qui coïncident exactement avec 460 raies sombres du spectre solaire : donc il y a du fer en vapeurs incandescentes dans le Soleil. Les métaux dont la présence dans le Soleil paraît certaine, sont le fer, le calcium, le magnésium,

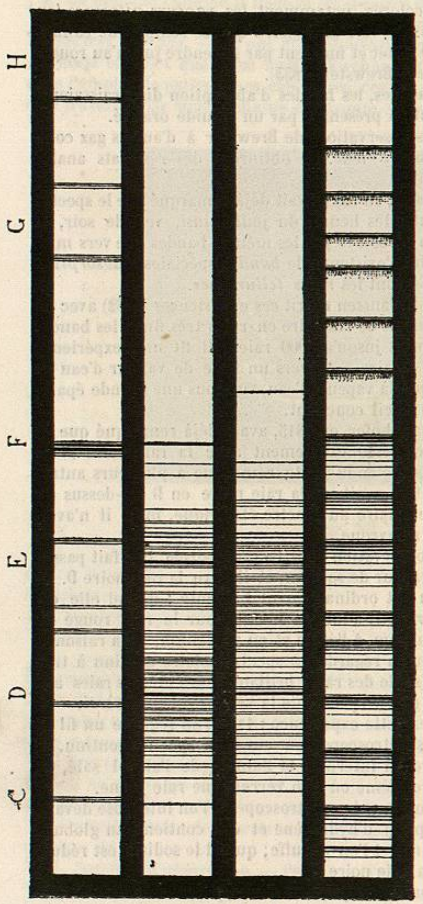

Fig. 562.

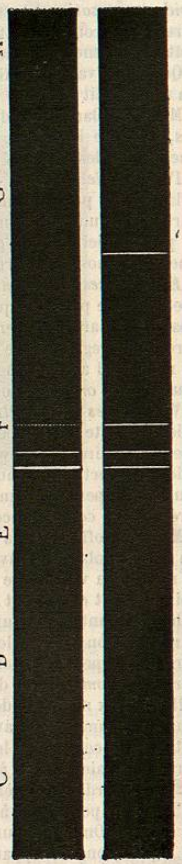

Fig. 563.

le sodium, le chrome, le nickel, le manganèse et l'hydrogène, et probablement le baryum, le cadmium et le zinc.

La Lune donne le même spectre que le Soleil : cela prouve qu'elle n'émet que de la lumière réfléchie. Il en est de même des planètes, à quelques raies près, produites par leurs atmosphères,

Les étoiles donnent des raies caractéristiques, en général noires, rarement brillantes. Elles sont donc lumineuses par elles-mêmes, comme le Soleil.

La figure 562 représente les spectres de Sirius (1), d'Aldébaran (2), de α d'Orion (3) et de α d'Hercule (4).

La figure 563 représente les spectres de la nébuleuse du Dragon (1) et de la nébuleuse d'Orion (2).

Les nébuleuses donnent des spectres à raies brillantes, comme les gaz; il en est de même des comètes.

CHAPITRE IX

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

496. **Définitions et classification.** — On nomme *instruments d'optique* des combinaisons de lentilles seules, ou de lentilles et de miroirs, qui peuvent se diviser en trois groupes, suivant les usages auxquels on les destine :

1° Les instruments qui donnent des images amplifiées des corps que leurs petites dimensions ne permettent pas d'observer à l'œil nu : ce sont les *microscopes*.

2° Les instruments qui *rapprochent*, c'est-à-dire qui permettent d'observer les astres ou les objets éloignés : ce sont les *lunettes* et les *télescopes*.

3° Les instruments propres à projeter sur un écran des images réduites ou amplifiées, qui peuvent être utilisées dans l'art du dessin, ou montrées à de nombreux observateurs; tels sont : la *chambre claire*, la *chambre obscure*, le *daguerréotype*, la *lanterne magique*, le *fantascope*, le *mégascope*, le *microscope solaire* et le *microscope photo-électrique*.

Les instruments des deux premiers groupes ne donnent que des images virtuelles, et les derniers, excepté la *chambre claire*, donnent des images réelles.

INSTRUMENTS QUI GROSSISSENT OU MICROSCOPES.

497. **Loupe** ou **Microscope simple.** — *Définition et description schématique.* — La *loupe* ou *microscope simple* est un instrument destiné à donner des images virtuelles et amplifiées des petits objets dont les détails échapperaient à l'œil nu.

Il est formé simplement d'un *oculaire* convergent, c'est-à-dire d'une lentille convergente qu'on place devant l'œil pour regarder

les petits objets. La lentille est *à court foyer*, et l'on met les objets en decà de son foyer principal.

Marche des rayons. — Soit l'objet AB, que l'on veut observer (fig. 564) : on en construira l'image en appliquant la règle générale (428). Pour cela, on mène d'abord les axes secondaires AO et BO; puis des rayons parallèles à l'axe, qui sont réfractés de manière à passer par le foyer principal de l'autre côté de la lentille : leurs prolongements vont couper les axes secondaires en

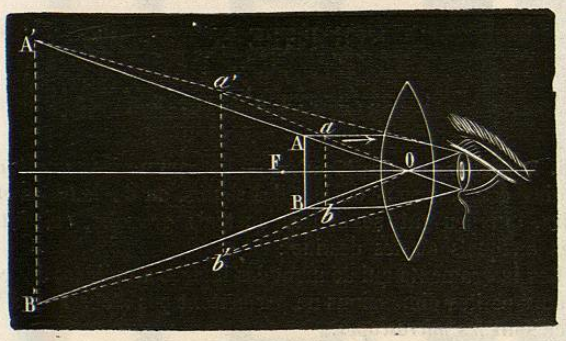

Fig. 564.

des points A′ et B′ qui sont les foyers virtuels des points A et B. On a donc en A′B′ l'image *virtuelle droite et amplifiée* de l'objet AB.

Mise au point. — Pour que l'image virtuelle des objets présente une grande netteté unie au maximum d'amplification, il ne suffit pas que ces objets soient fortement éclairés, il faut encore que l'image se forme à une distance déterminée, qu'on appelle *distance minimum de la vision distincte*. Nous verrons, en effet, en traitant de la vision, qu'il y a pour chaque œil une distance en deçà de laquelle il ne voit plus nettement. Elle varie avec les individus; mais pour un œil bien conformé elle est comprise dans les limites de 25 à 30 centimètres. Il n'y a pas d'ailleurs de distance *maximum* de la vision distincte, du moins pour l'œil bien conformé. Il y a intérêt, au point de vue du grossissement, à produire l'image virtuelle le plus près possible de l'œil. C'est donc à environ 25 ou 30 centimètres de l'œil que doit se former l'image.

Chaque observateur doit *mettre au point* pour sa vue. Cela se fait en modifiant très peu la distance de la lentille à l'objet ; on sait (fig. 567) qu'un léger déplacement de l'objet en imprime un très grand à l'image.

Diamètre apparent. — On nomme *grandeur apparente*, ou *diamètre apparent* d'un objet AB, l'angle sous lequel on le voit, c'est-à-dire l'angle AOB (fig. 565), formé par deux rayons visuels menés du centre de la pupille aux deux extrémités d'une même dimension de l'objet.

Dans la théorie et dans les applications des instruments d'optique, les angles sont toujours assez petits pour qu'on puisse leur substituer leurs tangentes (*théorie des rayons centraux*). Nous pourrons donc appliquer constamment à la mesure du grossissement les deux principes suivants :

I. *Pour un même objet vu à des distances inégales, le diamètre apparent est en raison inverse de la distance à l'œil de l'observateur.*

II. *Pour deux objets vus à la même distance, le rapport des diamètres apparents est le même que celui des grandeurs absolues.*

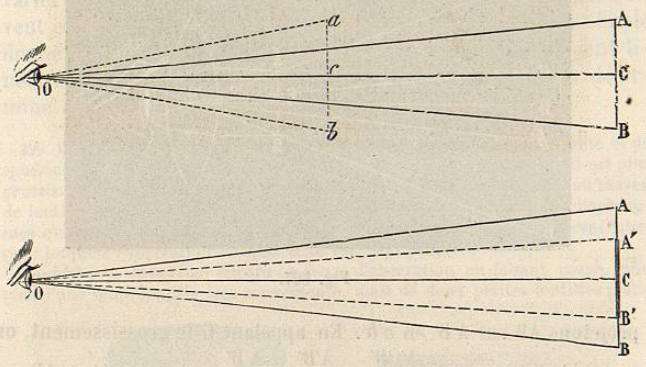

Fig. 565 et 566.

En effet, supposons que l'objet AB (fig. 565) soit transporté en *ab*, à une distence telle, que O*c* soit la moitié de OC. Les triangles rectangles ACO et *ac*O fournissent les égalités

$$\text{tang AOC} = \frac{\text{AC}}{\text{CO}}, \quad \text{et} \quad \text{tang } a\text{O}c = \frac{ac}{c\text{O}}, \quad \text{d'où} \quad \frac{\text{tang } a\text{OC}}{\text{tang AOC}} = \frac{ac}{\text{AC}} \times \frac{\text{CO}}{co}.$$

Or

$$ac = \text{AC} \quad \text{et} \quad c\text{O} = \frac{\text{CO}}{2}; \quad \text{d'où} \quad \text{tang } a\text{O}c = 2 \text{ tang AOC};$$

par suite, l'angle *a*O*c* est double de AOC. Donc, *à une distance deux fois moindre, le diamètre apparent est deux fois plus grand.* On trouverait de même qu'à une distance trois fois plus petite, il est triple : ce qui démontre le premier principe.

Soient maintenant deux objets AB et A′B′ (fig. 566) situés à la même distance de l'observateur, et supposons que l'œil soit placé sur une droite OC perpendiculaire sur le milieu de AB. Si l'on prend OC pour unité, les droites AC et A′C représentent les tangentes des angles AOC et A′OC; on a donc, d'après ce qui a été dit plus haut, $\frac{AOC}{A'OC} = \frac{AC}{A'C}$, ou, en doublant les deux termes de chaque rapport, $\frac{AOB}{A'OB'} = \frac{AC}{A'B'}$, égalité qui est l'expression du deuxième principe énoncé ci-dessus.

498. **Grossissement.** — 1° *Définition.* — On appelle grossissement *le rapport du diamètre apparent de l'image au diamètre apparent de l'objet*, supposés l'un et l'autre à la distance minimum de la vue distincte.

2° *Formule.* — Soient AB l'objet et A′B′ son image (fig. 567);

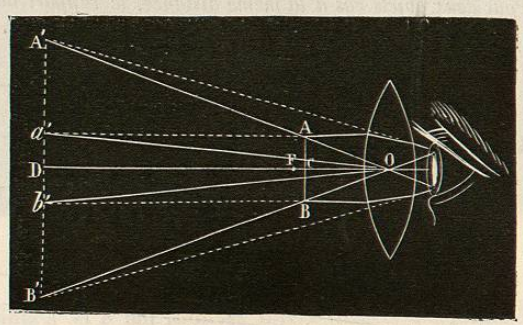

Fig. 567.

projetons AB sur A′B′ en $a'b'$. En appelant G le grossissement, on a, par définition, $G = \frac{A'OB'}{a'Ob} = \frac{A'B'}{a'b'} = \frac{A'B'}{AB}$, puisque $a'b' = AB$; or A′B′ est la grandeur réelle de l'image, et AB celle de l'objet; donc on peut aussi dire que, dans le microscope simple, *le grossissement est le rapport de la grandeur de l'image à celle de l'objet.*

Cela posé, les deux triangles semblables A′OB′ et AOB fournissent l'égalité $\frac{A'B'}{AB} = \frac{OD}{OC} = \frac{p'}{p}$, dans laquelle p' est la distance minimum de la vue distincte, et p la distance de l'objet à la lentille. On sait d'ailleurs, d'après la théorie des lentilles, qu'on a dans ce cas la formule

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{p} = \frac{1}{p'} + \frac{1}{f}$$

En multipliant les deux membres par p', il vient $\frac{p'}{p} = 1 + \frac{p'}{f}$. En remplaçant $\frac{p'}{p}$ par G et p' par δ, on a $G = 1 + \frac{\delta}{f}$. Enfin, en négligeant 1 par rapport à $\frac{\delta}{f}$, il vient $G = \frac{\delta}{f}$, qui est la formule normale du grossissement dans la loupe. Elle montre que le grossissement est d'autant plus fort : 1° que la lentille est *à plus court foyer*, c'est-à-dire qu'elle est plus convergente; 2° que la distance minimum de la vue distincte de l'observateur est plus grande.

Remarques. — 1° Le grossissement qu'on vient de considérer est le grossissement en diamètre, ou *grossissement linéaire*. Le grossissement *superficiel* est égal au carré du grossissement linéaire. Par exemple, si celui-ci est 20, le grossissement superficiel est 400. 2° Des lentilles de rechange permettent de faire varier le grossissement, mais dans de certaines limites, si l'on veut conserver à l'image toute sa netteté : le microscope simple donne des images encore très nettes avec un grossissement linéaire égal à 120. 3° On verra bientôt (502) comment on détermine expérimentalement le grossissement en diamètre.

499. **Correction des aberrations.** — Les aberrations de réfrangibilité et de sphéricité sont d'autant plus grandes dans le microscope simple, qu'il est plus *grossissant*. On a vu (485) que l'aberration de réfrangibilité se corrige au moyen de lentilles achromatiques, et l'aberration de sphéricité à l'aide de diaphragmes qui ne laissent passer que les rayons voisins de l'axe (ou *rayons centraux* pour lesquels l'aberration de sphéricité est négligeable.

Doublets. — On corrige encore ce genre d'aberration en faisant usage, non plus d'une seule lentille très convergente, mais de deux petites lentilles plan-

Fig. 568.

Fig. 569.

convexes superposées, dont les faces planes sont tournées vers l'objet (fig. 569) Ces lentilles sont fixées dans un *œillelon* représenté en vraie grandeur (perspective et coupe) dans les figures 568 et 569. Quoique chacune d'elles soit moins convexe que la lentille simple qu'elles remplacent, leur système possède le même grossissement, mais l'aberration en est moindre, parce que la première lentille a pour effet de rapprocher préalablement de l'axe les rayons qui tombent sur la seconde. Ce système de lentilles est connu sous le nom de *doublet de Wollaston.*

500. **Microscope simple.** — Ce nom est plus particulièrement réservé à la loupe, lorsqu'elle est munie d'une monture destinée

à en faciliter l'emploi. La figure 570 donne un spécimen du dispositif le plus habituel. Un support horizontal E, qui peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'une crémaillère et d'un pignon à bouton D, porte un *œilleton* noir *m*, au centre duquel est enchâssée une lentille plus ou moins grossissante. Au-dessous est le *porte-objet*, qui est fixe et sur lequel, entre deux lames de verre *b*, est placé l'objet qu'on veut observer. Comme il est nécessaire que l'objet soit fortement éclairé pour que l'image reste nette malgré son amplification, on reçoit la lumière diffuse de l'atmosphère sur un miroir concave M, convenablement incliné pour renvoyer sur l'objet un faisceau de rayons convergents. Pour se servir de ce microscope, on place l'œil très près de la lentille, puis on abaisse ou l'on élève celle-ci jusqu'à ce qu'on l'ait mise au point.

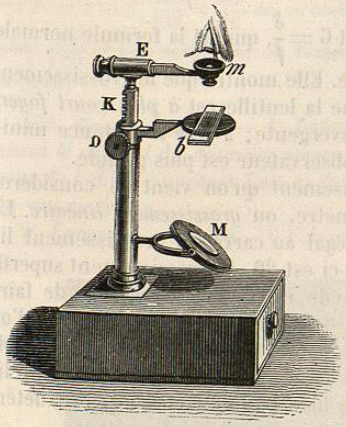

Fig. 570.

501. **Microscope composé.** — *Définition et description schématique.* — Le *microscope composé* est un instrument d'optique qui

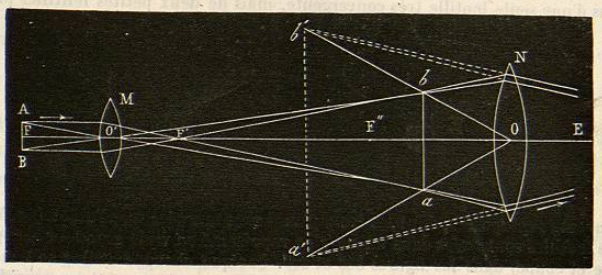

Fig. 571.

sert, comme la loupe, à faciliter la vision d'objets très petits, en leur substituant une image virtuelle, renversée et amplifiée. Réduit à son plus grand degré de simplicité, l'instrument est formé de deux verres lenticulaires convergents, l'un à court foyer,

nommé *objectif*, parce qu'il est tourné vers l'objet; l'autre, moins convergent, qui se nomme *oculaire*, parce qu'il est près de l'œil de l'observateur. Ces deux verres sont fixés dans un même tube et centrés de manière que leurs axes coïncident.

Marche des rayons. — Un objet AB étant placé très près, et un peu au delà, du foyer principal F de l'objectif M, une image aérienne *ab*, réelle, renversée et amplifiée, va se former de l'autre côté de l'objectif, beaucoup au delà du second foyer principal F′ (fig. 571). Or on règle la distance des verres M et N de manière que l'image *ab* se trouve entre l'oculaire N et son foyer F″. Il en résulte que ce dernier verre produit l'effet d'une loupe, et substitue à l'image *ab* une seconde image *a′b′*, virtuelle, amplifiée de nouveau, droite par rapport à la première, et par conséquent renversée par rapport à l'objet. (Application de la règle générale de construction.)

Grossissement. — 1° *Définition.* — Le grossissement se définit de la même manière que précédemment (498).

2° *Formule.* — Il est facile de démontrer que le *grossissement total* est égal au *produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire.*

En effet, si l'on se reporte à la figure 571, le grossissement de l'objectif est $\frac{ab}{AB}$ et celui de l'oculaire $\frac{a'b'}{ab}$. Or le produit de ces deux rapports est $\frac{a'b'}{AB}$, qui est bien le grossissement total. Par suite, on pourrait le calculer en fonction des distances focales de l'objectif et de l'oculaire, et des distances de l'objet et de son image à ces deux verres; mais, en général, on le détermine directement par l'expérience.

502 **Mesure expérimentale du grossissement.** — Elle se fait au moyen d'un *micromètre* et d'une *chambre claire.*

On nomme *micromètre* une petite lame de verre sur laquelle sont tracés, au diamant, des traits parallèles, distants les uns des autres de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ de millimètre, et *chambre claire* un petit prisme de verre *à réflexion totale.*

Chambre claire de Nachet. — Elle consiste en un prisme de crown *abc*, tronqué en *c* (fig. 573). Fixé dans une monture de cuivre percée sur les faces inférieure et supérieure, le prisme se place sur l'oculaire du microscope, comme le montre la figure 572. Une feuille de papier P étant posée auprès de l'instrument, un objet quelconque, par exemple une pointe de crayon A, appuyée sur le papier, envoie vers le prisme un faisceau de lumière qui entre normalement à la face *c* (fig. 573), subit un première réflexion totale sur la face *bc*, une deuxième sur la face *a*, et de là arrive à l'œil comme s'il sortait du microscope. En *a* est un petit prisme rectangle qui est appliqué sur le premier prisme avec du baume de Canada, liquide transparent et dont l'indice de réfraction surpasse peu celui du crown; grâce à ce prisme additionnel, les rayons qui émergent de l'oculaire *o*, traversent ainsi un milieu à faces paral-

lèles et arrivent à l'œil sans déviation. L'observateur voit donc simultanément, dans le microscope, le crayon et l'image des objets à observer. (Il peut au besoin suivre les contours de celle-ci avec le crayon.)

Opération. — On place sur le porte-objet un micromètre, divisé par exemple en centièmes de millimètre, puis, à l'aide de la chambre claire, on projette sur l'image des divisions du micromètre celle d'une échelle en millimètres tracée sur un papier blanc. Si l'on observe alors que 10 divisions du micro-

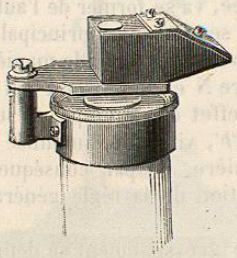

Fig. 572.

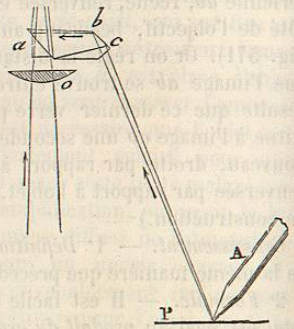

Fig. 573.

mètre recouvrent par exemple 120 millimètres de l'échelle, on en conclut que l'image d'une seule division du micromètre a une grandeur de 12 millimètres; or la grandeur absolue de l'objet est $\frac{1}{100}$ de millimètre, donc le quotient 1200 représente le grossissement.

Réciproquement, une fois le grossissement connu, on en déduit la grandeur réelle des objets en divisant la grandeur de l'image, prise à la chambre claire par le grossissement.

Autre procédé. — On peut opérer sans chambre claire, à l'aide de deux micromètres, l'un divisé en centièmes de millimètre, qu'on pose sur le porte-objet, l'autre, à divisions arbitraires, mais égales, qu'on place entre les deux verres de l'oculaire en *b* (fig. 574). On l'introduit dans le tube H par une ouverture latérale, et une vis de rappel *c* sert à l'élever ou à l'abaisser pour la mise au point; on tourne ensuite le tube H sur lui-même pour orienter parallèlement les deux micromètres, puis on le fixe en serrant la vis de pression *d*. Observant alors les micromètres, on trouve, par exemple, que 12 divisions du micromètre posé sur le porte-objet couvrent 4 divisions du micromètre supérieur; à chaque division du second correspondent donc 3 divisions du premier, c'est-à-dire $\frac{3}{100}$ de millimètre. Cela posé, substituant au micromètre inférieur l'objet dont on veut avoir la grandeur, et observant de nouveau, si l'image de l'objet correspond à 10 divisions du micromètre supérieur, on en conclut que la dimension observée est 10 fois $\frac{3}{100}$ de millimètre, ou $0^{mm},3$.

503. **Description détaillée du microscope.** — La figure 574 donne une vue perspective du microscope composé, tel qu'il est construit par M. Nachet, et la figure 575 en donne une coupe longitudinale.

1° *Corps de l'instrument.* — Il se compose d'un système de tubes de cuivre DD', I et H, dont le premier porte, à sa partie inférieure, l'objectif *o*, et le dernier, H, l'oculaire O. DD' est un seul et même tube dans lequel s'engage, à frottement doux, le tube I, tandis que le tube DD' peut glisser aussi à frotte-

ment doux dans un tube plus gros, maintenu dans son collet E. Ce dernier est fixé à un support BB' qui, au moyen d'une vis à pas très serrés qu'on fait tourner par un bouton T, s'élève ou s'abaisse, avec une course de 6 millimètres, le long d'une tige intérieure, qui n'est pas visible dans la figure. Avec la pièce BB' monte et descend tout le corps du microscope, ce qui permet de

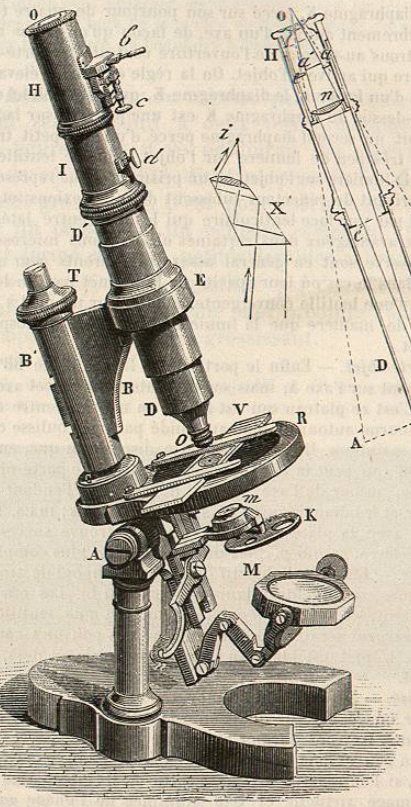

Fig. 574.

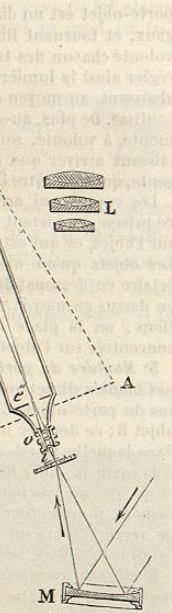

Fig. 575.

l'écarter ou de le rapprocher à volonté de l'objet qu'on observe. Enfin, la pièce BB' et toutes les autres pièces de l'instrument sont portées par un axe horizontal A, sur lequel elles tournent à frottement assez dur pour pouvoir s'incliner et rester fixes dans toutes les positions, depuis la verticale jusqu'à l'horizontale.

2° *Porte-objet.* — Les objets qu'on veut observer se placent, entre deux lames de verre V, sur une plate-forme R, qui est le *porte-objet*. Celui-ci est percé, en

son centre, d'un trou qui laisse passer la lumière envoyée par un réflecteur concave M.

3° et 4° *Réflecteur et Diaphragme.* — Ce *réflecteur* est un miroir concave de verre qui est monté à articulations de manière à pouvoir prendre toutes les positions et inclinaisons et à concentrer ainsi sur l'objet la lumière diffuse de l'atmosphère ou de toute autre source lumineuse. Entre le réflecteur M et le porte-objet est un diaphragme K, percé sur son pourtour de quatre trous inégaux, et tournant librement autour d'un axe, de façon qu'on puisse amener à volonté chacun des trous au-dessous de l'ouverture centrale du porte-objet, et régler ainsi la lumière qui arrive à l'objet. On la règle encore en élevant ou en abaissant, au moyen d'un levier *n*, le diaphragme K, qui est mobile dans une coulisse. De plus, au-dessus du diaphragme K est une pièce *m* sur laquelle on monte, à volonté, soit un second diaphragme percé d'un très petit trou et ne laissant arriver que très peu de lumière sur l'objet, soit une lentille convergente, qui concentre la lumière sur l'objet, ou un prisme oblique représenté en X.

Les rayons qui arrivent du réflecteur subissent deux réflexions totales dans ce prisme, et sortent par une face lenticulaire qui les concentre latéralement sur l'objet, ce qui est avantageux dans certaines observations microscopiques. Les objets qu'on observe sont en général assez transparents pour qu'on les éclaire en dessous; dans le cas où leur opacité ne le permet pas, on les éclaire en dessus au moyen d'une lentille convergente, montée sur un pied à articulations; on la place de manière que la lumière diffuse de l'atmosphère soit concentrée sur l'objet.

5° *Monture du porte-objet.* — Enfin le porte-objet R et la pièce BB′ ne sont pas montés directement sur l'axe A, mais sur un plateau fixé à cet axe au-dessus du porte-objet. C'est ce plateau qui est figuré en noir au centre du porte-objet R; ce dernier tourne autour du plateau, guidé par une coulisse circulaire dans laquelle il est maintenu. Il résulte de cette disposition que, en prenant à la main la pièce BB′, on peut la faire tourner, ainsi que le porte-objet et le corps du microscope, autour de l'axe optique de celui-ci. Pendant ce mouvement, le réflecteur et les diaphragmes ne se déplacent pas; mais, les lames de verre V tournant avec la plate-forme R, l'objet se trouve successivement éclairé sur toutes ses faces, ce qui permet une observation plus complète.

6° *Objectif composé.* — En *o* est l'objectif (fig. 575), composé de trois petites lentilles achromatiques convergentes (figurées à part en L). Les effets de ces trois lentilles s'ajoutent, et leur système agit comme une lentille unique dont le *pouvoir convergent* serait égal à la somme des pouvoirs convergents des lentilles simples. L'objet est placé en *i*, très près, mais au delà, du foyer principal de l'objectif.

7° *Oculaire composé.* — Les rayons qui émergent de l'objectif vont tomber, avant de former leur image, sur une quatrième lentille convergente *n*, qui les rends plus convergents. Ils vont former alors une image réelle et amplifiée de l'objet *i* en *aa′*, un peu au delà du foyer principal du cinquième verre convergent O. Par suite, si l'on regarde à travers celui-ci, il agit comme loupe et donne en AA′ une image virtuelle et très amplifiée de l'image *aa′*, et, par conséquent, de l'objet. Les deux verres *n* et O constituent un *oculaire négatif* (505).

Remarque — On adapte à l'instrument des objectifs et des oculaires de rechange, dont les verres plus ou moins convergents font varier le grossissement. Dans le microscope que nous venons de décrire, le grossissement superficiel peut aller jusqu'à 1300.

8° *Mise au point.* — La première image *aa′* doit se faire entre le verre O et son foyer principal à une distance telle, que la deuxième image AA′ se forme à la distance minimum de la vue distincte de l'observateur. Ce résultat s'obtient en faisant d'abord glisser avec la main le corps DH du microscope dans

le tube plus gros fixé au collet E, jusqu'à ce qu'on aperçoive une image assez nette; puis, tournant le bouton T dans un sens ou dans l'autre, on remonte ou on abaisse d'un mouvement lent la pièce BB′ et avec elle tout le microscope, jusqu'à ce que l'image AA′ atteigne son maximum de netteté.

Remarques. — Dans le microscope, où la distance de l'objectif à l'oculaire est constante, la mise au point s'obtient en approchant ou écartant l'instrument de l'objet qu'on veut observer. Dans les lunettes et les télescopes où les objets qu'on observe sont hors de la portée de l'observateur, on met au point en faisant varier la distance de l'oculaire à l'objectif.

504. Achromatisme du microscope. — Dans un microscope composé qui serait réduit à deux verres (comme on l'a supposé dans la figure 571), il se produirait des aberrations de sphéricité et de réfrangibilité d'autant plus fortes que le microscope serait plus grossissant. C'est pour corriger ces aberrations qu'on emploie un objectif et un oculaire *composés*. On a vu que l'objectif est formé de trois petites lentilles achromatiques. Quant à l'*oculaire négatif*, il est constitué par deux lentilles *n* et O, dont la première, *n*, suffirait seule pour produire l'achromatisme, si le microscope n'était pas très grossissant.

En effet, soient *ab* l'objet, O l'objectif et O′ un oculaire simple (fig. 576). Supposons que le verre *n* ne soit pas encore interposé entre O et O′. Les rayons

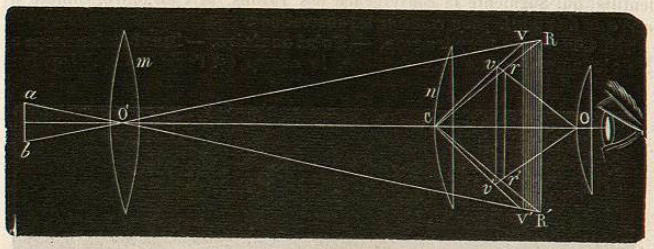

Fig. 576.

blancs émis par le point *b* étant plus ou moins dispersés à leur passage dans l'objectif, leurs radiations *rouges* vont former un foyer *rouge* en R, sur l'axe secondaire de *b*, tandis que les rayons violets, plus réfrangibles, vont concourir en V, plus près de la lentille; de même, les autres faisceaux forment leurs foyers entre R et V; la même chose a lieu de V′ à R′ pour les rayons partis de *a*. Si l'on regarde actuellement à travers l'oculaire O′ les sept zones colorées VV′RR′, les couleurs se superposant dans la partie centrale, celle-ci paraît blanche, tandis que les bords sont colorés en rouge et en orangé : de là provi nt l'*irisation* de l'image.

Interposons maintenant la lentille *n*. Les rayons rouges sont rapprochés de l'axe OO′ par cette lentille et vont former leur foyer en *r* et *r′*, sur les axes secondaires CR et CR′; de même les rayons violets forment les leurs en *v* et *v′*, plus près de la lentille. On conçoit qu'en combinant convenablement les cour-

bures des lentilles n et O', on arrive à placer les foyers v et r en ligne droite avec le centre optique de l'oculaire. Les autres faisceaux colorés forment d'ailleurs leurs foyers très sensiblement sur la ligne vr : donc, lorsqu'on regarde à travers l'oculaire les sept faisceaux, ceux-ci étant vus sous le même angle, il y a recomposition de la lumière par suite de la superposition des impressions sur la rétine, et l'irisation disparaît.

Le verre n est appelé soit *verre de champ* (parce qu'il augmente le *champ* (506) de l'instrument), soit *lentille collective* (parce qu'elle rassemble les rayons vers l'axe), ou bien encore *verre de Campani*.

503. **Oculaire négatif, Oculaire positif.** — Le système des verres n et O', fixés à une distance constante dans un même tube qui est le *porte-oculaire*, se désigne sous le nom d'*oculaire négatif*, ou d'*Huygens*. Dans cet oculaire, les lentilles sont plan-convexes et ont chacune leur face plane tournée vers l'œil ; l'image réelle, fournie par l'objectif, se forme entre les deux verres.

Cet oculaire est en général *réglé sur le type* 1, 2, 3, c'est-à-dire que, si l'on appelle f la distance focale principale de la lentille la plus raprochée de l'œil, la distance qui la sépare de l'autre lentille est égale à $2f$, et la distance focale principale de la deuxième lentille est égale à $3f$.

On construit aussi des oculaires dits *positifs*, ou *oculaires de Ramsden*. Ils sont composés de deux verres plan-convexes dont les convexités se regardent, et l'image réelle, au lieu de se faire entre les deux lentilles, comme ci-dessus, se forme en avant du système. Les deux verres agissent alors comme un seul pour donner de l'image réelle une image virtuelle et amplifiée. La première lentille, qui augmente la convergence des rayons, agit en outre, comme le *verre de Campani*, pour corriger les aberrations.

506. **Champ. — Diaphragme. — Point oculaire.** — Dans le microscope et dans les autres instruments d'optique, le *champ* est l'espace angulaire dans

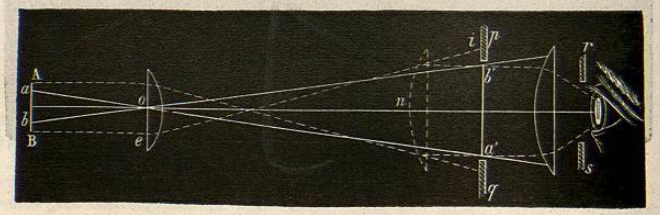

Fig. 577.

lequel sont compris tous les points visibles à travers l'oculaire. Le champ est *limité par une surface conique ayant pour sommet le centre optique de l'objectif, et pour base l'ouverture d'un* diaphragme *pq placé en avant de l'oculaire dans le plan de l'image fournie par l'objectif* (fig. 577). La seconde nappe de ce cône vient couper l'objet en ab, et en limite la partie visible : on dit que la portion ab est dans le *champ* de l'instrument.

Lorsqu'un objet dépasse les limites du champ, il n'y en a qu'une partie qui soit visible. Mais si l'on interpose un verre convergent tel que la lentille n, des rayons tels que Bei, qui étaient interceptés par le diaphragme, sont rapprochés vers l'axe de manière à tomber sur l'oculaire, et le point B, qui n'était

pas visible, le devient. On voit donc que le verre n (*verre de champ*) augmente le champ ; mais en réduisant l'image $a'b'$ *il diminue le grossissement*.

Le *diaphragme pq* est formé d'un mince disque de laiton noirci, percé d'une ouverture centrale. Il est destiné à ne laisser passer que les rayons qui arrivent à l'oculaire sous une faible obliquité et à réduire ainsi les effets d'aberration de sphéricité.

La grandeur du champ varie avec l'ouverture du diaphragme et avec sa distance à l'objectif. Plus cette distance est grande, plus le champ est petit. Il diminue encore quand le grossissement augmente ; car plus l'oculaire est convergent, plus son diamètre est petit, et plus le faisceau qui le traverse est resserré.

Point oculaire. — Enfin, la position de l'œil a aussi de l'influence sur l'étendue du champ. En effet, à leur sortie de l'oculaire, il y a un point où les rayons vont converger : on l'appelle *point oculaire*. C'est le foyer conjugué, *par rapport au dernier verre de l'oculaire*, du centre optique de l'objectif (considéré comme point lumineux). Et, en effet, c'est de ce point que partent les axes secondaires de tous les faisceaux lumineux qui tombent sur l'oculaire. C'est donc là que doit être placé l'œil pour embrasser tout le champ. Plus près ou plus loin, il ne recevrait qu'une partie des rayons émergents.

Œilleton. — Pour fixer la position de l'œil, on place en avant de l'oculaire un *œilleton* noir rs, percé d'une ouverture centrale, de manière que l'œil placé devant cette ouverture se trouve juste au point oculaire.

507. **Applications du microscope.** — On doit à l'emploi du microscope les plus intéressantes découvertes en botanique, en zoologie, en physiologie. Des animaux dont l'existence était restée jusqu'alors inconnue ont été observés dans le vinaigre, dans la pâte de farine, dans les fruits et les fromages secs; la circulation et les globules du sang sont devenus visibles. Le microscope offre aussi de nombreuses applications dans l'industrie. Par exemple, il donne les moyens de reconnaître les différentes espèces de fécules, les falsifications des farines, des chocolats, etc. ; il permet encore de constater dans les étoffes la présence du coton, de la laine, de la soie.

INSTRUMENTS QUI RAPPROCHENT OU TÉLESCOPES.

508. **Lunette astronomique.** — *Définition.* — La *lunette astronomique* ou *télescope dioptrique* est un instrument d'optique composé qui est destiné à l'observation des objets très éloignés, et en particulier des astres.

Description schématique et marche des rayons. — La lunette se compose essentiellement de deux systèmes dioptriques convergents, l'un qui sert d'objectif et l'autre d'oculaire. L'objectif M (fig. 578) donne, de l'astre AB [1] qu'on observe, une image ab vir-

1. Dans cette construction, on ne représente en AB que les axes secondaires extrêmes de l'objet qu'on regarde ; car, en réalité, cet objet est toujours très

tuelle et renversée, laquelle, vu la grande distance de AB, se forme sensiblement au foyer principal F de l'objectif. Or, la distance des verres M et N étant réglée de façon que cette image se

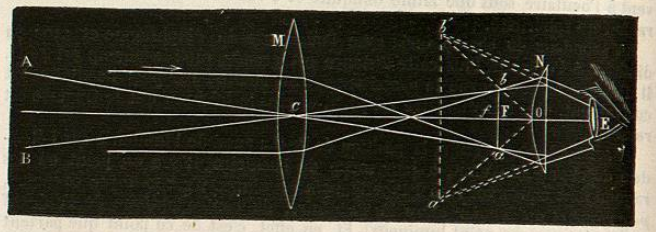

Fig. 578.

trouve entre l'oculaire N et le foyer principal f de ce verre, l'oculaire donne en $a'b'$ une image virtuelle et amplifiée de l'image aérienne ab.

Aspect extérieur. — La lunette se distingue à première vue du microscope, parce que son objectif est beaucoup plus large que son oculaire. Et, en effet, la lunette étant destinée à observer des objets très éloignés, il importe que l'objectif ait un grand diamètre en même temps qu'un grand rayon de courbure : grâce à la première condition, la quantité de lumière reçue de l'astre qu'on observe est plus considérable et, par suite, l'image a plus d'éclat; par la seconde, l'aberration de sphéricité est diminuée.

509. **Grossissement dans la lunette astronomique.** — *Définition et formule.* — On appelle grossissement *le rapport du diamètre apparent de l'image, vue dans la lunette, au diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu.*

Soit aOb (fig. 579) le diamètre apparent de l'objet, $A'B'$ l'image réelle formée par l'objectif, et A'' et B'' l'image virtuelle qu'on regarde. On a, par définition,

$$G = \frac{aOb}{A''O_1B''}.$$

Pour calculer ce rapport en fonction des éléments géométriques

éloigné de l'objectif. La même remarque s'appliquera ci-après à la lunette terrestre et à celle de Galilée. L'objet AB (qui est, par exemple, une planète) étant placé hors des limites de la figure, on se contente de tracer les deux faisceaux lumineux AC et BC émanés de ses deux extrémités et réduits à leurs axes. C'est ainsi que la construction des images est réalisée dans les figures 585 et 586.

de l'instrument, on peut, à cause de la petitesse des angles, substituer le rapport des tangentes trigonométriques à celui des arcs.

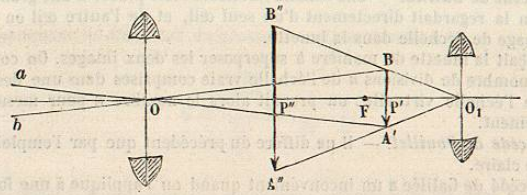

Fig. 579.

On a d'abord

$$aOb = 2.A'OP'$$

et

$$A''O_1B'' = 2.A'O_1P'$$

et, par conséquent,

$$G = \frac{A'O_1P'}{A'OP'}.$$

On a d'ailleurs

$$\text{tang } A'O_1P' = \frac{A'P'}{P'O_1}$$

$$\text{tang } A'OP' = \frac{A'P}{P'O}.$$

Donc

$$G = \frac{\dfrac{A'P'}{P'O_1}}{\dfrac{A'P'}{P'O}} = \frac{P'O}{P'O_1}.$$

$P'O$ diffère peu de F..., distance focale principale de l'objectif O,
$P'O_1$ diffère peu de f..., — — — de l'oculaire O_1.

En substituant ces distances, il vient $G = \frac{F}{f}$.

C'est une *limite inférieure* du grossissement. En effet,

d'une part, on a. . . $P'O$ toujours $> F$,
et d'autre part . . . $P'O_1$ — $< f$.

510. **Mesure expérimentale du grossissement.** — 1° *Méthode indirecte.* — La méthode la plus simple consisterait à appliquer la formule $G = \frac{F}{f}$. Elle est la plus exacte en théorie. Il suffit de déterminer avec précision F et f. Mais comme f peut être très petit (2 millimètres et au-dessous), une petite erreur

commise dans cette mesure en entraîne une très grande dans le quotient $\frac{F}{f}$.

Aussi préfère-t-on employer des méthodes directes.

2° *Procédé de Galilée.* — Une échelle verticale était placée à une grande distance, on la regardait directement d'un seul œil, et de l'autre œil on regardait l'image de l'échelle dans la lunette.

On plaçait la lunette de manière à superposer les deux images. On comptait alors le nombre de divisions n de l'échelle vraie comprises dans une des divisions de l'échelle virtuelle : on prenait alors le nombre n pour mesure du grossissement.

3° *Procédé de Pouillet.* — Il ne diffère du précédent que par l'emploi d'une chambre claire.

Le procédé de Galilée a un inconvénient quand on l'applique à une forte lunette : c'est que le tuyau cache l'échelle à l'œil extérieur (fig. 580). Cela n'a

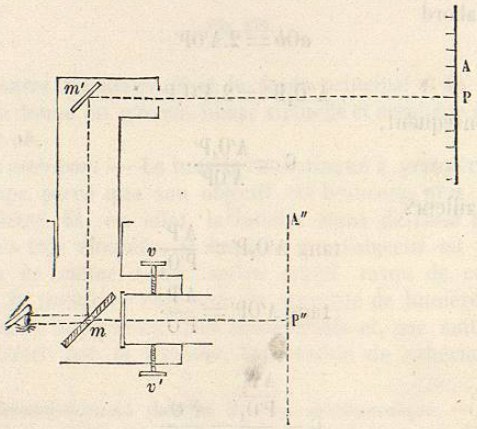

Fig. 580.

pas lieu quand on visse à l'oculaire, au moyen de vis v et v', une espèce de chambre claire, constituée essentiellement par deux miroirs métalliques m et m', inclinés à 45°.

Le miroir m' reçoit les rayons lumineux venant directement de l'échelle qui est placée au loin ; il les renvoie sur le miroir m, d'où ils reviennent à l'œil.

Le miroir m est percé en son centre d'un petit trou par où passent et arrivent à l'œil les rayons de l'image de l'échelle formée dans la lunette.

Le reste comme dans le procédé de Galilée.

Remarque. — Ces deux méthodes ne donnent pas la mesure du grossissement tel que nous l'avons défini.

En effet, soit D la distance de l'échelle. La chambre claire donne la longueur AP d'une division de l'échelle et son diamètre apparent est $\frac{AP}{D}$.

La lunette donne la longueur A''P'' de l'image de AP, à la distance Δ de la vision distincte.

Le diamètre apparent de cette image serait donc

$$\frac{A''P''}{\Delta}.$$

En appliquant la définition du grossissement, on devrait avoir

$$G = \frac{\frac{A''P''}{\Delta}}{\frac{AP}{D}} = \frac{A''P''}{AP} \cdot \frac{D}{\Delta}.$$

Or le rapport n que donne la méthode expérimentale est égal à $\frac{A''P''}{AP}$. Ce n'est donc pas seulement le grossissement vrai, mais seulement un nombre proportionnel.

On voit qu'il faudrait multiplier n par le rapport $\frac{D}{\Delta}$ pour avoir le grossissement tel que nous l'avons défini.

4° *Méthode de Ramsden.* — Elle donne le *grossissement vrai.*

Principe. — *Point oculaire* et *Cercle oculaire de Ramsden.* — L'*objectif* O, qui est exposé à la lumière directe de l'astre ou de l'objet lumineux, joue par

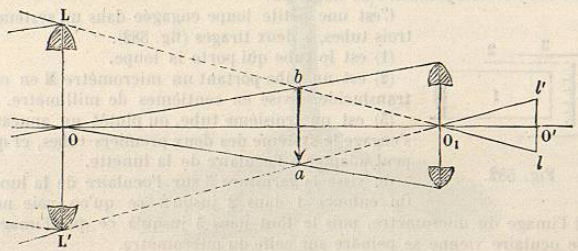

Fig. 581.

rapport à l'*oculaire* O_1 le rôle d'un objet lumineux et l'*oculaire* O_1 joue par rapport à cet objet lumineux le rôle d'un *objectif* (fig. 581).

Par suite, on aura au delà de l'oculaire une image réelle et réduite de l'objectif.

Elle se fera à une distance O_1O' telle, que l'on ait

$$\frac{1}{O_1O'} + \frac{1}{O_1O} = \frac{1}{f}$$

et la grandeur de l'image ll' sera donnée par l'équation

$$\frac{ll'}{L'L} = \frac{O_1O'}{O_1O}.$$

Le point O' conjugué du point O par rapport à O_1 s'appelle le *point oculaire de Ramsden.* Nous verrons bientôt pourquoi.

L'image ll' de l'objectif s'appelle *cercle oculaire de Ramsden.*