoir une image réelle, il faut donc que $D \geq 4f'$. On obtient alors deux solutions positives :

$$\overline{OA'} = \frac{D \pm \sqrt{D^2 - 4Df'}}{2}$$

Sachant que $\overline{OA} = \overline{OA'} - D$, les deux couples objets images sont donc :

$$\overline{OA'} = \frac{D + \sqrt{D^2 - 4Df'}}{2} > 0 \text{ et } \overline{OA} = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4Df'}}{2} < 0$$

et

$$\overline{OA'} = \frac{D - \sqrt{D^2 - 4Df'}}{2} > 0 \text{ et } \overline{OA} = \frac{-D - \sqrt{D^2 - 4Df'}}{2} < 0$$

Dans les deux cas les grandissements sont négatifs et les images renversés. Dans le premier cas, le grandissement γ_1 est tel que :

$$|\gamma_1| = \left| \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \right| = \frac{D + \sqrt{D^2 - 4Df'}}{D - \sqrt{D^2 - 4Df'}} > 1$$

et dans le second cas :

$$|\gamma_2| = \left| \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \right| = \frac{D - \sqrt{D^2 - 4Df'}}{D + \sqrt{D^2 - 4Df'}} < 1$$

Il faut donc, lors d'une projection, une distance supérieure à $4f'$ entre l'objet et l'écran pour observer une image sur l'écran.

Dans le cas présent, on dispose sur le banc d'une distance $D = 1,5$ m, donc il faut prendre une lentille de distance focale inférieure à 37,5 cm.

On calcule maintenant le grandissement :

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -4$$

soit :

$$|\overline{OA'}| > 4|\overline{OA}|$$

sachant que $OA > f'$ pour avoir une image réelle, on en déduit $\overline{AA'} > 5f'$ d'où $f' < 30$ cm . Les deux lentilles dont on dispose ($f' = 10$ cm et $f' = 20$ cm) vérifient les conditions précédentes, alors laquelle choisir ? De manière à se placer dans les conditions de Gauss, il faut avoir un faisceau le moins ouvert possible (petits angles d'incidence sur la lentille) : on choisit donc la lentille la moins convergente c'est-à-dire celle de focale 20 cm.

b) 1^{re} manipulation

Réaliser la montage avec les positions calculées précédemment.

Est-ce que l'image est très lumineuse ?

Est-ce que l'éclairement de l'image est uniforme ?

c) Rôle du condenseur

Pour pallier ce problème **il faut utiliser un condenseur**.

Un condenseur est une lentille convergente (ou un ensemble de lentilles) de faible focale permettant de concentrer les rayons de la source de lumière vers l'objet pour qu'il soit plus lumineux (Figure 30). Le miroir présent derrière l'ampoule sert à renvoyer vers l'avant la lumière émise vers l'arrière.

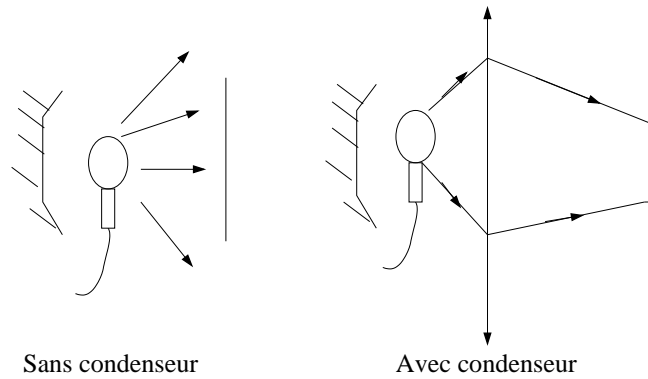


FIG. 30 –

d) 2^e manipulation

Dans le montage précédent, observer la tache lumineuse à l'arrière de la diapositive.

Placer le condenseur entre la source de lumière et la diapositive et observer de nouveau la tache lumineuse sur l'arrière de la diapositive? Quelle conclusion tirez-vous?

Déplacer le condenseur pour que le faisceau encadre juste la diapositive. Observer l'image et comparer à celle sans condenseur (en enlevant le condenseur de son pied).

Déplacer lentille et objet en les éloignant du condenseur (il faut refaire la mise au point sur l'écran).

Observer que le champ diminue. Observer que des aberrations chromatiques apparaissent car on utilise le bord du faisceau qui passe loin de l'axe optique du condenseur (hors conditions de Gauss).

e) Problème de la distorsion

Lorsqu'on veut que les images projetées soient grandes, on peut être gêné par le fait que la lentille de projection n'est plus utilisée rigoureusement dans les conditions de Gauss et que l'aplanétisme approché n'est plus vérifié. Dans ce cas, l'image projetée sur un écran ne peut être simultanément nette au centre et sur les bords. D'autre part on est souvent amené à utiliser un diaphragme pour contrôler l'éclairement. Question : où placer le diaphragme? La figure 31 propose trois positions pour le diaphragme dans le cas de l'image d'une grille.

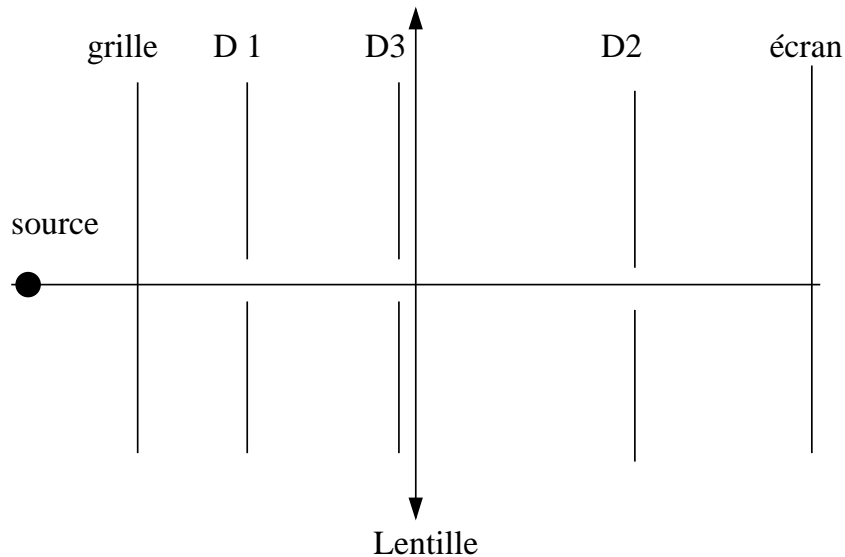


FIG. 31 –

On réalise donc l'image d'une grille sur un écran avec une lentille de focale $f' = 12,5$ cm. On place un diaphragme aux trois positions proposées.

Dans les positions (D1) et (D2) si le diaphragme est grand ouvert l'image est à peu près correcte bien que floue sur les bords. Par contre si le diaphragme est très fermé, l'image est bien sûr moins lumineuse mais on observe une

déformation de l'image. Dans la position (D1) l'image de la grille est déformée en " barillet " (Figure 33) alors que dans la position (D2), l'image de la grille est déformée en " coussinet " (Figure 32). Si le diaphragme est disposé contre la lentille, la distorsion n'apparaît plus lorsqu'on le ferme.

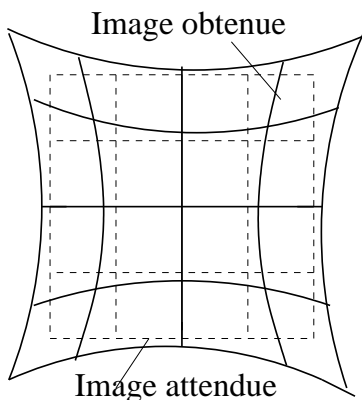


FIG. 32 – *Position coussinet*

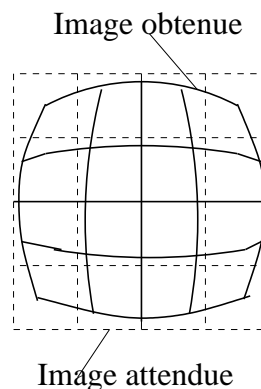


FIG. 33 – *Position barillet*

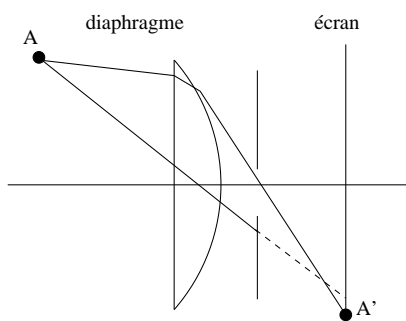


FIG. 34 – *Cousinnet*

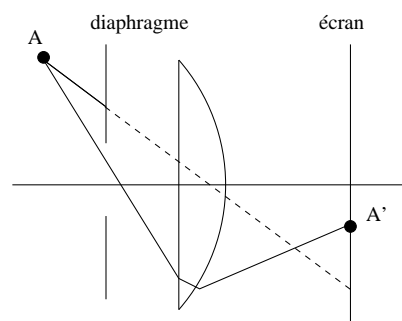


FIG. 35 – *Barillet*

Ceci est dû au fait que lorsque le diaphragme est fermé, parmi les rayons qui forment la partie extérieure de l'image, on sélectionne des rayons plus obliques, c'est-à-dire qui passent plus sur les bords de la lentille. Or les bords de la lentille rabattent plus les rayons vers l'axe, d'où les déformations observées sur les bords de l'image (il n'y a plus aplanétisme car ces rayons ne vérifient pas l'approximation de Gauss). Dans le cas du coussinet le rayon extérieur arrive sur l'écran plus près de l'axe optique que le rayon passant par le centre (Figure 35), et c'est le contraire dans le cas du barillet (Figure 34).

Cela confirme que pour utiliser une lentille dans les conditions de Gauss, il faut que les rayons passent près du centre optique.

D'autre part, on pourra vérifier sur un schéma, que pour que l'angle entre les rayons et les faces de la lentille soit le plus petit possible, il faut placer le côté plan d'une lentille plan convexe du côté où le faisceau est le plus convergent, donc placer le côté plan de la lentille du côté de l'objet ou de l'image le plus proche.

f) Montage correct pour effectuer une projection

On en déduit la méthode pour faire une projection correcte (Figure 36):

- faire par le condenseur l'image de la source sur la lentille;
- tourner le côté plan de la lentille du côté du faisceau le plus convergent;
- placer l'objet de manière à ce qu'il soit éclairé uniformément et totalement et que son image soit nette sur l'écran;
- placer le diaphragme contre la lentille et le fermer de manière à avoir l'éclaircissement souhaité.

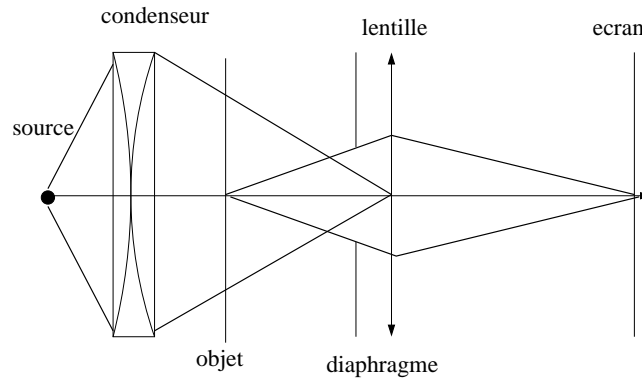


FIG. 36 –

2. Quelques aberrations

a) Aberrations chromatiques

Elles sont dues au fait que l'indice n du verre des lentilles dépend de la longueur d'onde λ suivant la loi de Cauchy :

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} \quad (3)$$

où a et b sont des constantes dépendant du matériau. Comme la distance focale f' est fonction de l'indice, elle dépend aussi de la longueur d'onde. Si l'on effectue le montage de la figure 37, avec une source de lumière blanche,

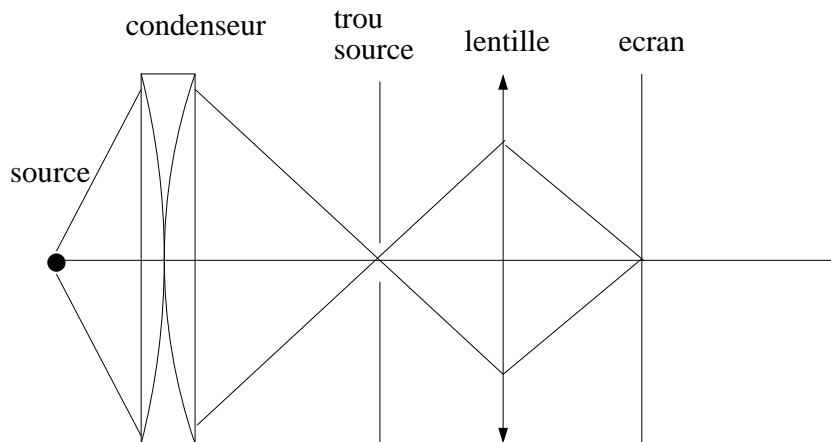


FIG. 37 –

on observera en déplaçant l'écran de gauche à droite d'abord l'image rouge puis l'image bleue du trou source. Plus précisément, de gauche à droite, le faisceau sera rouge au centre et bleu autour, puis bleu au centre et rouge autour. Pour éviter d'avoir des images différentes suivant la couleur, on peut utiliser des lentilles dites achromatiques qui sont formées de verre de différents indices de manière à compenser les déviations différentes suivant la couleur.

b) Astigmatisme et aberration de coma

À partir du montage précédent, si l'on tourne légèrement la lentille par rapport à son axe (Figure 38), on peut observer la déformation liée à l'astigmatisme : on observe un trait horizontal au lieu de l'image ponctuelle du trou source, puis en éloignant l'écran de la lentille, on observe une image ayant la forme d'un disque, puis un trait vertical.

Si on tourne fortement la lentille par rapport à son axe, on observe une tâche avec une " queue " : c'est l'aberration de coma.

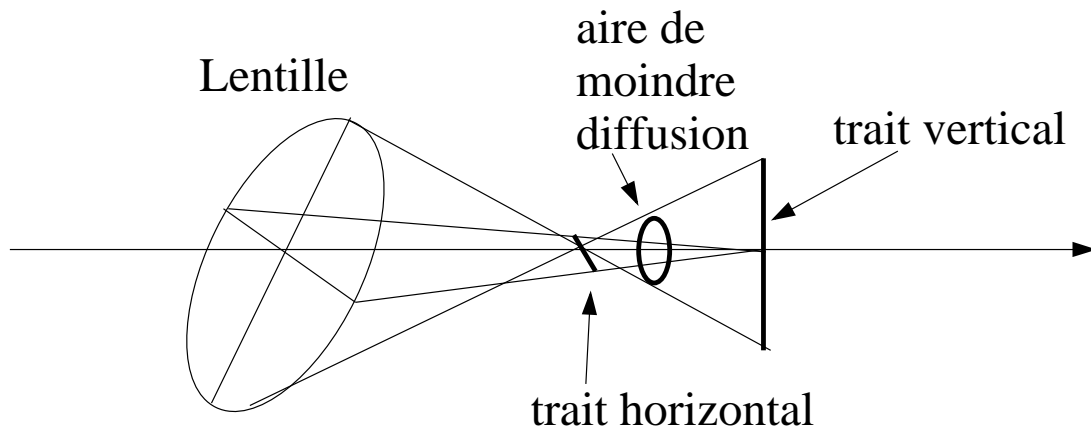


FIG. 38 -

IX- Le goniomètre

1. Description

Un goniomètre est un appareil de précision qui sert à mesurer des angles et donc des déviations de rayons lumineux par un prisme ou un réseau (Cf. cours de deuxième année). Le programme de première année limite l'étude du goniomètre au prisme.

Un exemple d'appareil est représenté sur la figure 39.

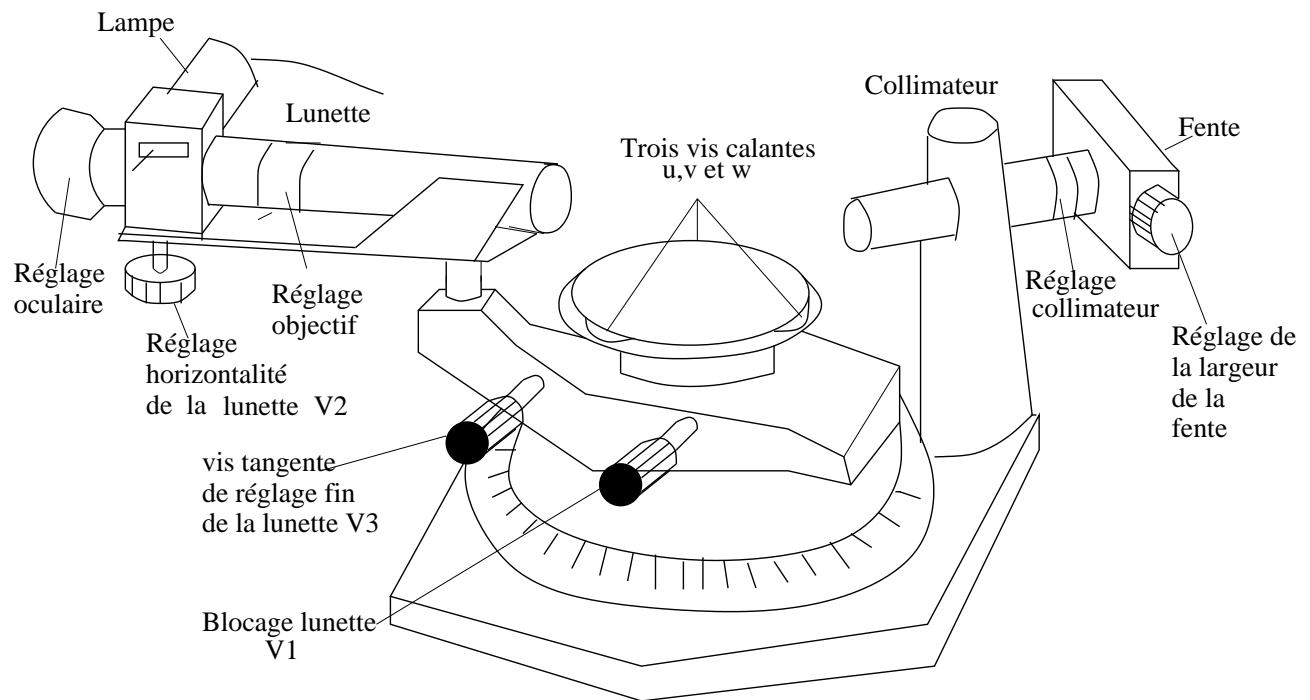


FIG. 39 - Goniomètre

Il comprend :

- un collimateur dont l'objet est une fente qu'il faut éclairer avec une lampe spectrale ;
- une lunette autocollimatrice montée sur un support mobile autour d'un axe central ;
- un plateau, lui aussi mobile autour de l'axe central.

On peut bloquer le support de la lunette par serrage de la vis V_1 . Cette vis V_1 étant serrée, de légères rotations sont encore possibles au moyen d'une vis tangente V_3 qu'on doit laisser au milieu de sa course et n'utiliser que pour

parfaire les pointés. Il existe aussi une vis de blocage du plateau et une vis de réglage fin qui n'ont pas été représentées pour ne pas alourdir le schéma.

La lunette peut basculer par rotation autour d'un axe horizontal, passant près de l'objectif, au moyen d'une vis V_2 .

Le collimateur est supporté par une potence fixe. La fente d'ouverture réglable peut être déplacée par rapport à l'objectif par rotation de la bague de réglage du collimateur.

Le plateau comprend deux plates-formes solidaires, tournant autour de l'axe central. La plate-forme supérieure est mobile verticalement par l'intermédiaire de 3 vis calantes u , v et w .

2. Réglage

Puisqu'on cherche à effectuer des mesures précises, il est nécessaire de régler parfaitement l'appareil grâce à la démarche donnée ici. Le réglage s'effectue en quatre étapes.

a) Lunette autocollimatrice

C'est le premier instrument à régler. On rappelle la procédure, mais pour plus de détails, voir paragraphe 3..

BUT : la lunette doit donner d'un objet à l'infini une image au Punctum Remotum de l'œil.

1. Éclairer le réticule en allumant l'ampoule et en baissant la lame semi-réfléchissante. Pour vérifier que la lame est abaissée, il suffit de vérifier que de la lumière sort par l'objectif.
2. Régler l'oculaire.
3. Régler l'objectif par autocollimation soit sur un miroir plan, soit sur une lame à faces parallèles ou une face du prisme posé sur le plateau, (il peut être nécessaire d'agir sur les vis calantes du plateau pour que la lumière réfléchie repasse par l'objectif).
4. Vérifier qu'il n'y a pas de parallaxe en hochant la tête.

b) Collimateur

BUT : le collimateur doit donner de la fente une image à l'infini (voir paragraphe VII-).

L'éclairer à l'aide d'une lampe spectrale, choisir une fente assez large, et le viser avec la lunette déjà réglée à l'infini. Tourner la bague du collimateur jusqu'à voir la fente nette, surtout sur les bords. Une fois le réglage effectué, rendre la fente fine pour les réglages ultérieurs.

c) Réglage de l'axe de la lunette perpendiculairement à l'axe central

BUT : il s'agit de placer la lunette de façon que, par rotation autour de l'axe central, l'axe de la lunette balaie un plan et non un cône. Sinon la mesure des angles de visée est fautive. Pour cela, il est nécessaire que l'axe optique de la lunette soit parfaitement perpendiculaire à l'axe de rotation. Le réglage se fait par autocollimation sur une lame à faces parallèles.

Ce réglage n'existe pas sur tous les goniomètres.

C'est la rotation possible de la lunette autour d'un axe horizontal qui permet ce réglage.

1. On rend d'abord la plate-forme grossièrement horizontale (en fait perpendiculaire à l'axe de rotation). Pour cela, descendre le plateau complètement puis le remonter en tournant chaque vis calante (u, v, w) de quelques tours (entre 3 et 10 suivant les goniomètres).
2. On pose la lame de verre à faces parallèles au centre du plateau, de façon à ce que sa base d'appui soit confondue avec une hauteur du triangle équilatéral formé par les trois vis calantes (Figure 40). Il faut rendre une des vis inopérante (u dans le cas de la figure), car le réglage avec trois vis serait difficile.
3. On règle la vis V_2 (Figure 39) de la lunette à mi-course.
4. On tourne la lunette pour avoir autocollimation sur la face F_1 de la lame (position L_1 sur la figure 40). On doit observer une portion de disque lumineux avec l'image du réticule (Figure 41), sinon vérifier les précédents points (1), (2) et (3) du réglage. Centrer les figures de manière à ce que les traits verticaux des réticules se superposent. Le but est de faire coïncider l'image du réticule \mathcal{R}' avec le réticule \mathcal{R} ; il reste donc à superposer les traits horizontaux.

Pour cela, agir sur la vis V_2 (horizontalité de la lunette) pour rattraper la moitié du décalage (Figure 42) et sur la vis calante (w) la plus proche pour rattraper l'autre moitié du décalage (Figure 43). La lumière issue de

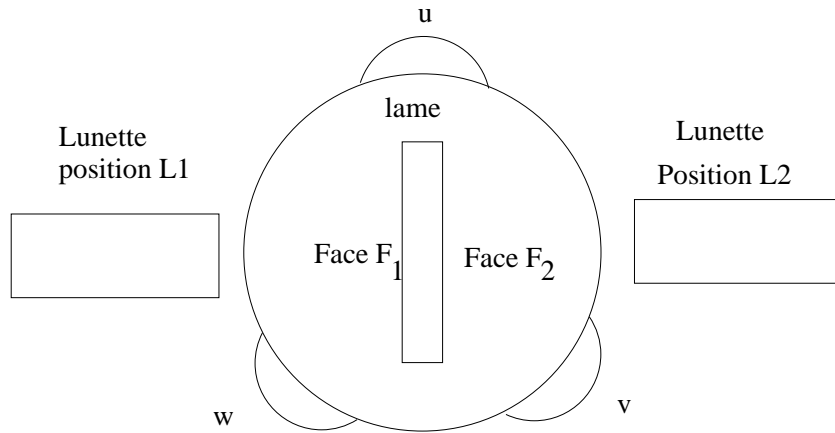


FIG. 40 – Positionnement de la lame

\mathcal{R} revient alors exactement en \mathcal{R}' : \mathcal{R}' est confondu avec \mathcal{R} , ce qui indique que la lunette est perpendiculaire à F_1 (Figure 44). Mais en général, les faces de F_1 ne sont pas parallèles à l'axe de rotation du plateau. Elle sont inclinées de ϵ par rapport à l'axe et donc l'axe de la lunette n'est pas perpendiculaire à l'axe de rotation.

5. On tourne la lunette de 180° (ou, ce qui revient au même, on tourne le plateau de manière à amener la deuxième face F_2 devant la lunette en position L_2 sur la figure 40).

L'incidence des rayons sur F_2 est alors 2ϵ comme sur la figure 45. Les traits horizontaux de \mathcal{R} et \mathcal{R}' ne sont plus confondus (Figure 46). On procède alors comme dans la position 1. On superpose les traits verticaux de \mathcal{R} et \mathcal{R}' . Puis on agit sur la vis V_2 de la lunette pour rattraper une moitié du décalage horizontal de \mathcal{R} et \mathcal{R}' , puis sur la vis calante la plus proche qui est alors (v) pour rattraper l'autre moitié du décalage.

6. On repasse à l'autocollimation sur F_1 (position L_1) par rotation de 180° de la lunette ou du plateau. On devrait retrouver \mathcal{R} et \mathcal{R}' en coïncidence exacte, mais il faut en général affiner le réglage car le rattrapage à vue de la moitié de l'écart a été seulement approché et il influe sur les autres opérations. On recommence alors sur F_1 les manœuvres effectuées au point (4) du mode opératoire : rattrapage de l'écart moitié par la vis calante la plus proche (w) et moitié avec V_2 . Puis on repasse à F_2 (position L_2) etc. jusqu'à coïncidence parfaite de \mathcal{R} et \mathcal{R}' sur F_1 et F_2 (Figure 47). Quatre ou cinq demi-tours suffisent en général pour avoir un bon réglage.

L'axe de la lunette est alors perpendiculaire à l'axe de rotation du plateau. **On ne touchera plus à V_2 par la suite.**

Il se peut qu'initialement on ne voit qu'une très faible partie du disque lumineux dans la lunette. Le rattrapage total de l'écart horizontal en position (1) entraînera un décalage trop important en position (2) et on ne verra plus rien dans la lunette (Figure 48). Il est préférable dans ce cas, d'essayer de recentrer petit à petit le disque lumineux avec la vis V_2 .

d) Positionnement du prisme sur la plate-forme

BUT : il s'agit de rendre l'arête utile du prisme parallèle à l'axe de rotation, et donc les deux faces utiles du prisme orthogonales aux axes optiques du collimateur et de la lunette (le prisme n'est pas taillé de façon idéale, et sa base n'est pas forcément perpendiculaire à l'arête, donc il faut incliner la plate-forme pour compenser ce défaut).

1. Rendre de nouveau la plate-forme grossièrement horizontale comme au point (1) du réglage précédent.
2. Repérer l'arête d'angle A utilisée.
3. Imaginer le triangle équilatéral formé par les vis calantes (u, v et w). Placer le prisme comme indiqué sur le schéma de la figure 49. L'arête A dépasse légèrement du centre de la plate-forme, les faces utiles F_1 et F_2 sont perpendiculaires aux côtés uw et vw du triangle équilatéral défini à partir des trois vis calantes.
4. Tourner le plateau pour amener A à l'opposé du collimateur. Le bloquer. Tourner la lunette pour observer l'autocollimation sur F_1 (position L_1). Amener \mathcal{R}' en coïncidence avec \mathcal{R} en agissant sur la vis tangente de la lunette V_3 pour faire coïncider les traits verticaux, et sur la vis calante (w) du plateau pour faire coïncider les traits horizontaux.
5. Tourner ensuite la lunette pour observer l'autocollimation sur F_2 (position L_2). Amener \mathcal{R}' en coïncidence avec \mathcal{R} en agissant sur la vis tangente de la lunette V_3 et sur la vis calante (v) du plateau.

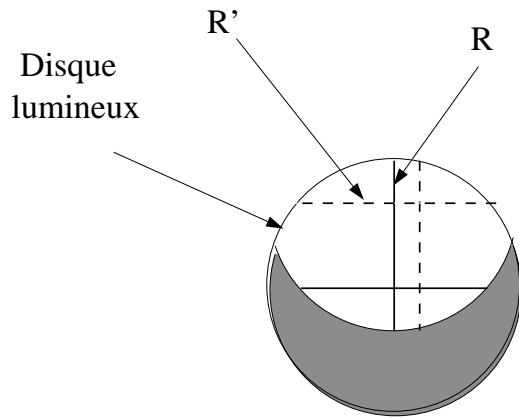


FIG. 41 – *Vision initiale*

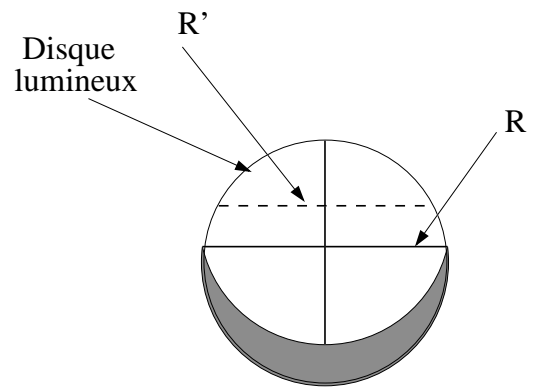


FIG. 42 – *Rattrapage moitié par V_2*

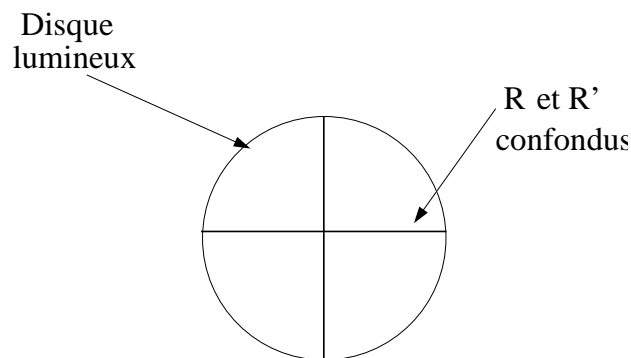


FIG. 43 – *rattrapage moitié par w*

6. Revenir à la position L_1 , réaliser à nouveau la coïncidence, revenir à L_2 , recommencer, etc. jusqu'à coïncidence parfaite.

La face F_1 est alors perpendiculaire à L_1 , la face F_2 est perpendiculaire à L_2 , et donc l'arête utile est parallèle à l'axe central car perpendiculaire au plan L_1L_2 (en effet le plan de balayage de l'axe de la lunette est perpendiculaire à l'axe central par le réglage précédent).

Les réglages sont terminés : il ne faut plus déplacer le prisme sur la plate-forme.

Pour effectuer des mesures sur les spectres donnés par le prisme, il est nécessaire de relever la lame semi-réfléchissante de la lunette, sinon il y a des images parasites.

3. Mesure de l'angle d'un prisme

La première des mesures à effectuer lorsqu'on a réglé le goniomètre est celle de l'angle utile du prisme A . Il existe deux méthodes.

a) Première méthode

On mesure l'angle entre les deux normales des faces F_1 et F_2 du prisme par autocollimation, c'est-à-dire entre les positions L_1 et L_2 de la lunette sur la figure 49. L'angle mesuré entre les deux positions est $\pi - A$, on en déduit la valeur de A (Figure 50).

b) Deuxième méthode

On utilise le collimateur éclairé par une lampe spectrale, avec une fente fine. Orienter le plateau jusqu'à ce que le faisceau éclaire les deux faces utiles du prisme. On vise alors avec la lunette les positions des rayons réfléchis (figure 51). L'angle entre les deux positions est $\beta = 2A$. En effet, d'après la figure 51, $\beta = A + x + y$ et $A' = (\pi/2 - x) + (\pi/2 - y)$. Or, on a déjà démontré dans le paragraphe sur le prisme, que $A' = \pi - A$. On en déduit que $x + y = A$ et $\beta = 2A$. Cette deuxième méthode est plus précise que la première car, comme on mesure $2A$ avec la même incertitude Δ que dans la première méthode (2 fois l'incertitude sur la lecture de la position de la lunette), l'incertitude sur A est $\Delta/2$.

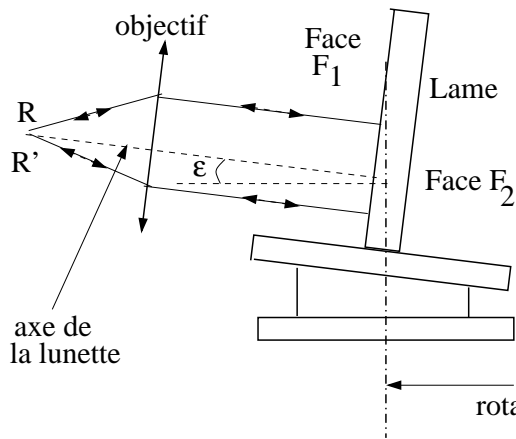


FIG. 44 -

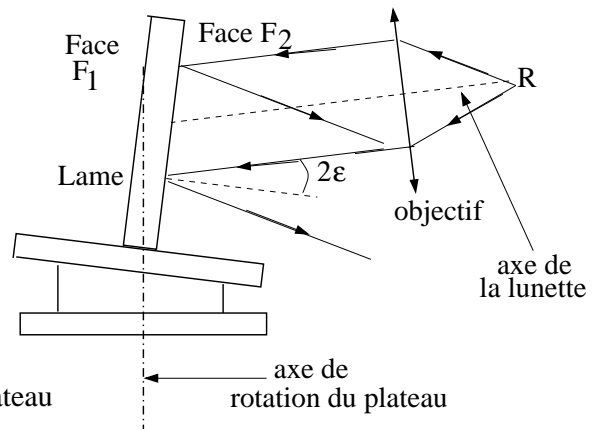


FIG. 45 -

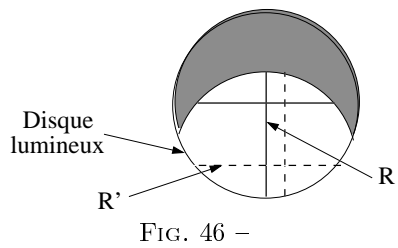


FIG. 46 -

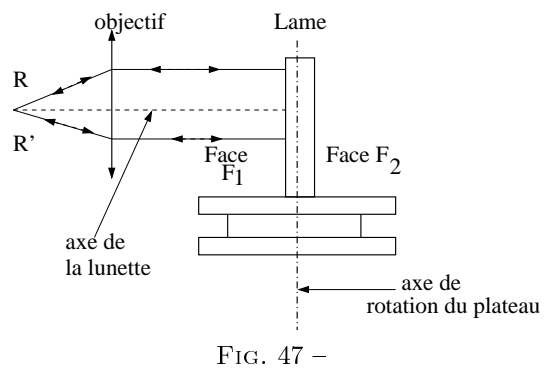


FIG. 47 -

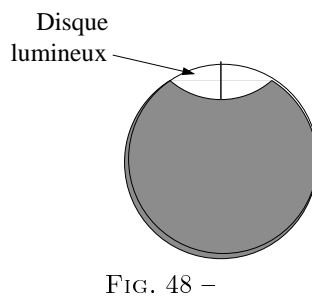


FIG. 48 -

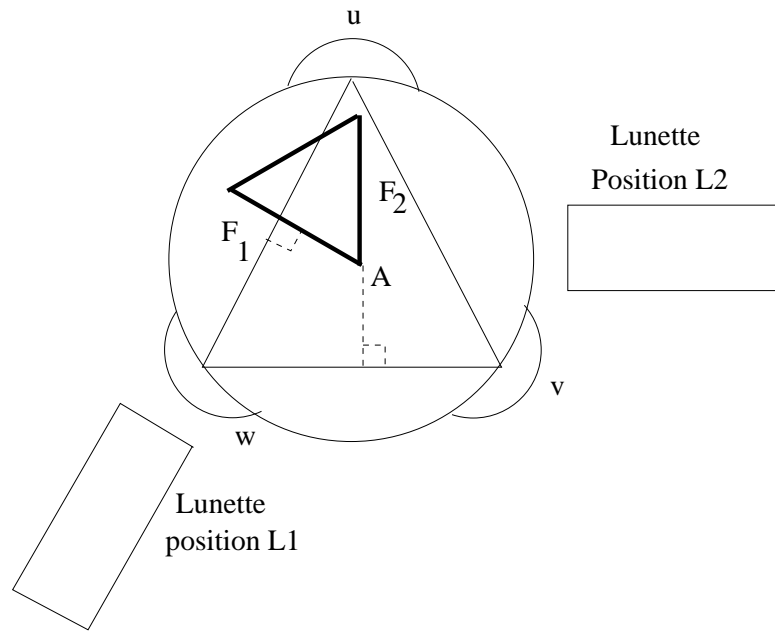


FIG. 49 – Positionnement du prisme

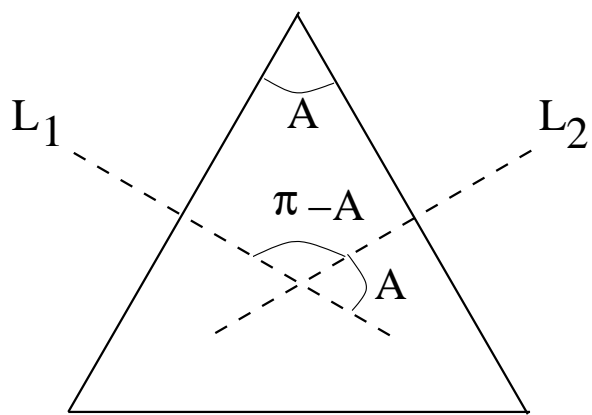


FIG. 50 – Méthode 1

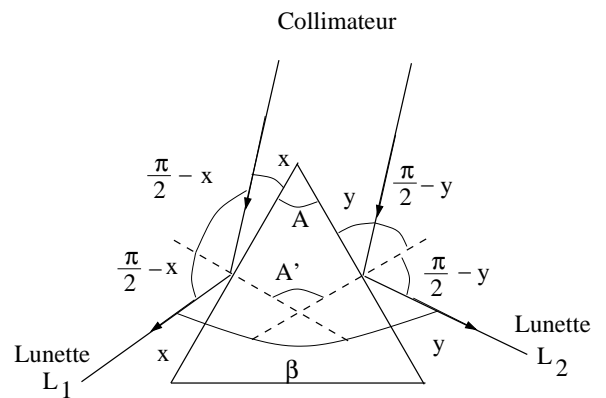


FIG. 51 – Méthode 2