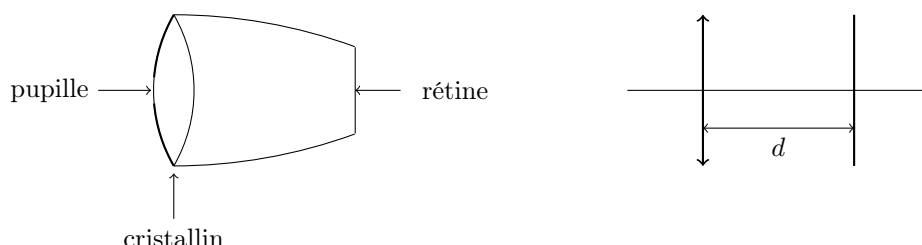


Instruments d'optique

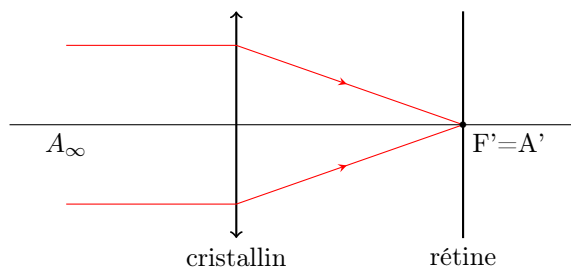
1 L'oeil

L'oeil peut être modélisé simplement par une lentille convergente de focale variable (le cristallin) et un écran (la rétine).

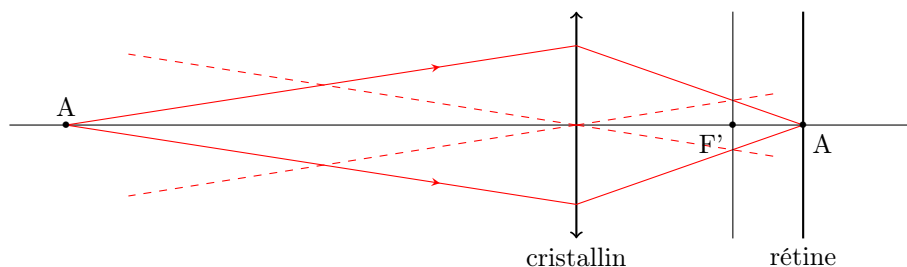


1.1 Accommodation

Le fait que la distance focale du cristallin puisse varier permet à l'oeil d'accommoder, c'est à dire de former nette sur la rétine l'image d'un objet quelle que soit sa distance par rapport à l'oeil. Lorsque l'oeil accommode à l'infini, la rétine est dans le plan focal image du cristallin (la distance focale du cristallin est alors égale à la distance entre le cristallin et la rétine), c'est la situation la plus reposante pour l'oeil.



Pour accommoder à distance finie, le cristallin devient plus convergent et le plan focal image est situé avant la rétine (la distance entre le cristallin et la rétine est toujours la même, c'est la distance focale du cristallin qui est plus petite), cette situation est plus fatigante pour l'oeil, des muscles devant se contracter pour déformer le cristallin).



Pour un oeil normal, la plage d'accommodation va de 25 cm (c'est un simple critère arbitraire, cela varie en réalité selon les individus, avec l'âge...) à l'infini. On appelle respectivement PP (punctum proximum) et PR (punctum remotum) les limites de la plage d'accommodation.



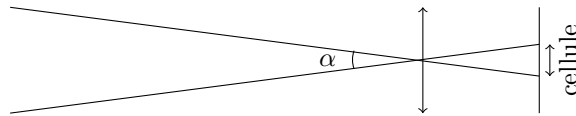
La distance cristallin-rétine est de l'ordre de 1,7cm. Avec cette valeur lorsque l'oeil accommode à l'infini la distance focale est de 1,7cm et lorsqu'il accommode au plus proche (on prend 25cm) elle est de 1,6cm :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{2} + \frac{1}{25} = 0,628 \quad \text{ce qui donne} \quad f' = 1,6\text{cm}$$

1.2 Résolution angulaire, champ de vision

En considérant la taille h du plus petit détail enregistrable sur la rétine (de l'ordre de la taille d'une cellule réceptrice, ces cellules étant très proches les unes des autres au centre de la rétine) et la distance cristallin-rétine de l'oeil d , on peut obtenir une estimation de la résolution angulaire de l'oeil :

$$\alpha = \frac{h}{d} \simeq \frac{0,005}{17} \simeq 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \simeq 0,017^\circ$$



Cela signifie que à un mètre le plus petit détail observable est de l'ordre de 0,3mm, à 10m il est de 3mm, à 1km de 30cm etc...

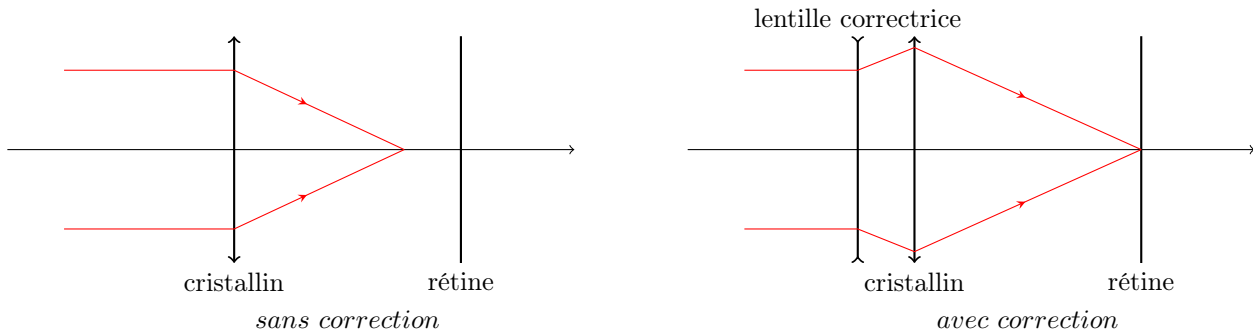
Cette valeur de $3 \cdot 10^{-4}$ radians doit en fait être nuancée, elle dépend aussi de la taille de la pupille (une trop petite ouverture de la pupille augmente l'influence de la diffraction, une trop grande ouverture augmente les aberrations). De plus, cette résolution ne concerne que quelques degrés d'ouverture du champ de vision, l'oeil peut voir sur une large plage d'angles, mais de moins en moins bien au fur et à mesure que l'angle augmente par rapport à la direction principale (ceci est dû au fait que les photorécepteurs sont moins nombreux en périphérie qu'au centre, et également aux aberrations dues à angles plus importants).

1.3 Défauts et correction

Le défaut le plus courant est la myopie, il est en général dû à une distance cristallin-rétine trop importante (typiquement plus de 20mm), mais il arrive également que le cristallin soit trop convergent. Le résultat est que, même au repos, le plan focal image du cristallin est situé avant la rétine, empêchant ainsi la vision à l'infini (en pratique, la vision à plus de quelques mètres). La plage d'accommodation est globalement rapprochée de l'oeil par rapport à un oeil normal. (un oeil myope peut voir plus proche qu'un oeil normal).



Pour corriger la myopie, il faut faire converger les rayons lumineux incidents un peu plus loin, et donc utiliser une lentille *divergente* :



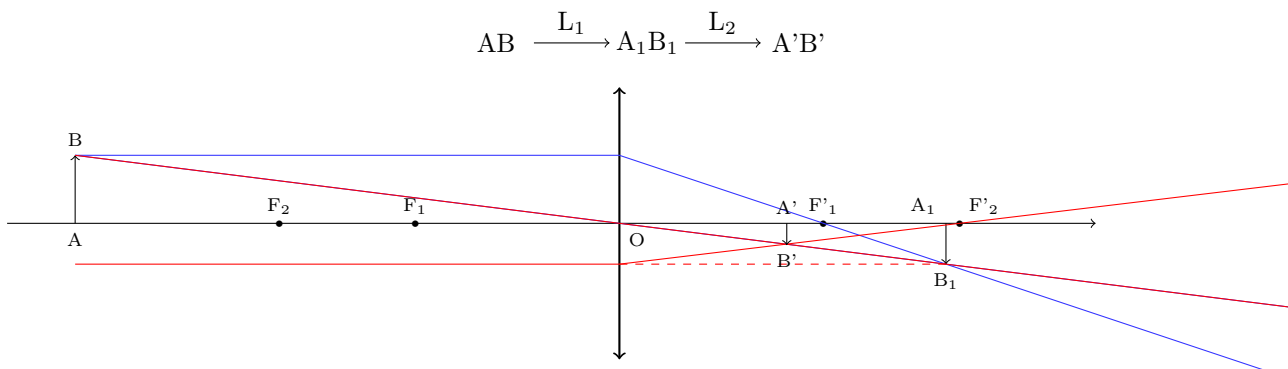
Le défaut inverse, plus rare, s'appelle hypermétropie, il n'est pas gênant pour voir au loin mais limite la vision de près. La plage d'accommodation est éloignée de l'oeil, et bien entendu il faut utiliser une lentille convergente pour la correction.

2 Lentilles accolées

Ce qui va suivre concerne une situation idéale où les centres des lentilles sont confondus. Lorsque les lentilles sont collées l'une à l'autre (accolées), ce peut être une bonne approximation de la réalité. Mais si les lentilles sont distantes, cela ne fonctionne pas (une association de deux lentilles distantes n'est pas équivalente à une lentille mince).

2.1 Théorème des vergences

On considère deux lentilles accolées, on peut construire l'image en utilisant la démarche habituelle :

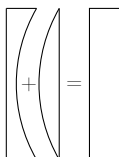


On peut établir un résultat intéressant : la vergence de la lentille équivalente est simplement la somme des vergences des deux lentilles accolées :

$$c_{eq} = c_1 + c_2$$

En effet, l'application de la formule de conjugaison à chacune des deux lentilles donne (le centre est O pour les deux lentilles) : $\frac{1}{OA_1} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f_1'}$ et $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA_1} = \frac{1}{f_2'}$ et donc en sommant : $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'}$, d'où $\frac{1}{f_{eq}'} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'}$, ce qui correspond au résultat énoncé ci dessus.

Il est intéressant de remarquer que si l'on accole des lentilles de focales exactement opposées (donc une convergente et une divergente) on obtient une «lentille» équivalente de vergence nulle (focale infinie) qui ne dévie pas la lumière, ce qui est illustré ci dessous.



2.2 Applications

Une application intéressante est la correction des défauts de l'oeil avec une lentille de contact (dans ce cas il est légitime de considérer les deux lentilles comme accolées, cela ne fonctionne pas en revanche si on considère une correction avec des verres portés par des lunettes). Par exemple, pour un oeil myope de distance cristallin-rétine égale à $d=20\text{mm}$ et de distance focale du cristallin $18,4\text{mm}$ au repos, il faudrait que la distance focale de l'ensemble cristallin+lentille de contact soit égale à 20mm . Cela conduit à :

$$\frac{1}{f'_{cristallin}} + \frac{1}{f'_{contact}} = \frac{1}{d} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{f'_{contact}} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f'_{cristallin}}$$

On trouve ainsi $f'_{contact} = -23\text{cm}$, ce qui correspond à une vergence de $-4,3\delta$.

Une autre application est de mesurer la distance focale d'une lentille divergente, ce qui n'est pas du tout évident de manière directe : on forme un ensemble convergent en accolant la lentille divergente inconnue et une lentille convergente connue (il faut bien sur que la lentille convergente ait une distance focale plus courte que la lentille divergente), puis on mesure la distance focale de l'ensemble comme on le ferait pour une lentille convergente. Il ne reste qu'à déduire la focale de la lentille divergente avec le théorème des vergences.

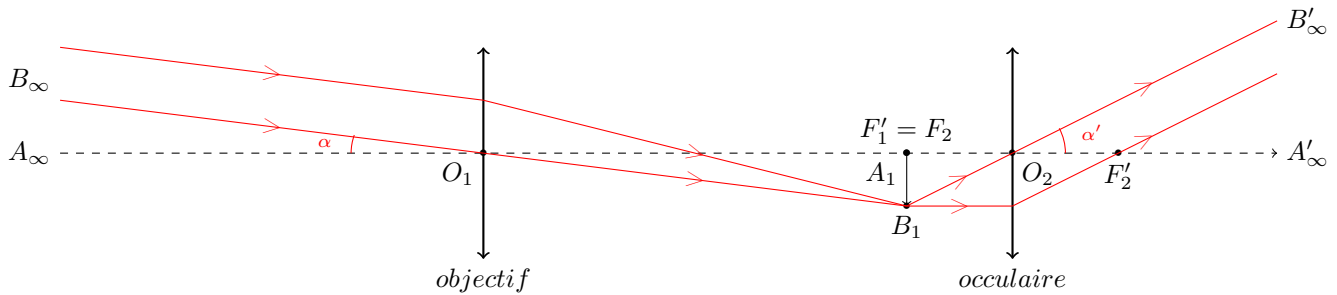
3 Lunette astronomique

3.1 Intérêt et réalisation

Une lunette astronomique (et par extension un télescope, qui est en quelque sorte l'évolution de la lunette astronomique) a deux rôles :

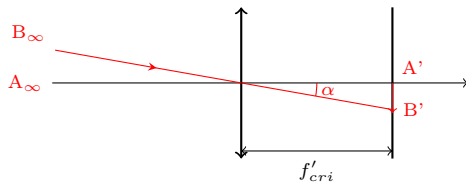
- Permettre de former sur la rétine de l'observateur une image plus grande qu'avec une observation directe
- Collecter un maximum de lumière, plus que celle qui entrerait par la pupille de l'oeil en observation directe

Une lunette astronomique est fondamentalement constituée de deux lentilles, l'objectif qui est nécessairement convergent et de grande focale, et l'oculaire qui peut être convergent ou divergent, et de courte focale. C'est un système *afocal*, ce qui signifie que l'image d'un objet à l'infini est à l'infini (ainsi, une lunette astronomique est conçue pour observer des objets lointains, l'oeil accommodant à l'infini). La conséquence en termes de construction est que le foyer image de l'objectif et le foyer objet de l'oculaire doivent coïncider.

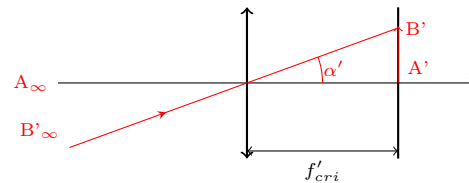


3.2 Grossissement

Le schéma précédent permet de mettre en évidence le fait que l'angle α' sous lequel est vu l'image donnée par la lunette est plus grand que l'angle α sous lequel serait vu l'objet sans la lunette. C'est exactement ce qui est important, car la taille de l'image sur la rétine est proportionnelle à cet angle (elle est égale à la focale du cristallin multipliée par cet angle, l'oeil accommodant à l'infini). On remarque également que l'observation au travers de la lunette astronomique renverse le sens de l'image sur la rétine.



objet vu sans la lunette



objet vu au travers de la lunette

Le rapport entre les deux angles est appelé le *grossissement* de la lunette :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

On établit facilement le lien entre le grossissement (en valeur absolue) et les distances focales de l'objectif et de l'oculaire :

$$G = \frac{f'_{obj}}{f'_{occ}}$$

3.3 Téléscoptes

Historiquement, l'observation de l'espace a débuté avec des lunettes astronomiques. L'une des dernières mises en service (à la fin du 19^{ème} siècle), la lunette de l'observatoire Yerkes, avait un objectif d'environ 1m de diamètre pour une distance focale proche de 20m (image ci-contre).

Le principe d'un télescope est semblable à celui de la lunette astronomique, avec un objectif de grande focale et un oculaire de courte focale, la différence essentielle étant que l'objectif est constitué d'un miroir convergent au lieu d'une lentille convergente.

Il est en effet impossible de construire des lentilles de grand diamètre (pour de simples raisons de résistance mécanique), or il est essentiel pour un télescope de collecter le plus possible de lumière (les plus grands télescopes actuels ont un miroir primaire d'une dizaine de mètres de diamètre). Les miroirs ont en plus l'avantage de ne pas disperser la lumière, ce qui évite les aberrations chromatiques.

Le miroir primaire, qui joue le même rôle que l'objectif d'une lunette, est soit sphérique, soit parabolique (le miroir parabolique est plus performant pour un télescope, d'autant plus que l'objet observé est dans l'axe du télescope).

Il faut ensuite ramener la lumière vers l'observateur, pour cela il existe essentiellement deux configurations, celle de Newton et celle de Cassegrain : Dans un télescope de Newton un miroir plan de petites dimensions placé avant le miroir primaire renvoie la lumière à 90 degrés de l'axe optique, alors que dans un télescope de Cassegrain (et ses nombreuses variantes) un miroir secondaire (convexe ou parabolique) réfléchit la lumière dans la direction de l'axe optique, qui passe ensuite par une petite ouverture au sommet du miroir primaire.

Il faut finalement observer au travers d'un oculaire, équivalent à une lentille convergente mais en réalité constitué de plusieurs lentilles (pour améliorer la qualité des images, comme un objectif d'appareil photo), qui joue exactement le même rôle que l'oculaire d'une lunette.

Si l'on veut observer directement avec l'œil, l'image finale est à priori à l'infini (on peut toujours régler l'oculaire à sa vue) et l'ensemble du télescope est donc afocal, mais sur les télescopes récents on fait l'acquisition des images (comme dans un appareil photo numérique) et l'image finale est donc à distance finie. Cela permet en outre de retraiter les images pour les corriger, par exemple, des turbulences atmosphériques. Il y a également un télescope (Hubble) satellisé qui permet d'éviter les problèmes liés à la traversée de l'atmosphère par la lumière collectée.

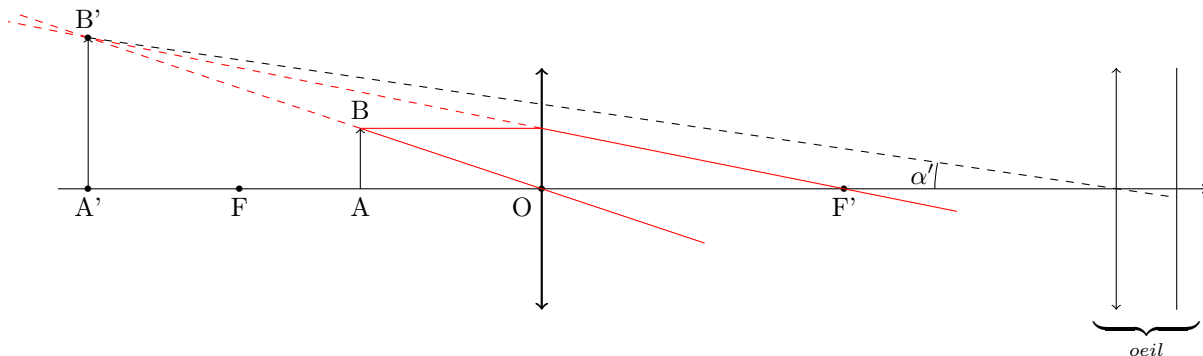


4 Microscope

4.1 Loupe

Une loupe est une lentille convergente d'assez courte focale, environ 10 cm, utilisée en plaçant l'objet entre la lentille et son plan focal objet. L'image est donc virtuelle. Ce que «l'on a gagné» est que l'angle α' sous lequel on voit l'objet au travers de la loupe est plus grand que l'angle α sous lequel on voit l'objet sans la loupe.

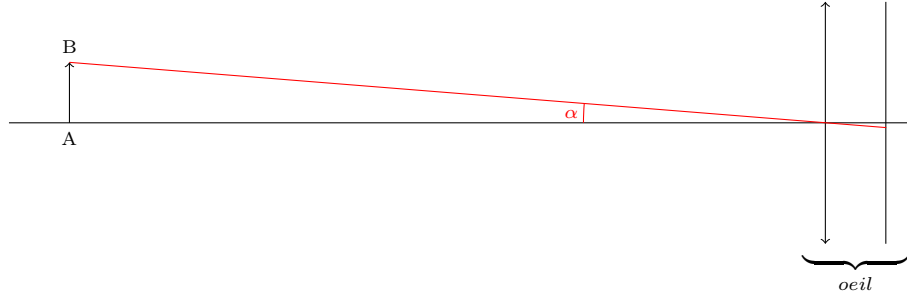
Application : On va considérer un exemple d'utilisation d'une loupe avec une lentille de distance focale $f' = 10\text{cm}$ et un objet AB de hauteur 2cm. Dans les deux situations (avec et sans la loupe) la distance entre l'œil et l'objet est de 25cm. La loupe sera placée à 6cm après l'objet. (faire des dessins à l'échelle 0,5).



On trouve $\overline{OA'} = -15\text{cm}$ et $\overline{A'B'} = 5\text{cm}$ (la distance entre l'image et l'oeil est donc de 34cm), ce qui permet de calculer la taille de l'image sur la rétine (on prend comme distance cristallin-rétine $d=2\text{cm}$) :

$$\text{taille image} = \alpha' d = \frac{5}{34} * 2 = 0,29\text{cm}$$

On compare avec ce que l'on obtient sans la loupe :



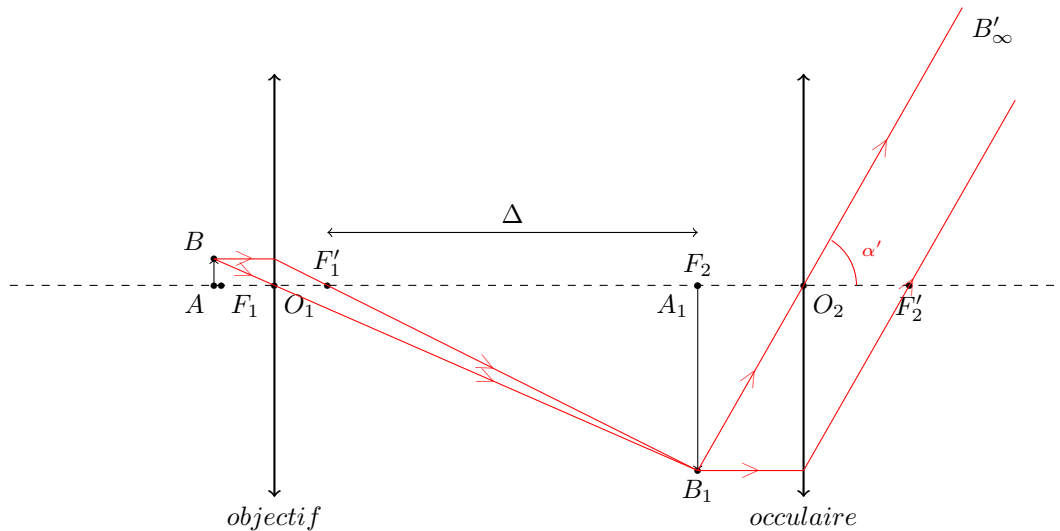
Cette fois la taille de l'image sur la rétine vaut :

$$\text{taille image} = \alpha d = \frac{2}{25} * 2 = 0,16\text{cm}$$

On voit que la taille de l'image sur la rétine a été quasiment multipliée par deux, ce nombre est le *grossissement* apporté par la lentille dans cette situation. Le grossissement est défini comme le facteur par lequel a été multiplié l'angle sous lequel on voit l'image.

4.2 Microscope

Le but d'un microscope est d'augmenter la visibilité des détails d'un objet proche de l'oeil. Le plus petit détail discernable à l'oeil nu étant de l'ordre de 50 μm , un microscope devient nécessaire pour observer des objets de taille inférieure à cette limite. Schématiquement, un microscope est constitué de deux lentilles convergentes, un objectif et un oculaire. Jusqu'ici cela ressemble à une lunette astronomique, mais il y a une différence essentielle : l'objet que l'on veut observer n'est pas à l'infini (l'image étant, pour un réglage standard de l'oculaire, toujours à l'infini). Ainsi le microscope n'est *pas* un système afocal, les foyers image de l'objectif et objet de l'oculaire ne sont pas confondus (et même nettement séparés), leur distance est appelée intervalle optique du microscope : $\Delta = F_1'F_2$. L'autre point qui diffère fondamentalement de la lunette astronomique est l'ordre de grandeur de la focale de l'objectif, typiquement quelques mm (alors que pour l'oculaire c'est plus ou moins comme pour une lunette, de quelques cm).



On a donc un objectif convergent de distance focale f_1' qui donne d'un objet AB situé légèrement avant de son foyer objet une image intermédiaire A_1B_1 , laquelle donne ensuite par l'oculaire une image finale $A'B'$ à l'infini.

Il faut donc que l'image intermédiaire soit dans le plan focal objet de l'oculaire, ce qui implique que l'objet doit être placé à une distance précise de l'objectif, il faut vérifier (la formule de Newton s'avère ici pratique car elle fait directement apparaître l'intervalle optique) :

$$\overline{F_1 A} = -\frac{f_1'^2}{\Delta}$$

Comme précédemment le grossissement est le rapport entre l'angle α' sous lequel on voit l'objet au travers du microscope et l'angle α sous lequel on le voit à l'oeil nu. Pour calculer α on prend à priori une distance de 25cm entre l'oeil et l'objet.