

CHAPITRE II

LES LENTILLES.

§ 1. — GÉNÉRALITÉS.

27. Définitions. — Lorsque plusieurs milieux transparents séparés par des surfaces sphériques ont leurs centres sur une même droite ils constituent un *système dioptrique centré* (ou *dioptré centré*). L'axe principal ou *axe* de ce système est formé par la droite qui joint tous les centres de courbure. Une lentille est formée par un milieu transparent limité par deux surfaces sphériques. Une lentille constitue donc un système centré.

Les surfaces qui limitent les lentilles peuvent être convexe, concave ou plane; les deux faces ne peuvent être planes à la fois.

Le cas d'une face plane forme la transition entre une face concave

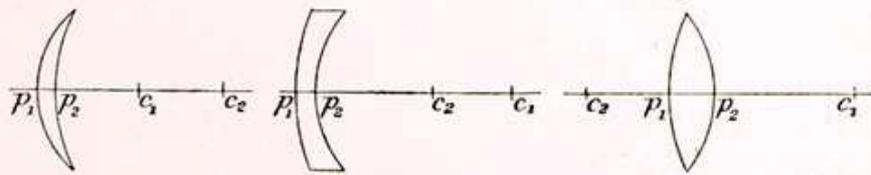


Fig. 6.

Fig. 7.

Fig. 8.

et une face convexe; une face plane peut, en effet, être considérée comme appartenant à une sphère de rayon infini.

Les lentilles peuvent présenter diverses formes.

I. La première face est convexe : le centre c_1 est à droite de la lentille;

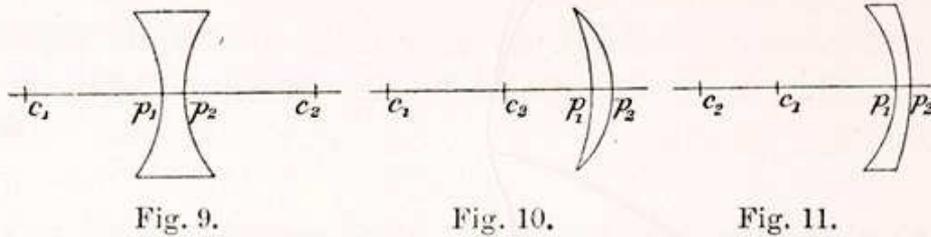
a) La deuxième face est concave; son centre c_2 est à droite de la lentille; c'est un *ménisque* : 1° si le rayon de la deuxième face est plus grand que celui de la première, les deux surfaces se coupent et le ménisque est dit *convergent* (fig. 6). — 2° Si le rayon de la deuxième face est plus petit que celui de la première, les deux surfaces ne se coupent pas et le ménisque est dit *divergent* (fig. 7).

Si la deuxième face est convexe, son centre c_2 étant à gauche les deux faces se coupent; la lentille est *biconvexe* (fig. 8).

II. La première face est concave, son centre c_1 est à gauche de la lentille.

Si la deuxième face est concave, son centre étant à droite de la lentille, les deux faces ne se coupent pas, la lentille est *biconcave* (fig. 9).

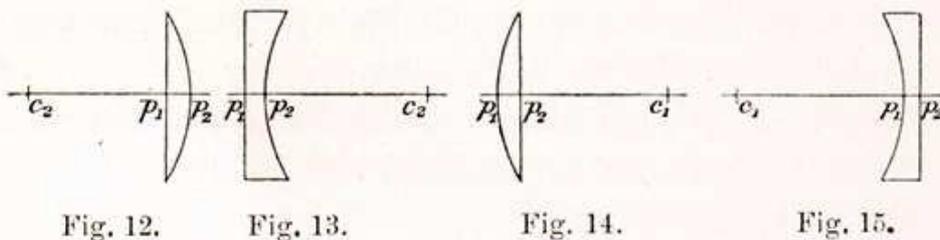
Si la deuxième face est convexe, son centre c_2 étant à gauche, la



lentille est un ménisque et l'on obtient ménisque *convergent* (fig. 10); ménisque *divergent* (fig. 11) : ces deux dernières sont identiques, sauf retournement aux formes figures 6 et 7.

III. La première face est plane.

Si la seconde face est convexe, c'est la lentille *plan-convexe* (fig. 12).



Si la seconde face est concave, on a la lentille *plan-concave* (fig. 13).

IV. La deuxième face est plane.

On retombe sur les mêmes formes au sens près (fig. 14 et 15).

Il suit de là qu'il peut y avoir six formes de lentilles, les unes plus épaisses à leur partie centrale que sur les bords, ce sont :

- 1° Lentille biconvexe.
- 2° Lentille plan convexe.
- 3° Lentille concave-convexe, ou ménisque convergent, dont la face concave a un rayon plus grand que la face convexe.

Ces trois lentilles constituent les lentilles *convergentes*.

- 4° Lentille biconcave.
- 5° Lentille convexe-concave, ou ménisque divergent : le rayon de la face convexe est plus grand que celui de la face concave.

6° Lentille plan concave.

Les trois dernières lentilles sont plus minces au centre que sur les bords; ce sont les lentilles *divergentes*.

L'*axe principal* de la lentille est la droite qui joint le centre des deux sphères.

Le *centre optique* d'une lentille est un point tel que tout rayon qui à l'intérieur de la lentille passe par ce point ou se dirige vers lui sort de celle-ci parallèlement à sa direction d'entrée; ce point est situé sur l'axe principal.

On appelle *axe secondaire* de la lentille une droite passant par le centre optique de la lentille et faisant un angle plus ou moins grand avec l'axe principal.

28. Fabrication des lentilles photographiques. — On emploie pour la fabrication des lentilles photographiques un verre homogène, aussi incolore et aussi transparent que possible. Cette fabrication est difficile : pour la préparation du *flint-glass* et du *crown-glass*, qui sont les deux espèces employées en optique, on suit les procédés indiqués par Bontemps et Guinand.

Dans ces dernières années, la fabrique du Dr Schott, à Iéna, a produit des verres que l'on commence à employer avec avantages pour la fabrication des objectifs photographiques.

Le *flint-glass* est un verre alcalin plombeux très réfringent dont la densité est voisine de 4; une des compositions du flint-glass employée par Guinand est la suivante :

Silice.....	42,50
Oxyde de plomb.	43,50
Potasse.....	11,70
Alumine... ..	1,80
Chaux.....	0,50
Arsenic.....	traces.

M. Lamy a proposé de remplacer le potassium par une quantité équivalente de thallium. Il emploie la *composition* suivante :

Sable.....	100,0
Minium.	66,7
Carbonate de thallium.....	112

Le verre préparé à l'aide de cette formule est facile à fondre et à

affiner; malheureusement, il est légèrement teinté de jaune, ce qui restreint considérablement son emploi en photographie.

Les matières employées doivent être extrêmement pures; on les fond à la houille dans un four rond ne contenant qu'un grand creuset en terre réfractaire dont la forme rappelle celle d'une cornue à col très court. Par le col de la cornue on peut introduire une tige de terre destinée à brasser la masse. La difficulté de fabrication provient de ce que le verre liquide tend à se partager en couches d'inégales densités, ce qui produit des stries qui le rendent impropre aux usages de l'optique. Guinand, en brassant la masse fondue jusqu'à ce qu'elle soit redevenue visqueuse, a empêché cette formation de couches de différentes densités.

On chauffe d'abord le creuset au rouge; après trois heures de chauffe, on introduit 10 à 15 kilogrammes de composition pour l'*enverrer*; une heure après, on enfourne 20 kilogrammes de matière, puis 40 kilogrammes au bout de deux heures, et ainsi de suite pendant dix heures, jusqu'à ce que toute la composition soit chargée; après chaque charge, on referme la gueule du creuset avec son couvercle et on ne recommence que lorsque le charbon du foyer ne donne plus de fumées.

On chauffe alors fortement pendant quatre heures; on débouche le creuset afin d'introduire l'agitateur constitué par un cylindre de terre réfractaire fixée à une barre de fer coudé; on brasse pendant trois minutes, on laisse reposer une heure et l'on attise le feu. Cinq heures après, on fait un second brassage, et à partir de ce moment les brassages se succèdent d'heure en heure, ne durant que quelques minutes. Après six brassages, on ferme le creuset, on couvre le feu avec une forte épaisseur de houille qui se réduit en coke, on laisse refroidir le four pendant deux heures: les bulles s'échappent de la masse pendant ce temps. On active alors le feu et l'on chauffe fortement pendant cinq heures pour redonner au verre toute sa fluidité: il est alors exempt de bulles. On bouche la grille de façon à ce que le four puisse se refroidir, et on commence le grand brassage qui dure deux heures sans discontinuer: un dispositif spécial permet de changer la barre de fer dès qu'elle est chaude sans retirer le cylindre de terre réfractaire. Le four se refroidissant, la matière s'épaissit; quand le brassage ne se fait plus que difficilement, on retire l'agitateur en terre. On bouche le creuset et le four; on abandonne au refroidissement spontané; après huit jours, on *défourne* le creuset,

on le casse, on le sépare avec soin du flint, qui le plus souvent constitue un seul bloc ; on examine le bloc et on le débite.

Le *crown-glass* est un verre à base d'alcali et de chaux ; les compositions qu'on emploie sont très variables : les verres fusibles sont trop alcalins et hygroscopiques ; s'ils sont trop chargés en chaux, ils se dévitrifient très facilement. Voici une des compositions de Bon-temps (1867) :

Sable.....	100,0
Carbonate de potasse.....	43,5
Nitrate de potasse.....	4,5
Minium.	9,0
Calcaire.	0,5

L'opération s'effectue comme pour le flint-glass.

Les fragments extraits de la masse de verre sont examinés et triés. Quelques soins que l'on prenne, le verre du haut du creuset est rarement identique à celui du milieu et à celui de la partie inférieure. On choisit le verre : les plus beaux morceaux sont destinés aux objectifs d'astronomie, la qualité suivante aux objectifs photographiques, la troisième catégorie sert aux lentilles ordinaires ; le restant constitue le déchet que le verrier réunit aux fontes suivantes. C'est de l'emploi de ce déchet que proviennent les différences dans les qualités de matière, différences tellement grandes que le fabricant ne peut jamais garantir exactement la même qualité de verre.

Le verre doit être exempt de bulles autant que possible et surtout de *stries* ; les bulles sont cependant moins nuisibles que les *stries* ou *fil*s qui proviennent d'un mauvais mélange des matières vitrifiables. Ces défauts donnant au verre divers pouvoirs réfringents *peuvent altérer* la netteté des images. Nous disons *peuvent*, car une bulle dans un objectif photographique ne doit pas le faire rejeter. Nous connaissons même un bel objectif astronomique de 38 centimètres de diamètre qui possède un *fil* ; ce défaut n'a été aperçu que longtemps après qu'on s'était servi de l'objectif et qu'on l'avait reconnu bon.

Le verre doit être dur et non décomposable à l'air : cette altérabilité empêche l'usage de certaines matières, présentant de grandes qualités, mais dont la conservation est fort problématique.

Les fragments de verre destinés aux objectifs photographiques sont livrés à l'opticien en plaques d'épaisseurs variant de 1 à 5 centimè-

tres ; les verres communs destinés à fabriquer des condensateurs de lanternes ou d'appareils d'agrandissement sont en général ramollis au feu et moulés dans des formes d'argile ou de fer. Le verre livré en disques porte quelquefois des facettes polies qui permettent d'en juger la qualité.

Lorsque ces disques sont trop épais pour l'objet auquel ils sont destinés, on enlève à la pince, sur une des surfaces et par écailles, une bonne quantité de verre afin d'abrèger le travail ; on se sert d'abord d'une pince assez forte pour *équarrir*, puis d'une plus mince : cela se nomme *fioner*, en termes du métier. On *dégrossit* ensuite le verre en l'usant avec du grès mouillé dans un outil en fonte dont la courbure est sensiblement la même que celle de l'outil en bronze dans lequel il doit être terminé.

La courbure définitive des lentilles s'obtient en usant le verre avec de l'émeri mouillé sur des calottes ou dans des bassins de cuivre ou de laiton. La calotte convexe sur laquelle on use le verre s'appelle la *balle* ; celle qui est concave est le *bassin*. Ces balles et ces bassins doivent avoir une épaisseur suffisante pour résister à la flexion pendant le travail. En général, pour les objectifs photographiques (dont le diamètre dépasse rarement six pouces), on les coule d'une seule pièce d'une épaisseur suffisante. On fait d'abord le modèle en bois qui sert au moulage et on achève au tour la pièce fournie par le fondeur.

Les surfaces de la lentille doivent avoir les rayons de courbure que lui assignent le calcul : il faut donc que les bassins et les balles présentent ces rayons de courbure. Pour cela, on commence par faire un calibre en traçant sur une plaque de cuivre un arc de cercle d'un rayon correspondant à la courbure que l'on veut donner au bassin ; on découpe très exactement ; on obtient deux calibres, l'un convexe l'autre concave ; on use les courbures l'une contre l'autre avec de l'émeri ; on établit ainsi la courbure convenable. Ces calibres s'appliquent contre le bassin et la balle pendant qu'on les travaille au tour et servent à constater si ces outils ont la courbure cherchée. On n'obtient cette forme qu'en terminant l'usure des bassins l'un contre l'autre avec un peu d'émeri et jusqu'à ce qu'ils se touchent partout : ils sont alors sphériques. La balle et le bassin doivent d'ailleurs de temps en temps être usés l'un contre l'autre pour leur maintenir la courbure qu'ils doivent avoir. Dans chaque atelier d'optique on possède en général plusieurs centaines de paires d'outils

dont les rayons de courbure sont gradués en vue du travail à effectuer. Ces outils sont munis de tige à vis permettant de les fixer soit sur le tour d'opticien, soit sur un arbre mobile pouvant se mouvoir circulairement pour les lentilles de petite dimension, soit dans un écrou fixe.

Pour user le verre on se sert d'émeri plus ou moins fin; on obtient ces divers degrés de finesse par *lévigation*. On met l'émeri dans de grands baquets munis de robinets, on ajoute de l'eau, on remue le mélange, on cesse d'agiter, puis on recueille le liquide; on laisse de nouveau déposer ce liquide tenant en suspension des particules d'émeri et l'on obtient un émeri d'un degré de finesse en rapport avec le temps qui s'est passé avant de laisser écouler le liquide. On emploie en général de l'émeri de 30 secondes, 1, 2, 5, 10, 30 et 60 minutes : les deux derniers servent au *doucissage*.

Les opérations qu'effectue l'opticien sont les suivantes. Il faut : 1^o dégrossir le verre; 2^o l'apprêter; 3^o le doucir et le raffiner; 4^o le polir.

L'opération du dégrossissage constitue en quelque sorte l'ébauche du travail. Elle consiste à donner au verre une courbure se rapprochant de celle que doit posséder la lentille terminée. Pour cela, on use la lentille sur une balle ou dans un bassin de fonte de fer avec du grés tamisé et mouillé; on termine avec de l'émeri n^o 1, puis n^o 2; on place ensuite la lentille sur une molette en bois très élevée, qui se fixe au mandrin du tour, et avec de l'émeri, en se servant d'une plaque de laiton arrondie, on use les bords de façon à lui donner une forme circulaire : cela s'appelle *déborder*.

On fixe alors la lentille à l'aide d'un mélange de poix molle et de cendre répandue en gouttes séparées sur l'une de ses surfaces à une plaque de laiton arrondie et travaillée au tour, de manière à ce que le verre s'y adapte aussi bien que possible. Cette plaque empêche le verre de fléchir sous la pression de la main : l'on commence le *doucissage*.

La lentille fixée sur sa *molette* est tenue de la main droite; on projette sur l'outil de l'émeri n^o 5, puis quelques gouttes d'eau; on promène la lentille sur l'outil circulairement et régulièrement. Le verre ne doit jamais dépasser les bords de l'outil qui doit être plus grand que le verre; l'émeri doit toujours être maintenu humide. Quand le verre touche bien sur tous les points la surface de l'outil, on change d'émeri pour employer successivement les n^{os} 10,

30 et 60. Avant d'employer ces deux derniers, l'outil est d'abord *réuni*, c'est-à-dire que la balle et le bassin sont rodés l'un sur l'autre. On prend alors l'outil utile et l'on y met une très petite quantité d'émeri avec un peu d'eau; la pâte ainsi formée est étalée à l'aide d'un *verre d'épreuve*. Ce verre d'épreuve est un disque de verre présentant la courbure de l'outil; il permet de reconnaître si dans le mélange d'eau et d'émeri il existe le moindre corps étranger. L'émeri étant étalé à l'aide du verre d'épreuve, on dépose sur l'outil la surface à tailler et l'on frotte circulairement. Au bout de quelque temps, le mélange devient pâteux et sec et l'on a peine à mouvoir le verre; on s'arrête alors. Avec une fine éponge mouillée on enlève l'émeri qui se trouve sur l'outil et sur le verre et on recommence l'opération: quelques opticiens terminent le doucissage par l'emploi de pierre ponce porphyrisée. Après cette opération, la surface du verre présente une *douceur* de grain extrêmement grande; on vérifie le centrage de la lentille. C'est alors que peut commencer l'opération du polissage.

On polit généralement les grands verres sur du papier. Pour préparer un polissoir, on colle sur l'outil, au moyen d'empois d'amidon

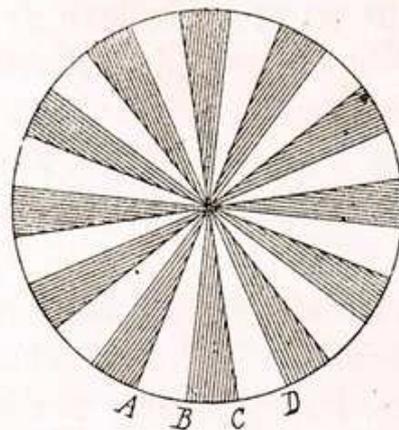


Fig. 16.

et en se servant d'un petit instrument en verre que l'ouvrier fait lui-même et que l'on nomme *colloir*, une feuille de papier dans laquelle on a coupé certaines parties, comme le représente la figure 16, pour pouvoir lui donner la courbure de l'outil. Cette opération est très délicate, et de sa bonne exécution dépend souvent la qualité de la lentille. Quand le polissoir est bien préparé, on étale à sa surface du tripoli qui permet de commencer le travail, puis on ponce légèrement le papier avec du rouge d'Angleterre humide, on le brosse, et on y étale du rouge fin. On polit la lentille sur le papier ainsi

préparé, soit en frottant le verre circulairement (au tour ou à la main) ou à l'aide d'un mouvement de va-et-vient. Il faut une grande dextérité pour ne pas déformer la surface de la lentille pendant cette opération.

Certains opticiens polissent sur le mastic. On prépare cette composition en fondant un mélange fait par parties égales de poix et de colophane, on chauffe légèrement le bassin ou la balle, on y étend cette composition sur une épaisseur de 3 à 4 millimètres et en *réunissant* l'outil, on égalise les surfaces; on fait durcir le mastic, on répand à sa surface un peu de rouge d'Angleterre très fin et l'on polit la lentille. Si l'on n'exerce pas une pression égale sur la surface de la lentille, certaines portions se polissent avant les autres et la surface peut perdre de sa sphéricité. Pour éviter cet insuccès, certains opticiens ajoutent autour de la lentille qu'ils fixent sur la molette des segments de même rayon de courbure qui absorbent l'excès de rouge anglais. Certains outils portent même ce dispositif. D'autres tracent dans la poix quelques sillons se croisant à angle droit; ces sillons sont destinés à recevoir l'excès de rouge et les fragments de mastic. Pendant le polissage, on *réunit* plusieurs fois l'outil, de façon à lui conserver sa courbure; en un mot, on le *doucit* avec de l'émeri n° 60 et on le lave de nouveau avant de le recouvrir de rouge anglais. Ce procédé est très employé pour polir les petites lentilles, en particulier les lentilles d'objectifs microscopiques. Au lieu de rouge d'Angleterre, on emploie la potée d'étain.

Le polissage au drap (au lieu de papier) est réservé en France aux lentilles de qualité inférieure.

Une lentille est dite *centrée* lorsque les centres de ses deux surfaces se trouvent sur une même droite perpendiculaire à la circonférence qui limite la lentille. Pour s'assurer de l'exactitude du centrage, on monte la lentille sur le tour, on la fait tourner et on observe par réflexion les images d'un point lumineux. Si le centrage est imparfait, l'une des images ou toutes deux décrivent un cercle. On déplace la lentille jusqu'à centrage parfait: dans ce cas, les deux images paraissent immobiles, on rode alors avec l'émeri les bords de la lentille. Pour les grandes lentilles, on emploie des appareils spéciaux et on s'assure de l'égalité d'épaisseur des bords de la lentille.

M. Laurent¹ a imaginé un dispositif basé sur les propriétés des

I. Voyez *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1882.

anneaux colorés qui permet de reconnaître les moindres défauts de centrage d'une lentille : cet appareil est réservé à l'examen des instruments d'optique plus précis que ceux employés en photographie.

Les bords de la lentille doivent former un cylindre parallèle à l'axe de la ou des lentilles qui constituent l'objectif. On réunit, en effet, deux ou trois lentilles convergentes ou divergentes, on les monte dans un *barillet* (anneau de cuivre portant un pas de vis) ; quelquefois elles sont séparées (objectif double à portrait, *rectilinear landscape* de Dallmeyer). Le plus souvent, elles présentent une surface commune et sont collées au baume du Canada, qui présente un indice de réfraction très voisin de ceux des verres. Ce montage, pour être bien exécuté, exige certaines précautions : on chauffe la lentille, on verse un peu de baume dans la surface concave, on y applique la surface convexe, on serre les deux lentilles l'une contre l'autre, en faisant tourner celle qui doit être enchâssée dans l'autre, de façon que l'excès de baume s'écoule ; il faut que les axes optiques des deux lentilles coïncident après cette opération ; on laisse refroidir, et les deux lentilles n'en forment qu'une.

L'ensemble des deux lentilles est alors disposé dans le barillet ; il est maintenu en place par un anneau que l'on peut facilement visser et dévisser. Dans les montures soignées, les lentilles sont *serties* : elles sont alors fixées à demeure. Si l'opération a été bien faite par le tourneur sur cuivre, le centrage que l'on obtient dans un objectif composé de plusieurs lentilles achromatiques est plus parfait que si les lentilles étaient placées dans de simples barillets à vis.

Le calcul des courbures des lentilles nécessite de la part de l'opticien des connaissances approfondies en physique et en mathématiques. Si l'on pouvait obtenir des fabricants verriers des qualités de matières toujours identiques à elles-mêmes, la fabrication se réduirait à un travail ne nécessitant qu'une habileté manuelle. Un premier objectif étant obtenu, il suffirait de mouler au mastic les surfaces des lentilles qui composent l'objectif pour arriver, avec un peu de dextérité, à obtenir des instruments sensiblement identiques au type que l'on veut copier. Malheureusement, il n'en est rien, car le verrier ne livre jamais deux fois de suite la *même fonte* (par suite de la déplorable habitude de mélanger les déchets des fontes précédentes à chaque nouvelle fournée) ; de plus, dans un même creuset, le verre du haut n'est pas identique à celui du bas. Les constantes relatives à chaque matière sont donc à déterminer

chaque fois, et à l'aide de ces constantes il faut calculer les nouveaux rayons de courbure, modifier l'outillage, etc., précautions que prennent seuls les opticiens de premier ordre. Ajoutons que lors même que les matières seraient toujours les mêmes, la fabrication soignée exige tant de précautions qu'il est fort difficile de n'obtenir que de bons objectifs ; aussi les maisons sérieuses, celles dont la réputation est bien établie, rejettent impitoyablement les instruments qui présentent quelques défauts : ces défauts peuvent provenir d'un *doucissage* imparfait, de déformations pendant le *polissage*, d'un *centrage* mauvais, etc., etc. On comprend donc pourquoi la production d'objectifs corrects nécessite des connaissances spéciales, des soins minutieux et des travaux que l'acheteur doit forcément rémunérer s'il veut acquérir des instruments pouvant être avantageusement utilisés.

§ 2. — PROPRIÉTÉS DES LENTILLES.

29. Nous avons vu que les lentilles pouvaient se diviser en lentilles convergentes et lentilles divergentes. Ces lentilles, supposées infiniment minces, ont un *centre optique*, point tel que tout rayon qui à l'intérieur de la lentille passe par ce point ou se dirige vers lui sort de celle-ci parallèlement à sa direction d'entrée.

Dans les lentilles biconvexe et biconcave, le centre optique est à l'intérieur de la lentille ; dans les lentilles plan convexe ou plan concave, il est sur la face bombée ; pour les ménisques convergents ou divergents, il est en dehors de la lentille du côté le plus bombé. Les propriétés des lentilles *minces* (c'est-à-dire des lentilles dont l'épaisseur est assez faible eu égard aux distances de l'objet ou de l'image à la lentille pour qu'on puisse négliger l'épaisseur de cette lentille), sont assez simples et peuvent se déduire des principes généraux de la réfraction que nous avons rappelé plus haut : elles permettent d'exposer simplement les lois générales ; quant aux applications pratiques, on est obligé de tenir compte de l'épaisseur, sans quoi les erreurs que l'on commet sont de l'ordre des aberrations à détruire.

Une lentille étant un système dioptrique centré possède deux foyers : nous appellerons *premier foyer principal* celui des deux foyers où doit être placé un point lumineux pour que son image se forme à l'infini ; le *deuxième foyer principal* est celui où se forme l'image d'un point situé à l'infini sur l'axe principal.

Un *plan focal* est un plan perpendiculaire à l'axe principal et passant par l'un des deux foyers principaux. Un objet plan, situé assez loin pour être considéré comme à l'infini, donne son image dans le *deuxième plan focal* (plan du verre dépoli des photographes). Un objet placé dans le premier plan focal donne son image à l'infini ; par conséquent, les rayons émis par un point du premier plan focal sortent du système parallèlement entre eux.

En supposant que sur l'axe optique d'une lentille (ou sur une droite paral-

lèle à l'axe) on fasse mouvoir un point lumineux, le point lumineux et son image se déplaceront toujours dans le même sens.

Il existe dans un système centré quelconque deux points conjugués tels que tout rayon incident qui passe par le premier donne un rayon émergent passant nécessairement par le second et parallèle au rayon incident. Listing a appelé ces points *points nodaux*¹.

Examinons les divers cas qui peuvent se présenter dans la formation des images par les lentilles minces; nous nous occuperons seulement des cas les plus communs dans la pratique photographique.

30. Lentilles convergentes infiniment minces. — L'objet est réel : il est placé en avant du premier plan focal; dans ce cas, on obtient une image réelle. En désignant par f_1 la première distance focale principale, par f_2 la deuxième distance focale, p la distance de l'objet, p' la distance de l'image, on a :

$$\frac{f_1}{p} + \frac{f_2}{p'} = 1.$$

La relation suivante existe entre la grandeur o de l'objet et celle i de l'image :

$$\frac{i}{o} = \frac{f_1}{f_2} \frac{p'}{p}.$$

Si nous supposons que les milieux qui baignent les deux faces de la lentille sont identiques, c'est le cas habituel des objectifs photographiques (mais non des objectifs de microscope), $f_1 = f_2$ et les formules deviennent :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad \frac{i}{o} = \frac{p'}{p}.$$

2^o L'objet est réel : il est placé entre le premier plan focal et la lentille; l'image est virtuelle.

3^o L'objet est virtuel (dans le sens que nous avons attaché à l'expression *faisceau virtuel*); la lentille donne alors une image réelle.

31. Lentilles épaisses. — Les formules sont les mêmes pourvu qu'on compte les distances de l'objet ou de l'image, non à partir d'un même plan, mais à partir de deux plans fixes, distincts, perpendiculaires à l'axe principal et qu'on appelle *plans principaux*. C'est à Gauss que l'on doit la notion de ces *plans principaux*². Il suppose que la lentille est épaisse, mais que les rayons incidents ne sont pas très distants de l'axe principal : dans ces conditions, la direction de chacun des rayons incidents parallèles à l'axe principal coupe la direction du rayon émergent correspondant sur un

1. Biot (*Astronomie physique*, 1841; t. I, p. 473), les avait appelés *centres conjugués*.

2. En 1840. (Voyez Bravais, *Annales de chimie et de physique*, t. XXXIII.)

même plan perpendiculaire à l'axe principal ; ce plan est appelé *plan principal*.

De même qu'il y a deux foyers principaux, il y a aussi deux plans principaux : le *premier plan principal* est celui qui correspond au premier foyer principal, le *second plan principal* est celui qui correspond au second foyer principal, les *points principaux* sont ceux où l'axe principal rencontre les plans principaux.

Les deux plans principaux sont généralement distincts : ils sont conjugués ; l'un est l'image de l'autre.

32. Éléments cardinaux. — Une lentille est complètement définie par la connaissance de ses *éléments cardinaux*, qui sont : 1^o l'axe optique ;

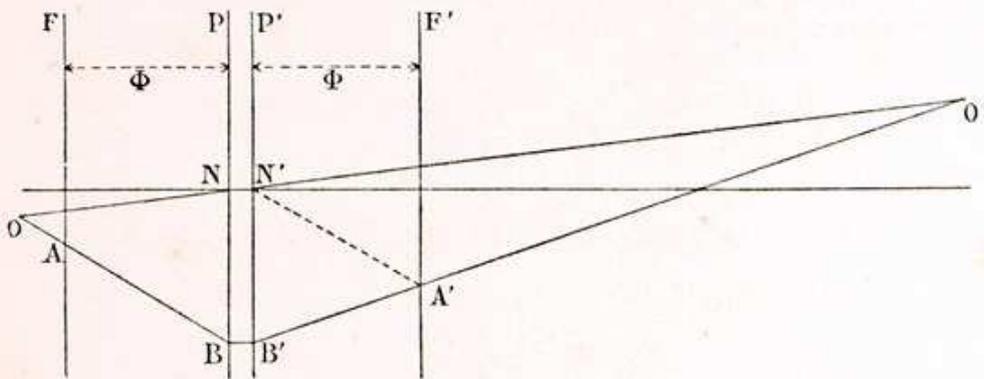


Fig. 17.

2^o les deux plans principaux d'incidence P, d'émergence P', et 3^o les deux plans focaux d'incidence F, d'émergence F', situés à la même distance du plan principal correspondant (*fig. 17*).

33. Formule de Newton. — Désignons par φ la distance de l'objet au premier foyer principal, par φ' la distance de l'image au second foyer principal, on a :

$$\varphi\varphi' = f_1 f_2.$$

Si $f_1 = f_2$, on a $\varphi\varphi' = f_1^2$.

34. Points nodaux dans les lentilles épaisses. — On appelle *points nodaux* deux points situés sur l'axe principal obtenus en portant à partir de chacun des foyers principaux, et du côté du plan principal correspondant, une longueur égale à l'autre distance focale. La *distance* des deux points nodaux (appelée *interstice* par Listing) est la même que la distance des deux plans principaux.

Tout rayon incident qui se dirige vers le premier point nodal (correspondant au premier foyer principal) donne naissance à un rayon émergent dont la direction passe par le second point nodal et qui est parallèle au rayon incident. De même tout rayon incident qui donne naissance à un rayon émergent parallèle à lui passe par le premier point nodal, et le rayon émergent par le second point nodal. Ces deux points N et N' (*fig. 18*) jouent donc le rôle que l'on attribue au *centre optique* dans la théorie des lentilles

minces. Dans les objectifs photographiques, le *point nodal* d'émergence N est le *point de vue perspectif* de la photographie.

Quand les deux faces d'un système optique sont plongées dans l'air, les points nodaux se confondent avec les points principaux, puisque la distance d'un point nodal au point principal correspondant est égal à la différence des deux distances focales.

35. Plans principaux. — Désignons par α la distance du premier point nodal à la surface de la lentille ($\alpha > 0$ si le point nodal est en avant de cette face, $\alpha < 0$ s'il est en arrière), R et R' les rayons de courbure de la

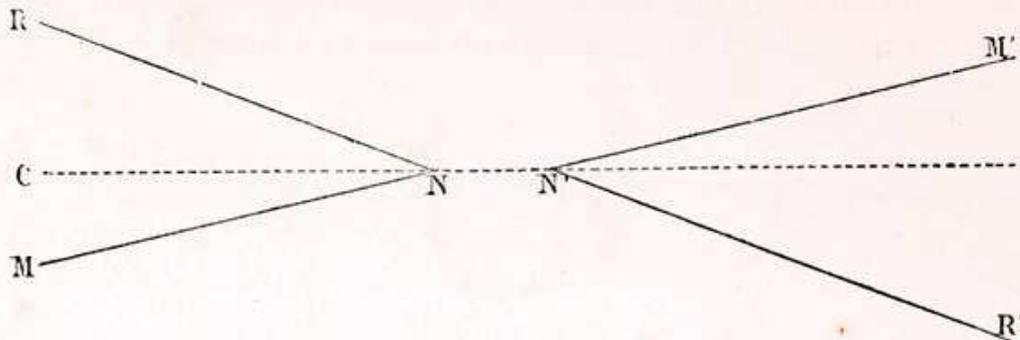


Fig. 18.

première et de la seconde face, e l'épaisseur de la lentille, k l'indice de réfraction par rapport à l'air de la substance de la lentille, on démontre que l'on a :

$$\alpha = \frac{eR}{k(R' - R - e) + e}.$$

Pour le second point nodal (en supposant $\alpha' > 0$ si le second point est en arrière de cette face et $\alpha' < 0$ s'il est en avant), on a :

$$\alpha' = \frac{-eR'}{k(R' - R - e) + e}.$$

Ces formules indiquent la position des plans principaux pour chaque forme de lentille. En particulier, pour une lentille biconvexe ou biconcave, les plans principaux sont à l'extérieur; pour une lentille plan convexe ou plan concave, l'un des plans principaux est tangent à la face courbe; pour un ménisque, un des plans principaux est toujours en dehors de la lentille, du côté de la face qui a la plus forte courbure.

Pour des lentilles de même épaisseur, quelle que soit leur forme, la distance des deux plans principaux est sensiblement la même. Cet interstice d peut se calculer par la formule

$$d = e + \alpha + \alpha'$$

et, par suite, pour les lentilles de verre peu épaisses $d = \frac{k-1}{k} e$, la distance des deux plans principaux est indépendante de la forme de la lentille.

Si $k = \frac{3}{2}$, $d = \frac{e}{3}$: l'insterstice est le tiers de la longueur.

36. Mesure de la longueur des foyers principaux. — Il existe un grand nombre de procédés pour mesurer la longueur des foyers principaux d'une lentille ou d'un système de lentilles ; le plus précis est, sans contredit, celui qu'a fait connaître M. Cornu ¹. Il présente une certaine analogie avec celui qu'avait indiqué M. Ad. Martin ², mais la marche indiquée par M. Cornu fournit des vérifications qui augmentent singulièrement la précision des observations ; elle permet de fixer sur l'axe principal du système quatre points : les deux *foyers principaux* et les deux *points nodaux*.

Ces foyers principaux (*fig. 19*) F et F' sont les points de convergence des rayons parallèles à l'axe du système ; les points nodaux N et N' sont les

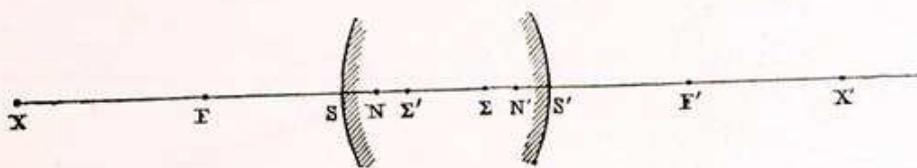


Fig. 19.

images virtuelles du centre optique, vues par un observateur placé d'un côté ou de l'autre du système ; les distances NF, N'F' sont égales à la distance focale principale f (foyer absolu de l'objectif), et les distances xx' de deux foyers conjugués quelconques XX' aux foyers principaux correspondants sont liées entre elles par la relation de Newton

$$xx' = f^2.$$

Nous admettons que l'on compte x et x' dans le même sens, ce qui est indispensable pour établir la correspondance des trois points X, F, N, X', F', N'. Pour se rendre compte des positions relatives de ces divers points, supposons un point lumineux X situé à l'infini et avançant de X vers X' : le verre dépoli étant placé de l'autre côté du système, nous obtenons en F' un foyer principal ; ce foyer sera l'origine des x' . A mesure que le foyer lumineux s'approche du système, on est obligé d'éloigner le verre dépoli : x' augmente. Le point lumineux arrivant en F, la position du verre dépoli serait rejetée à l'infini et $x = 0$, car F est l'origine de x . A partir de ce moment, le foyer conjugué est virtuel : il a passé à gauche du système ; il faut compter x négativement par rapport à F' qui est son origine, tandis que x est positif si on le compte relativement à F. Le foyer lumineux atteint la première surface S : là il est matériellement arrêté. Mais on peut supposer qu'au lieu d'un point lumineux réel, on prendra comme source lumineuse le point de concours de rayons concentrés par un système optique quelconque ; de cette manière, le point lumineux peut atteindre jusqu'au centre optique, c'est-à-dire jusqu'à un point tel que tout rayon entrant par la première surface du système émerge parallèlement à sa direction à sa

1. *Journal de physique de d'Almeida*, t. VI, 1877, p. 276.

2. *Annales de chimie et de physique*, 1867, p. 385.

sortie de la dernière. L'image virtuelle du centre optique pour l'observateur, toujours situé du côté de la dernière surface, est le point nodal N.

Les trois points correspondants N' , F' , X' sont donc ainsi définis; on obtiendrait de même la correspondance des trois autres points N , F , X .

Pour déterminer f , on cherchera la position des foyers principaux F et F' en tournant successivement les faces du système vers un objet situé à l'infini, et l'on observera de l'autre côté du système le foyer des rayons conjugués, puis on placera un objet à une distance x d'un des foyers principaux, et on observera la distance x' du foyer conjugué à l'autre foyer principal; le produit xx' donne le carré f^2 de sa distance focale principale cherchée. Cette méthode est susceptible d'une très grande précision; l'erreur relative commise sur la distance focale est la moyenne des erreurs relatives commises sur les coordonnées x et x' des foyers conjugués.

Afin d'obtenir plus d'exactitude, on prend pour x et x' deux points très voisins des points nodaux; on choisit : 1^o les pôles extérieurs du système optique donnés; 2^o leurs images observées à travers la surface opposée. Avec un pinceau et de l'encre de Chine délayée dans un peu d'eau gommée, on trace sur le milieu d'une des surfaces (il est très utile que ce trait coïncide avec le pôle ou sommet de la surface) un petit trait S , et l'on mesure la distance ϵ' de son image Σ' vue à travers la surface S' au sommet S' sur laquelle on a tracé également un petit trait. On a au préalable mesuré $FS = d$, $F'S' = d'$.

S servant de foyer lumineux, Σ' est son foyer conjugué; on a

$$d(d' + \epsilon') = -f^2.$$

De la même manière, en retournant le système optique, on peut observer le trait S' à travers la surface S , c'est-à-dire son image Σ , et mesurer la distance $S'\Sigma' = \epsilon$; on aura de même

$$d'(d + \epsilon) = -f^2.$$

On détermine ainsi de deux manières la distance focale principale f . Connaissant la valeur de f , en la portant en sens convenable, à partir de F et

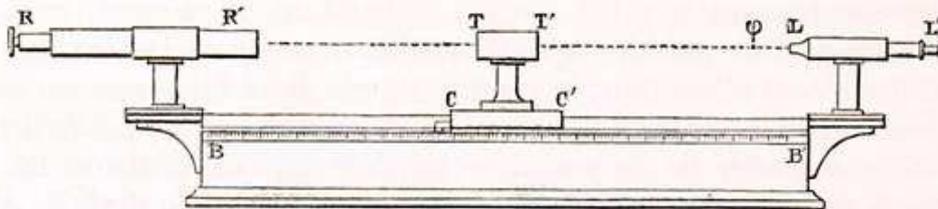


Fig. 20.

de F' sur l'axe principal, on détermine alors les points nodaux N et N' .

Pour effectuer ces déterminations, M. Cornu emploie l'appareil suivant (*fig. 20*), dont la disposition se comprend à la simple inspection de la figure

BB' banc en fonte rabotée,

CC' chariot sur lequel on place l'objectif; ce chariot est mobile le long d'une règle divisée,

RR' collimateur muni d'une fente ou d'un diaphragme portant un réticule.

Les opérations à effectuer sont extrêmement simples :

1^o On centre la lentille à étudier dans le tube TT', et on dirige l'axe principal de l'appareil sur un objet situé à plusieurs centaines de fois la distance focale présumée de l'objectif; on fait voyager le chariot CC' jusqu'à ce que l'image de cet objet formée par le système optique vienne se faire en φ au plan de visée du microscope LL'. Lorsque la coïncidence de l'image est aussi parfaite que possible, on lit la position de l'index sur la règle, soit z'_0 cette lecture.

2^o On rapproche le chariot jusqu'à ce que le point tracé sur la surface la plus voisine soit perçu nettement dans le microscope; on lit la nouvelle position de l'index; soit z'_1 cette lecture.

3^o On rapproche davantage le chariot jusqu'à voir distinctement dans le microscope le point tracé sur la surface opposée du système; soit z'_2 la nouvelle position de l'index; par hypothèse, l'objet visé étant suffisamment éloigné, on a

$$d' = z'_1 - z'_0, \quad d' + \varepsilon' = z'_2 - z'_0.$$

4^o, 5^o, 6^o. On retourne l'objectif à essayer *bout pour bout* et l'on fait les trois lectures analogues z_0 , z_1 , z_2 . On a alors

$$d = z_1 - z_0, \quad d + \varepsilon = z_2 - z_0,$$

d'où l'on conclut

$$f^2 = + (z_1 - z_0)(z'_2 - z'_0), \quad f^2 = + (z'_1 - z'_0)(z_2 - z_0).$$

Ces deux valeurs doivent être les mêmes. Le retournement *bout pour bout* ayant changé le sens des valeurs positives pour chaque foyer principal, on met le signe +. On a donc une vérification dans la pratique. Ce procédé est applicable à la mesure du foyer principal de tous les systèmes optiques.

M. Ad. Martin¹ opère différemment. Son procédé est basé aussi sur l'emploi de la formule de Newton, qu'il énonce ainsi : Si l'on prend, d'une part, la distance du point lumineux à la position qu'il devrait occuper pour que ses rayons devinssent parallèles après réfraction, et, d'autre part, la distance de l'image à la position qu'elle aurait occupée si les rayons avaient été parallèles avant réfraction, le produit de ces deux distances est constant.

Pour déterminer la position des plans focaux principaux, M. Martin compte les distances à partir de la première surface que rencontrent les rayons lumineux. Il emploie un banc ou table munie d'une règle divisée. Il fixe la lentille sur un support portant un trait de repère que l'on amène au zéro des divisions de la règle; on établit sur un petit support une aiguille en contact avec le sommet (pôle) de la première surface du premier verre. On recule ensuite celui-ci jusqu'à ce qu'en visant l'aiguille à travers la lentille, à l'aide d'une lunette ajustée pour les objets situés à l'infini, on voie nettement la pointe de l'aiguille; celle-ci est alors dans le plan focal principal du système, et la quantité dont a dû reculer l'objectif mesure la distance de ce plan *au sommet* de la surface.

1. *Ann. de chimie et de physique*, 4^e série, vol. X, 1876, p. 447.

Une aiguille mise en contact central avec la dernière surface du système sera reculée jusqu'à ce que la lunette, reportée en sens contraire de sa position première, en donne l'image bien nette; elle déterminera le deuxième plan focal.

On aura mesuré la course de l'aiguille dans ce deuxième cas, et un compas d'épaisseur donne d'ailleurs la distance des surfaces extérieures du système. Si les aiguilles sont fixées sur des supports dont le déplacement puisse être mesuré sur la règle, elles pourront tenir lieu de compas d'épaisseur.

Les positions des plans focaux étant connues par rapport aux surfaces, on mesurera la longueur focale principale. A cet effet, on reculera le système de sa position actuelle d'une quantité connue φ . L'aiguille antérieure se trouvera ainsi en avant du foyer de cette quantité φ ; puis on reculera l'aiguille postérieure de manière à l'amener au point de l'espace où se forme l'image renversée de la première, et cela avec assez d'exactitude pour qu'en plaçant l'œil latéralement cette superposition ne cesse pas d'exister.

La lecture de la course de la deuxième aiguille, à partir de son plan focal, donnera φ' , et comme les milieux extrêmes sont identiques, puisque les deux aiguilles sont dans l'air, $\varphi = \varphi'$.

$$\varphi \varphi' = f^2.$$

En retranchant de f la distance de chaque aiguille à la surface correspondante, on aura la distance du point nodal correspondant à l'intérieur du système.

En donnant une nouvelle valeur à φ , on aura une nouvelle valeur de φ' et on vérifiera la valeur de f .

37. Convergence d'une lentille; dioptrie. — La *convergence* d'un système optique centré est par définition l'inverse de sa distance focale (inverse de la distance du second foyer au second plan principal).

On évalue la convergence d'un système à l'aide d'une unité spéciale, la *dioptrie*, que l'on peut définir : la *dioptrie* est la convergence d'un système dont la distance focale est 1 mètre. Par conséquent, en évaluant la distance focale d'un système en mètres, l'inverse de ce nombre représente sa convergence en dioptries. Si le système est divergent, sa convergence est négative.

Soit un système optique de 5 centimètres de distance focale, la convergence est $\frac{1}{0,05} = 20$ dioptries.

Dans le cas de plusieurs lentilles placées l'une contre l'autre, la convergence du système est égale à la somme algébrique des convergences des lentilles; ainsi un objectif achromatique formé d'un système de lentilles convergentes de + 5 dioptries et d'une lentille divergente de - 3 dioptries a une convergence de + 2 dioptries.

§ 3. — DES ABERRATIONS.

38. Aberration sphérique; caustiques. — Nous avons jusqu'à présent considéré des lentilles de peu d'amplitude; dans ce cas, tous les rayons issus d'un point lumineux coupent l'axe sensiblement au même point et le

faisceau émergent est sensiblement homocentrique. Cette propriété n'est rigoureusement exacte que lorsque les rayons considérés sont infiniment voisins, que si l'ouverture de la surface réfringente est petite; dans les autres cas, les rayons réfractés sont distribués d'une façon spéciale. Gergonne a démontré qu'après un nombre quelconque de réflexions ou de réfractions par des surfaces de forme quelconque, les rayons issus d'un point lumineux sont normaux à une même surface. Ce théorème sert de base à la théorie des *caustiques*.

Quand les rayons émanant d'un point lumineux tombent sur la surface plane ou courbe qui sépare deux milieux transparents, il existe toujours sur cette surface deux systèmes de courbes, dites *lignes de réfraction*, telles que tous les rayons réfractés sur une même courbe forment une surface développable en se coupant deux à deux. L'ensemble des arêtes de rebroussement des surfaces développables correspondant à un même système de courbes forme une *surface caustique* de réfraction ou *diacaustique*. Les intersections des deux diacaustiques forment des *lignes focales*, ou des foyers quand ce sont des points.

La considération des *lignes focales* est due à Sturm. On peut montrer leur existence par l'expérience suivante. On fait pénétrer dans une chambre noire un faisceau de rayons solaires passant par un petit trou; on reçoit le faisceau sur une fiole en verre pleine d'eau qui réfracte le faisceau d'une façon très irrégulière. Sur la face postérieure de la fiole on a collé une feuille de papier opaque percée d'une petite ouverture. En écartant plus ou moins une feuille de papier blanc sur laquelle on reçoit le faisceau réfracté, on trouve deux positions pour lesquelles la tache lumineuse formée par le faisceau devient linéaire. Ces deux lignes lumineuses sont perpendiculaires entre elles comme le veut la théorie.

La forme de la caustique peut s'observer facilement quand on fait passer les rayons solaires à travers une lentille à grande ouverture: si l'air est troublé par de la poussière ou de la fumée, on aperçoit la caustique qui est très effilée à son extrémité.

En recevant l'image solaire sur un écran on reconnaît qu'autour de l'image la plus nette possible du soleil se trouve une auréole. Cette auréole constitue l'*aberration de sphéricité* transversale: elle provient de ce que les *rayons centraux* (voisins de l'axe) coupent l'écran en des points différents de ceux formés par les *rayons marginaux*. Le *diamètre* de ce cercle constitue l'*expression de l'aberration sphérique* transversale. On appelle *aberration longitudinale* la distance qui sépare le foyer des rayons centraux du foyer des rayons marginaux.

L'*aberration longitudinale* est considérée comme *positive* quand le point de concours des rayons marginaux est en avant du point de concours des rayons centraux; elle est *negative* quand il est en arrière; elle augmente comme le carré du diamètre de l'ouverture; elle varie en raison inverse de la distance focale.

L'*aberration sphérique* varie en raison inverse de la valeur de l'indice de réfraction du verre de la lentille. Quand le diamètre de la lentille n'est pas supérieur au quinzième de sa distance focale, l'*aberration sphérique* est très faible, sensiblement nulle. L'*aberration transversale* est proportionnelle *au cube* de l'ouverture et en raison inverse de la distance focale.

39. Destruction de l'aberration sphérique. — En réduisant l'ouverture de la lentille par un diaphragme, on diminue l'aberration de sphéricité qui est un défaut causant le manque de netteté de l'image ; mais jamais le diaphragme ne détruit complètement l'aberration de sphéricité.

Un système optique qui donne d'un point lumineux une image dépourvue d'aberration de sphéricité est dit *aplanétique*. On ne peut réaliser l'aplanétisme rigoureux que pour un seul point lumineux.

Pour corriger l'aberration des lentilles convergentes, on leur associe des lentilles divergentes et réciproquement. On conçoit aisément que, étant donné une lentille convergente C, si on lui associe une lentille divergente D.

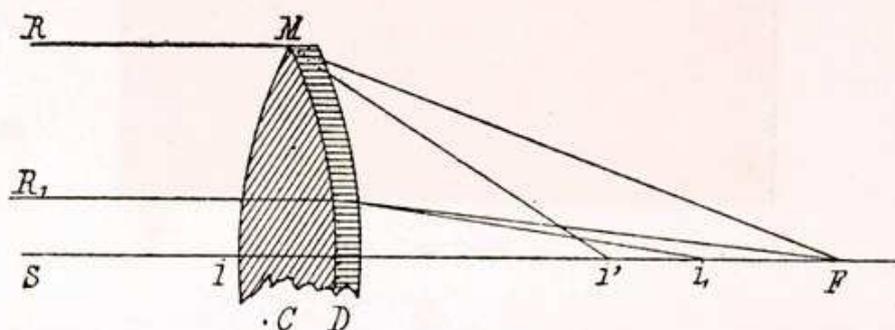


Fig. 21.

de rayons de courbure convenablement choisis, les rayons centraux tels que SI ne seront pas déviés, tandis que la marche des rayons tels que RM sera fortement modifiée (*fig. 21*).

Les deux lentilles peuvent être collées ensemble ou bien être séparées par un anneau ; la nature du verre est généralement différente pour les deux lentilles, parce que le plus souvent la lentille ajoutée a aussi pour but de corriger l'*aberration chromatique*.

Quand l'image d'un objet n'est pas trop grande, si les aberrations sont rigoureusement nulles pour un de ses points, elles sont tellement faibles pour les autres qu'en pratique l'image est d'une netteté suffisante, si ce n'est pour les pinceaux très obliques à l'axe. Dans ce cas, on réduit l'aberration sphérique à un minimum par l'emploi d'un diaphragme.

On peut se proposer de chercher l'équation d'une surface réfringente qui donne d'un point une image sans aberrations. Ces surfaces sont difficiles à réaliser dans la pratique.

40. Courbure du champ ou aberration de forme de l'image. —

L'image d'un objet plan se forme dans un plan parallèle quand l'objet s'écarte très peu d'un axe qui lui est perpendiculaire, cet axe se confondant sensiblement avec l'axe principal.

S'il n'en est pas ainsi, s'il y a des points qui s'écartent notablement de l'axe, les images des divers points de l'objet ne sont pas dans un même plan ; l'image est courbe, de là une cause de déformation des images. L'image (*fig. 22*) ne saurait donc être reçue sur un plan à moins de sacrifier la netteté des points A, C.

41. Définition de la netteté. — Il résulte des aberrations de sphéricité

que l'image de deux points infiniment rapprochés ne peut être obtenue sans que l'un des points empiète sur l'autre : il y aura confusion des deux images, car l'image d'un point est représentée par une surface. Quelles sont les dimensions minima de cette surface pour que la séparation de deux points ait lieu à la distance de la vision distincte ? La surface par laquelle

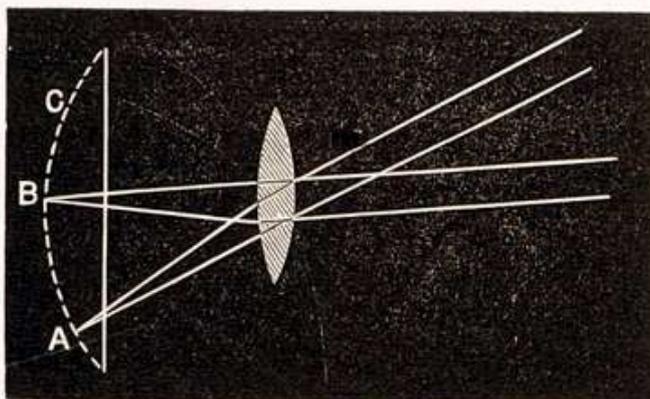


Fig. 22.

l'image du point est représentée s'appelle *cercle de confusion minima*. Le diamètre de ce cercle ne doit pas dépasser à 0^m00025 pour que nous ayons une *image nette*. Il est clair que cette définition ne présente rien d'absolu ; elle concerne des images examinées par un œil normal. Nous verrons, en traitant de l'emploi des objectifs photographiques, comment on peut, suivant les circonstances (clichés destinés à être agrandis), modifier cette netteté par l'emploi des diaphragmes.

42. Profondeur de foyer. — La profondeur de foyer est une propriété des lentilles de donner une image nette de points situés à des distances diffé-

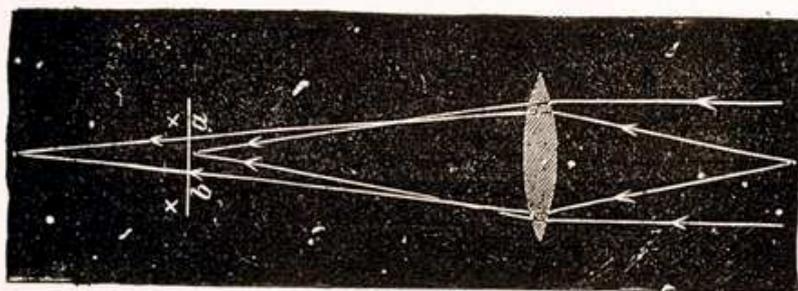


Fig. 23.

rentes de la lentille. Le point conjugué de tout point distant de la lentille de cent fois sa longueur focale est très près du foyer principal, et tous les points au delà de cette distance font leur image sensiblement au même point. Par conséquent, si l'on reçoit l'image sur un verre dépoli, on pourra faire mouvoir d'une très petite quantité ce verre dépoli sans que l'image perde d'une façon visible de sa netteté.

La profondeur de foyer varie avec l'ouverture de la lentille. Soient des rayons parallèles et des rayons venant d'un autre point plus rapproché de

la lentille, les premiers rayons font leur image au foyer principal, les autres au delà de ce foyer par rapport à la lentille. Tout plan situé entre les deux ne donnera d'images nettes que lorsque les cercles de confusion auront un diamètre inférieur à 0^m00025 . Si nous mettons au point l'objet éloigné, l'image du point rapproché (*fig. 23*) sera représenté par un cercle de largeur *ab*.

Supposons la lentille aplanétique et plaçons un diaphragme en avant de la lentille : les angles des rayons formant les images seront diminués et entre les deux points éloignés se trouvera un plan sur lequel les cercles de confusion des images des deux points seront d'un diamètre inférieur ou égal à 0^m00025 . Dans ces conditions l'image sera nette, et si le diaphragme (*fig. 24*) est assez réduit, elle pourra l'être sur une certaine distance; on pourra donc avancer ou reculer le verre dépoli d'une petite longueur.

La profondeur de foyer varie donc avec l'ouverture de la lentille et la distance des objets; elle varie aussi suivant la forme des combinaisons optiques constituant l'objectif.

Parmi les lentilles simples, les ménisques convergents armés d'un diaphragme convenablement placé sont celles dont le champ est le moins

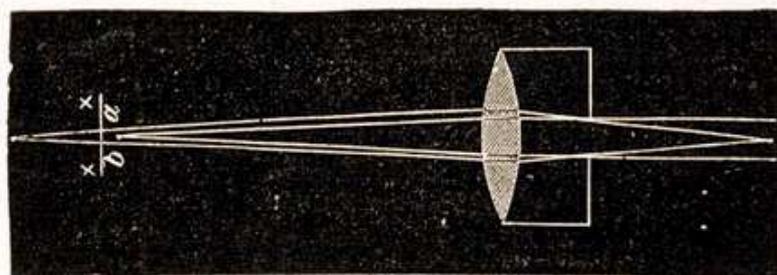


Fig. 24.

courbe, pourvu que l'on fasse présenter leur face concave à l'objet à reproduire. Si l'on se contente d'une amplitude de 10 à 15° , le champ est complètement plat. Pour obtenir une amplitude plus considérable, on devrait théoriquement associer au ménisque convergent une lentille négative présentant une courbure de champ en sens inverse : la courbure du champ donné par une telle lentille serait renversée parce que les rayons marginaux auraient une distance focale plus grande que les rayons centraux. En pratique, à cause de l'achromatisme, on associe une lentille convergente à une lentille divergente, comme nous le verrons en traitant des objectifs simples.

43. De la distorsion. — On observe facilement le phénomène connu sous le nom de distorsion en examinant l'image d'une surface quadrillée (*fig. 25*); si l'on emploie pour cet objet une lentille simple, on constate que le quadrillé est déformé : les lignes droites sont courbées, de là le nom de *distorsion*.

L'image présente l'aspect de l'une des figures suivantes (*fig. 26 et 27*), soit que l'on emploie une lentille divergente, soit que l'on emploie une lentille convergente.

Cette aberration provient de l'épaisseur de la lentille; suivant que le rayon

incident tombe plus ou moins loin du bord, il y a distorsion. On corrige cette aberration à l'aide du diaphragme. La distance varie suivant la position du diaphragme. S'il est en contact avec la lentille, l'image est sensiblement

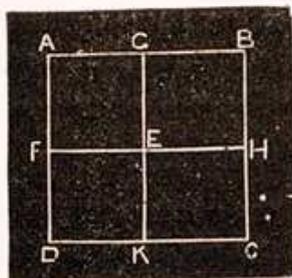


Fig. 25.

exempté de distorsion, puisque les bords de la lentille n'interviennent pas pour la formation de l'image; plus le diaphragme est rapproché de la lentille, plus les rayons incidents obliques passent près du centre de figure de la lentille.

L'objectif simple employé en photographie muni d'un diaphragme en avant donne la distorsion en barillet (*fig. 26*); en plaçant le diaphragme entre l'objectif et la glace dépolie la distorsion serait inverse (*fig. 27*).

Il résulte de là qu'en employant pour la formation des images deux lentilles identiques disposées *symétriquement* par rapport au diaphragme,

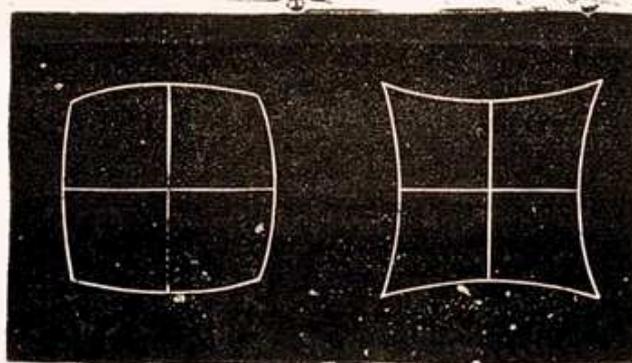


Fig. 26

Fig. 27.

l'une produisant la distorsion en forme de barillet, l'autre en forme de croissant, ces deux défauts s'annuleraient, et on aurait une reproduction dans laquelle les lignes droites seraient conservées : c'est là l'un des principes qui préside à la fabrication des objectifs *symétriques*. L'aberration sphérique d'un tel système établi avec les anciennes formes de lentilles était considérable; on est parvenu aujourd'hui à réduire cette aberration.

44. De l'astigmatisme. — L'astigmatisme peut se démontrer par une expérience fort simple. Mettons au foyer l'image du soleil sur une feuille de papier, nous pourrions obtenir une image nette; tournons la lentille de façon à ce que son axe fasse un angle considérable avec la direction des rayons solaires, dans cette nouvelle position il sera impossible de mettre au point.

La figure 28 permet de se rendre compte de ce phénomène.

Elle montre, en effet, qu'il y a deux distances focales de la même lentille pour les rayons parallèles obliques à l'axe et tombant parallèlement entre eux à la surface de la lentille : l'une des distances focales est dans le plan

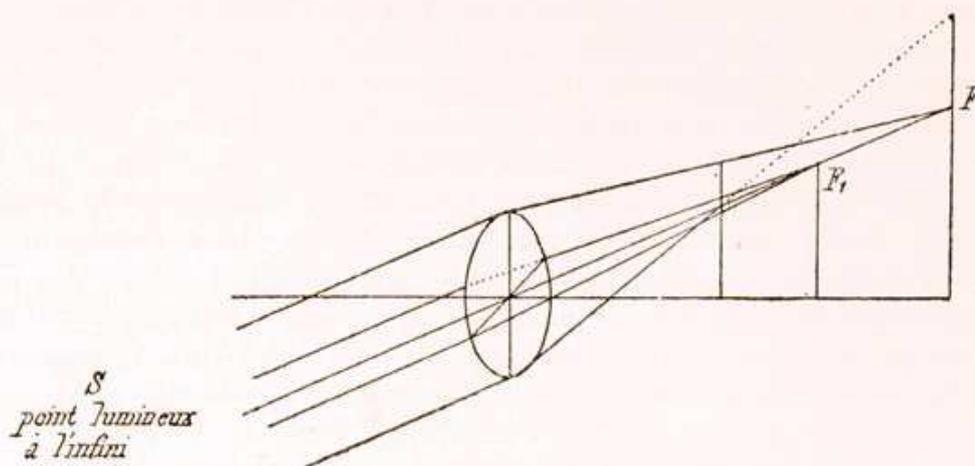


Fig. 28.

passant par l'axe principal de la lentille et le point rayonnant; l'autre passant par le point rayonnant, le point nodal d'émergence et perpendiculaire au premier.

On ne peut détruire complètement l'astigmatisme pour les rayons très obliques à l'axe, car la différence entre le foyer primaire et le foyer secondaire ne peut être nulle. En pratique, on réduit l'astigmatisme au *minimum* par l'emploi du diaphragme et par le choix des rayons de courbures des lentilles. Ces rayons de courbure doivent être choisis de telle sorte que les rayons immergents et les rayons émergents fassent un très petit angle avec les normales aux surfaces sphériques des lentilles.

L'effet du diaphragme peut être expliqué par la figure 29. Dans le plan comprenant l'axe principal et des rayons (représentés en traits ponctués)

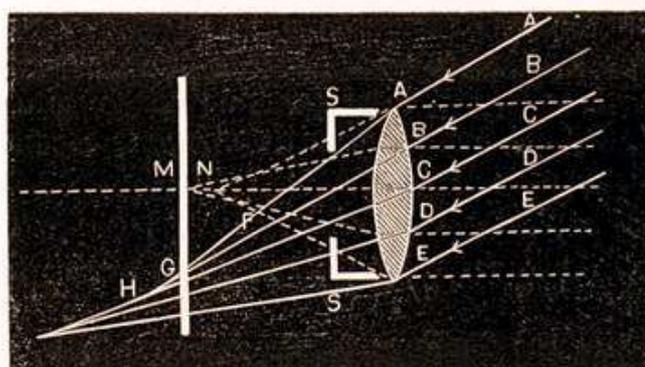


Fig. 29.

assez écartés de l'axe principal, le diaphragme intercepte les rayons marginaux, ne conserve que les rayons centraux, et, par suite, allonge légèrement le foyer; dans le plan des rayons obliques (traits pleins), tous les rayons, tels que CH, sont éliminés, et les choses se passent comme si le foyer secondaire était raccourci. Le foyer primaire étant allongé, le dia-

mètre des cercles de confusion est diminué, et, par suite, la netteté est augmentée.

45. Aberration chromatique. — Les radiations qui sont le plus actives, eu égard aux substances employées en photographie, sont celles qui, dans le spectre solaire, présentent à l'œil l'éclat le moins grand; ce sont : le bleu, le violet, l'indigo. En admettant qu'on ait détruit dans une lentille toutes les aberrations précédemment signalées, l'emploi de cette lentille, pour produire une image photographique, donnera lieu au phénomène suivant : la mise au point de l'objet, exacte pour l'œil, ne le sera plus pour la surface photographique; nous devons modifier la position de la surface sensible pour obtenir une épreuve nette, sinon l'image de l'objet manquera de définition. Il y a donc dans une lentille corrigée des diverses aberrations (objectif de lunette astronomique, par exemple) deux groupes de foyers principaux : 1^o le *foyer visuel*, c'est celui que nous observons lorsque nous mettons au point; 2^o les *foyers chimiques*, qui sont les foyers de la lentille vus par les surfaces sensibles. Dans tout objectif photographique, ces deux groupes doivent coïncider pour la commodité du travail. On obtient cette coïncidence en employant deux ou plusieurs lentilles.

Un système de plusieurs lentilles centrées infiniment minces et infiniment voisines est équivalent à une lentille unique dont la convergence serait égale à la somme algébrique des convergences des lentilles qui composent ce système.

Cette équivalence doit s'entendre pour ce qui est de la *distance* et de la *grandeur* des images.

Le calcul démontre qu'il est possible de trouver deux lentilles formant un système achromatique; pour deux couleurs, les lentilles doivent être taillées dans des verres inégalement dispersifs. L'une des lentilles du système achromatique doit être convergente, l'autre divergente. Les valeurs absolues des convergences des deux lentilles doivent être inversement proportionnelles aux pouvoirs dispersifs.

Le système achromatique est convergent si la lentille formée du verre le moins dispersif est convergente; il est divergent si la lentille formée du verre le moins dispersif est divergente.

En désignant par k_1 l'indice de réfraction pour le jaune; k_2 l'indice de réfraction pour le bleu; R_1, R_2 les rayons de courbure de la première lentille; k_1', k_2', R_1', R_2' les mêmes quantités pour la seconde lentille, la condition d'achromatisme est :

$$(k_2 - k_1) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) + (k_2' - k_1') \left(\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_1'} \right) = 0.$$

Si l'on veut obtenir une distance focale déterminée F , on aura une nouvelle équation :

$$\frac{1}{F} = (k_2 - k_1) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \left\{ \frac{k_1 - 1}{k_2 - k_1} - \frac{k_1' - 1}{k_2' - k_1'} \right\}.$$

En général, on prend comme troisième condition

$$R_2 = -R_1'.$$

De cette façon, les deux faces en regard s'appliquent l'une contre l'autre; on les colle à l'aide de baume du Canada.

La quatrième condition que s'imposent les opticiens est la condition d'*aplanétisme*; ils s'efforcent de rendre minima les aberrations de sphéricité du système.

Dans quelques cas, on emploie trois lentilles de trois verres différents pour faire coïncider les images de trois couleurs et diminuer plus complètement les aberrations; c'est ainsi que dans les objectifs simples de M. Dallmeyer l'emploi de trois lentilles permet, dans un cas, de détruire l'aberration de sphéricité au point de pouvoir employer des diaphragmes relativement grands (*Rapid landscape lens*); dans l'autre cas, il permet d'augmenter le champ de netteté (*Wide angle landscape lens*).

Les formules que nous venons d'indiquer concernent les lentilles infiniment minces; elles ne donnent que des résultats approchés pour les lentilles épaisses. La théorie de Gauss permet de trouver les règles tout à fait exactes concernant chaque cas en particulier. S'il s'agit de lentilles de faible amplitude (comme les objectifs de lunettes par exemple), les règles élémentaires établies pour des lentilles infiniment minces peuvent suffire; elles donnent à l'opticien un achromatisme approché. En retouchant les surfaces, on arrive par un tâtonnement régulier à rendre extrêmement faibles les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité, tout en conservant au système la même distance focale.

Pour les lentilles destinées à la photographie, lentilles qui sont d'une amplitude considérable (elle atteint et dépasse même 45° dans certains objectifs), la méthode élémentaire ne donne rien; on peut calculer¹ la marche des rayons pour deux ou même trois points des premières surfaces: on arrive ainsi à connaître le sens et la grandeur des défauts du système; on reprend ensuite le calcul en modifiant dans les données, soit une épaisseur, une courbure, etc., de manière à faire naître les défauts opposés; par une simple interpolation, on arrive à la meilleure combinaison possible avec les matières dont on dispose. Il reste enfin, après avoir établi la lentille conformément aux données du calcul, à la retoucher convenablement, ce qui demande beaucoup de patience et d'habileté de la part de l'opticien. C'est là un procédé en quelque sorte empirique: connaissant la distance focale, les indices de réfraction et les pouvoirs dispersifs, le calcul direct des surfaces est extrêmement long; il se fait cependant chez plusieurs opticiens de premier ordre, qui ne reculent pas devant ce surcroît de travail pour ne rien laisser de livré au hasard dans des productions le plus souvent parfaites².

1. Porro, *Sur le perfectionnement pratique des appareils optiques*. Paris, Gauthier-Villars, 1858, et *Bulletin de la Société française de photographie*, 1858.

2. Nous adressons tous nos remerciements à M. Berson, professeur de physique à la Faculté des sciences de Toulouse, qui a bien voulu revoir avec nous cette partie de notre travail.

BIBLIOGRAPHIE.

- GARIEL. *Études d'optique géométrique*. Paris, 1889.
- LISTER. *On some properties in achromatic object glasses*, Phil. Transac., 1830.
- CODDINGTON. *Treatise on optics*. Cambridge, 1829.
- PRETCHL. *Praktische Dioptrik*. Vienne, 1828.
- HERSCHELL. *Traité d'optique*, traduit par Quételet.
- VERDET. *Leçons de physique*, optique.
- FOUCAULT. *Œuvres complètes*. Paris, Gauthier-Villars.
- GAUSS. *Annales de chimie et de physique*, t. XXXIII.
- BIOT. *Astronomie physique*, 1841, t. I.
- SECRETAN. *De la distance focale des systèmes convergents*. Paris, 1855.
- VAN MONCKHOVEN. *Optique photographique*.
-