

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DU DR TOULOUSE

BIBLIOTHÈQUE

DIRECTEUR

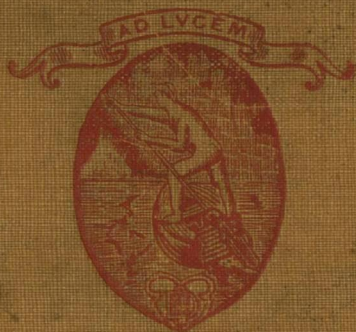
DES INDUSTRIES PHYSIQUES

H. CHAUMAT

Instrumentes optiques d'Observation et de Mesure

PAR

JULES RAIBAUD



OCTAVE DOIN & FILS. EDITEURS. PARIS

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Octave DOIN et Fils, éditeurs, 8, place de l'Odéon, Paris.

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

Publiée sous la direction du D^r TOULOUSE

BIBLIOTHÈQUE

DES INDUSTRIES PHYSIQUES

Directeur : **H. CHAUMAT**

Sous-directeur de l'École supérieure d'Électricité.

Il n'est réellement pas besoin de montrer à quel point est important le domaine des applications de la Physique dont relève presque toute l'industrie moderne.

Mais, dans cet immense domaine, il est une part considérable qui se trouve traitée dans la Bibliothèque de Mécanique appliquée, en particulier toutes les applications particulières de la Thermodynamique. La prédominance des données mécaniques dans la construction des moteurs et des machines innombrables servant au travail des métaux et des bois, aux divers modes de traction, etc., a nécessité cette division générale dans le domaine des applications de la Physique.

Aussi, à part un petit nombre de volumes, cette Bibliothèque est-elle essentiellement consacrée à la branche de

la Physique qui tend bien à devenir la plus importante dans l'industrie, à l'Électricité.

Dans cette branche, les progrès sont actuellement des plus rapides; la captation de l'énergie sous la forme électrique, particulièrement maniable, et sa distribution amèneront peut-être dans un avenir prochain des transformations économiques profondes, telles que le développement des ateliers familiaux. C'est aussi grâce aux facilités de transport de l'énergie électrique qu'ont pu être utilisées des forces naturelles pratiquement inépuisables, comme les chutes d'eau des régions montagneuses, qui alimentent en énergie des villes, souvent éloignées à des centaines de kilomètres, qui leur donnent la lumière et leur assurent l'activité. Et les circulations électriques, qui servent à la traction d'innombrables véhicules, permettant aux hommes de se déplacer avec une extrême rapidité, et qui assurent aussi entre des points quelconques de la terre un échange immédiat de pensées, se doublent maintenant du libre transport des ondes électriques qui, sans être emprisonnées dans un réseau, rendent particulièrement simples les communications télégraphiques; la téléphonie sans fil débute même déjà, et l'on conçoit la possibilité, — que des essais ont déjà démontrée, — d'alimenter d'énergie à distance des éléments mobiles, des torpilles qu'on dirigerait, des navires qu'on éclairerait.

Le rôle capital, et sans cesse croissant, de l'électricité dans la vie industrielle contemporaine exigeait donc une place particulièrement importante dans cette Encyclopédie pour les volumes consacrés à ses applications. Et l'on risque plus à cet égard de pécher par défaut que par excès. Mais il faut bien s'attendre à ce que les cadres de cette Bibliothèque s'élargissent ultérieurement au fur et à mesure des progrès nouveaux. Telles applications, que l'on ne soupçonne même pas aujourd'hui, surgiront sans doute demain, et l'on devra dès lors leur faire une place.

C'est là ce qui fait justement l'utilité de cette Encyclopédie, qui cherche à rester vivante, en s'adaptant à la vie même de la science.

Les volumes seront publiés dans le format in-18 jésus cartonné; ils formeront chacun 350 pages environ avec ou sans figures dans le texte. Le prix marqué de chacun d'eux, quel que soit le nombre de pages, est fixé à 5 francs. Chaque volume se vendra séparément.

Voir, à la fin du volume, la notice sur l'ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE, pour les conditions générales de publication.

TABLE DES VOLUMES ET LISTE DES COLLABORATEURS

*Les volumes publiés sont indiqués par un *.*

1. L'Électricité industrielle. Théories générales. 2 vol.
2. Le Ferro-Magnétisme ; applications, par JOUAUST, Ingénieur au Laboratoire central d'Électricité.
3. Les Matériaux au point de vue électrique.
4. Les Constructions électriques à courant continu. 2 vol.
5. Les Constructions électriques à courant alternatif. 2 vol.
6. Les Rhéostats.
7. Transport et distribution de l'énergie électrique. Principes généraux.
8. Les Canalisations électriques.
9. Les Tableaux de distribution et l'Appareillage électrique.
10. Les Moteurs électriques.
11. La Commande électrique des ateliers.
12. L'Électricité dans les mines.
13. La Traction électrique.
14. L'Éclairage électrique, par CAMILLE LÉONARD, Ingénieur de la Compagnie Thomson-Houston.
15. La Télégraphie et la Téléphonie.
16. La Télégraphie sans fils et les applications des oscillations électriques, par J. TISSOT, professeur à l'École navale.
17. Les Applications de l'électricité à la Guerre et à la Marine, par HENRI ROYER, Ingénieur de la Marine, professeur à l'École supérieure de la Marine.
18. Les Applications usuelles de l'électricité.

19. **L'Électro-Chimie.**
 20. **Le Four électrique.**
 21. **Les Accumulateurs électriques.**
 22. **Les Essais de réception.**
 23. **L'Usine hydro-électrique.**
 24. **La Thermodynamique appliquée.**
 25. **La Liquéfaction des gaz.**
 26. **La production industrielle du froid.**
 27. **La production industrielle des hautes températures.**
 28. **L'Éclairage.**
 29. **Le Chauffage.**
 30. **Instruments d'acoustique.**
 - *31. **Instruments optiques d'observation et de mesures**, par le Capitaine RAIBAUD, Chef du Laboratoire de Physique à la section technique de l'Artillerie.
-

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

du **D^r TOULOUSE**, Directeur de Laboratoire à l'École des Hautes-Études.

Secrétaire général : **H. PIÉRON**, Agrégé de l'Université.

BIBLIOTHÈQUE DES INDUSTRIES PHYSIQUES

Directeur : **H. CHAUMAT**

Sous-directeur de l'École supérieure d'Électricité.

INSTRUMENTS OPTIQUES

INSTRUMENTS OPTIQUES

D'OBSERVATION ET DE MESURE

PAR

JULES RAIBAUD

CAPITAINE D'ARTILLERIE

Avec 144 figures dans le texte

PARIS
OCTAVE DOÏN ET FILS, ÉDITEURS
8. PLACE DE L'ODÉON, 8

—
1910

Tous droits réservés.

INTRODUCTION

GÉNÉRALITÉS

1. **Caractère des instruments d'observation.** — Substituer à la contemplation directe des objets l'examen d'images optiques convenables, soit réelles, soit virtuelles, tel est le rôle des *instruments optiques d'observation*. Ces appareils mettent essentiellement en œuvre les propriétés réfléchissantes des surfaces polies, et les propriétés réfringentes des corps transparents.

Leur théorie est régie, à peu près exclusivement, par une loi simple, à laquelle Snellius et Descartes ont attaché leurs noms : le changement de direction d'un rayon lumineux rencontrant la surface de séparation de deux milieux réfringents s'effectue dans le plan du rayon incident et de la normale, issue du point d'incidence, à la surface séparatrice ; la direction du rayon réfracté est telle que le rapport du sinus de l'angle d'incidence i à celui de l'angle de réfraction r est une constante n , — *indice de réfraction* du second milieu par rapport au premier, — ne dépendant que de la nature des milieux, et non de la grandeur de l'angle d'incidence.

Les recherches subséquentes ont appris que cet indice relatif n était égal au rapport des indices relatifs n_2 et n_1 du

second et du premier milieu par rapport à un troisième quelconque ; et, par suite, égal au rapport de leurs *indices absolus* (ce qualificatif s'appliquant lorsque le troisième milieu, dont le choix reste toujours libre, est le vide). L'indice n est aussi égal au rapport des vitesses de propagation des ondes lumineuses dans le milieu d'incidence et celui de réfraction, ou au rapport des longueurs d'ondes, dans les mêmes substances, de la radiation lumineuse en jeu.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

2. Classification des instruments d'observation.

— Toute classification, étant plus ou moins artificielle, reste incomplète et se trouve généralement peu satisfaisante ; sa nécessité s'impose cependant dans un exposé didactique. Sous le bénéfice de cette double remarque, nous répartirons dans les trois catégories ci-après les instruments dont nous nous occuperons.

En premier lieu, les instruments destinés à l'observation des objets éloignés ; ils sont représentés par les longues-vues, lunettes d'approche terrestres, lunettes astronomiques, télescopes catoptriques. Ils pourraient être rangés sous le nom générique de *télescopes* (ainsi qu'on le faisait jadis), si celui-ci n'était pas actuellement à peu près réservé aux instruments astronomiques à miroirs courbes. Une subdivision spéciale renfermera, sous le nom de *jumelles*, les appareils utilisant la vision binoculaire.

Le seconde catégorie comprendra les *microscopes*, en étendant cette désignation aux loupes simples ou composées (dites parfois microscopes simples). Les instruments de cette nature sont utilisés pour l'examen des objets rapprochés.

Les différentes variétés de l'*objectif photographique* constitueront le troisième groupe. Cet organe, le photo-objectif, d'applications si variées, peut, logiquement, être considéré

comme un véritable instrument d'observation. Tandis que les appareils des deux premières catégories soumettent, en définitive, à l'examen visuel une image optique virtuelle, l'objectif photographique donne une image réelle, qui peut être observée directement ou non ; malgré cette différence, on pourrait, suivant les circonstances, faire rentrer le photo-objectif dans l'un ou l'autre des deux groupes précédents, si son rôle habituel n'était pas de permettre la réalisation, la matérialisation de l'image produite. Grâce à la plaque sensible, l'objectif devient un merveilleux instrument d'observation, offrant sur les autres, — à côté, il est vrai, de certains inconvénients, — l'avantage indiscutable de conserver une trace fidèle de l'objet examiné. D'ailleurs l'emploi de la plaque photographique exige, pour le photo-objectif, des propriétés spéciales qui justifient sa séparation d'avec les instruments énumérés plus haut.

3. Constitution générale des instruments d'observation. — Les éléments optiques utilisés sont des surfaces réfléchissantes et des masses réfringentes.

Ces dernières sont constituées par des corps transparents, perméables à la lumière, dont les deux surfaces utiles, dites encore efficaces ou actives, sont polies et de formes régulières. Lorsque ces surfaces, — ou au moins l'une d'elles, l'autre pouvant être plane, — sont sphériques, l'élément réfringent porte le nom de *lentille*, et comporte six variétés principales bien connues ; si elles sont planes et inclinées l'une sur l'autre, on sait que l'élément est désigné sous le nom de *prisme* ; enfin, deux faces planes et parallèles limitent une *glace* ou *lame*.

On a utilisé encore, quoique exceptionnellement, des lentilles dont les faces étaient des sphères légèrement et systématiquement déformées ; chaque surface reste de révolution autour de l'axe de l'élément, et sa méridienne est une parabole, de degré plus ou moins élevé, osculatrice au cercle générateur de la sphère, en son sommet. Quant aux

lentilles à surfaces elliptique, hyperbolique, etc., on ne peut considérer que comme des curiosités sans grand intérêt les rares instruments dans lesquels elles ont été employées.

Les surfaces non actives des éléments réfringents, généralement surfaces d'appui brutes, ou mieux dépolies, sont des cylindres concentriques à l'axe, dans les lentilles; dans les prismes et dans les glaces, elles sont symétriques par rapport aux faces d'entrée et de sortie, à moins que la constitution spéciale de l'appareil ne leur impose une autre orientation.

Les matières — homogènes, et, autant que possible, isotropes — utilisées dans ces éléments réfringents sont, dans la majorité des cas, les produits artificiels si variés désignés sous le nom de *verres d'optique* : crown, flint, glace, cristal, etc. Certaines substances naturelles, biréfringentes, — cristal de roche, quartz, spath d'Islande, — ont été mises à contribution, mais plus spécialement dans les appareils de mesure. Quant aux liquides, adjuvants précieux dans certaines circonstances (observations au microscope, par exemple), ils n'ont pas, jusqu'ici, répondu aux espoirs qu'on avait fondés sur eux.

Signalons encore, comme matières réfringentes, les résines, — baume de Canada, térébenthène, — employées en quantités presque infinitésimales dans la liaison des substances réfringentes solides.

Les surfaces réfléchissantes des instruments optiques sont plus spécialement métalliques : elles sont constituées soit par la surface polie d'une masse en alliage spécial, soit par une mince couche d'argent brunie et polie, déposée sur une forme convenable en verre. Ces surfaces portent le nom bien connu de *miroirs*, avec les qualificatifs particuliers de plan, convexe, concave, sphérique, parabolique, etc.

On emploie aussi comme surfaces réfléchissantes, surtout

quand il s'agit de plans de faibles dimensions, la surface de séparation d'une masse réfringente et de l'air, soit en utilisant le phénomène de la réflexion totale, soit en se contentant parfois de celui de la réflexion partielle. Les surfaces de réflexion font partie de *prismes en verre*, ou même de polyèdres comprenant au moins, en dehors de la surface réfléchissante, deux faces polies, une d'entrée, une de sortie, que les rayons attaquent le plus normalement possible.

4. — Le seul caractère à peu près général que présentent les instruments optiques, relativement à la disposition de leurs éléments réfléchissants et réfringents, est que l'ensemble de ces derniers constitue, dans chaque appareil, un système centré. Les centres des surfaces actives des lentilles, ceux des miroirs, sont situés sur une même droite, dite *axe du système* ou de l'instrument. Sur ce dernier axe sont appliqués aussi ceux des surfaces de révolution non sphériques.

L'axe du système n'est généralement brisé que par les réflexions qui se produisent sur les éléments plans; l'instrument comprend alors plusieurs systèmes centrés sur des axes différents. Mais, en faisant l'abstraction légitime des réflexions planes, le système composé redevient unique.

Quant aux déviations et aux dédoublements d'axe produits par des lames ou des prismes réfringents, ils constituent des cas d'espèce. Il est nécessaire, par l'examen de l'instrument, de voir s'il est possible de considérer ce dernier comme un système centré unique (après suppression fictive des éléments déviateurs), ou s'il est indispensable de l'envisager comme un composé de systèmes centrés.

Les divers éléments optiques d'un instrument sont en général portés par une monture, plus ou moins rigide, qui forme le corps de l'appareil. C'est à cette monture que sont fixés les seuls organes mécaniques communs à tous les ins-

truments : les *diaphragmes*, lames opaques, minces, percées d'une ouverture généralement circulaire, centrée sur l'axe et dans un plan perpendiculaire à celui-ci. Ils comportent trois variétés : les *diaphragmes de limitation*, qui règlent l'amplitude des faisceaux traversant l'instrument, formant écran pour les rayons jugés nuisibles ; les *diaphragmes de champ* qui arrêtent les faisceaux provenant de points objets dont la vision à travers l'instrument serait imparfaite ; les *diaphragmes de clarté*, s'opposant à la propagation de faisceaux qui, issus d'objets non soumis à l'examen, altéreraient les qualités de l'image observée.

Les montures des verres peuvent remplir le rôle de diaphragme de limitation.

En principe, il n'y a qu'un seul diaphragme de limitation et un seul de champ efficaces. Quand il en existe plusieurs remplissant le même rôle, ils doivent se correspondre : chacun d'eux agissant, réellement ou virtuellement, sur les parties homologues du faisceau.

5. Instruments de mesure. — On transforme un appareil optique d'observation en instrument de mesure en lui adaptant les organes mécaniques ou optiques qui permettent d'utiliser les propriétés métriques des images ou les conséquences optiques de la déformation géométrique de l'appareil primitif.

Pour satisfaire aux conditions requises, la modification en question exige parfois la combinaison en un seul appareil d'instruments de même espèce ou de variétés différentes ; dans d'autres cas, elle réduit l'instrument au rôle d'un appareil plus complexe. Mais, dans la sphère des transformations pratiques, un fait paraît dominer : la modification en instrument de mesure ne s'opère, dans les meilleurs conditions possibles, qu'au détriment de quelques-unes des qualités de l'appareil, en tant qu'appareil d'observation.

5. Classification des instruments de mesure. — Le rayon lumineux, — ou, mieux, le faisceau infiniment

délié, le *pinceau*, — constitue la réalisation la plus parfaite de la notion géométrique de direction ; deux directions déterminent un angle ; si l'on joint à la mesure des angles la connaissance d'une longueur, — d'une base, — on aura tous les éléments pour évaluer les distances.

Ces remarques nous serviront de guide pour établir une classification des instruments de mesure ; répartition qui sera quelque peu factice, mais qui semble acceptable, à condition de ne pas s'astreindre à des divisions trop tranchées.

Sous cette réserve, nous distinguerons :

Les instruments, — généralement simples organes d'appareils complexes, — dont le seul but est de réaliser optiquement une ligne droite ; ils seront rangés sous la rubrique de *viseurs* ;

Ceux dont le rôle essentiel consiste dans la mesure des écarts angulaires, et qu'on peut dénommer *goniomètres*.

Parmi les appareils spécialement organisés pour la mesure des distances, nous classerons séparément : d'abord, ceux pour lesquels la base est en dehors de l'instrument, et généralement voisine de l'objet ; — ces instruments, qu'on pourrait appeler *stadimétriques*, se distinguent souvent à peine de ceux signalés dans la catégorie précédente ;

Ensuite, les appareils qui contiennent la base linéaire ; ce sont les instruments à parallaxe, que nous engloberons sous la dénomination de *télé mètres*.

Dans une catégorie spéciale, tant en raison de leur emploi que de leur organisation optique, nous rangerons les instruments qui utilisent le principe si fécond de l'*autocollimation*.

7. Instruments de mesure utilisant les phénomènes de l'optique physique. — La classification qui précède est loin de comprendre toute la série des instruments de mesure ; elle ne renferme que ceux qui relèvent le plus directement de l'optique géométrique, de la loi de

Descartes. D'autres appareils mettent à contribution les phénomènes si variés et si délicats de l'optique physique. Le défaut d'espace nous oblige à les passer sous silence.

HISTORIQUE SOMMAIRE

8. — On peut, à la rigueur, faire remonter jusqu'aux dernières années du XIII^e siècle, époque de l'invention des *besicles*, l'origine des instruments d'optique. Mais il faudra laisser s'écouler encore trois cents ans avant de rencontrer, hors la loupe, un appareil optique digne de ce nom.

Les découvertes se succèdent alors rapidement. Le XVII^e siècle voit surgir, dans une forme primitive, il est vrai, toute la variété des télescopes et des microscopes ; le XVIII^e siècle les perfectionnera, dès surtout que la découverte de l'achromatisme aura ouvert une voie nouvelle. Une autre poussée se produira dans le courant du siècle suivant, amenée par l'étude des problèmes que soulève la photographie, et aidée par le développement intense des arts mécaniques.

9. **L'optique chez les Anciens, et avant le XIV^e siècle.** — Excellents géomètres, remarquables observateurs, les anciens Grecs ne furent, autant qu'on en peut juger par ce qui nous reste d'eux, que de médiocres ou dédaigneux expérimentateurs. Ils ne paraissent avoir connu aucun instrument optique (70) ; sinon ils l'auraient utilisé dans leurs observations astronomiques, et transmis ensuite aux Arabes. Quant à leurs connaissances relativement aux phénomènes lumineux, elles sont toujours rudimentaires ou vagues, souvent inexactes. L'optique d'un certain Euclide, — pas le géomètre, — n'infirmes pas cette opinion ; ce ne pourrait être que le traité attribué à Archimède, s'il n'était entièrement perdu, — à condition toutefois qu'il eût été composé par ce grand homme.

Les connaissances optiques des anciens proviennent de l'observation, quand elles ne consistent pas en idées géométriques préconçues. La véritable cause des éclipses (conséquence de la propagation rectiligne de la lumière), l'origine de la clarté de la Lune sont connues de Pythagore (— 580). Platon et son école (— 350 environ) sont en possession de la loi d'égalité des angles d'incidence et de réflexion, vérité probablement découverte par la seule géométrie (loi du trajet minimum, que reprendront plus tard Descartes et Fermat). L'idée de la réfraction, — réfraction astronomique, — apparaît dans Posidonios, se précise chez son disciple Cléomède, qui la rapproche de la réfraction dans l'eau, pour expliquer la différence des grandeurs apparentes d'un astre à différentes élévations sur l'horizon. Plutarque, Ptolémée (fin du 1^{er} siècle) signalent nettement le phénomène de la réfraction de la lumière passant de l'air dans l'eau.

Les Romains, d'esprit bien moins scientifique que les Grecs, ne semblent avoir possédé aucune notion d'optique : un curieux des choses naturelles, Sénèque¹, signale cependant l'effet grossissant d'une boule de verre remplie d'eau, et les couleurs de l'iris produites par une baguette de verre prismatique ; un compilateur, Pline², rapporte que Néron regardait à travers une émeraude concave les combats de gladiateurs. Il est toutefois difficile de trouver dans ces remarques la trace de la loupe, ou des besicles.

Pendant la plus grande partie du moyen âge, l'optique n'effectue aucun progrès. Les savants arabes Al-Hazen, Alfa-Rabius, Ibn-Heitem composent leurs livres des vestiges de l'antiquité. Vitellion copie Al-Hazen, et ébauche la théorie de l'arc-en-ciel et des parhélies. La plupart essayent, infructueusement, d'établir la loi de la réfraction.

10. **L'invention des besicles.** — Jusqu'ici tout

¹ SÉNÈQUE, *Questions naturelles*, livre I.

² PLINE, livre XXXVII.

phénomène optique provient de l'observation. Le fait paraît tenir à ce que, si le verre était connu depuis une haute antiquité, son travail était rudimentaire; le coulage et le soufflage de la matière vitreuse suffisaient à toutes les exigences. Le désir d'obtenir des glaces parfaitement polies incita probablement les Vénitiens à employer pour le polissage du verre la méthode d'usure lente utilisée dans le travail des pierres précieuses. L'opération du polissage réalisée, l'obtention de surfaces sphériques n'offrait aucune difficulté sérieuse.

La première application des lentilles polies s'adressa à l'amélioration des vues fatiguées. L'histoire ne peut, avec sûreté, associer le nom d'un inventeur à celui des besicles ou lunettes; elle hésite entre le seigneur Salvino Armato degli Armati (de Florence), le Frère Alexandre de Spina (des Frères Prêcheurs de Pise); mais l'époque de l'apparition des lunettes peut, sans crainte d'erreur, être fixée au dernier quart du XIII^e siècle (64).

11. **Du XIII^e au XVII^e siècles.** — La *loupe simple* est contemporaine des besicles; peut-être aussi la loupe composée de deux verres à faible intervalle. D'ailleurs Al-Hazen avait fait, au sujet d'un segment de verre coulé, une remarque analogue à celle formulée par Sénèque sur la boule pleine d'eau; il avait même ajouté que le verre était d'autant plus grossissant qu'il approchait davantage de la sphère entière.

La loupe reste à peu près le seul instrument optique jusqu'au commencement du XVII^e siècle. Dans l'intervalle, quelques notions se précisent. Maurolyc assimile le cristallin à une lentille, mais n'arrive pas jusqu'à la conception des images rétiniennes. Porta découvre la chambre noire en disposant une lentille convexe dans l'ouverture de la chambre obscure; mais, quoique médecin et anatomiste, il ne se résout pas à assimiler l'œil à sa chambre noire.

12. **L'invention du télescope et du microscope.**

— Un heureux hasard, — un amusement d'enfants, suivant une légende qui est peut-être de l'histoire, — fait découvrir, au commencement du xvii^e siècle, la combinaison qui constitue la première *lunette* d'approche : objectif convexe, oculaire concave. L'origine de l'instrument est hollandaise ; sa paternité est moins certaine : elle se répartit sur Zacharie Jans, Jean Lapprey, lunettiers à Middelbourg, et Jacques Metius. Sur la simple annonce de sa découverte, Galilée la réalise (1609) à Venise, construit une lunette grossissant trente-trois fois et commence à publier son *Sidereus Nuntius*.

La même époque voit naître le *microscope* ; les progrès du verre, permettant d'obtenir des lentilles de court foyer, en rendent la construction possible. On l'attribue, avec des motifs également plausibles, tantôt à Zacharie Jans, tantôt à Corneille Drebbel.

La *lunette astronomique* suit, à peu d'intervalle, les instruments précédents ; on peut, à elle, donner avec certitude, un père illustre : Kepler ; elle présente, de plus, ce caractère historique important qu'elle constitue le premier système optique théoriquement conçu avant d'être réalisé. Kepler, dans son *Traité d'Astronomie*, aborde l'Optique ; il étudie l'œil, qu'il assimile très justement à la chambre noire de Porta, reconnaît les rôles de la cornée, du cristallin et des humeurs, constate le renversement des images rétiniennees. Il explique les propriétés des besicles, décrit le télescope à deux verres convexes et en expose les effets.

Kepler laissa à un de ses disciples, le Père Scheiner, le soin de réaliser l'instrument conçu ; peut-être même lui indiqua-t-il aussi le *télescope redresseur à trois verres*, la première lunette terrestre à verres convexes, qui fut également exécuté. Les inconvénients de ce dernier appareil (sa grande longueur, la déformation des images, leurs irisations) furent atténués par le Père de Rheita, qui imagina de remplacer la lentille centrale par le *système véhiculaire* de deux lentilles.

Au même savant on attribue l'idée d'avoir associé deux lunettes pour la vision binoculaire. Mais un fabricant français l'avait précédé dans cette voie (44).

13. **La loi de Snellius-Descartes.** — La loi exacte de la réfraction avait échappé à Kepler, comme à Al-Hazen. Le célèbre astronome lui avait substitué la règle de proportionnalité entre les angles d'incidence et de réfraction : elle suffisait pour l'explication qualitative et, dans une certaine mesure, quantitative des phénomènes. Une loi rigoureuse était pourtant indispensable pour pouvoir transformer, en lui appliquant la méthode géométrique, l'art de l'opticien science. Kepler aurait pu connaître la loi, car elle était enseignée publiquement à Leyde, par un de ses contemporains, Wilbrod Snellius. Descartes en modifia l'énoncé, montra qu'elle découlait du principe du chemin minimum, la publia et l'utilisa dans la recherche des surfaces aplanétiques. La postérité a rendu justice au grand philosophe en attribuant son nom à la loi des sinus.

14. **L'optique au XVII^e siècle.** — L'aurore du xvii^e siècle avait vu naître l'optique scientifique et prendre corps l'optique appliquée. Dès lors, grâce au concours des recherches théoriques, des observations, des expériences, l'optique entière progressera rapidement. C'est l'époque où l'arc-en-ciel trouve son explication à peu près définitive, avec Descartes et Huygens ; où Gassendi énonce, sans trop de preuves toutefois, l'affaiblissement de l'intensité lumineuse en raison du carré de la distance, et où il attribue aux réfractions les couleurs de l'iris ; où Grimaldi découvre les phénomènes de *diffraction*, et Bartholin ceux de la double réfraction du spath, étudiés peu après par Huygens, qui, d'autre part, frappé des analogies entre les sensations lumineuses et sonores, suggère l'idée géniale des ondulations.

Au point de vue des instruments proprement dits, signalons, à côté de perfectionnements secondaires auxquels con-

courent Huygens, Hévelius, Hooke, l'invention du *télescope catoptrique* ou à miroir par Mersenne, qui laissera la gloire de le réaliser à Jacques Gregory, et celle de le perfectionner à Newton; celle du micromètre, à laquelle coopèrent Huygens, Malvasia, Auzout et Picard; celle de la lanterne magique, due au Père Kircher.

15. **La découverte de l'achromatisme.** — Grâce à la loi de Descartes et au fonds d'idées légué par leurs devanciers, la conception d'un instrument optique devant satisfaire à des exigences données n'était qu'un jeu pour les subtils géomètres qu'étaient les savants du XVIII^e siècle. On en rencontre la preuve évidente dans les ouvrages de l'époque. Mais la réalisation des combinaisons projetées se heurtait invariablement à une difficulté qui paraissait insurmontable : les *images produites manquaient de netteté*. La cause tenait principalement aux irisations qui les bordaient.

Les astronomes, qui côtoient seulement les contingences terrestres, avaient tourné la difficulté en augmentant démesurément la longueur de leurs lunettes; la solution ne pouvait être généralisée. Une expérience de Newton, mal conduite par excès de précaution, avait fait croire à la *proportionnalité de la déviation et de la dispersion des rayons non monochromatiques*; la disparition des couleurs irisées paraissait, dès lors, aussi impossible que la quadrature du cercle. Et cette conséquence imposait presque la substitution des surfaces réfléchissantes aux masses réfringentes : solution médiocre à divers égards.

La conclusion que Newton avait cru pouvoir tirer de son expérience était heureusement inexacte. Des doutes furent émis par Euler, qui remarqua que l'œil humain, constitué uniquement par des corps réfringents, s'il n'était pas absolument achromatique, jouissait d'un achromatisme enviable pour bien des instruments. Les tentatives d'Euler pour constituer des objectifs. — c'était un point capital, — sur le

modèle de l'œil ne furent pas couronnées de succès ; mais l'idée était juste et féconde. Un opticien français établi en Angleterre, Dollond, l'utilisa et parvint à réaliser, en employant deux espèces de verres, les premiers objectifs achromatiques.

La difficulté physique était levée ; la prévision des propriétés d'un système optique devenait du ressort de la géométrie ; les profonds géomètres du xviii^e siècle ne faillirent point à leur tâche : Clairaut, d'Alembert, Euler, plus tard Lagrange et Biot, suivis de savants d'ordre moindre, apporteront un concours précieux, inestimable, à l'étude des éléments optiques. C'est l'époque héroïque de l'optique instrumentale théorique. Les savants qui édifièrent la merveilleuse analyse infinitésimale ne crurent pas déroger en s'astreignant, à propos de lunettes, à des calculs élémentaires, fastidieux, prolixes et ingrats.

16. **L'invention de la photographie.** — Les recherches des géomètres, l'habileté des constructeurs avaient permis de tirer tous les fruits de la découverte de l'achromatisme. L'invention de la photographie suscita d'autres problèmes à résoudre, et, par contre-coup, força l'attention des opticiens à se reporter sur les instruments qu'ils avaient jugés parfaits.

L'étape fut d'ailleurs longue et laborieuse. Les premières conclusions théoriques se heurtèrent à une difficulté matérielle : les verres, en nombre fort limité, dont disposaient les constructeurs ne possédaient pas les propriétés préconisées par le calcul. Les systèmes optiques réclamés par la pratique ne furent malgré l'ingéniosité des opticiens, malgré leurs nombreuses tentatives expérimentales, obtenus d'abord qu'imparfaitement.

Pour réaliser les combinaisons suggérées par la théorie, il était indispensable de mettre à la disposition des opticiens des verres ayant des propriétés autres que celles des crowns et des flints employés jusque-là. Un maître verrier français,

Guinand, avait, dès 1840, produit des variétés acceptables de matières convenables, mais dans des conditions onéreuses telles, que l'on avait dû s'arrêter devant la question économique. Le problème fut repris vers 1880, en Allemagne; et, quelques années plus tard, les *verres d'Iéna*, — suivis d'ailleurs bientôt par des verres français au moins équivalents, — faisaient leur apparition sur le marché. Il devenait dès lors possible de mettre à l'épreuve les théories élaborées par divers savants, parmi lesquels on peut regretter de ne pas rencontrer les successeurs qualifiés des grands géomètres du xviii^e siècle.

Ajoutons d'ailleurs que les perfectionnements apportés au travail du verre et au travail mécanique ont permis la réalisation de combinaisons jadis réputées inexécutables, en raison du degré de précision qu'elles exigeaient.

DIVISIONS DE L'OUVRAGE

17. — Les instruments d'observation présentent un certain nombre de propriétés générales qui tiennent principalement au mode de *formation des images* optiques. L'étude de ces caractères fera l'objet de la première partie de l'ouvrage. Quelques lignes seront consacrées aux instruments de mesure.

Dans la seconde partie, on exposera l'*organisation* et le *mode d'emploi* des instruments, tant de mesure que d'observation. La matière sera traitée en suivant l'ordre indiqué plus haut (2).

Le cadre limité de ce volume ne nous a pas permis d'aborder les questions relatives au *calcul*, à la *construction* et à l'*examen* des instruments. On trouvera cependant, dans l'index bibliographique, un certain nombre de documents qui s'y rapportent.

18. — Dans l'exposé qui va suivre, nous supposons con-

nus les faits et les théories de l'Optique géométrique, les phénomènes essentiels de l'Optique physique. Les notions et propositions nécessaires seront, s'il y a lieu, énoncées en temps utile; les formules, rappelées à l'occasion sans démonstrations, — le cas échéant, le mode de ces dernières pourra être indiqué.

Des instruments qui peuvent être rangés dans la partie optique de la Physique générale, nous avons exclu ceux plus spécialement consacrés aux mesures optiques proprement dites; tels sont les photomètres, spectroscopes et spectromètres, polariscope et polarimètres, réfractomètres, etc. Ces appareils entrent parfois en jeu dans l'examen des instruments que nous considérons plus spécialement; des indications pourront être données sur eux, s'il est nécessaire; mais leur étude détaillée aurait étendu démesurément le cadre de cet ouvrage.

INSTRUMENTS OPTIQUES

D'OBSERVATION ET DE MESURE

PREMIÈRE PARTIE

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES INSTRUMENTS

CHAPITRE I

DES QUALITÉS OPTIQUES DES INSTRUMENTS.

19. Les qualités qu'on doit rechercher, avant tout, dans les instruments d'observation se rapportent à la *netteté* des images, à leur *clarté*, au *champ* de l'instrument et à la *fidélité d'aspect* des images.

Nous allons définir et préciser ces notions. Leur étude détaillée fera l'objet de chapitres ultérieurs.

20. **Netteté des images ; puissance des instruments.** — *Puissance* d'un instrument optique et *netteté* de l'image produite sont des notions identiques

qui ne diffèrent, dans leur expression, qu'en raison du point de vue adopté : appréciation du rôle de l'appareil, examen de la finesse de l'image.

Une longue-vue est plus puissante qu'une autre si elle laisse distinguer des détails que la seconde ne peut discerner ; par exemple, si elle permet à un observateur d'assurer qu'un individu tient les doigts d'une main ouverts, tandis que le second appareil laisserait la question indécise. De deux microscopes, le premier est le plus puissant s'il laisse compter les stries de l'*Amphipleura pellucida*, lorsque le second ne montre qu'une nappe moutonnée. Les photographes apprécient la puissance de leurs objectifs, — leur *finesse*, disent les uns ; leur bonté, prétendent les autres, — d'après le degré de flou qui réunit les détails plus ou moins entrevus d'un paysage.

Quel que soit l'instrument, sa puissance est d'autant plus grande qu'est plus faible sur l'objet considéré l'intervalle minimum existant entre deux détails séparés sur l'image soumise à l'examen. La puissance de l'instrument, corrélative de la netteté des images, devient mesurable par son *pouvoir séparateur* ; — d'aucuns disent encore son *pouvoir pénétrant ou résolutif*.

Cette faculté séparatrice prend une forme simple dans les observations astronomiques. Les distances angulaires des étoiles, — qu'il s'agisse de constellations ou d'étoiles doubles, — sont assez variées pour permettre de différencier deux lunettes ou deux télescopes de puissances presque égales : l'un des instruments montrera deux étoiles, lorsque l'autre n'en laissera voir qu'une. L'intérêt du fait tient ici à ce que les détails

sur lesquels peut se baser l'évaluation du pouvoir séparateur se présentent sous la forme la plus simple : celle de points lumineux, les plus parfaits peut-être des points réalisables.

La puissance d'un instrument peut donc se déduire, — exception faite des difficultés expérimentales, — de l'intervalle minimum, angulaire ou linéaire suivant le cas, qui sépare deux points lumineux dont les images définitives ne sont pas confondues. Pour les instruments destinés à la vision éloignée (lunettes, objectifs à paysages), le pouvoir séparateur s'évaluera en écarts angulaires (secondes sexagésimales, centigrades ou tangentes trigonométriques de ces angles) ; la puissance, qui doit logiquement être caractérisée par un nombre d'autant plus grand qu'elle est plus considérable, se mesurera par l'inverse de la tangente définissant le pouvoir séparateur. Ainsi une lunette séparant la seconde aura une puissance de 200 000. Pour les objectifs destinés aux reproductions, la même règle peut être admise ; mais il doit être sous-entendu que la distance de l'objet est donnée, ou remplacée par la focale de l'objectif et le coefficient de réduction. Quant aux microscopes, il est d'usage d'évaluer à la fois le pouvoir séparateur et la puissance par le nombre maximum de lignes parallèles très fines, de stries, qui peuvent être discernées dans un intervalle de 1 millimètre.

21. **Clarté des instruments.** — Toutes les personnes qui se servent couramment de longues-vues n'ignorent pas que tel instrument, parfait en plein jour, devient presque inutilisable au crépuscule ou dès que la brume envahit l'atmosphère ; les images s'estompent et s'affaiblissent ; dans les mêmes conditions, une lunette

de Galilée, de qualité moindre, permet encore d'apprécier des détails ou de distinguer des objets dont la première laisse les formes indéterminées. La luminosité des objectifs photographiques s'évalue assez exactement par le temps de pose qui, dans des circonstances identiques, donne aux clichés le même degré de vigueur. Les micrographes ont soin d'augmenter l'intensité de leur éclairage à mesure qu'ils élèvent les numéros de leurs objectifs.

La clarté des instruments, quelle que soit son origine, paraît être en liaison étroite avec celle des images produites, c'est-à-dire avec leur éclairage superficiel; comme, d'ailleurs, ce dernier est nécessairement variable avec la clarté absolue de l'objet, il convient d'évaluer la clarté d'un instrument par le rapport des éclairages superficiels spécifiques de l'image et de l'objet, éclairages supposés uniformes. Bien que ce rapport, *clarté propre* de l'instrument, ne caractérise pas toujours entièrement à lui seul le degré de visibilité d'un objet. — on en verra plus loin les causes, — sa considération est capitale dans la question actuelle. Les procédés photométriques habituels peuvent, avec les variantes convenables, être utilisés; il paraît difficile de choisir une unité pour mesurer la qualité dont il s'agit.

22. **Champ d'un instrument.** — Un instrument optique, — de position et si ses éléments sont mobiles, de configuration données. — ne permet de voir nettement que les objets situés dans une certaine région de l'espace. Cette région constitue le champ de l'instrument, — le *champ réel*, précise-t-on habituellement.

Ce champ est un solide, au sens géométrique du mot. La qualité que possèdent les instruments d'être en général des systèmes optiques centrés, et par suite de posséder un axe de révolution, impose à l'une des surfaces limites du champ d'être un cône de révolution autour de cet axe. C'est ce cône qui circonscrit le *champ angulaire* de l'appareil.

Mais, des objets situés dans le champ angulaire, seuls donnent des images nettes ceux qui sont compris entre deux autres surfaces, également de révolution autour de l'axe du système, et dont la forme est plus ou moins voisine d'un plan ou d'une sphère. Elles limitent le *champ en profondeur* de l'instrument.

Le champ réel, total, doit donc être défini au moins par deux nombres. L'un caractérisera le champ angulaire : ce sera l'angle au sommet du cône, évalué soit en unités d'angle (degrés, grades et leurs fractions), soit par sa tangente trigonométrique, — surtout pour un champ ne dépassant pas 6° , — mise souvent sous la forme de la longueur en mètres du diamètre, à 1000 mètres de la section droite du cône. Cela s'applique aux instruments spéciaux pour l'observation à grande distance. Pour les objectifs photographiques, il est d'usage d'indiquer le champ par la désignation du format usuel de la plaque couverte, dans les conditions d'emploi de l'objectif ; cette donnée, jointe à la valeur de la focale de l'organe, suffit pour la détermination du cône limite. Quant au microscope, c'est en spécifiant l'étendue linéaire maximum nettement visible d'un objet qu'on en évalue le champ : le millimètre est, dans ce cas, une unité en général convenable.

La seconde caractéristique se rapporte au champ en

profondeur. Il suffit, dans la majorité des cas, qu'elle détermine les positions des points où les deux surfaces terminales rencontrent l'axe de l'instrument. La distance de ces points est la profondeur du champ. L'unité peut, suivant la diversité des conditions, être le kilomètre, le mètre, le centimètre; pour les microscopes, il faut des fractions, généralement faibles, du millimètre.

Les valeurs des éléments qui mesurent le champ n'offrent d'ailleurs de garanties qu'autant qu'on a défini la netteté et la clarté exigées pour les images : car tout se tient en optique. L'organisation mécanique d'un instrument, — l'emplacement et l'ouverture des diaphragmes, par exemple, — peut attribuer un champ angulaire considérable à un instrument; mais si, vers les bords du champ, les images sont brouillées ou leur clarté insuffisante, il convient de réduire impitoyablement les valeurs indiquées. Les données relatives aux objectifs photographiques que l'on rencontre dans les prix-courants sont trop souvent dans ce cas.

23. Fidélité d'aspect des images. — L'image est une représentation fidèle de l'objet lorsqu'elle en conserve les colorations et la forme géométrique.

La première condition intéresse à un très haut degré la netteté des images; en la supposant réalisée, la question géométrique reste seule à examiner.

A ce point de vue, dans les instruments monoculaires, — les autres ne peuvent actuellement être envisagés, — la fidélité d'aspect exige que l'image puisse être considérée comme une perspective conique de l'objet. Cette condition comporte comme corollaire la

similitude géométrique entre l'image et l'objet situé dans un plan normal à l'axe de l'instrument, le rapport de similitude pouvant d'ailleurs varier avec la position du plan objet. L'instrument est dit alors, suivant la terminologie allemande, *orthoscopique* ; dans le cas contraire, les images sont déformées ; on exprime ce fait en disant, — terme d'origine anglaise, — qu'elles présentent de la *distorsion*. Un carré centré sur l'axe se transforme en quadrilatère curviligne dont les côtés se courbent vers l'axe ou dans la direction opposée ; un système de circonférences équidistantes, situées dans un même plan et dont le centre commun est sur l'axe, donne, comme images, des circonférences également centrées sur l'axe, mais pour lesquelles le caractère d'équidistance n'est pas conservé. Le rapport entre les grandeurs, linéaires ou angulaires, des rayons correspondants de l'image et de l'objet, peut servir à évaluer, dans chaque région du champ, le degré de distorsion présenté par l'instrument ; le rapport en question n'est constant que si l'appareil est orthoscopique.

24. Du grossissement dans les instruments.

— Dans l'énumération des qualités essentielles d'un instrument d'observation, nous n'avons pas mentionné son *grossissement* ; c'est pourtant cette dernière caractéristique qui est, souvent, la première énoncée dès qu'il s'agit d'une longue-vue ou d'un microscope. L'opinion commune est qu'un instrument est d'autant plus remarquable que son grossissement est plus élevé. C'était aussi, mais avec une restriction qui la réduit à sa juste valeur, l'opinion d'Euler (24, lettre 88). « Plus une lunette grossit les objets, plus elle est sans doute parfaite, pourvu qu'aucune des autres bonnes qualités

n'y manque. » Malheureusement ce n'est, trop souvent, qu'au détriment des autres propriétés de l'instrument, — qualités optiques, mécaniques, économiques, — qu'on en accroît le grossissement : la perte est certaine, le bénéfice illusoire.

Il est aisé de donner à une excellente longue-vue un grossissement supérieur à celui qu'elle possède : il suffit de la munir d'un autre oculaire, *plus fort*, suivant le terme admis. Les images sont amplifiées; l'intervalle qui séparait deux détails de l'image s'élargit; mais il est exceptionnel que des détails nouveaux deviennent perceptibles; la puissance maximum de l'instrument ne subit aucune variation. En retour, la clarté s'abaisse nécessairement, et souvent le champ se rétrécit.

On sait aussi que cette diminution du champ est corrélatrice de l'accroissement du grossissement obtenu, dans les microscopes, par le changement de l'objectif; mais, si la puissance est ici généralement augmentée, la réduction du champ peut être telle que l'observation perd toute valeur : les arbres empêchent de voir la forêt.

L'emploi de forts grossissements n'a en lui-même d'utilité que dans des cas exceptionnels, plus rares dans les instruments d'observation que dans ceux de mesure. Pour ces derniers, on peut citer l'exemple de la lunette méridienne. Dans les autres, un fort oculaire peut arriver à faire discerner deux détails ténus mal séparés par l'objectif, en affaiblissant suffisamment la zone commune à leurs taches centrales; en dehors de ce cas, le rôle du grossissement paraît se réduire à donner aux images un aspect plus agréable pour certains

observateurs ; mais ce caractère ne peut prétendre à être précisé.

Toutefois, dans les appareils bien conçus, et dans des conditions d'emploi bien déterminées, la connaissance du grossissement, notion vulgaire et de facile compréhension, peut remplacer assez exactement celle, plus scientifique et plus délicate, de puissance. A ce titre, il est utile d'en faire mention dans la description d'un instrument.

25. Importance relative des qualités d'un instrument d'observation. — La question, journalièrement posée, est, dans sa généralité, insoluble. Chaque cas particulier doit être envisagé, et la réponse n'est pas du ressort exclusif de l'Optique.

A priori, il semble que la puissance d'un instrument constitue sa qualité primordiale. « La netteté dans l'expression, — dit Euler (24, lettre 81), qu'on peut toujours citer en pareille matière, — est un article si important entre les qualités d'une lunette, qu'il semble l'emporter sur tous les autres..., puisque tout le monde convient qu'une lunette qui ne représente pas nettement les images des objets est fort défectueuse. » L'opinion est, en effet, unanime ; les divergences ne s'accusent qu'au moment de déterminer le degré de netteté convenable. Tel instrument très puissant peut n'être qu'un médiocre outil, si la netteté des images n'a été obtenue qu'en donnant au champ une amplitude trop faible.

En général, ce sont les conditions normales d'emploi de l'instrument qui fourniront la base d'appréciation des qualités exigibles. Pour un type donné, les qualités seront, dans des degrés limités, l'une indispensable

à réaliser, l'autre utile; quant aux dernières, il sera avantageux de les obtenir, autant que le permettront et les conditions pratiques — en général, mécaniques — d'emploi, et le prix de revient de l'appareil. Ainsi une longue-vue d'exploration devra avant tout posséder un grand champ; en second lieu, avoir une clarté suffisante; la netteté ne viendra qu'en troisième ligne; la distorsion des images pourra être négligée. Au contraire, un objectif destiné à des travaux cartographiques devra fournir avant tout des images exemptes de distorsion; ensuite donner une netteté suffisante. Les exemples pourraient être multipliés à l'infini.

Le mode d'emploi d'un instrument impose à ses qualités optiques, mécaniques, économiques, des conditions, non pas contradictoires, mais incompatibles. Le géomètre pourrait se borner à constater le fait; le praticien doit passer outre, et, après discussion des sacrifices à consentir, choisir la plus plausible, à son sens, des solutions acceptables. Les qualités optiques d'un instrument sont donc le résultat d'un compromis nécessaire. Il serait injuste de l'oublier quand on apprécie une combinaison optique.

26. Qualités des instruments de mesure. — Il ne saurait être question de produire, ici, l'énumération des qualités optiques nécessaires aux appareils de mesure; car autant d'instruments, autant de problèmes.

Deux remarques générales, seulement, semblent utiles.

Dans ces instruments, la mesure est le but; l'optique est le moyen, et partant, l'accessoire. Par suite, il ne faut pas hésiter à se contenter, si elles sont suffisantes, de qualités optiques en apparence médiocres

pour un instrument d'observation. C'est ainsi, par exemple, qu'on pourra parfois se borner à obtenir dans une lunette la netteté maximum au centre, sans s'occuper outre mesure de ce qu'elle devient sur les bords du champ.

La seconde remarque a trait à la précision de l'appareil. L'usage auquel on destine celui-ci détermine le degré de précision de la mesure; un sage équilibre doit régner entre les divers éléments de l'instrument; chacun d'eux doit concourir pour sa part, sans excès, à la précision définitive. Il peut être mauvais de trop soigner certains organes, de les travailler ou de les monter avec une précision propre que ne comporte pas celle de l'appareil; car toute précision se paye, et toujours fort cher, et sa conservation exige des soins minutieux.

CHAPITRE II

ROLE DE L'OEIL DANS LA VISION INSTRUMENTALE

27. **Nécessité de cette étude.** — La connaissance des propriétés de l'œil est indispensable pour l'étude des instruments optiques. L'assertion pourrait passer pour une évidence ou une naïveté. Il faut en expliquer la portée.

Dans l'étude d'un phénomène mécanique, thermique, électrique, acoustique même, ce n'est pas, le plus souvent, l'organe humain qui a pu le déceler qui est utilisé dans l'observation ou la mesure de ce phénomène. Entre le siège de ce dernier et l'opérateur, s'intercale un appareil spécial, — d'exploration ou de mesure, — dont les déformations sont fonctions de la nature et de la grandeur du phénomène, et qui sont perçues par un organe déterminé, l'œil généralement. Le voltmètre indique la tension d'un réseau sans que l'opérateur en ressente les effets; un observateur sourd peut, en examinant le diagramme tracé sur le papier enfumé, indiquer, mieux que le meilleur des musiciens, la note émise.

Les phénomènes lumineux ne peuvent, au contraire, être étudiés qu'avec le concours de l'organe même qui les perçoit. De là, suivant les observateurs, des divergences qui naissent dès qu'il s'agit de questions touchant à la netteté, à la clarté ou à l'appréciation de certaines conséquences géo-

métriques et physiques de la vision. En particulier, l'examen et le contrôle des instruments deviennent délicats et donnent des résultats incertains, si chacun rapporte, sans corrections, ceux-ci à son œil.

Les notions qui vont suivre donneront les éléments indispensables pour faire intervenir l'œil dans la conception, l'organisation et la vérification des instruments optiques. La physiologie de l'œil sera loin d'être épuisée. Sur ce sujet, Helmholtz a écrit un ouvrage remarquable (53) et volumineux, auquel nous emprunterons beaucoup.

28. **L'œil idéal.** — Autant d'hommes, autant d'yeux ; ce dernier nombre pourrait même être largement augmenté, car beaucoup d'êtres humains n'ont pas leurs yeux identiques. De cette diversité d'organes, la Science doit en former un type, afin de pouvoir en soumettre les propriétés aux règles de la Logique. Cet œil, de caractère un peu théorique, possédera des propriétés moyennes (au sens vulgaire de qualificatif) ; il aura les caractères que l'on rencontre dans ce qu'on appelle habituellement les bons yeux, organes sains, exercés à la vision normale dans les circonstances variées.

Nous l'appellerons *l'œil idéal* ; le mot idéal n'est pas pris ici dans le sens de parfait.

Les propriétés des instruments étant établies pour cet organe abstrait, il sera facile ensuite d'en déduire celles qui se rapportent à des yeux naturels, normaux ou peu anormaux. Il ne s'agira plus alors que de variations de quelques grandeurs ; et l'on sait que, dans des cas très nombreux, la règle de proportion suffit aux calculs.

29. **Éléments optiques de l'œil.** — Les élé-

ments réfringents de l'œil sont, en allant d'avant en arrière :

1° La *cornée transparente*, lame solide, mince, à faces sensiblement parallèles et convexes vers l'extérieur. Sa forme est assez exactement celle d'une calotte d'ellipsoïde, pas tout à fait de révolution, dont le sommet est au centre des faces.

2° L'*humeur aqueuse*, liquide incolore, constitué par de l'eau tenant en solution ou suspension 2% de matières solides.

3° Le *cristallin*, corps lenticulaire, biconvexe, dont la face antérieure est la plus aplatie; c'est une masse gélatineuse, élastique, plus consistante au noyau ou centre, et composée de couches dont l'indice de réfraction augmente de l'extérieur à l'intérieur. Les surfaces terminales appartiennent à des ellipsoïdes de révolution.

4° Le *corps vitré*, contenu dans la membrane hyaloïde, est, comme le cristallin, une masse gélatineuse, mais de nature moins consistante et de constitution différente; elle est formée d'eau et, dans la proportion totale de 2%, de substances solides et d'une matière mucilagineuse.

L'indice du corps vitré est un peu plus élevé que celui de l'humeur aqueuse; tous deux, supérieurs à celui de l'eau, en diffèrent à peine.

Un *diaphragme*, l'*iris*, est placé en avant et contre le cristallin; son ouverture circulaire, la *pupille*, — on disait jadis la *prunelle*, — varie de diamètre, entre 2 et 10 millimètres environ, suivant l'intensité de la lumière ambiante.

30. **Œil schématique de Listing; œil réduit.**

— Les caractéristiques de l'œil schématique, organe théorique, sont les suivantes (fig. 1) :

Les surfaces des éléments réfringents sont supposées sphériques et rigoureusement centrées (dans l'œil réel, le centrage n'est pas parfait); la cornée C est réduite à une surface géométrique; l'humeur aqueuse et le corps vitré sont considérés comme identiques; le cristallin $\Gamma\Gamma'$ est supposé homogène.

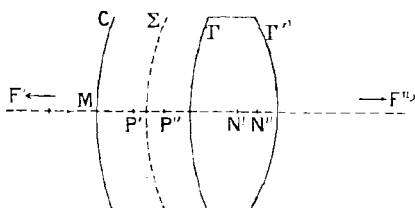


Fig. 1.

Les données numériques admises sont :

Rayons de courbure : de la cornée, 8 millimètres; de la face antérieure du cristallin, 10 millimètres; de sa face postérieure, 6 millimètres;

Épaisseurs suivant l'axe : de l'humeur aqueuse, 4 millimètres; du cristallin, 4 millimètres; du corps vitré, 15 millimètres environ.

Indices de réfraction : du cristallin, 1,455; de l'humeur aqueuse et du corps vitré, 1,337.

L'axe du système est dit *axe de l'œil* ou *axe optique*.

Le calcul permet de déduire de ces hypothèses les résultats ci-après :

Positions des points principaux :

$$MP' = 2^{\text{mm}}, 175; \quad MP'' = 2^{\text{mm}}, 572;$$

Positions des points nodaux :

$$MN' = 7^{\text{mm}}, 242; \quad MN'' = 7^{\text{mm}}, 640;$$

Positions des points foyers :

$$MF' = 7^{\text{mm}}, 765; \quad MF'' = 27^{\text{mm}}, 715;$$

et par suite :

Focale antérieure,

$$P'F' = 15^{\text{mm}}, 007.$$

Focale postérieure,

$$P''F'' = 20^{\text{mm}}, 075;$$

Intervalle des points principaux,

$$P'P'' = 0^{\text{mm}}, 398;$$

Intervalle des points nodaux,

$$N'N'' = 0^{\text{mm}}, 398.$$

En supposant réunis, vu leur faible intervalle commun, d'une part les points principaux et de l'autre les points nodaux, on peut remplacer tout le système réfringent de l'œil par une surface unique Σ séparant l'air d'un milieu réfringent, dit *œil réduit*, d'indice égal à celui de l'humeur aqueuse. Cette surface, sphérique, passe par le point principal unique, a pour centre le point nodal, et son rayon est égal à $5^{\text{mm}}, 125$.

31. Formation des images; rétine. — Les images des objets extérieurs se peignent, réelles et renversées, sur une surface organisée, concave vers l'intérieur de l'œil, la *rétine*, qui est un épanouissement du nerf optique et qui limite, en arrière, le corps vitré. La rétine est constituée par les éléments nerveux ordinaires, et par d'autres éléments spéciaux, filiformes, très réfringents, effilés à leurs bases, qui pénètrent

dans la couche sous-jacente, leurs extrémités libres formant la surface même de la rétine à laquelle ils sont normaux. Ces éléments, pressés les uns contre les autres, sont de deux sortes : des *bâtonnets* (bacilli) cylindriques, de 65 à 80 μ de longueur et de 1,8 μ de diamètre ; des *cônes* (coni), de 15 à 20 μ de longueur et de 4 à 5 μ de section à la surface de la rétine, prolongés d'ailleurs dans les tissus par des bâtonnets spéciaux de cône.

Ces éléments, et plus particulièrement les cônes, paraissent être les récepteurs utiles des sensations lumineuses. Leur répartition est inégale sur la surface de la rétine. Dans une région circulaire de 1 à 2 millimètres de diamètre, la *tache jaune* (*macula lutea retinæ*), dont le centre est à 1^{mm},5 environ du pied de l'axe optique et vers le côté temporal, les cônes sont plus nombreux que les bâtonnets ; ceux-ci disparaissent même au centre de la tache, où se trouve une dépression, la *fovea centralis*, de 0^{mm},2 de diamètre, pavée de cônes moins épais, 2 à 3 μ . A mesure qu'on s'éloigne de la tache jaune, la proportion des bâtonnets augmente ; exception faite du *punctum cæcum*, entrée du nerf optique, presque symétrique de la tache jaune par rapport à l'axe de l'œil, où disparaissent cônes et bâtonnets.

32. Orientation de l'œil dans la vision nette ; centre de rotation. — La faculté de perception de la rétine, nulle à l'entrée du nerf optique, maximum dans la fovea centralis, très grande dans la tache jaune, diminue à mesure que l'image rétinienne s'éloigne de cette dernière région. La sensibilité de la rétine semble liée à la présence des cônes.

Dès que la volonté intervient pour regarder un objet, l'œil, par suite d'une habitude inconsciemment acquise, s'oriente de façon que le point particulièrement fixé forme son image au centre de la fovea centralis. Ce mouvement est accompli par le jeu automatique de six muscles moteurs. Le globe oculaire ne pouvant avoir qu'un déplacement d'ensemble dans son orbite osseuse, ses déformations étant insensibles, tourne autour d'un point fixe par rapport à la masse crânienne, et fixe, par suite, par rapport à lui. Ce point, dit *centre de rotation* de l'œil, est situé sur l'axe optique à $13^{\text{mm}},6$ en moyenne en arrière du sommet de la cornée. Pour les yeux myopes, cette distance doit être portée à près de 16 millimètres, et réduite à $12^{\text{mm}},3$ pour les yeux presbytes.

La ligne qui joint au centre de la fovea le point nodal postérieur de l'œil constitue la partie postérieure de la *ligne visuelle*; sa partie antérieure, qui lui est parallèle, joint, dans le cas de la vision nette, le premier point nodal au point fixé.

33. Champ de la vision. — L'œil immobile ne perçoit très nettement que les détails angulairement peu éloignés de la ligne visuelle; ce *champ de la vision nette* ne paraît pas supérieur à un demi-degré; cette valeur correspond assez exactement à l'angle sous-tendu du second point nodal par la fovea centralis, et aussi à l'étendue visible des caractères d'écriture à la distance habituelle de la lecture (3 millimètres à 30 centimètres).

Mais, en raison de l'extrême mobilité de l'œil autour du centre de rotation et de la rapidité de transmission au cerveau des impressions rétiniennes, le *champ de la vision pratique* est de beaucoup plus étendu : on peut

appeler ainsi le champ que, sans fatigue et sans action consciente de la volonté, l'œil peut parcourir.

L'œil, au repos, a dans l'organisme humain une position telle que la ligne visuelle est, à peu près, parallèle au plan de symétrie et perpendiculaire à l'axe du corps (la verticale, l'homme étant supposé debout). Le champ de la vision pratique est un cône à base elliptique dont l'axe horizontal a une étendue angulaire de 30° et l'axe vertical de 20° . Sous l'action de la volonté, ces nombres peuvent être multipliés par 2 et même par 3.

Les champs ainsi définis se rapportent à la *vision directe*; tandis que se forme sur la tache jaune l'image nette du point visé, les autres régions de la rétine perçoivent, moins distinctement, mais dans des conditions souvent suffisantes, les objets extérieurs au champ de la vision nette; — c'est ainsi qu'en regardant attentivement un point tout particulier d'un paysage, on ne perd pas de vue les allées et venues des personnes autour de soi. Le champ ainsi défini, *champ de la vision indirecte*, a une amplitude considérable : elle atteint 150° dans le sens horizontal, 120° dans le sens vertical.

34. Netteté des images rétinienne; accommodation. — La simple orientation de l'œil suffit à la netteté de la vision lorsqu'il s'agit d'objets éloignés; car l'œil normal au repos est disposé pour la vue à l'infini, les images se formant alors sur la rétine. Lorsque l'objet se rapproche, la perception ne devient nette qu'à la suite d'une modification automatique de l'œil, qui porte le nom d'*accommodation*, et qui a pour but de placer l'image sur la surface rétinienne.

La modification en question paraît seulement con-

sister dans un changement de forme du cristallin, qui devient ainsi une lentille à foyer variable : les deux surfaces de l'élément augmentent de courbure, le sommet de la face postérieure restant en place. Accessoirement, la pupille se resserre.

Les variations dont il s'agit ne deviennent sensibles qu'au moment où le point visé est parvenu à 15 ou 20 mètres; elles se continuent jusqu'au moment où l'objet arrive à la distance, 25 centimètres environ, du *punctum proximum*. La forme du cristallin ne variant plus, si l'objet se rapproche encore, son image devient de plus en plus confuse.

Dans l'œil schématique de Listing, on attribue l'accommodation à la variation de courbure de la face postérieure du cristallin (qui passe de 6 à 5^{mm},5) et au changement d'épaisseur du même élément (qui augmente de 0^{mm},4), — l'objet se déplaçant de l'infini à 13 centimètres, *punctum proximum* encore admissible pour certaines vues flexibles et exercées. Ces hypothèses conduisent à un déplacement de 2 millimètres, en avant, du foyer principal postérieur de l'œil, et à une diminution de 10 millimètres de la focale propre du cristallin.

35. Perception des détails par l'œil. Acuité visuelle; loi de Hooke. — Les propriétés spéciales de l'œil qui règlent son accommodation semblent pouvoir être condensées dans les deux faits suivants, assez étroitement liés entre eux :

1^o Un point géométrique lumineux et une petite aire lumineuse donnent la même impression rétinienne, — celle d'un point lumineux physique, comme nous l'appellerons, — quand l'angle sous-tendu du point nodal

antérieur par la dimension linéaire maximum de l'aire radiante est au plus égal à une minute.

Il faut supposer que le plan de l'aire, normal à la ligne visuelle, est plus loin que le punctum proximum ; que les intensités totales du point et de la surface sont sensiblement équivalentes, et qu'en outre, en raison des phénomènes d'irradiation, l'intensité lumineuse n'est pas trop forte.

2° Deux points géométriques lumineux sont vus distinctement séparés lorsque leur distance angulaire, le point nodal antérieur de l'œil étant au sommet, est au moins égale à une minute.

Des restrictions analogues à celles indiquées plus haut doivent être faites.

On peut donner à l'ensemble de ces deux propriétés le nom de loi de Hooke, — plus spécialement attribué à la seconde. La grandeur, une minute, qui entre dans leur énoncé porte le nom d'*acuité visuelle* ; elle n'est autre que la mesure du pouvoir séparateur de l'œil considéré comme instrument optique. Sa puissance est dès lors 3000.

La valeur d'une minute admise pour l'acuité visuelle a été indiquée par Hooke à la suite d'observations de couples d'étoiles. Des valeurs différentes, généralement plus élevées, ont été indiquées par d'autres expérimentateurs opérant dans d'autres conditions. Le nombre de Hooke semble le plus admissible ; il est habituellement adopté.

36. Profondeur du champ de la vision. — Pour des faisceaux déliés, l'œil peut être considéré comme aplanétique. L'organe accommodé donne alors d'un point lumineux une image ponctuelle rétinienne.

Si, sans variation d'accommodation, le point lumineux se déplace, l'image rétinienne devient une petite aire sensiblement circulaire, qui continuera à donner une sensation ponctuelle tant qu'elle sera vue du second point nodal sous un angle inférieur à une minute; quand cette limite sera atteinte, le diamètre de la tache sera de 5 μ . Ce fait peut être la conséquence du déplacement du point objet soit en deça soit au delà de sa position initiale. La distance entre les deux positions extrêmes est la profondeur du champ pour l'état d'accommodation donnée. Dans cet intervalle, tout point géométrique lumineux donne comme image un point physique, l'accommodation de l'œil étant invariable. Le calcul des systèmes optiques permet d'évaluer la profondeur du champ. En particulier, pour l'œil au repos, c. a. d. accommodé à l'infini, l'objet peut se déplacer jusqu'à 15 mètres environ avant que le diamètre de son image atteigne 5 μ ; la pupille est, ici, supposée ouverte à 4 millimètres de diamètre. Sous une autre forme, on peut dire que, pour l'œil, l'infini commence vers 15 mètres.

37. Profondeur de foyer de l'œil. — Dans les mêmes conditions, le degré d'accommodation de l'œil est indifférent, pour la netteté des images, pourvu que la rétine coupe l'une ou l'autre des nappes du cône des rayons réfractés suivant un cercle de diamètre inférieur à 5 μ . L'intervalle des deux sections satisfaisant à cette condition est la profondeur de foyer de l'œil. Pour un objet situé à l'infini, cette caractéristique est d'environ 50 μ .

38. Image solide d'un point. — L'image d'un point est donc, à peu près indifféremment, l'une ou

l'autre des sections d'un cône à deux nappes, limité. Ce petit volume peut être appelé *l'image solide* du point. Sa figure exacte étant déterminée pour une accommodation donnée, on obtiendra l'image géométrique sur la rétine, pour une accommodation différente, en déplaçant ce solide suivant son axe. Ce glissement sera accompagné d'une extension d'autant plus faible que le seront les variations de forme du cristallin. La variation de position du point lumineux entraîne également un mouvement de l'image solide.

En réalité, l'image solide sera un pseudo-cône, c'est à dire une sorte d'hyperboloïde de révolution très allongé; cela, en raison du non-aplanétisme absolu de l'œil; mais le cercle de gorge ne paraît pas avoir un diamètre supérieur à quelques dixièmes de micron.

39. **Clarté des images rétinienne.** — Cette clarté est, dans une certaine mesure, assurée par le jeu involontaire de l'iris. Dès que l'intensité de l'objet augmente, les actions réflexes provoquées par l'excitation anormale de la rétine amènent le rétrécissement rapide de la pupille; si son ouverture minimum, 2 millimètres environ, est insuffisante pour faire tomber au taux convenable l'éclairement spécifique de l'image, la persistance de la fixation est suivie de troubles visuels, à moins que les cils et les paupières n'arrêtent à la fois clarté et netteté. Quand, au contraire, l'intensité de la lumière reçue s'abaisse, la pupille s'ouvre lentement de manière à accroître l'éclairement de l'image. La valeur de sa grandeur maximum, 8 à 10 millimètres, paraît tenir à l'apparition des aberrations, comme sa valeur minimum semble être limitée par les phénomènes de diffraction.

L'ouverture normale de la pupille est de 4 millimètres. C'est celle qui convient aux éclairages moyens : objets à l'ombre, en plein air, par un beau soleil et une atmosphère calme et pure. Il est difficile de préciser autrement dans cette appréciation.

40. Sensibilité de l'œil aux diverses radiations. — W. Herschel a essayé de déterminer la sensibilité en question en cherchant la distance maximum à laquelle étaient perceptibles des caractères d'imprimerie éclairés par des sources de diverses couleurs. Le procédé lui a indiqué la couleur jaune légèrement orangée comme étant la plus efficace ; le vert viendrait ensuite. En s'éloignant de part et d'autre de ces couleurs voisines dans le spectre, la sensibilité de l'œil diminuerait rapidement. Les nombres du tableau ci-après indiquent (colonne S) avec une approximation suffisante le degré de sensibilité de l'œil.

Rouge (raie B)	S = 3	L = 40
Orangé (raie C)	20	50
Jaune (raie D)	100	100
Vert (raie E)	50	40
Bleu (raie F)	7	25
Indigo (raie G)	0,5	7
Violet (raie H)	0,1	2

La seconde colonne (L) mentionne la proportion de la couleur qui existe dans la lumière blanche solaire. La notion est peu précise ; elle paraît dériver de l'expérience classique du disque de Newton.

41. Valeur photométrique de l'œil. — L'œil apprécie mal le rapport des intensités de deux sources ou celui des éclairagements de deux surfaces sauf lorsque

ce rapport est très voisin de l'unité, auquel cas la valeur qui lui est attribuée est 1. Il est indispensable d'ailleurs que la lumière soit douce (ni trop vive, ni trop faible en intensité absolue) et que les couleurs soient identiques. — Pour des colorations différentes, le problème photométrique toujours posé, souvent résolu sans succès, n'a pas un sens déterminé.

En lumière blanche, ou légèrement jaunâtre, l'œil ne perçoit pas de différence entre deux éclaircissements lorsque leur rapport diffère de l'unité de $\frac{1}{64}$ au plus.

Cette propriété est une conséquence de l'observation photométrique de Bouguer, qui a constaté qu'une impression lumineuse disparaissait lorsqu'elle se superposait à une autre 64 fois plus forte.

La sensibilité de l'œil peut être accrue par la mobilité de l'une des taches éclairées par rapport à l'autre (Arago), et, s'il s'agit d'une source punctiforme peu intense sur fond plus obscur, en amenant l'image de la source un peu en dehors de la tache jaune, c'est-à-dire dans une région plus sensible parce qu'elle travaille moins.

42. Chromatisme de l'œil. — Bien que l'œil soit moins achromatique qu'il n'est aplanétique, la substitution de la lumière blanche, solaire, à une source monochromatique (jaune ou vert francs lumineux) ne paraît pas diminuer la netteté des objets éclairés.

Le chromatisme de l'œil, jadis nié, n'est pas douteux. L'observation de Fraunhofer (mise au point de l'œil sur le réticule d'un spectroscopie), l'expérience des cœurs agités de Wollaston en donnent la preuve. La

remarque suivante a le même caractère : si, à une distance de 4 ou 5 mètres, on regarde une affiche rouge franc bordée d'une large bande vert foncé, le cadre paraît faire une saillie bien accusée. Le fait s'explique par la position du foyer des rayons verts en avant de celui des rayons rouges.

L'observation de Fraunhofer conduit à admettre 0,4 à 0,6 millimètre pour la distance entre les foyers des rayons extrêmes visibles rouges et violets. En adoptant la valeur de 0,5 millimètre, les données attribuées à l'œil réduit de Listing permettent de calculer le diamètre du cercle chromatique, la réline étant accommodée pour les rayons moyens. Avec une pupille de 4 millimètres d'ouverture, « diamètre moyen de la pupille d'yeux normaux. » dit Helmholtz, le diamètre du cercle de diffusion est de 50 μ , soit dix fois celui de la tache maximum qui constitue un point image physique. Si cependant la sensation ponctuelle se conserve, c'est que, en dehors du centre où se condensent les rayons verts et jaunes, les autres couleurs du spectre ne possèdent plus une intensité suffisante pour impressionner efficacement la rétine.

43. Vision binoculaire ; convergence optique.

— Les propriétés précédentes concernent la vision monoculaire ; à la vision binoculaire s'en ajoutent d'autres.

Dès que le regard fixe un point, chaque œil s'accommodé séparément pour la distance de l'objet ; mais, en même temps, les yeux se disposent de telle façon que leurs lignes visuelles concourent sur le point fixé. Chacune des deux images de celui-ci se forme, dans le cas maximum de netteté, au centre de la fovea correspondante ; les images des points voisins se peignent

autour, en des points correspondants des deux rétines.

Aussi bien que pour l'accommodation, les yeux sont, au repos, disposés pour la vision binoculaire à l'infini : les lignes visuelles sont parallèles. Quand l'objet examiné se rapproche, la convergence de ces lignes croît de 0° jusqu'à 15° environ, correspondant à un punctum proximum de 25 centimètres, et à un écart moyen des centres de rotation de 65 millimètres.

44. Faculté stéréoscopique de l'œil ; perception de la profondeur. — Loi de Helmholtz. — L'accommodation et la convergence sont fonctions de la distance de l'objet à l'observateur. Les variations de l'accommodation sont assez mal perçues et ne peuvent être utilisées pour apprécier les variations de distance de l'objet ; il en est autrement des variations de la convergence.

Si deux points lumineux A et B (fig. 2) sont à peu près dans la même direction que le regard, les yeux étant en O et O', l'observateur pourra juger de la situation relative en profondeur des deux points dès que la différence des parallaxes

$$\alpha = \widehat{OAO'}, \quad \beta = \widehat{OBO'}$$

atteindra une valeur suffisante pour donner à cet observateur la sensation d'une variation de convergence. Helmholtz a indiqué, sous la forme suivante, la valeur

d'une minute : « La comparaison des images rétinienne des deux yeux, pour la vision stéréoscopique, se fait avec la même exactitude que l'appréciation des plus petites distances dans un seul et même œil. »

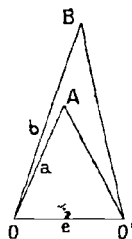


Fig. 2.

En appelant a et b les distances OA, OB supposées assez grandes par rapport à l'écartement oculaire $OO' = e$, la vision binoculaire pourra juger que B est plus éloigné que A, quand on aura :

$$\frac{e}{a} - \frac{e}{b} \geq \frac{1}{3000};$$

$\frac{1}{3000}$ est la tangente trigonométrique de r' .

En appelant $\tau = b - a$ la différence de profondeur, supposant $e = 65$ millimètres, et arrondissant le produit $3000 e$ à 200 mètres, la formule précédente donne pour la profondeur minimum perceptible, — l'unité de mesure étant le mètre :

$$\tau = \frac{a^2}{200 - a}.$$

La loi reste valable quand les points lumineux sont remplacés par des objets, pourvu qu'on n'ait sur eux aucun renseignement autre que celui qui peut résulter de la variation de convergence. Elle devient inutile si l'objet rapproché cache plus ou moins l'objet éloigné ou projette de l'ombre sur lui, si, dans le jugement, on tient compte de la grandeur, exacte ou non, des objets, etc. Ainsi la relation précédente implique, par la valeur infinie que prend τ pour $a = 200$ mètres, l'impossibilité d'assurer, par la vision seule, qu'un homme placé à plusieurs kilomètres est plus éloigné qu'un autre situé à 200 mètres; on ne se trompe pourtant guère, pratiquement, lorsque le premier est à 300 mètres seulement. C'est que les statures sont généralement comparables; la conclusion pourrait être erronée si l'homme le plus rapproché était un nain vis-à-vis de l'autre.

La loi d'Helmholtz, généralement acceptée, ne paraît pas avoir été systématiquement vérifiée pour des valeurs très diverses de la distance. Son auteur l'a déduite d'expériences de laboratoire, parfaites comme méthode, mais sans envergure. Elle semble cependant, d'après quelques-unes de ses conséquences, pouvoir être admise.

La vision binoculaire offre encore l'avantage de permettre une appréciation plus exacte de la forme des objets, soit par la perception de leur profondeur, soit par la différence géométrique des images produites sur chaque rétine. La sensation cérébrale est toujours unique; mais l'image n'est plus une simple perspective sur un seul tableau; elle résulte de la fusion de deux pareilles figures, les points de vue étant différents et simultanés: c'est cette dernière condition qui définit la *vision stéréoscopique*.

45. — Les considérations précédentes, applicables aux yeux *normaux*, ou *emmétropes*, ne conviennent qu'avec les restrictions nécessaires aux yeux *amétropes* (*brachymétropes* ou *myopes*, *hypermétropes* ou *presbytes*), ainsi qu'aux yeux *astigmatés*, et aux organes dont la sensibilité est émoussée.

46. **Rôle de la plaque photographique.** — Entre l'œil et l'objectif photographique s'interpose habituellement la plaque sensible. La connaissance de ses propriétés générales est nécessaire; son étude détaillée sort du cadre de cet ouvrage.

La plaque sensible reçoit l'image réelle; les manipulations ultérieures, d'ordre chimique, matérialisent celle-ci (étendant le sens du mot, nous les désignerons sous le terme de développement de l'image).

Si absolue que soit la convergence des rayons formant un point de l'image réelle, ce point fût-il d'ailleurs exactement sur la couche sensible (mise au point parfaite), celle-ci sera impressionnée, non en un point géométrique, mais sur une petite surface plus ou moins étendue. Le diamètre de cette aire, à peu près circulaire, dépendra de la nature de la couche, et, plus spécialement, — en l'état actuel de l'organisation des plaques, — de la constitution du support (collodion, gélatine, etc.). Les opérations du développement révéleront l'image qui se présentera sous la forme d'un point noir — la production d'un négatif est le cas normal — de dimensions finies. Quand les points objets seront trop rapprochés, leurs images formeront une aire sombre unique, continue, où elles ne paraîtront plus séparées. La plaque a donc, indépendamment de l'objectif supposé parfait, un pouvoir séparateur particulier.

Il n'est pas possible de lui assigner une valeur unique. Le mode de développement, — où se révèle l'habileté de l'opérateur, — peut la modifier. Dans le procédé si souple du collodion humide, des manipulations sagement conduites d'affaiblissement et de renforcement combinés font apparaître deux lignes distinctes là où le développement proprement dit montrait une bande unique. Le même fait peut se produire, plus ou moins aisément, avec des couches d'autre espèce.

Un autre caractère des plaques photographiques doit être indiqué. Produits artificiels, on pourrait croire qu'il est possible de donner à la couche active la sensibilité voulue aux diverses radiations, de manière que, malgré l'absence de coloration de l'image, ses parties claires correspondent, — dans la photocopie positive, — aux régions lumineuses de l'objet. Les recherches à ce sujet n'ont pas encore abouti. Le sel d'argent, élément sensible, est surtout excité par les rayons très réfrangibles : bleu et violet ; les couleurs lumineuses à l'œil, jaune et vert, donnent du noir sur le positif.

De là, un manque de fidélité dans l'aspect de l'image. Les spécialités de plaques, dites orthochromatiques, panchromatiques, ont partiellement remédié à ce défaut, mais aux dépens de la clarté générale des images ; car le palliatif consiste à réduire, par une absorption convenable, l'action des rayons actiniques.

Nous n'insisterons pas sur la non-conservation des couleurs de l'objet dans l'image photographique. On sait comment, à une époque relativement récente, le problème a pu être résolu sans être généralisé. La méthode directe de M. Lippmann, application remarquable des phénomènes interférentiels dans les lames minces, le procédé de la trame colorée interposé entre l'objectif et la couche sensible (plaques autochromes de MM. Lumière), n'ont pas encore supplanté la photographie courante : images noires et blanches.

CHAPITRE III

DE LA NETTETÉ DES IMAGES DANS LES INSTRUMENTS OPTIQUES

47. **Des causes qui influent sur la netteté des images.** — Un objet éclairé peut, rigoureusement, être considéré comme l'ensemble de points géométriques lumineux ; la même propriété convient à son image à travers un système optique. Mais la relation entre points correspondants n'est pas univoque : à un point objet s'associent tous les points d'une image contenus dans une aire plus ou moins étroite. L'image d'un point géométrique est une *tache lumineuse*.

S'il était indispensable qu'elle fût un point, aucun instrument optique ne serait réalisable. Les propriétés énoncées pour l'œil, — et aussi pour la plaque photographique, — dispensent de cette condition. Suivant le but à atteindre, il suffit que les dimensions de la tache image restent inférieures à certaines limites. La netteté demandée est alors atteinte, quelles que soient les dimensions dont il s'agit.

Les calculs de l'optique géométrique classique assignent au point lumineux une image ponctuelle.

Ce résultat découle des hypothèses ou approximations suivantes :

1° Le rayon physique lumineux possède les propriétés de la ligne droite géométrique ; en d'autres termes, la sensation lumineuse s'annule autour de la ligne droite abstraite de propagation ; la lumière ne se *diffracte* pas.

2° L'organisation du système optique est telle que les rayons — géométriques, suivant l'hypothèse précédente — issus d'un point, convergent vers un point à la sortie du système. Autrement dit, celui-ci ne présente pas d'aberrations dues à sa forme ; il est *aplanétique*.

La marche des rayons est ici réglée par la loi de Descartes, l'indice de réfraction n étant constant.

3° Le système optique est en outre exempt d'aberrations dues à l'inégale réfrangibilité des couleurs ; il est *achromatique*, c'est-à-dire que les points images formés par des rayons de colorations différentes coïncident. Sous une autre forme, à un rayon incident géométriquement simple, quoique physiquement complexe, correspond un seul rayon émergent de même nature.

L'imparfaite réalisation de ces hypothèses¹ transforme le point image en tache.

48. Possibilité d'une étude séparée de chaque cause. — La détermination de la tache aréolaire serait des plus pénibles s'il était nécessaire d'envisager l'action simul-

¹ A celles-ci on doit ajouter les deux suivantes : les milieux traversés sont homogènes ; les surfaces actives sont géométriquement continues. Elles seront supposées implicitement réalisées.

tanée des trois causes : diffraction, aberrations de forme, aberrations de réfrangibilité. Mais dans l'emploi habituel et la constitution des instruments optiques que nous considérons, les hypothèses énoncées sont suffisamment approchées pour que l'on puisse négliger les variations des causes dues à leur existence simultanée. On pourra donc étudier l'effet de chacune des causes, en supposant que les deux autres n'agissent pas, et combiner ensuite, par simple superposition, les trois effets résultants.

Diffraction.

49. Tache de diffraction. — Nous supposons que le système optique est aplanétique et achromatique. Le foyer conjugué d'un point sera donc le point unique de concours des éléments rectilignes émergents des droites brisées géométriques, dont la marche à travers le système est régie par la relation analytique $\sin i = n \sin r$, droites brisées qui, d'autre part, passent par le point donné.

Tout point géométrique lumineux est un centre d'ébranlement de l'éther. Les ondes sphériques, — le milieu étant homogène, — centrées sur ce point se transforment dès leur entrée dans le système optique ; mais, celui-ci étant aplanétique, les ondes émergentes sont nécessairement sphériques et concaves vers le foyer conjugué du point objet. Elles créent autour de ce foyer une agitation éthérée qui se traduit par une sensation lumineuse.

La sensation serait celle d'un point si les ondes émergentes étaient physiquement illimitées ; le fait ne peut se présenter, parce que les ondes incidentes sont,

quant à leur partie utile, limitées dès leur entrée dans le système optique. L'arrêt d'une portion de l'onde par une ouverture est accompagnée de phénomènes de diffraction qui transforment le foyer ponctuel en tache.

50. Ouvertures ou diaphragmes apparents.

— La destruction partielle de l'onde s'opère au moment où celle-ci rencontre, dans sa propagation, un diaphragme de limitation, montures des verres comprises.

La portion efficace de l'onde incidente peut être déterminée comme il suit¹ :

Soit (fig. 3) D un diaphragme; formons son image D' à travers la partie antérieure (S') du système total. Si D limite réellement l'onde transmise, l'ouverture D' limitera virtuellement l'onde incidente. En répétant

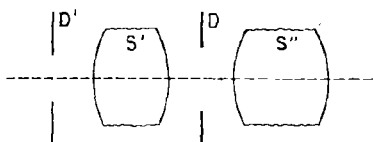


Fig. 3.

la même opération, — image de chaque diaphragme ou surface de chaque verre par rapport à l'ensemble du système qui lui est antérieur, — on obtiendra des images telles que D'_1, D'_2, \dots . L'onde incidente issue du point réel A sera limitée par celle des ouvertures D' qui sera vue de A sous le plus petit angle. L'ouverture en question s'appellera *diaphragme apparent* (ou *ouverture apparente*) d'entrée.

¹ D'une manière générale, les figures seront tracées de façon que la lumière se propage de la gauche vers la droite. La surface antérieure se trouvera donc à gauche du lecteur. Quand cette règle ne sera pas suivie et qu'il pourra y avoir doute sur le sens de propagation de la lumière, des flèches indiqueront la marche des rayons.

La même règle s'applique à l'onde émergente, les images D' de D étant formées par rapport à la partie postérieure du système. On obtient ainsi le *diaphragme apparent de sortie*.

La surface antérieure du système est elle-même son image; elle peut être à la fois diaphragme apparent et diaphragme réel. La même propriété s'applique à la dernière surface.

Il doit être entendu que la lumière est supposée se propager en sens rétrograde quand on forme l'image par rapport à un système partiel antérieur au diaphragme.

51. Image de diffraction dans une lunette.

— La théorie ondulatoire de la lumière, basée sur le principe de Huygens-Fresnel, permet de calculer les effets dus à la diffraction. Deux cas très fréquents conduisent à des résultats simples.

Le premier se présente dans un système convergent lorsque le point rayonnant est éloigné, à l'infini : il concerne plus spécialement la production des images réelles par les objectifs des lunettes et, dans de fréquentes circonstances, par les objectifs photographiques.

L'onde incidente est alors plane, et si le radiant¹ est sur l'axe du système, l'onde est en outre normale à l'axe. L'image se présente alors, dans le plan focal principal, sous la forme d'un cercle lumineux, dit *tache centrale*, entouré d'anneaux alternativement sombres et clairs. Cette apparence découverte, par Herschel, étudiée par Fraunhofer, expliquée par Airy, tient aux

¹ Cette expression, *radiant*, est due à Clairaut.

phénomènes d'interférence qui se produisent entre les ondes élémentaires issues des divers points de la zone sphérique, en laquelle le système optique a transformé l'onde plane limitée par le diaphragme apparent.

Le rayon de la tache centrale, lorsque le système optique est plongé dans l'air, est donné par la relation théorique suivante :

$$\rho = 1,2 \frac{\lambda F}{\Omega},$$

F est ici la focale principale de l'objectif; Ω , son diamètre (dit *ouverture*); λ , la longueur d'onde de la lumière émise.

En appelant ε l'angle, en secondes, sous lequel on voit le rayon de la tache du point nodal d'émergence (du centre optique, si l'objectif est mince), la formule peut s'écrire :

$$\varepsilon \Omega = 242000 \lambda.$$

Cette relation, contenant λ , montre que les bords de la tache sont irisés quand le radiant émet de la lumière blanche; les anneaux clairs présentent le même caractère.

D'autre part, l'éclairement de la tache est loin d'être uniforme; son intensité, maximum au centre, s'abaisse au tiers de sa valeur au milieu du rayon, pour devenir nulle au bord; quant aux anneaux, dont l'intensité décroît avec le numéro d'ordre, le premier ne possède qu'une intensité maximum n'atteignant pas les 0,02 de celle du centre. Aussi les anneaux sont-ils rarement discernables.

52. Pouvoir séparateur d'un objectif de lunette. — Ces considérations, vraies pour un radiant

situé sur l'axe optique, restent suffisamment exactes pour des points voisins. Il s'ensuit que deux points angulairement très rapprochés donneront des tâches identiques qui pourront empiéter l'une sur l'autre. En raison de la répartition de l'éclairement sur chacune d'elles, on peut admettre qu'elles paraîtront encore séparées lorsque la circonférence de l'une passera par le centre de l'autre. L'angle correspondant, égal à ϵ , déterminera le plus faible écartement angulaire de deux points donnant des images distinctes; il définira donc, quant à la diffraction, le pouvoir séparateur du système optique.

En lumière blanche, on peut attribuer à λ la valeur $0,58 \mu$ répondant au jaune, et écrire la dernière formule :

$$\epsilon\Omega = 130$$

ϵ étant exprimé en secondes et Ω en millimètres.

Un objectif aplanétique de 130 millimètres d'ouverture peut donc séparer, dédoubler la seconde. La propriété a été vérifiée expérimentalement par Foucault.

La relation précédente porte parfois son nom.

53. Pouvoir séparateur d'un objectif de microscope. — Le second des cas que nous avons en vue se rapporte à l'objectif du microscope. Ici, l'objet est à peu de distance du système optique; l'image en est éloignée, — la focale de l'objectif servant de terme de comparaison. Le rayon ρ de la tache centrale qui répond à un point de l'axe optique est donné par la même formule que dans le cas de la lunette, Ω désignant alors l'ouverture apparente de sortie et F la distance à son centre du point image. La même règle peut être suivie pour la détermination

du pouvoir séparateur. Celui-ci étant caractérisé par l'intervalle minimum δ , qui, sur l'objet, sépare deux points discernables à travers l'objectif, on aura :

$$\delta = k \frac{\lambda}{n \sin u},$$

λ est la longueur d'onde, dans le vide, de la lumière émise; n , l'indice de réfraction du milieu interposé entre l'objet et la face frontale de l'objectif; u , l'angle sous-tendu du point objet par le rayon de l'ouverture apparente d'entrée (qui coïncide généralement avec la surface antérieure de l'objectif).

La valeur du coefficient k est habituellement prise égale à 0,5. Elle pourrait être portée à 0,6.

Ces considérations s'appliquent à l'observation d'objets lumineux par eux-mêmes ou diffusant la lumière reçue.

Quand il s'agit de l'examen d'objets à structure périodique et régulière comportant des éléments opaques et transparents (ou réfléchissants), Abbe (1) et Helmholtz (54) ont, à peu près simultanément, et après Fraunhofer (75), indiqué, pour le pouvoir séparateur d'un objectif, la formule :

$$\delta = k \frac{\lambda}{n \sin u}.$$

Pour un réseau, k est égal à 1 ou à 0,5 suivant que les rayons qui éclairent l'objet tombent sur lui parallèlement à l'axe de l'objectif, ou sous l'incidence maximum qui permet encore la formation d'images.

Quel que soit l'objet observé, les relations précédentes montrent que le pouvoir de résolution de l'ob-

jectif croît quand λ diminue, lorsque n , u et par suite $n \sin u$, augmentent. On affaiblit λ en utilisant des radiations très réfringibles (lumière bleue; rayons violets ou ultra-violets dans le cas de la microphotographie); on accroît n en interposant entre l'objet et l'objectif un liquide très réfringent (objectif à immersion), et u en ouvrant les verres et rapprochant de l'objet la surface frontale de l'objectif.

$n \sin u$ s'appelle, d'après Abbe, *ouverture numérique* de l'objectif.

54. Pouvoir séparateur de l'œil. — L'œil est un système optique. Disposé pour la vision à grande distance, la formule de Foucault lui assure une acuité visuelle, qui est le nom de son pouvoir séparateur, égale à $33''$ pour une ouverture de pupille de 4 millimètres de diamètre. L'expérience ne justifie pas ce nombre. La même formule ne donne l'acuité habituelle de $60''$ que pour une pupille de 2 millimètres, ce qui suppose des points lumineux intenses. Quand la pupille se dilate, le pouvoir séparateur reste constant, soit en raison de l'insuffisance de clarté, soit à cause de l'apparition d'aberrations chromatiques.

55. Rôle de l'oculaire dans la séparation des images. — Grossissement. — Qu'il s'agisse d'images réelles données par un objectif de télescope, de microscope, ou par un photo-objectif, l'intervalle linéaire entre deux taches séparées est trop faible pour être discernable à la vision directe. Il faudrait en effet que l'œil pût se placer de telle sorte que l'angle déterminé par les droites joignant au nœud antérieur les centres des deux taches, fût au moins égal à une minute. Généralement, cette condition amènerait l'image

en deçà du *punctum proximum*, là où l'accommodation est impossible.

On sait qu'on tourne la difficulté en observant l'image à travers un système optique, l'oculaire, qui, en la rendant virtuelle, rejette l'image au delà du *punctum proximum*. L'écart angulaire des deux détails, des deux points séparés, prend alors une valeur déterminée; son rapport à l'écart des points correspondants de l'objet, — celui-ci étant supposé vu directement par l'œil, dans les meilleures conditions d'observation possibles, — n'est autre que le *grossissement* de l'instrument (ensemble des systèmes objectif et oculaire).

Le système objectif étant supposé donné, ainsi que les deux points juste séparés par lui, l'angle visuel à travers l'oculaire est essentiellement fonction de la focale de ce dernier et de sa position, qui détermine la situation de l'image virtuelle. Le grossissement ne dépend plus que de cet angle visuel, et varie proportionnellement à lui.

L'angle visuel doit être au moins égal à une minute. Cette condition détermine la valeur du grossissement minimum de l'instrument. Il n'y aurait pas lieu d'envisager un grossissement maximum, si toute augmentation de cette qualité secondaire n'était accompagnée pour les autres qualités essentielles (le champ, la clarté et quelquefois la fidélité des images) d'une diminution qu'on ne peut annuler sans changer le système objectif. Le minimum du grossissement peut donc être aussi considéré comme sa valeur maximum, et par suite comme sa valeur normale¹.

¹ Les personnes dont l'acuité visuelle est différente de la minute doivent modifier, en conséquence, le grossissement.

Il faut toutefois corriger la précision de cette conclusion par la remarque suivante : « Certaines personnes distinguent quelquefois mieux dans une image légèrement confuse et avec un angle visuel plus grand qu'avec une accommodation exacte et un angle de vision moindre (53). »

Remarquons encore qu'une augmentation de grossissement peut, d'elle-même, contribuer à la netteté : deux taches qui se recouvrent plus qu'il ne faut pour être séparées peuvent être distinguées grâce à un fort grossissement ; il suffit que la diminution de clarté soit assez grande pour rendre insensible à l'œil la région médiane et assez faible pour conserver aux deux centres une intensité convenable.

56. Grossissement normal des lunettes et des microscopes. — Les considérations précédentes seront appliquées aux lunettes et au microscope.

Dans les lunettes, il est préférable que l'image virtuelle soit rejetée à l'infini : l'œil observe alors au repos avec le minimum de fatigue. Le grossissement de l'instrument est égal au rapport des focales de l'objectif et de l'oculaire :

$$G = \frac{F}{f}.$$

Pour un pouvoir séparateur ε secondes, l'angle visuel, ayant pour valeur $G\varepsilon$, devant être égal à $60''$, on aura :

$$G\varepsilon = 60.$$

La relation de Foucault et les équations précédentes donnent :

$$G = \frac{60}{\varepsilon}, \quad G = \frac{60}{130} \Omega = 0,462 \Omega; \quad f = 2,16 \frac{F}{\Omega},$$

(ε en secondes, Ω en millimètres).

Le grossissement normal est donc un peu inférieur au rayon, exprimé en millimètres, de l'ouverture utile de l'objectif.

Pour le microscope, l'image est amenée à la distance Δ du punctum proximum. L'observation se fait alors dans des conditions les plus favorables. Si l'intervalle δ paraît sous l'angle α , on aura, G étant le grossissement linéaire :

$$G = \frac{\Delta \alpha}{\delta}.$$

En faisant $\alpha = 1 : 3000$ (valeur de la minute) et $\Delta = 250$ millimètres, on obtient pour le grossissement normal :

$$G = 83 \frac{n \sin u}{K \lambda},$$

λ étant exprimé en microns.

Si F, f sont les focales respectives, dans l'air, de l'objectif et de l'oculaire, l'optique géométrique donne la relation :

$$G = \frac{n \Delta^2}{F f},$$

qui détermine l'oculaire à associer à un objectif de constantes connues.

57. — Quelles que soient les causes, diffraction ou aberrations, qui, au lieu de points, produisent des taches images, les considérations précédentes s'appliquent à la détermination du grossissement normal. Si la question a été exposée ici, c'est que la diffraction doit la régler.

En effet, les éléments d'un système optique doivent être déterminés de façon que les taches dues aux aberrations soient au plus égales à la tache diffractive. Lorsque la condition ne peut être réalisée, il y a lieu de diminuer l'ouverture de l'objectif : cette modification facilite la réduction des aberrations et augmente la tache due à la diffraction. C'est donc, en définitive, ce dernier phénomène qu'il reste à considérer dans le sujet actuel.

Aberrations de sphéricité; aplanétisme.

58. **Image solide.** — L'hypothèse fondamentale est, ici, l'assimilation du rayon lumineux à la droite géométrique; elle supprime tout effet de diffraction. Le système optique est, en outre, supposé achromatique; sous une autre forme, on ne considère que des rayons homogènes, non décomposables, monochromatiques.

Les rayons issus d'un point lumineux, rayons *homocentriques*, ne possèdent pas, à leur émergence d'un système optique, la propriété de passer par un point unique, soit réel si le rayon lumineux le rencontre, soit virtuel s'il en est ainsi de son prolongement géométrique.

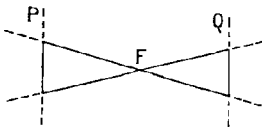


Fig. 4.

Si le caractère d'homocentricité était conservé, le point de concours F (fig. 4), foyer du point objet, aurait le rôle suivant : c'est par lui que devrait passer le plan d'une plaque photographique de finesse idéale; c'est sur lui que devrait s'accommoder un œil parfait, pour perce-

voir avec la netteté maximum les détails de l'objet dont le point radiant fait partie.

La perfection n'existant pas, il sera cependant tout aussi favorable, pour la perception de la netteté, que l'œil s'accommode entre deux plans, P et Q, tels que les sections par eux du faisceau émergent soient vues de l'œil sous un angle au plus égal à une minute; la plaque sensible pourra être disposée entre les deux plans analogues qui détermineraient dans le faisceau des sections égales au *cercle de diffusion tolérée*. Quel que soit l'organe récepteur, œil ou plaque, nous appellerons *plan de mise au point* le plan sur lequel la plaque est située ou l'œil accommodé.

Les rayons émergents ne restant pas homocentriques, le faisceau, au lieu d'être un cône à double nappe, deviendra (fig. 5) un quasi-

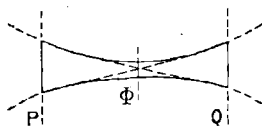


Fig. 5.

cône, surface réglée à cercle de gorge Φ ou non ponctuel. Si le diamètre de Φ est assez faible, il existera, comme dans le cas précédent, deux plans limites P et Q de mise

au point. La netteté des images restera aussi parfaite que dans un système aplanétique; mais la *profondeur* de mise au point, intervalle des plans P et Q, sera vraisemblablement plus faible. Ce défaut pourra se traduire par une fatigue de l'œil résultant d'une tension de l'accommodation entre des limites très étroites, et par une difficulté de mise au point de la plaque tenant à la précision exigée. Le solide quasi-conique, limité par les plans P et Q, constituera, comme pour l'œil, ce que nous appelons une *image solide*.

59. **Théorème de Dupin.** — En donnant au rayon lumineux les propriétés de la droite, on réduit, grâce à la loi de Descartes, toute l'étude des aberrations à une question de géométrie pure. La théorie est dominée par un théorème remarquable, auquel se rattachent les noms¹ de Malus, de Dupin et de Sturm, du second surtout.

Cette proposition, susceptible d'un énoncé purement géométrique très général, peut, relativement à notre sujet, être ainsi formulée : Les rayons issus d'un point lumineux, et traversant un système optique, sont, après chaque réflexion ou réfraction soumise à la loi de Descartes, normaux à une même surface géométrique (de forme variable après chaque réfraction) ; par suite, les rayons infiniment voisins d'un rayon quelconque donné, dit *médial*, s'appuient sur deux éléments linéaires perpendiculaires entre eux et au rayon médial.

La surface trajectoire normale des rayons réfractés, nous l'appellerons *surface de Dupin*. Les éléments linéaires d'appui sont les *droites focales de Sturm* ; elles passent par les centres de courbure de la surface de Dupin situés sur le rayon médial, et appartiennent à ses plans principaux.

La surface de Dupin n'est d'ailleurs autre chose que la *surface de l'onde* ; nous lui donnons un nom particulier pour rappeler son origine purement géométrique.

60. **Aberration d'un faisceau issu d'un point de l'axe.** — La présence d'un axe dans les systèmes centrés conduit tout naturellement à considérer d'abord

¹ On attribue souvent ce théorème à Gergonne. C'est faire trop d'honneur à ce dernier. (*Ann. de Math.*, XIV, 1823-24.)

le cas où le radiant P est sur cet axe (fig. 6). Les surfaces de Dupin, la surface d'émergence Σ , en particulier, sont de révolution autour de l'axe. Le pinceau¹ central émerge suivant un pinceau conique dont le sommet est au centre de courbure unique P' de Σ sur l'axe PX . Un pinceau marginal de direction PI émerge suivant un pinceau dont le rayon médial est EQ et

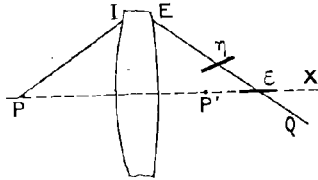


Fig. 6.

qui s'appuie sur les deux droites focales ε et η . — Le plan Π , commun à l'axe et aux deux rayons médiaux, est pris comme plan du tableau. — La focale ε est située sur l'axe PX , car elle ne doit évidemment pas se déplacer quand PI tourne autour de PX ; l'autre focale, η , est par suite normale en h à EQ et au plan Π . Lorsque le pinceau PI tourne autour de PX pour engendrer une couronne incidente, ε reste fixe, et η enveloppe une circonférence de cercle γ , lieu du point h , normale à l'axe et centrée sur lui. Quand, enfin, l'inclinaison de PI sur l'axe varie de manière à faire balayer à la couronne incidente la surface utile d'entrée, l'élément ε décrit une portion finie de l'axe, et la circonférence γ engendre une zone, limitée par deux plans normaux à PX , de la surface caustique Γ d'émergence.

En résumé, les rayons émergents formeront un complexe s'appuyant (fig. 7) sur le segment $P_1 P_2$

¹ Nous réservons le nom de pinceau à un faisceau infiniment délié.

de l'axe et sur une zone de surface I' limitée par les plans M_1 et M_2 . La méridienne de cette surface de révolution passera d'ailleurs par le foyer F' , où l'axe sera une tangente de rebroussement. La section déterminée dans ce complexe par un plan de mise au point constituera l'image du point P sur ce plan.

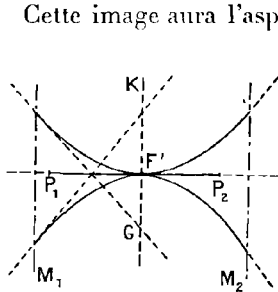


Fig. 7.

Cette image aura l'aspect général suivant : un point central très brillant entouré d'un cercle plus sombre ; une circonférence lumineuse, section de la surface caustique, bordera ce cercle et sera suivie d'une couronne circulaire dégradée.

Cette couronne pourra faire défaut si ce plan de mise au point est assez éloigné de F' ; le point central sera

moins accusé en dehors du segment $P_1 P_2$. Mais, de tous ces plans de mise au point, le plus remarquable est celui K qui passe par F' : la circonférence lumineuse se réunit au point central auquel elle donne l'intensité maximum. Cette propriété fait attribuer à la tache correspondante la qualité d'être la meilleure image, bien que son diamètre ne soit pas minimum ; ce dernier caractère appartient à la section déterminée par le plan N_1 ou N_2 ⁽¹⁾.

Dans un grand nombre de systèmes usuels, P_2 (ou P_1) coïncide avec F' . Le rayon $F'G$ de la tache sur le plan K s'appelle l'*aberration latérale* ; le segment $F'P_1$ (ou $F'P_2$) est l'*aberration longitudinale*. On peut donner un signe

(1) Le lecteur verra aisément la position des plans N_1 et N_2 sur la figure 7.

à cette dernière, suivant la position relative des points extrêmes.

61. Séparation des taches de diffusion. —

Un radiant voisin de l'axe donne, par raison de continuité physique, une image sensiblement identique à celle d'un point axial. Les taches de deux points voisins angulairement (et linéairement, s'ils sont à distance finie) pourront empiéter l'une sur l'autre. On admet, pour leur séparation, soit la règle même qui régit les taches diffractées, soit plutôt celle qui assure la tangence extérieure des taches.

62. Aberration d'un pinceau oblique; astigmatisme. — Nous supposons maintenant le radiant en dehors de l'axe du système optique. Le pinceau PI

(fig. 8) donne un pinceau émergent s'appuyant sur les deux droites focales ϵ et η , dont la situation exacte dans le système ne nous est pas indispensable. Si

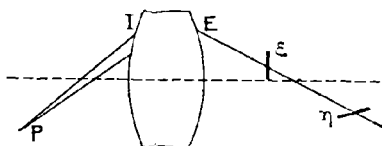


Fig. 8.

le pinceau s'ouvre de manière à se transformer en un faisceau, de rayon médial PI, découpant sur la surface incidente une aire petite, mais finie, le théorème de Sturm s'applique encore dans son essence. Les éléments ϵ et η deviennent des droites physiques, c'est-à-dire présentant une petite épaisseur, et courtes, mais non infiniment petites; toutes les normales autour de E ne coupent pas ces droites physiques (car il n'y a plus ici de termes infinitésimaux du troisième ordre, mais seulement des quantités très faibles). Quelques-unes

d'entre elles y passent seulement fort près ; de sorte qu'en mettant au point sur ϵ , par exemple, l'image de P sera une petite droite lumineuse entourée d'une aire de diffusion allongée dans sa direction. En η , l'image aura le même caractère, mais sa direction sera à 90° de la première. Dans l'intervalle, l'image se rapprochera de la forme circulaire, qu'elle atteindra en un point déterminé ; mais l'intensité centrale sera plus faible que celle des images linéaires, et la dégradation lumineuse moins rapide. En dehors de l'intervalle $\epsilon\eta$, l'image aura une forme elliptique dont la grandeur absolue ira constamment en augmentant.

Supposons, pour abrégier le discours, le système orienté de façon que ϵ soit vertical. Imaginons, au lieu de P, une petite croix dont une branche soit verticale. La mise au point sur ϵ donnera une image (fig. 9)

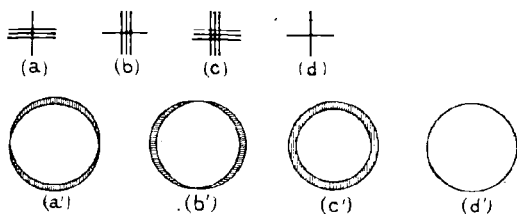


Fig. 9.

ayant l'apparence (a) ; la mise au point sur η donnera l'aspect (b) ; la figure (c) conviendra à une mise au point intermédiaire.

Si la croix est remplacée par une circonférence de cercle d'égale épaisseur, les apparences seront respecti-

vement celles (a' , b' , c') figurées ci-dessus. Mais, dans aucun cas, l'image n'aura l'aspect (d) ou (d'), qu'on obtiendrait en centrant la figure sur l'axe optique de l'instrument.

Les apparences dont il vient d'être question portent le nom général d'*astigmatisme*¹; il n'y a pas, en effet, alors, de foyer conjugué; en place, deux droites lumineuses espacées et un intervalle dans lequel on a le choix des images possibles. Les deux focales de Sturm, physiquement réalisées, sont les *droites d'astigmatisme*. Leur intervalle s'appelle, parfois, l'*astigmatismation*.

63. Aberration d'un faisceau oblique; coma.

— Envisageons, maintenant, le cas où le faisceau incident intéresse toute l'ouverture d'un système optique centré. Le pinceau PN' (fig. 10), dirigé vers le centre N' de l'ouverture apparente d'entrée, émerge suivant un pinceau tel que $N''Q$ passant par N'' , centre du diaphragme de sortie.

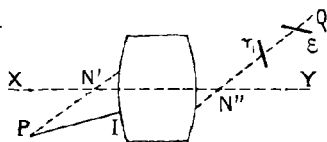


Fig. 10.

Les focales du pinceau sont l'une ϵ normale au plan (P, xy) , l'autre τ dans ce plan; des considérations de symétrie suffisent pour l'établir.

Quand le pinceau incident PN' se déplace et, tel PI , balaye l'ouverture d'entrée du système optique, de façon à engendrer le faisceau total, les focales ϵ et τ varient. Elles ne peuvent envelopper des cercles qui devraient être à la fois centrés sur xy et sur PN' ; elles restent

¹ Expression due au Dr. Wehwell: α στιγμα, sans foyer.

tangentes à deux sortes d'ellipses, dont les grands axes sont respectivement parallèles aux directions indiquées ε et η des focales du pinceau QN'' . Ces ellipses, d'autant plus aplaties que l'ouverture est faible le faisceau peu ouvert et peu incliné sur l'axe, constituent les meilleures — ou, plus exactement, les moins mauvaises — images du point P, parce qu'elles possèdent l'intensité spécifique maximum qui attire l'œil et impressionne fortement la plaque sensible. Leur ensemble se substitue au foyer conjugué F' du point situé sur l'axe, point commun à l'élément et à la caustique, lieu et enveloppe respectifs des focales de Sturm.

Pour les mêmes causes qui interviennent lorsqu'il s'agit d'une image axiale, les ellipses lumineuses, squelettes de l'image astigmatique, sont accompagnées d'une aire de diffusion de même forme. Au point de vue de l'intensité lumineuse, cette aire, symétrique par rapport au plan Pxy du radiant et de l'axe optique, ne l'est pas relativement au plan normal à Pxy et passant par QN'' . En effet, l'image astigmatique due au faisceau total est la résultante par superposition des images analogues formées par les faisceaux déliés tels que PI, images élémentaires qui sont sensiblement symétriques autour du rayon émergent médial. Considérons une gerbe conique de ces faisceaux PI de révolution autour de PN' ; l'image qu'elle produit reste à peu près symétrique autour de QN'' tant que la base de la couronne s'appuie tout entière sur la surface utile d'entrée du système optique; en ouvrant de plus en plus la gerbe de façon à lui faire balayer toute cette surface utile, il arrive, en raison de la non-symétrie du système autour de QN'' , qu'une partie, de plus en plus faible, de la couronne

atteint la surface utile. Ces régions provoquent sur l'image déjà formée une traînée lumineuse dont l'axe est, dans le plan Pxy , normal à QN'' et qui s'affaiblit en s'éloignant de cette dernière droite. La traînée forme ainsi la queue ou chevelure d'une sorte de comète qui devient l'image astigmatique; c'est cette apparence que les auteurs allemands désignent sous le nom de *coma*.

64. Travail des surfaces dans les systèmes optiques. — Nous venons de considérer trois cas de production d'aberrations : faisceau émanant d'un point axial; faisceau issu d'un point quelconque avec deux variantes, suivant que la base du faisceau n'intéresse qu'une petite région d'une surface réfringente ou couvre totalement celle-ci.

Le premier cas concerne évidemment l'observation centrale par les instruments, et s'applique alors à toutes les surfaces des systèmes. Il faut, pour les deux autres, distinguer le caractère de ces surfaces au point de vue de leur mode de travail. Les unes travaillent sur toute leur ouverture efficace pour le faisceau utilisé émanant d'un radiant donné (ce sont, par exemple, les objectifs des lunettes astronomiques et des microscopes, les oculaires des lunettes de Galilée); les autres ne travaillent, pour le même pinceau, que dans une petite région qui se déplace en même temps que le radiant (telles les surfaces des oculaires astronomiques et terrestres, de l'objectif de la lunette de Galilée). Dans les objectifs photographiques doubles, les surfaces travaillent totalement ou presque, surtout pour les appareils ramassés; — le travail est partiel pour les objectifs simples diaphragmés à distance, et les objectifs triples quant aux surfaces des combinaisons postérieures.

65. Correction des aberrations. Formule de Goulier. — La correction des aberrations est un problème des plus délicats. Nous ne donnerons ici que des indications d'ordre général.

Dans le cas de l'observation axiale, le but poursuivi doit être de réduire à la valeur maximum admissible l'aberration latérale, c'est-à-dire de réaliser l'aplanétisme suivant l'axe.

Pour les objectifs photographiques, on a d'abord le choix entre deux palliatifs : diaphragmer ou employer des objectifs à long foyer ; car, *grosso modo*, la valeur de l'aberration latérale est de la forme $M \frac{u^3}{f^2}$, u étant l'ouverture et f la focale principale de l'appareil. Mais le choix de la focale est souvent imposé par des conditions d'emploi, et la fermeture du diaphragme est limitée par les effets de diffraction. La véritable réduction doit porter sur le facteur M qui met en jeu les positions relatives des surfaces des verres. Relativement aux instruments comportant objectif et oculaire, la question peut être scindée, chaque combinaison étant étudiée à part.

Pour les lunettes, le colonel Goulier (39) a énoncé la règle suivante : « On peut démontrer, par le calcul, que dans les lunettes de même qualité, c'est-à-dire exécutées avec la même perfection et ayant d'ailleurs la même clarté, les cercles de confusion ont le même rayon, ou, autrement dit, le défaut de netteté apparente des objets visés est le même quand le rapport de la longueur focale f de l'objectif au diamètre Ω de son ouverture efficace est proportionnel à la racine quatrième de la longueur focale. Si on détermine le

rapport de proportionnalité en admettant que pour $f = 300$ millimètres, $\Omega = 30$ millimètres, on trouve la formule suivante, dans laquelle f et Ω doivent être exprimés en millimètres :

$$\frac{f}{\Omega} = \frac{\sqrt[4]{f}}{0,42}.$$

... Toutefois, la formule ci-dessus suppose qu'on a adopté, pour les quatre surfaces des lentilles, les rayons de courbure les plus avantageux, et que les lentilles sont bien centrées. »

La relation de Goulier peut encore s'écrire :

$$\Omega = 0,42 \sqrt[4]{f^3} \quad \text{ou} \quad f = 0,318 \sqrt[3]{\Omega^4}$$

La forme en était connue au XVIII^e siècle (81) ; le coefficient seul paraît avoir été déterminé par Goulier. La formule ancienne concernait une lunette composée d'un objectif et d'un oculaire, tous deux simples. Nous ne pensons pas qu'on puisse la justifier, et, comme on l'a fait quelquefois, l'appliquer sans discussion pour la détermination des focales d'objectifs à deux verres d'ouvertures données. Goulier corrige d'ailleurs l'absolu de la formule en disant : « On admet que, pour les lunettes d'instruments bien exécutées, le rapport de l'ouverture à la longueur focale de l'objectif peut varier en général entre $\frac{1}{12}$ et $\frac{1}{10}$, et aller exceptionnellement à $\frac{1}{9}$. » La compétence de l'auteur est la garantie de cette remarque, au moins pour les appareils organisés, comme les longues-vues de modèle courant.

Dans les lunettes de Galilée, toujours peu puissantes

et d'organisation simple, l'aplanétisme général, — aussi bien central qu'oblique (nous ne reviendrons pas sur ce dernier), — est suffisamment obtenu en donnant à l'ouverture totale de l'objectif une valeur qui est en général le $\frac{1}{5}$; et atteint au plus le $\frac{1}{4}$ de sa focale.

La relation de Goulier, supposée exacte, ne devrait pas être, ici, appliquée, à l'ouverture totale Ω , mais seulement à l'ouverture utile Ω' ; celle-ci est, pour un radiant et son image situés à l'infini, égale à Ga environ, G étant le grossissement et a l'ouverture de la pupille. Les équations :

$$\Omega = \frac{1}{4} F, \quad \Omega' = Ga, \quad \Omega' = 0,42\sqrt[4]{F^2}$$

conduiraient alors à l'expression :

$$G = 1,19 \frac{1}{a} \sqrt[4]{\Omega^3}$$

indiquant le grossissement normal d'une lunette galiléique pour des ouvertures totales de l'objectif et de la pupille données. La pratique justifie assez bien cette conclusion.

Enfin, dans les objectifs de microscopes, la correction des aberrations est facilitée par l'existence de points aplanétiques dont la découverte appartient au botaniste Lister (6). Pour des radiants qui en occupent la place, les séries entières qui expriment les aberrations latérales des images ne commencent qu'au terme en u^4 , u étant l'ouverture du pinceau central. L'absence du terme en u^2 assure à l'aberration une valeur de minimum pratique.

66. — Dans les oculaires de types anciens, consti-

tués par une même espèce de verre, l'aplanétisme a été obtenu, à la suite d'essais pratiques basés, peut-être, sur des considérations théoriques générales, par une disposition et des formes convenables des éléments constituants. Les procédés de calcul des objectifs photographiques ont dû être employés dans l'étude des oculaires plus récents à lentilles composées.

67. Correction de l'astigmatisme. — Lorsque le faisceau incident émane d'un point situé en dehors de l'axe optique, la correction des aberrations doit consister d'abord dans la réduction de la différence astigmatique, puis dans l'atténuation du coma et la diminution de la zone diffusée.

C'est dans les objectifs photographiques que le problème se présente avec sa complexité maximum, et cela à cause de leur grande ouverture et de la forte inclinaison des faisceaux sur l'axe. Pour ceux qui sont très ouverts, ce n'est qu'à la suite de calculs pénibles et d'essais coûteux qu'on peut assurer l'aplanétisme général du champ.

Quand les prévisions ne sont pas réalisées, le jeu du diaphragme peut pallier les défauts de l'organe, mais au détriment de la clarté, jusqu'à l'apparition des taches de diffraction : la réduction de l'ouverture, sans changer l'astigmatisme, rétrécit la zone de diffusion et affaiblit le coma.

Pour les objectifs de lunettes, le défaut astigmatique est généralement peu accentué, souvent négligeable, à moins que le champ ne soit considérable. Dans ce dernier cas, le problème précédent se pose de nouveau ; sinon, la correction de l'astigmatisme est une conséquence de l'atténuation de l'aberration centrale.

Ce sont surtout les oculaires qui peuvent donner l'image astigmatique. Il n'y a, dans ce cas, que des faisceaux peu ouverts qui agissent; le coma est négligeable; toute la question se résume dans la réduction de l'astigmatisme. Le guide dans la recherche de la solution paraît être dans ce fait qu'un faisceau normal à une surface réfringente n'est pas astigmatique. Il est, par suite, vraisemblable que le défaut astigmatique s'atténuera si, pour chaque lentille, le faisceau tombe, à peu près normalement, sur sa surface moyenne. On pourra y arriver autant par la forme appropriée des faces du verre que par la position de la lentille relativement au diaphragme limitatif du faisceau. L'exemple le plus typique se rapporte, non à un oculaire, organe trop complexe, mais à l'objectif photographique simple : un aplanétisme général suffisant est obtenu à l'aide d'un ménisque concave vers l'objet et d'un diaphragme situé en avant de la lentille. Le diaphragme ne réduit aucun des intervalles des focales de Sturm; son rôle est uniquement de sélectionner les faisceaux incidents de manière à ne laisser tomber sur la surface que ceux auxquels cette dernière assure une homocentricité acceptable.

68. Aberrations sur-corrigées et sous-corrigées. — En étudiant séparément les aberrations des combinaisons — objectif et oculaire, par exemple — d'un système optique et de leurs éléments individuels, on peut arriver à discerner les formes générales les plus convenables à leur donner; la méthode est encore commode dans un exposé didactique. Il serait, cependant, désavantageux de l'utiliser dans ses lointaines conséquences.

Le problème, en effet, est uniquement de donner à l'image définitive une netteté déterminée. Il n'est pas nécessaire que les images intermédiaires possèdent le même caractère. En s'occupant à le leur donner, on restreint gratuitement les limites entre lesquelles on peut faire varier la forme ou la situation des verres constituants, pour satisfaire à la propriété demandée; on complique donc la question.

Si on se borne à réaliser la netteté exigée, seulement dans l'image définitive, les images antérieures pourront être plus nettes ou moins nettes que si elles possédaient la même séparation des détails que l'image dernière. Dans l'image antérieure en question, l'aberration sera dite, suivant le cas, *sur-correctée* ou *sous-correctée*.

Aberrations de réfrangibilité.

Achromatisme.

69. **Images solides chromatiques.** — Suivant la remarque antérieurement faite, les systèmes optiques que nous aurons à considérer seront supposés aplanétiques. Nous raisonnerons d'ailleurs, pour fixer les idées, sur un objet lumineux situé dans un plan normal à l'axe du système.

Un objet émettant des rayons non-monochromatiques, soit directement en temps que source, soit par suite de la nature de son éclaircissement, donne, à travers un système optique, autant d'images que la lumière incidente comporte de radiations. Les images seront situées dans des plans parallèles qui ne couperont pas l'axe au même point, et leur grandeur absolue variera

d'un plan à l'autre; en outre, elles pourront être incomplètes; car, par exemple, si une région de l'objet (point, détail ou aire étendue) n'envoie que de la lumière verte, l'image de cette région manquera dans tous les plans autres que celui qui répond à la radiation verte.

Si l'on pouvait ne percevoir qu'une seule de ces images, le seul défaut à relever serait l'infidélité de la représentation; mais l'élimination nécessaire à cet effet étant souvent irréalisable, la perception à travers le système s'accompagne en outre d'un défaut de netteté.

Un point émettant des radiations divers^s, au nombre de deux, R, V, pour abrég^{er} le discours, donnera deux images solides de couleurs différentes et

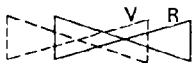


Fig. 11.

non superposées (fig. 11). En supposant la mise au point (par l'œil ou la plaque) effectuée au centre de l'une R, l'image reçue comportera une couronne V; et le diamètre de celle-ci pourra, suivant la distance des centres r , v , être supérieur au cercle de diffusion tolérée; en d'autres termes, les taches images provenant de deux points objets voisins pourraient se recouvrir plus que ne le comporte la netteté prévue pour l'instrument.

Laissons d'ailleurs de côté la modification apportée à la couleur R du point central par la tache V, et aussi les apparences de l'image quand la mise au point varie; mais signalons que, même si la tache totale est suffisamment restreinte, son aspect — cas de la lumière incidente blanche — produit à l'œil une impression désagréable, qui peut avoir une répercussion sur la netteté de perception.

70. **Achromatismes absolu et apparent.** — En thèse générale, la réalisation de l'achromatisme exige la superposition, point par point, des images colorées ultimes du système optique; elle nécessite donc d'abord la coïncidence des foyers conjugués de l'objet, qui amène celle des plans des images; ensuite l'égalité du grossissement de ces images, ce qui conduit à la superposition de leurs bords. Suivant la méthode et les expressions de Biot, on peut rattacher à ces deux conditions deux opérations concernant respectivement l'*achromatisme longitudinal* et l'*achromatisme latéral*.

A ce mode d'achromatisme, nous adjoindrons le qualificatif d'*absolu*. Euler (24, lettre 87) a le premier fait remarquer que cette sorte d'achromatisation, évidemment suffisante, n'était pas toujours nécessaire : quand « les dernières images représentées par la lunette sont tellement arrangées que la droite terminatrice, étant prolongée, passe précisément dans l'œil, alors l'œil verra par un seul rayon toutes les extrémités des images; et en général tous les points qui répondent à un même point de l'objet seront portés dans l'œil par un même rayon, et par conséquent ils y seront représentés distinctement ». Sous une autre forme, il suffira, pour que l'achromatisme soit réalisé, que les images colorées soient des perspectives de l'une d'elles, le point de vue étant unique; en plaçant l'œil à celui-ci, les images se projetant l'une sur l'autre donneront la sensation d'une image unique conservant les couleurs de l'objet; car, dit Biot, « l'œil tolère assez aisément les distances différentes des images, mais non leur défaut de direction (8). »

Ce genre d'achromatisme sera qualifié d'*appa-*

rent¹. Biot (8) donnait à la condition qui le concerne le nom de *dispersion rectiligne des foyers*.

71. **Achromatisme absolu.** — **Choix des radiations.** — L'achromatisme absolu est celui des objectifs photographiques, car la plaque sensible ne peut être traitée comme l'œil; il doit aussi être celui des objectifs de microscope, afin de rendre possible leur échange ainsi que celui des oculaires.

Remarquons d'abord qu'à *priori* on doit douter qu'il soit rigoureusement réalisable si, — tel le cas de la lumière solaire, — la lumière incidente comprend une infinité de radiations formant un ensemble continu; car on serait conduit à réduire en un plan unique tout l'espace compris entre les plans des images extrêmes. La pratique se contente de solutions approximatives; il suffit que l'achromatisme soit accompli pour deux ou trois radiations, quatre très exceptionnellement.

C'est de leur choix qu'il faut d'abord s'inquiéter; on les définit par les raies correspondantes du spectre solaire.

Quand il s'agit de systèmes ou d'éléments d'instruments pour lesquels l'œil entre seul en jeu, — objectifs de lunettes dans lesquels on tient à réaliser plus ou moins parfaitement l'achromatisme absolu, objectifs de faibles numéros pour microscopes, — il suffit d'assurer la coïncidence des images répondant aux radiations D et F, les plus agréables à l'œil: D(589,5 $\mu\mu$), raie jaune du sodium; F(486,1 $\mu\mu$), raie verte de l'hydrogène.

Pour les objectifs photographiques d'usage courant,

¹ Il est pratiquement réalisé dans la loupe simple. Goulier (39) lui donne le qualificatif de *latéral*.

le choix de deux radiations très réfrangibles, dans le bleu et le violet, serait acceptable; mais, alors, la mise au point sur l'image optique (jaune ou verte), la plus aisément perceptible à l'œil, laisserait en avant l'image actinique efficace pour la plaque sensible. En substituant alors cette dernière à la glace dépolie, l'image photographique serait trouble, à moins qu'on ne prît la précaution de déplacer d'une quantité convenable en avant le châssis de la chambre. On s'évite cette sujétion en assurant, dans la mesure du possible, la coïncidence des images optique et actinique, c'est-à-dire en réalisant l'achromatisme pour deux radiations assez éloignées : l'une est définie par la raie D; l'autre par la raie G'(434,1 μ) indigo de l'hydrogène, ou H(396,9) violette du cadmium.

Dès qu'on a affaire à des objectifs plus délicats, — objectifs de microscopes de grande puissance susceptibles d'être employés avec la lumière violette, photo-objectifs utilisés soit pour la production d'images destinées à la reproduction trichrome, soit avec des plaques panchromatiques, — on peut être amené à assurer la coïncidence de trois radiations assez distantes du spectre, telles que C (656,3 μ), raie α de l'hydrogène, F et G'; avec remplacement possible, suivant les cas, de C par D, ou de G' par la raie violette de mercure.

72. Achromatisation de deux couleurs. —

La seule coïncidence des foyers répondants à deux ou trois radiations, effectuée sans précautions, ne suffit pas toujours à assurer un achromatisme absolu, pas même un achromatisme longitudinal convenable.

Prenons, pour fixer les idées, le cas de la lumière blanche, et supposons qu'on ait réalisé l'achromatisme

pour deux couleurs J et B. On sait qu'on est obligé d'employer au moins deux verres inégalement réfringents; mais la plupart d'entre eux sont diversement dispersifs, c'est-à-dire que les spectres formés par des prismes de même angle ne comportent pas le même rapport des espaces diversement colorés; de sorte que la coïncidence des couleurs J et B n'assure pas celle des autres. Celles-ci forment alors un spectre secondaire qui altère la pureté des images.

On peut, au point de vue qualificatif, préciser davantage. Les foyers dus aux radiations J et B coïncident quand la différence des déviations des rayons est nulle, c'est-à-dire quand on a :

$$(J - B)\alpha + (J' - B')\beta = 0,$$

α , β étant les angles des prismes déterminés par les plans tangents aux points d'incidence des rayons sur les faces des deux verres.

La coïncidence d'une autre couleur, V par exemple, avec les deux précédentes exigerait que l'on eût :

$$(J - V)\alpha + (J' - V')\beta = 0,$$

et par suite :

$$\frac{J - B}{J - V} = \frac{J' - B'}{J' - V'}.$$

Le fait n'a pas lieu; en désignant par θ le rapport du premier membre de l'équation au second, les tables des indices des verres permettent de s'assurer que θ est différent de l'unité.

Quant à la déviation du rayon V par rapport au rayon J, elle est, dans les mêmes conditions d'approximation :

$$\Delta = (J - V)\alpha + (J' - V')\beta,$$

ou, en tenant compte des relations précédentes,

$$\Delta = (1 - \theta)(J - V)\alpha.$$

Suivant que θ sera plus grand ou plus petit que l'unité, le foyer des rayons V se trouvera d'un côté ou de l'autre de celui des rayons J et B réunis (Δ positif ou négatif).

73. Spectre secondaire. — Ces faits, bien connus de Clairaut, étudiés après lui par Boscowich, s'étendent, dans leur esprit, à un nombre quelconque de verres constituants. Le spectre secondaire subsiste. Il était à présumer que l'on devait arriver à le faire presque disparaître en employant deux combinaisons de même signe (toutes deux convergentes ou divergentes), dont l'une donnerait à θ une valeur supérieure à 1 et l'autre une valeur inférieure. En effet, dans ce cas, la déviation du rayon V aurait pour expression :

$$(1 - \theta)(J - V)\alpha + (1 - \theta_1)(J_1 - V_1)\alpha_1,$$

et pourrait être voisine de zéro, car les coefficients $1 - \theta$ et $1 - \theta_1$ des quantités de même signe $(J - V)\alpha$ et $(J_1 - V_1)\alpha_1$ seraient de signes contraires.

Malheureusement, dans les verres connus à l'époque, la dispersion croissait avec l'indice moyen; $1 - \theta$ avait un signe constant. Le D^r Blair (56) eut l'idée de constituer de pareils systèmes en employant des liquides, de compositions variées, contenus dans des lentilles en verre dont le seul rôle était dès lors de servir d'enveloppe. La réussite fut parfaite; mais la solution n'était pas pratique. Les verres obtenus vers 1840 par Guinand auraient conduit au même résultat (21) : leur prix de revient, trop élevé, fut un autre obstacle.

La maison Schott, d'Iéna, étant parvenue à la fabri-

cation courante de verres à indice élevé et à faible dispersion, Abbe réalisa, sous le nom d'*apochromatique*, un objectif de microscope dans lequel le spectre secondaire était éliminé. Basés sur le même principe, des objectifs photographiques apochromatiques furent construits par Steinheil, Zeiss, Harnack, Berthiot (25).

Les combinaisons à deux éléments, indiquées par Blair et réalisées avec des verres, ont reçu de Zeiss des noms qu'il nous suffira de signaler ici. Si des deux verres, celui qui a le plus fort indice possède la dispersion la plus grande, la combinaison est dite *normale*; c'est celle du crown et du flint des objectifs courants de lunette; sinon, elle est dite *anormale* ou *anormale*.

74. **Correction des aberrations chromatiques.** — Le calcul de l'achromatisme longitudinal est, devant le problème des aberrations sphériques, relativement simple. Pour deux couleurs, il suffit de remplacer, dans la première des équations du n° 72, α et β en fonction des éléments géométriques des lentilles. L'équation résultante ne contient que les premières puissances des rayons; on la résout assez aisément par une méthode d'approximation numérique.

Le seul point important est relatif à la précision exigée. La coïncidence des deux foyers ne peut être absolue; la figure 11 montre qu'il suffit que leur intervalle soit au plus égal à la demi longueur de l'image solide, car un plus grand éloignement réduirait la profondeur de l'image solide quasi-achromatique résultante; un intervalle plus faible n'aurait aucun intérêt, puisque nous supposons identique l'impression due à un point et à l'aire de la base de l'image.

Quant à l'achromatisme latéral, lorsqu'il n'est pas

suffisamment assuré par le précédent (notamment si le champ est considérable), sa réalisation comporte des calculs et des essais pénibles dont il ne peut être question maintenant.

Remarquons, au sujet de l'achromatisme absolu, qu'il semble étrange que, pour faire disparaître les spectres secondaires, on n'achromatise pas pour trois, quatre, etc., radiations. Mais, alors, on constituerait des systèmes trop complexes, onéreux et très absorbants.

75. **Achromatisme apparent.** — L'achromatisme apparent est celui des lunettes d'observation; il peut être obtenu presque rigoureusement, quel que soit le nombre de radiations, car il s'agit ici d'une propriété descriptive des images, et non d'une propriété métrique. Biot en a fait une étude approfondie. Si l'image objective est achromatique, il sera possible de constituer, avec une même espèce de verre, un oculaire, astronomique ou terrestre, qui assurera la dispersion rectiligne des foyers. Il faudra, en outre, que le point de concours, dit *point oculaire*, soit en dehors du système optique matériel et à une distance telle que le centre de la pupille apparente puisse s'y placer. Biot a montré que l'oculaire négatif d'Huygens remplissait ces conditions; mais qu'il n'en était pas ainsi de l'oculaire de la lunette galiléique, ni de l'oculaire de Ramsden. Ce dernier donne un point oculaire extérieur seulement lorsqu'il est approximativement achromatique.

Dans la pratique, il n'est pas indispensable que le point oculaire soit rigoureusement fixe; il suffit que les droites qui joignent les bords d'une image déterminée aux bords des autres coupent l'axe en des points suffisamment rapprochés. Les images, d'autre part, ne

doivent pas être trop éloignées les unes des autres ; il faut que l'œil soit accommodé sur leur ensemble ; mais, de ce côté, la marge est considérable.

Le calcul de l'achromatisme apparent est guidé par des équations assez maniables, mais des tâtonnements sont indispensables.

76. **Sous-corrrection et sur-corrrection.** — Les considérations exposées au § 68 s'appliquent, dans leur esprit, à l'achromatisme. Si un système doit être corrigé de cette aberration, il suffit que l'image dernière le soit ; les images intermédiaires peuvent être chromatiques ; les combinaisons partielles qui les produisent offrent deux caractères différents.

Admettons que le système total doive réunir les couleurs jaune et bleue. L'une des combinaisons pourra laisser le J au delà du B, elle sera dite *sous-achromatisée* ; l'autre, utilisée seule, ramènerait le jaune en deçà du B, plus qu'il ne faudrait pour l'achromatisme, elle est alors *sur-achromatisée*.

De même, dans les lunettes, l'image objective peut ne pas présenter l'achromatisme absolu ; il est possible d'en profiter pour réaliser plus parfaitement l'achromatisme apparent, qui seul importe. Toutefois, le chromatisme dû à l'objectif doit rester faible. « Quoique, en théorie, dit Biot (8), les conditions d'achromatisme ne soient indispensables à remplir que dans l'ensemble de l'appareil, on trouve beaucoup d'avantages à les introduire séparément dans le système objectif et dans le système oculaire. Car, non seulement elles s'obtiennent ainsi, dans l'un et dans l'autre, par des procédés divers qui deviennent plus faciles à réaliser isolément, mais il en résulte, en outre, la possibilité d'adopter successi-

vement au même objectif des oculaires divers qui donnent des grossissements angulaires de grandeurs différentes, sans que l'appareil total cesse de remplir les conditions générales de l'achromatisme, du moins aussi approximativement qu'il est nécessaire pour la netteté de la vision. »



CHAPITRE IV

DE LA CLARTÉ DES INSTRUMENTS

77. **Flux lumineux et notions qui en dérivent.**

— La notion primitive qu'on rencontre à la base de la photométrie est celle d'éclairement, — au sens vulgaire du mot, — d'une surface sur laquelle tombent les rayons d'une source lumineuse. L'œil, dans certaines conditions, apprécie assez bien l'égalité des éclairagements de deux surfaces voisines, et distingue, le cas échéant, le sens de leur différence. De cette constatation dérive la notion de l'intensité — ou puissance lumineuse — plus ou moins grande de la source.

Deux sources punctiformes identiques très voisines relativement à la distance d'observation constituent une source unique. Par une double convention, arbitraire, mais logique, cette dernière source est dite avoir une intensité double de chacune des composantes, et l'éclairement produit sur une surface quelconque est double de celui que produirait l'une des sources primitives, dans les mêmes conditions géométriques et physiques. Qui a lu Euclide peut alors parler de la proportionnalité des intensités des sources aux éclairagements qu'elles produisent, du rapport de deux éclairagements et du rapport de deux intensités.

L'éclairement produit par une source donnée sur une surface qui se déplace parallèlement à elle-même est, fait

expérimental, proportionnel à l'inverse du carré de la distance de la surface à la source ponctuelle. La forme de cette loi conduit, comme dans d'autres branches de la Physique, à la conception du flux et au principe de sa conservation, qui se lie à la notion de transparence du milieu acquise d'autre part.

La notion du *flux lumineux*, sans que celui-ci soit défini, peut être considérée dès lors comme la base unique de la photométrie. A cette grandeur physique, il suffira d'ajouter des grandeurs géométriques appropriées. Elle peut donner un sens à la *quantité de rayons* lumineux, sens analogue, non identique, à celui du nombre de lignes de force de Faraday.

Le flux Φ émanant d'une source punctiforme se répartit intégralement et uniformément sur les différentes sphères concentriques à la source, et se conserve dans des cônes issus de celle-ci. L'intensité I peut donc être mesurée comme le flux qui tombe sur l'aire découpée, sur l'une des sphères, par un cône dont l'angle solide est l'unité. Donc .

$$\Phi = I\sigma,$$

Φ étant le flux émis dans l'angle solide σ par une source ponctuelle d'intensité I .

Ce flux, se conservant dans l'angle solide, donne sur les diverses surfaces qu'il rencontre des *éclaircissements* E inversement proportionnels au carré de la distance, et par suite à l'aire S découpée, celle-ci étant supposée un corps opaque. De plus, la plupart, sinon tous, des corps naturels opaques possèdent cette propriété expérimentale, que, inclinés diversement sur un faisceau lumineux, ils produisent à l'œil un effet total identique. On peut donc poser dans tous les cas

$$\Phi = ES.$$

La première relation s'applique à un système de points lumineux isolés; elle doit être modifiée pour une source continue. Un élément superficiel d'aire s est l'origine

d'émission d'un flux qui part de son centre ; la partie de ce flux contenu dans l'angle solide unité autour de la normale à l'élément peut évaluer la puissance de cet élément s . La notion d'intensité, applicable au point isolé, se transforme ici en celle d'éclat e ; la puissance lumineuse de l'élément devient es , et on peut poser

$$\Phi = es\tau.$$

Il a été nécessaire d'envisager ici le flux suivant la normale à l'élément, car la puissance lumineuse, — l'œil le constate, — varie avec la direction du flux. La plupart des corps suivent la *loi de Lambert* : leur puissance est proportionnelle au cosinus de l'angle α formé par la direction du flux avec la normale à la surface. Donc, plus généralement,

$$\Phi = es\tau \cos \alpha.$$

Enfin une surface lumineuse d'aire totale S émet un flux total Φ . Le rayonnement *E' intrinsèque* de cette source est défini par

$$\Phi = E'S.$$

On l'appelle aussi son *éclairage*, en raison de la forme de cette relation.

78. Clarté absolue et clarté relative. — Le degré de visibilité d'un objet dépend de l'éclaircement, en valeur absolue, de son image rétinienne et du contraste qu'il présente avec le fond sur lequel il se détache. Il en est de même pour une image optique.

La règle s'applique aussi à l'image produite par l'objectif photographique : il suffit de substituer, dans l'énoncé, la plaque sensible à la rétine.

On peut donc distinguer, au moins didactiquement, une *clarté absolue* et une *clarté relative*. Dans les appareils où l'œil intervient, la première sera suffisamment définie par le rapport entre les éclaircissements rétiens

produits par l'image observée à travers l'instrument et par l'objet. Le même rapport sera utile dans l'étude de l'objectif photographique; mais il servira surtout à comparer les clartés de deux objectifs différents.

Quant à la clarté relative, il suffira généralement d'évaluer si le contraste avec le fond est plus ou moins grand pour l'image que pour l'objet, ou de déterminer les causes qui l'augmentent.

79. Égalité d'éclat de l'image et de l'objet.

— Une propriété intéressante est commune à tous les systèmes optiques : l'éclat de l'image a généralement la même valeur que celui de l'objet. Il s'agit, bien entendu, de systèmes parfaitement transparents : la question des pertes de lumière, — de flux, — sera étudiée ensuite.

Considérons (fig. 12) un système optique (S) dou-

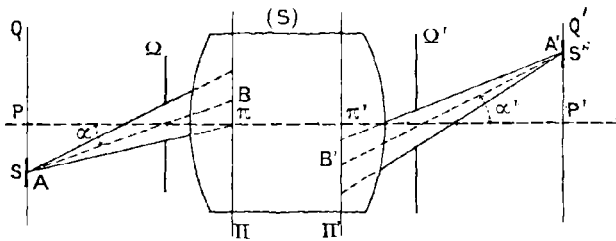


Fig. 12.

nant d'un plan Q , normal à son axe, une image plane Q' ; soient Ω et Ω' les ouvertures respectives d'entrée et de sortie. Le flux utile envoyé par le très petit élément s de Q , situé à une distance angulaire α de l'axe, a pour expression :

$$\Phi = es\tau \cos \alpha.$$

En prolongeant (51) le cône qui limite le flux jusqu'au premier plan principal II du système, sur lequel il découpe une aire ω , l'évaluation géométrique de l'angle solide σ transforme la relation précédente en :

$$\Phi = es \frac{\omega \cos \alpha}{D^2} \cos \alpha = es\omega \cos^2 \alpha \frac{\cos^2 \alpha}{p^2} = es\omega \frac{\cos^4 \alpha}{p^2},$$

$$\text{où} \quad D = AB \quad \text{et} \quad p = P\pi.$$

Le flux sortant, égal au précédent, a pour expression :

$$\Phi = e's'\omega \frac{\cos^4 \alpha'}{p'^2}.$$

Car, en vertu même de la définition des plans principaux, les aires découpées par les deux flux sont égales. Donc, on a :

$$e' = e \frac{s}{s'} \frac{\cos^4 \alpha}{\cos^4 \alpha'} \frac{p'^2}{p^2}.$$

Or on sait que, si n est l'indice du milieu antérieur par rapport au milieu postérieur, on a :

$$\frac{s}{s'} = \frac{p^2}{p'^2} \frac{1}{n^2},$$

$$\text{donc :} \quad e' = \frac{1}{n^2} \frac{\cos^4 \alpha}{\cos^4 \alpha'} e.$$

Dans le cas où les milieux extrêmes sont identiques, les deux éclats sont égaux quand l'élément considéré est très voisin de l'axe (vision centrale), ou lorsque, $\alpha' = \alpha$, le grossissement angulaire est voisin de l'unité (cas normal des objectifs photographiques pour paysages).

Il pourrait y avoir doute sur la validité de la démonstration quand (cas usuel des lunettes) les plans principaux sont à l'infini ; la continuité géométrique autorise

cependant l'extension légitime du résultat ; la proposition peut d'ailleurs s'établir directement.

80. **Anneau oculaire.** — L'étude de la clarté absolue des lunettes et des microscopes est facilitée par la considération du diaphragme apparent de sortie du système, qui porte dans ce cas le nom d'*anneau oculaire* ou de *cercle de Ramsden*. Dans les instruments habituels, cet anneau est l'image, sensiblement plane et de forme circulaire, de la surface antérieure utile de l'objectif. Le faisceau issu d'un point quelconque du champ de l'instrument et limité par l'ouverture utile passe, à l'émergence, dans l'anneau oculaire dont il couvre entièrement la surface.

Quand l'anneau oculaire, dit alors *réel*, est situé en dehors de l'instrument, au delà de la surface d'émergence, de manière que la pupille apparente puisse se disposer dans son plan, l'œil est susceptible, moyennant certains déplacements et dans des conditions particulières d'éclat intrinsèque de l'image, de recevoir tous les rayons émanant d'un point de l'image. Dans ce cas, les rayons émergent de la surface de sortie de l'appareil, en convergeant vers l'anneau oculaire pour diverger ensuite.

Lorsque l'anneau est *virtuel*, c'est-à-dire situé dans le corps de l'instrument, en avant de la surface d'émergence, l'œil ne saurait s'y placer. Les rayons sortent divergents du système, leurs prolongements géométriques seuls s'appuyant sur le cercle de Ramsden ; l'œil ne peut recevoir la totalité de ceux qui émanent d'un point de l'image, qu'autant que la pupille apparente est au moins égale à la section déterminée par son plan dans le faisceau émergent.

L'optique géométrique permet de déterminer aisément, dans chaque cas, la position et le diamètre de l'anneau oculaire. Nous en rappellerons trois résultats.

Les lunettes astronomiques ou terrestres, les télescopes sont généralement à anneau réel. Le diamètre a de celui-ci, en supposant l'objectif mince, est donné par la relation $\Omega = Ga$, dans laquelle Ω est l'ouverture utile de l'objectif et G le grossissement de l'instrument.

La même formule s'applique à la lunette de Galilée; mais, dans cette combinaison, l'anneau est virtuel.

Dans les microscopes, le cercle de Ramsden est réel, et son diamètre est donné par la relation :

$$a = \frac{2\omega\Delta}{G},$$

ω étant l'ouverture numérique de l'objectif, et Δ la distance de la vision (c'est-à-dire la distance de l'image à la pupille apparente).

81. Clarté des lunettes à anneau oculaire réel. — L'éclairement de l'image rétinienne, duquel dépend la clarté absolue d'un instrument où l'œil est intéressé, est proportionnel au flux reçu par l'œil. Le coefficient de proportionnalité est le même dans la vision directe et dans la vision instrumentale, dans les cas où nous nous plaçons : lunettes rejetant à l'infini l'image d'un objet à l'infini, microscopes réglés pour la distance minimum de la vision distincte. Il s'agit donc d'évaluer les flux reçus par l'œil dans les deux circonstances : directement, à travers l'instrument.

Nous considérerons d'abord les systèmes à anneau oculaire réel. L'œil aura tout intérêt à centrer sa

pupille apparente sur l'anneau ; il ne pourrait y avoir hésitation que si le cercle de Ramsden était plus petit que la pupille ; mais alors, quoique l'œil puisse recevoir, intégralement, pour diverses positions, les faisceaux émergents, il y a avantage à viser à la coïncidence indiquée, qui permet, sans variation de clarté, la tolérance maximum dans la position de l'œil.

Supposons le centrage effectué et examinons en premier lieu le cas des lunettes. Le flux direct est donné par $\Phi = k e p^2$, p étant l'ouverture pupillaire. Le flux reçu à travers l'instrument est :

$$\Phi' = k e' p^2, \quad \text{si } a > p,$$

$$\text{ou} \quad \Phi' = k e' a^2, \quad \text{si } a < p,$$

a étant le diamètre de l'anneau oculaire.

Pour une image centrale, $e' = e$, la clarté, rapport des deux flux Φ' à Φ , sera l'unité, si l'anneau oculaire est au moins aussi grand que la pupille ; l'image et l'objet paraîtront également éclairés ; la clarté sera diminuée dans le rapport de a^2 à p^2 , si la pupille est plus ouverte que l'anneau oculaire.

Pour une image non centrale, la clarté sera, dans tous les cas, encore réduite dans la proportion de $\cos^4 \alpha'$. Ce coefficient de réduction n'est pas toujours négligeable. Ainsi sur les bords du champ d'une lunette de grossissement 20 et de 2° de champ, on a sensiblement $\alpha' = 20^\circ$, et le coefficient en question est 0,78.

De cette discussion, il résulte que la valeur la plus convenable à donner au diamètre de l'anneau oculaire est celui de la pupille apparente ; mais, cette dernière s'ouvrant d'autant plus que l'objet est moins éclairé

ou moins lumineux, il s'ensuit que l'anneau devra être calculé pour les conditions d'éclairage les plus mauvaises, eu égard au rôle de l'instrument.

81 bis. **Grandeur théorique de l'anneau oculaire.** — Cette règle n'est cependant pas parfaite. L'œil, dans les conditions où nous l'avons placé, ne perçoit distinctement que les points situés à quelques minutes autour de l'axe du système, ceux qui forment l'image rétinienne sur la *macula lutea*. Le champ dans lequel se trouve l'image virtuelle, — dit *champ apparent*, — est beaucoup plus étendu; il peut atteindre 20° autour de l'axe. Or l'œil examine l'image comme un objet réel; il tourne rapidement autour de son centre de rotation. Ce mouvement presque instinctif doit être accompagné, afin que la pupille reste en coïncidence avec l'anneau oculaire, d'un déplacement, plus volontaire et par suite moins rapide, souvent en retard, de la tête de l'observateur. Quand toutes ces variations ne sont pas en concordance, la pupille ne reçoit plus que les rayons tombant sur l'aire, souvent faible, qu'elle a

de commun avec l'anneau oculaire. L'éclairement rétinien, et, par suite, la clarté de l'image dans la région observée, décroissent rapidement.

Il est facile de calculer le diamètre que devrait posséder l'anneau oculaire AA' (fig. 13) pour que la rotation de l'œil n'influe pas sur la clarté apparente des images.

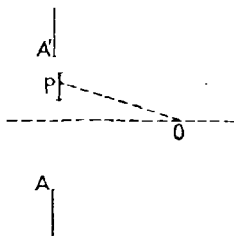


Fig. 13.

Si δ est la distance du centre de rotation O à la

pupille d'ouverture p , γ le champ réel de l'instrument, $\gamma' = G\gamma$ le champ apparent, la figure indique sans difficulté que l'on doit avoir :

$$a = \delta\gamma' + p = G\delta\gamma + p.$$

En adoptant les valeurs $\delta = 10^{\text{mm}}, 2$ et $p = 2^{\text{mm}}, 5$, cette formule donne, pour les caractéristiques suivantes très admissibles :

$$G = 16, \quad \gamma = 0,06; \quad a = 12^{\text{mm}}, 3.$$

$$G = 8, \quad \gamma = 0,08; \quad a = 9^{\text{mm}}.$$

Il est malheureusement impossible de satisfaire à ces exigences pour des instruments d'usage courant. Le premier demanderait un objectif de 20 centimètres d'ouverture et, par suite, de 2 mètres à 2^m,50 de focale; le second, — dont les données sont celles d'un corps de jumelle de campagne, — devrait avoir un objectif de 72 millimètres d'ouverture et près de 1 mètre de focale. Les conditions d'emploi, le prix de revient s'opposent à la réalisation de ces données.

Il sera avantageux de porter le diamètre de l'anneau oculaire au maximum possible, ne fût-ce que pour éviter à la pupille la nécessité d'un centrage trop pénible. Bien que l'œil se rende compte d'un défaut de concentricité, il lui est difficile de le corriger rapidement s'il ne perçoit pas une clarté suffisante. Or, avec un anneau oculaire de 2^{mm}, 5}, par exemple, un déplacement de la pupille de 0^{mm}, 5} fait perdre le huitième de la clarté de l'image centrale.

82. Clarté du microscope. — Dans le microscope, l'anneau oculaire est toujours plus faible que la pupille. Le rapport des clartés de l'image et de l'objet

est donc, pour les raisons développées au sujet des lunettes :

$$\frac{a^2}{p^2} = \frac{4\omega^2\Delta^2}{p^2G^2}.$$

En ouvrant la pupille à 4 millimètres, et supposant $\Delta = 250$ millimètres, le rapport ci-dessus deviendrait égal à l'unité, — anneau ouvert comme la pupille, — pour :

$$G = 125\omega.$$

Or ce grossissement est beaucoup plus faible que celui qui convient au pouvoir séparateur de l'objectif d'ouverture numérique ω .

Pratiquement, la clarté relative de l'image par rapport à l'objet est sans importance, car l'expérimentateur est, dans une large mesure, maître de l'éclairage.

83. Clarté dans les instruments à anneau oculaire virtuel. — Les phénomènes sont un peu différents quand l'anneau oculaire est virtuel. L'ensemble des faisceaux émergents couvre la pupille PP' , même à son maximum d'ouverture ; nous le supposons, d'abord ; il suffit pour cela que la surface de sortie S soit assez grande.

Tout faisceau incident tombant sur la surface utile Σ d'entrée émerge de façon que son prolongement géométrique couvre l'anneau oculaire AA' , mais ces faisceaux émergents sont diversement utilisés.

Menons le cône dont AA' et PP' sont des sections droites (fig. 14) ; soit O son sommet. Tout faisceau émergent dont le sommet Q sera dans l'angle AOA' atteindra la pupille entière en la débordant. En ne considérant que le cas où l'éclat de l'objet se conserve dans

l'image, ce qui est le cas des lunettes de Galilée, il en sera de même de l'éclaircissement rétinien, puisque, soit dans la vision directe, soit dans la vision instrumentale, la même ouverture de pupille est intéressée; par suite, pour tous les points de l'objet correspondants des points Q, la clarté de l'image sera égale à celle de l'objet.

Si le sommet Q' du faisceau émergent se trouve dans l'angle BOB', le faisceau entrera entièrement dans la pupille, en y découpant une aire d'autant plus faible

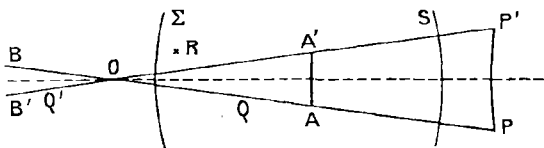


Fig. 14.

que le point Q' sera plus éloigné de O et plus rapproché de l'axe du système.

Quand enfin le sommet du faisceau sera en R, hors des deux angles précités, une partie excentrée de la pupille se trouvera en dehors du faisceau, et la portion atteinte par ce dernier se trouvera d'autant plus faible que le sommet R sera plus distant de l'axe et plus loin de l'anneau oculaire.

Dans ces deux cas, Q' et R, la clarté de l'image perçue par l'œil sera d'autant plus faible que l'aire intéressée de la pupille sera plus réduite.

Il suit de là que, pour un objet uniformément éclairé, si la mise au point se fait entre O et l'anneau oculaire, on percevra un cercle uniformément éclairé, entouré

d'une couronne dont l'éclairement décroîtra en s'éloignant du centre; si la mise au point a lieu au delà de O, la couronne extérieure présentera le même caractère; mais, dans ce cercle intérieur, l'intensité décroîtra en allant de la circonférence au centre.

La seule conséquence que nous en tirerons ici est que, le premier aspect étant évidemment meilleur, il sera utile de l'obtenir dans tous les cas, et par suite, rejetant O au moins à l'infini, de donner à l'anneau oculaire une ouverture au moins égale à celle de la pupille maximum.

Les mêmes apparences se présenteront si, contrairement à ce que nous avons admis, la pupille ne recevait pas entièrement le faisceau total émergent; mais en outre le champ entier serait uniformément assombri dans le rapport des aires de la pupille active et de la pupille totale. Il est donc indispensable que la surface de sortie ait une dimension suffisante, d'ailleurs aisée à déterminer.

Ces considérations seront appliquées plus loin à la lunette de Galilée.

84. Éclat des images ponctuelles. — Nous avons implicitement admis jusqu'ici que l'objet examiné était de dimensions finies; dans cette hypothèse, les phénomènes de diffraction n'ont qu'une influence, d'ailleurs négligeable, sur les bords de l'image. Il n'en est plus de même quand on regarde un point lumineux isolé, par exemple une étoile. Le cas doit être traité à part.

Une étoile, vue à l'œil nu, donne une image rétinienne de diamètre α , qui produit la sensation d'un point. L'éclairement de cette image est le rapport de $\Phi = kep^2$ à α^2 .

Le flux $ke\Omega^2$ reçu par la lunette, et que nous supposons intégralement transmis, se répartit suivant une loi connue sur la tache centrale et ses différents anneaux. Quand l'œil peut percevoir tout cet ensemble, — le fait dépend du grossissement de la lunette et de l'éclat intrinsèque de l'étoile, — il est difficile de préciser ce qu'on doit entendre par éclat de l'image. Admettons, comme corollaire plausible de la loi de Hooke, que ce soit l'éclairement spécifique moyen sur l'étendue Σ de la partie de l'image vue de l'œil sous l'angle de r' : cette hypothèse dispense de tenir compte de la valeur de α .

Le rayon σ , qui, sur l'image objective, correspond à la portion Σ de l'image virtuelle, est donné par la relation :

$$\sigma = \frac{60\Omega}{130G} \rho = u\rho.$$

Le flux réparti sur Σ est une fraction, $\Phi' = ke\Omega^2 B^2(u)$, du flux reçu ; B est une fonction connue (4).

Lorsque, — c'est le cas le plus commun, — la pupille est plus ouverte que l'anneau oculaire, ce flux pénètre entièrement dans l'œil, se répartissant sur l'image rétinienne α , le rapport des éclats de l'image et de l'objet est celui de Φ' à Φ , c'est-à-dire :

$$R = \left[\frac{\Omega}{\rho} B(u) \right]^2.$$

Si $u \geq 1$, et par suite si le grossissement est au plus égal au grossissement normal, $B(u)$ est sensiblement égal à l'unité ; l'image paraît alors plus brillante que l'étoile, car, en pratique, l'objectif Ω est plus

ouvert que la pupille. D'ailleurs, dans cette circonstance, la sensation rétinienne est ponctuelle.

A mesure que le grossissement augmente à partir de sa valeur normale, u et, par suite, $B(u)$ diminuent. Il en est, par suite, de même de l'éclat relatif R , qui peut, pour des grossissements élevés, devenir très inférieur à l'unité. L'expérience vérifie cette conclusion : les étoiles observées à l'aide de lunettes très grossissantes paraissent moins brillantes qu'à l'œil nu.

Les mêmes conclusions s'appliquent quand l'anneau oculaire est inférieur à la pupille ; mais alors R doit être multiplié par le rapport de p^2 à a^2 ; en conséquence, dans son expression, p doit être remplacé par a .

85. Clarté de l'objectif photographique. — L'évaluation de la clarté des photo-objectifs est une conséquence immédiate de la formule établie au n° 79, relative au flux entrant. Ce flux, se répartissant sur l'aire s' , donne à l'image un éclairement :

$$\begin{aligned} E' &= \frac{\Phi}{s'} = e \frac{s}{s'} \frac{\omega}{p^2} \cos^4 \alpha = e \frac{s}{s'} \frac{p'^2}{p^2} \frac{\omega}{p'^2} \cos^4 \alpha \\ &= e \frac{\omega}{p'^2} \frac{\cos^4 \alpha}{n^2}. \end{aligned}$$

Et comme, en général, $n = 1$, on a, en appelant Ω le diamètre de ω :

$$E' = \frac{1}{4} \pi e \left(\frac{\Omega}{p'} \right)^2 \cos^4 \alpha.$$

C'est l'éclairement E' qui détermine l'intensité de l'image photographique, et non l'éclat e' ; car l'impression lumineuse sur la plaque croît évidemment avec l'ouverture du cône de flux qui arrive sur un de ses points.

La qualité d'un objectif photographique, au point de vue de la clarté, dépend du coefficient de e dans l'expression ci-dessus. Pour la caractériser par un nombre unique, on a l'habitude de faire $\alpha = 0$ et $p = \infty$, c'est-à-dire de supposer un petit objet à l'infini, sur l'axe. La clarté est proportionnelle au carré du rapport de Ω à la focale principale

$$\Gamma = h \left(\frac{\Omega}{F} \right)^2.$$

On détermine h , dans l'usage courant, en supposant $\Gamma = h$ pour $\frac{\Omega}{F} = \frac{1}{10}$, d'où :

$$\Gamma = 100 \left(\frac{\Omega}{F} \right)^2.$$

La clarté d'un objectif photographique ne dépend que du rapport de son ouverture à sa focale. Cette propriété explique et justifie la désignation, adoptée par les constructeurs, de la qualité de l'objectif, par ce rapport, mis généralement sous la forme $\frac{1}{m}$. Mais il faut insister sur ce point que, si on prend pour F la focale principale, Ω doit être la section par le plan principal postérieur du cône de sortie tombant sur le foyer, et non l'ouverture réelle ou apparente du diaphragme.

86. Pertes par réflexion. — Aucun instrument n'étant parfait, le flux sortant est toujours, en réalité, plus faible que le flux entrant. La différence, perte dans le système, provient des réflexions sur les surfaces réfringentes, de l'absorption par les masses réfringentes dans leur traversée, de l'absorption et de la dif-

fusion par les surfaces réfléchissantes dont le poli n'est pas idéal, et enfin de la réfringence des surfaces qui doivent agir soit par réflexion totale, soit par réflexion partielle en proportion déterminée.

En décomposant virtuellement un faisceau de lumière naturelle en deux faisceaux polarisés à angle droit, Fresnel a pu évaluer la proportion ρ de lumière incidente réfléchie sous l'angle d'incidence i par une surface parfaitement transparente et polie :

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\operatorname{tg}^2(i-r)}{\operatorname{tg}^2(i+r)} \right],$$

Les hypothèses admises par Fresnel sont suffisamment justifiées pour le verre. La relation ci-dessus peut donc être adoptée.

Pour avoir une idée de la perte par réflexion, — que la formule permet d'ailleurs de calculer exactement dans tous les cas, — supposons l'indice du verre égal à 1,5 et considérons le faisceau incident, successivement dans l'air et dans le verre : soit d'abord $\sin i = n \sin r$, puis $\sin i = \frac{1}{n} \sin r$.

La proportion ρ de lumière réfléchie est, dans chaque cas, une fonction de l'angle d'incidence qu'on peut traduire par les courbes ci-contre (fig. 15) en coordonnées rectangulaires. La forme de ces courbes montre qu'il commence à être désavantageux d'avoir des angles d'incidence supérieurs à 35° sur le verre (traits pleins) et à 65° sur l'air (traits pointillés). C'est pour cette raison qu'on évite, dans la mesure du possible, de faire attaquer les surfaces des lentilles des lunettes sous des angles supérieurs à 30°. Jusqu'à cette limite, la perte

n'est guère plus sensible que sous l'incidence normale; mais elle croit ensuite très rapidement, surtout si le rayon doit passer dans l'air.

Certaines surfaces intérieures des objectifs photographiques doivent avoir, en vue de la correction des aberrations, des courbures qui n'admettraient pas tous les faisceaux sous des incidences assez faibles; et comme la perte de lumière s'opère, si faible que soit l'épaisseur de la lame d'air séparant deux lentilles, on se trouve obligé, malgré les inconvénients d'un

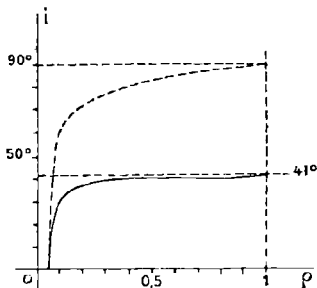


Fig. 15.

autre ordre qui en résultent, de coller les diverses lentilles d'une combinaison, c'est-à-dire de les réunir par un milieu d'indice voisin de ceux des verres.

87. Pertes par absorption. — La perte par absorption qu'éprouve un flux lumineux parallèle Φ est, par un principe acceptable, proportionnelle à Φ et à l'épaisseur traversée, lorsque celle-ci est infiniment petite. La traduction de cette proposition est l'équation différentielle

$$-d\Phi = k\Phi dx,$$

dont l'intégration donne pour le flux Φ' ayant traversé l'épaisseur finie u :

$$\Phi' = \Phi a^u,$$

a étant une constante d'absorption dépendant de la nature du milieu et de celle des radiations transmises.

Pour le crown et le flint ordinaires, a est voisin de 0,985 quand u est exprimé en centimètres (80). Pour les autres verres, il est très variable, et des indications sur ce sujet ne pourraient être utiles qu'à la condition d'être très détaillées.

88. Pertes par diffusion. — La perte par absorption des surfaces opaques imparfaitement polies ne peut être appréciée qu'expérimentalement. Il semble que, pour les métaux bien polis, on puisse admettre un taux de 10 %. Comme la réflexion spéculaire importe seule avec ces surfaces, il faut compter en outre la perte par diffusion, qui peut être évaluée à 40 % pour les miroirs métalliques, à 30 % pour les glaces en verre argentées ou étamées, et descendre à 5 % pour une couche argentée déposée sur une surface de verre poli, puis brunie et soigneusement polie. Mais ces nombres sont susceptibles de larges variations, en raison des dégradations accidentelles, difficiles à éviter en toutes circonstances, qui peuvent survenir au miroir : oxydation des métaux, désagrégation de la couche ou sulfuration de l'argent.

89. Pertes par réfraction. — Dans certains instruments, les prismes de verre, agissant par réflexion totale, remplacent avantageusement les miroirs à couche réfléchissante métallique. La perte de lumière, par l'action propre de la surface, est évitée ; subsiste celle due à l'absorption de réfringence. Mais le phénomène de la réflexion totale suppose la conservation absolue de la différence entre l'indice du verre et l'air environnant. Qu'un souffle de buée se dépose sur la surface, qu'une couche imperceptible de graisse s'étende sur elle, l'indice du milieu passe de la valeur 1 à la valeur de 1,33

(eau) ou 1,47 (glycérine, huiles), trop voisin des indices (1,49 à 1,60) des verres : seuls se réfléchissent alors les rayons très inclinés sur la surface, et non ceux pour lesquels le prisme était prévu. Ces derniers sont partiellement transmis; la formule de Fresnel permet d'en calculer la proportion; en tous cas, la clarté de l'image diminue, souvent considérablement.

Le même phénomène se présente avec les prismes à réflexion partielle.

90. Clarté relative; illumination du champ.

— Une image ne pourrait être perçue si, avec la même coloration, elle présentait même clarté que le fond. Toute cause qui éloignera de l'unité le rapport de ces éclaircissements fera croître la clarté relative.

Si, à l'éclaircissement normal de l'image et du fond, on superpose, dans un instrument quelconque, une illumination générale du champ, la clarté relative diminuera. Le système optique peut y contribuer de lui-même par son organisation; en plus (fig. 16) de

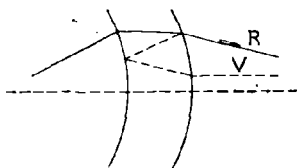


Fig. 16.

l'image normale due uniquement à la réfraction R, il peut s'en former une ou plusieurs autres à la suite de réflexions V, au nombre de deux au moins, la seconde ayant lieu sur une surface antérieure à la première. Sans doute, ni l'œil ni la plaque, suivant le cas, ne sont nécessairement au point sur cette image; mais les rayons qui la constituent n'en continuent pas moins leur route pour impressionner plus ou moins confusément l'or-

gane récepteur. Cette apparence constitue la *tache centrale des objectifs photographiques*. On l'évite, avec ces systèmes, en reportant en avant des différentes surfaces actives les surfaces apparentes de sortie, — images du diaphragme, — correspondant aux divers modes de réflexions et de réfractions combinés, c'est-à-dire en rendant ces surfaces apparentes virtuelles. On ne peut y parvenir d'ailleurs que par un choix convenable des rayons des verres.

L'illumination peut provenir des objets situés en dehors du champ : les rayons qui en émanent n'arrivent pas directement sur l'organe récepteur ; mais ils peuvent y parvenir, plus ou moins affaiblis, à la suite de réflexions sur les parois intérieures de la monture de l'instrument ou sur les poussières déposées sur les verres (sur la surface d'entrée, principalement). On arrête ces rayons nuisibles en munissant les instruments de pare-soleils (lunettes et photo-objectifs), qui abritent surtout la surface d'entrée, en noircissant soigneusement et au ton mat toutes les surfaces intérieures non actives, et, dans les appareils longs (lunettes et microscopes), en disposant des diaphragmes spéciaux, — dits *de clarté*, — pour arrêter les rayons réfléchis ou diffusés par les parois intérieures.

Au même ordre d'idées se rapporte l'emploi d'œilletons, d'œilères ou de bonnettes d'oculaire, de protecteurs mobiles ou non pour l'œil, dont le rôle est d'éviter l'illumination directe du champ rétinien par les objets extérieurs à l'instrument. Le noircissage mat des œillets de lunettes s'impose, lorsqu'ils n'emboîtent pas l'œil ; sinon les réflexions sur leur surface occasionnent une perte de clarté relative, souvent considérable.

91. Variation du contraste avec le champ.

— La clarté relative, quand on passe de la vision directe à la vision instrumentale, ne peut augmenter que lorsque s'affaiblit la clarté du fond sur lequel se détache l'image, si l'objet est plus éclairé que le fond ; quand l'objet est plus sombre que le tableau, tout affaiblissement de clarté de celui-ci entraîne une perte de clarté relative. Il ne saurait d'ailleurs être question d'agir sur la clarté absolue de l'image, qu'on est maître seulement de diminuer.

Par suite de la réduction de leur champ, les lunettes montrent les objets très lumineux mieux éclairés qu'à l'œil nu.

Une étoile, objet punctiforme, possède le même éclat à l'œil nu ou à l'œil armé d'une lunette de grossissement inférieur au grossissement normal. A l'œil nu, le champ rétinien acquiert un éclaircissement qui provient d'une région angulaire α d'éclaircissement moyen ε autour de l'étoile. Il est difficile de préciser cette valeur de α , tant à cause de la mobilité de l'œil que de l'ignorance des circonstances exactes qui amènent une partie du flux émis sur la tache diffractée ; mais α doit être assez grand, comme on le verra ci-dessous. A travers l'instrument, l'éclaircissement ε se conserve ; mais le fond actif se restreint à une valeur angulaire au plus égale à la moitié du champ γ de l'appareil. Le rapport des clartés relatives est donc :

$$\rho = \frac{G^2 e}{e} : \frac{1}{4} \frac{\varepsilon \gamma^2}{\varepsilon \alpha^2} = \frac{4G^2 \alpha^2}{\gamma^2}.$$

Que 2α soit considérable envers γ , le fait est connu : en observant, en plein jour, le ciel à travers un long tuyau

($G = 1$), on peut distinguer les étoiles; donc $\rho > 1$, et $2\alpha > \gamma$. Il s'ensuit que ρ sera d'autant plus éloigné de l'unité que le grossissement G sera plus élevé.

Il peut cependant être nécessaire de modifier cette conclusion quand la pupille est plus ouverte que l'anneau oculaire, et, surtout, quand le grossissement G devient trop grand. On utilisera, le cas échéant, la même méthode, en tenant compte des considérations développées antérieurement (84).

Lorsqu'il s'agit, non d'une étoile, mais d'un objet de diamètre apparent sensible, les éclaircissements de l'objet et du fond se conservent; si alors, ω est la grandeur apparente de l'objet à l'œil nu, on a :

$$\rho = \frac{G^2 \omega^2}{\omega^2} : \frac{\frac{1}{4} \varepsilon \gamma^2}{\varepsilon \alpha^2} = \frac{4G^2 \alpha^2}{\gamma^2}.$$

Identique à la précédente, cette formule comporte les mêmes conclusions.

92. Remarques générales sur la clarté des instruments. — De l'étude qui précède, il ressort que la clarté relative des instruments dépend, surtout, de leur organisation mécanique. Quant à leur clarté absolue, elle peut être caractérisée assez simplement, si toutefois on veut bien tenir compte des conditions spéciales dans lesquelles l'évaluation a lieu. Le diamètre de l'anneau oculaire, quand il est réel, donne une idée assez juste de la clarté de l'instrument; c'est l'aire de ce cercle que les constructeurs indiquent à cet effet. Si l'anneau est virtuel, l'ouverture de la surface réelle de sortie doit être suffisante; toute autre condition est inutile. Enfin, pour l'objectif photographique, le taux

du travail, — rapport de l'ouverture efficace à la focale, — est une donnée qui suffit dans bien des circonstances.

Il faut cependant, dans tous les cas, que les pertes de clarté par absorption ou par réflexions inutiles soient négligeables; l'examen ne justifie pas toujours cette hypothèse, et qui se baserait uniquement sur l'ouverture de l'anneau oculaire pour apprécier la clarté d'une lunette pourrait se tromper grossièrement.

Enfin, une remarque doit être faite ici au sujet de l'objectif photographique. Il y a pour lui deux sortes de clartés : la clarté *visuelle* ou *optique*, due aux radiations jaune et verte, les plus sensibles à l'œil; et la clarté *actinique*, qui provient des rayons plus réfrangibles. Elles ne sont pas proportionnelles. Tel objectif donnant une image très claire à l'œil pourra être médiocre comme rapidité d'exposition. La plupart des verres, non tous, absorbent proportionnellement plus de lumière bleue que de lumière jaune; les flints qui jaunissent ou se tachent n'altèrent guère l'image visuelle, et, pourtant, affaiblissent l'effet actinique. Aussi faut-il n'accepter que sous réserves les essais photométriques d'objectifs photographiques, où l'œil seul intervient dans les conditions habituelles de la vision.

CHAPITRE V

DU CHAMP DES INSTRUMENTS

93. **Limitation du champ; diaphragmes.** — Tout instrument est constitué par des éléments optiques (lentilles, miroirs, prismes) centrés sur un même axe. Les conditions optiques, mécaniques, économiques, tenant à l'emploi prévu de l'appareil imposent, entre certaines limites, à ces éléments des dimensions, des formes et des intervalles.

Un faisceau (fig. 17) qui a traversé intégralement une partie A du système peut, dans sa route ultérieure, venir passer en dehors d'un élément subséquent E. Le faisceau est dès lors arrêté, et le point P correspondant à l'image P''' est en dehors du champ réel.

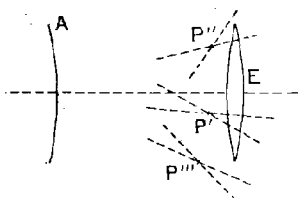


Fig. 17.

Quand le faisceau réfracté de sommet P' tombe intégralement sur l'élément, et qu'il possède le même caractère dans le reste du système, le point conjugué P

est évidemment dans le champ réel : on ne peut exiger, *a priori*, d'autre condition à remplir.

Enfin, si dans son parcours le faisceau, tel celui qui a son sommet en P'' , ne tombe que partiellement sur un ou plusieurs éléments E , le point objet correspondant pourra être aperçu par l'organe récepteur ; mais tous ces points formeront, autour du champ de visibilité maximum, une zone, en général étroite, où la clarté sera moindre et en outre très variable. On évite l'aspect désagréable de cette zone en la supprimant ; on arrête systématiquement, à l'aide de diaphragmes, tous les faisceaux, tels que P'' , qui n'atteignent pas totalement tous les éléments optiques du système.

Ces diaphragmes, dit *de champ*, — car ils limitent matériellement celui-ci, — ne peuvent être disposés que dans les plans où se forment des images réelles. Un seul suffirait dans chaque instrument ; il est prudent d'en placer, cependant, à chaque image réelle. Leurs ouvertures doivent être dans un rapport convenable, déterminé par ce fait qu'elles sont des images les unes des autres. En dehors de ces diaphragmes, le champ peut être encore borné par les diaphragmes *de limitation*, ouvertures des verres comprises. Les diaphragmes de clarté n'ont aucune influence sur l'amplitude du champ.

94. Champ réel ; champ apparent. — Le *champ réel* est la région de l'espace, supposé invariablement lié à l'instrument, dans laquelle se trouvent les objets perçus par le système optique ; on donne le nom de *champ apparent* à la région dans laquelle se forment les images.

Le champ angulaire apparent Γ d'un instrument de

grossissement angulaire G est évidemment lié au champ angulaire réel γ par la relation¹ :

$$\Gamma = G\gamma.$$

La considération du champ apparent facilite l'étude de certaines questions; en outre, dans les appareils à oculaire, sa valeur caractérise assez exactement la qualité optique de l'oculaire.

On l'appelle souvent encore champ *amplifié*: la relation précédente explique cette dénomination.

95. **Amplitude du champ en fonction des diaphragmes.** — La présence de diaphragmes de

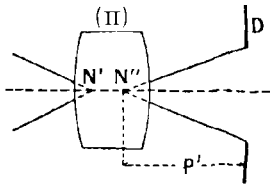


Fig. 18.

champ suppose au moins une image réelle. C'est le cas des lunettes astronomiques ou terrestres et des microscopes. D'une manière générale (fig. 18), quelle que soit la portion (π) du système total (S) qui donne l'image dans le plan du dia-

phragme D d'ouverture δ , le champ réel γ est sensiblement déterminé par (1)

$$\gamma = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\delta}{2p'}, \quad (1)$$

N' et N'' étant les points nodaux.

¹ Nous employons, en maintes circonstances, des formules approchées. On rétablira aisément les formules plus exactes. Ici les champs sont supposés faibles. Sinon, on aurait, avec un grossissement constant, et les champs mesurés en fractions du cercle :

$$\Gamma = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(G \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right).$$

Il est donc variable avec la distance du point objet. Dans les lunettes, le champ est évalué pour un objet à l'infini; donc $p' = F$, focale principale de (π) . Si, de plus, l'objectif est mince, que l'on considère la première image réelle et si l'angle γ est assez faible, on obtient la relation approchée¹ :

$$\gamma = \frac{\delta}{F}, \quad (2)$$

F étant la focale de l'objectif, dans lequel les points nodaux sont confondus avec le centre optique.

Lorsqu'on connaît l'ouverture δ' du diaphragme d'une autre image réelle, on pourra soit calculer F et appliquer la formule générale, soit construire l'image de δ' à travers les verres placés entre δ' et l'objectif (verre de champ dans la lunette astronomique avec oculaire d'Huygens, véhicule et verre de champ dans la longue-vue terrestre); l'ouverture de cette image sera δ , et la dernière formule écrite s'appliquera.

La formule (1) devra être utilisée pour le microscope; des considérations géométriques simples détermineront ensuite le champ linéaire, quand le champ angulaire sera connu.

Le champ apparent se calcule par la formule

$$\Gamma = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\delta}{2p''},$$

p'' étant la distance du diaphragme au point nodal d'émergence de la partie arrière (π') du système total.

Il peut être parfois plus simple de calculer le champ

¹ On aurait une formule plus exacte en considérant les ouvertures apparentes d'entrée et de sortie; mais celle-ci est, en général, suffisante.

apparent, et d'en déduire ensuite le champ réel : ainsi dans une lunette astronomique avec oculaire négatif, si le verre d'œil, supposé mince, a une focale f' , on aura :

$$\Gamma = \frac{\delta}{f'}, \quad \gamma = -\frac{\delta}{Gf'}$$

Dans tous les instruments à diaphragmes de champ effectifs, l'uniformité de clarté des champs sera réalisée dans la mesure du possible ; en d'autres termes, si le champ réel est uniformément éclairé, il en sera de même du champ apparent.

95 bis. — Soient, maintenant, D un diaphragme de limitation et (fig. 19) D' son image par rapport au système partiel antérieur (S') ; si Ω , ω sont respectivement l'ouverture de la première surface Σ du système et celle de D' , le champ possible est évidemment donné par la relation très approchée (Σ est supposée plane) :

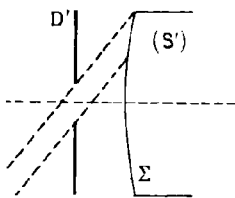


Fig. 19.

$$\gamma = \pm \frac{\Omega}{\delta} - \frac{\omega}{\delta}, \quad (1)$$

δ étant l'intervalle de D' à Σ .

Cette relation concerne des objets situés à l'infini (faisceaux parallèles) ; elle est aisée à généraliser. Le signe du second membre doit être choisi de façon que γ soit positif.

Si on établit les relations analogues pour tous les diaphragmes, y compris les ouvertures des verres, — ou plus rigoureusement pour toutes les sections droites

transparentes de l'instrument, — on obtiendra un certain nombre de valeurs telles que γ (théoriquement, une infinité ; pratiquement, quelques-unes). La plus faible d'entre elles donnera la valeur du champ réel.

Si dans la relation (1) ci-dessus, le signe $+$ s'impose, Σ ne travaillera, pour chaque faisceau, que sur une partie convenable de son étendue ; sinon, tous les faisceaux utiles atteindront la surface entière de Σ , mais passeront par des régions diverses de D' .

Lorsqu'au lieu de Σ , on considère la surface de sortie, et que les images des diaphragmes sont formées relativement à la partie postérieure du système, les formules telles que (1) se rapportent au champ apparent.

La formule (1) concerne le champ d'égalité de clarté, celui des points P' de la figure 17. Le champ total des points P' et P'' est donné par

$$\gamma' = \frac{\Omega + \omega}{\delta}. \quad (2)$$

96. Champ de la lunette de Galilée. — Dans un instrument ne donnant aucune image réelle, la limitation du champ résulte exclusivement de celles des surfaces réfringentes ; on ne saurait annuler cette zone, entourant le champ de clarté maximum, que, ailleurs, le diaphragme de champ fait disparaître.

Considéré comme formant un ensemble avec l'œil, un instrument de cette espèce comporte comme diaphragme de limitation la pupille. Les formules indiquées ci-dessus s'appliquent à ces systèmes. Pour eux, le champ total comprend donc un champ de *pleine lumière* et un champ d'*éclairage variable*. Le premier,

seul véritablement utilisable, pourra être comparé au champ des appareils de même emploi, mais à diaphragmes réels; le second ne sera guère employé que comme champ de recherche, et non d'observation.

On obtient des résultats simples pour la lunette de Galilée, qui fait partie de cette classe d'instruments.

Nous supposons (fig. 20) l'objectif Ω et l'oculaire ω

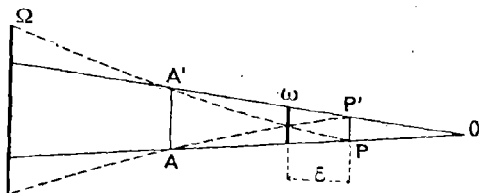


Fig. 20.

infinitement minces et leurs foyers en coïncidence; comme il s'agit en outre de la vision à l'infini, nous admettrons que le point O est en arrière de l'oculaire (83), ce qui revient à supposer $a > p$ ($AA' > PP'$).

Tout point situé dans l'angle AOA' appartient au champ amplifié Γ de pleine lumière. Donc, en supposant les angles faibles,

$$\Gamma_0 = \frac{a - p}{\eta + \varepsilon} = \frac{[\Omega - Gp] G}{G^2\varepsilon + (G - 1) F},$$

$$\text{car } \frac{1}{\eta} = \frac{1}{F - f} = \frac{1}{f} \quad \text{et } Ga = \Omega, \quad F = Gf$$

Le champ réel correspondant sera donc :

$$\gamma_0 = \frac{\Omega - Gp}{G^2\varepsilon + (G - 1) F}.$$

Ce champ, où la clarté de l'image se conserve

(83), croît avec l'ouverture Ω de l'objectif et diminue quand la pupille s'ouvre. A remarquer que, dans les lunettes ordinaires, le champ est constant.

Pour qu'un point en dehors du champ apparent Γ_0 envoie quelque rayon à la pupille, il suffit qu'il soit dans l'angle du cône s'appuyant sur AA' et sur PP' et de sommet intérieur. Le champ amplifié total Γ peut donc s'exprimer par :

$$\Gamma = \frac{a + p}{\eta + \varepsilon} = \frac{[\Omega + Gp]G}{G^2\varepsilon + (G - 1)F},$$

et par suite le champ réel total est :

$$\gamma = \frac{\Omega + Gp}{G^2\varepsilon + (G - 1)F}.$$

Ce champ total, champ intégral de recherche, augmente avec l'ouverture de l'objectif et de la pupille. Cette remarque est à retenir dans l'emploi de la lunette de Galilée comme instrument de découverte.

Il y a intérêt à considérer le rapport du champ de pleine lumière au champ total. Son expression est :

$$\rho = \frac{\Omega - Gp}{\Omega + Gp}.$$

Ce rapport ne peut être égal à l'unité ; par suite, la zone d'éclairement variable existe toujours, et croît à mesure que le champ réel est moins éclairé, et qu'en outre le grossissement s'élève. Quant à la clarté de la zone, elle décroît progressivement en allant du bord intérieur au bord extérieur.

97. Champ de l'objectif photographique. — Le champ de l'objectif photographique est limité par les mêmes causes que celui des autres systèmes optiques ;

mais comme, sauf certaines combinaisons spéciales, le photo-objectif ne donne qu'une seule image réelle, il n'y a pas à proprement parler de diaphragme de champ; seul mériterait ce nom le châssis ou l'intermédiaire qui porte la plaque sensible. Les diaphragmes dont sont munis les objectifs sont des diaphragmes de limitation.

Le champ, matériellement limité par eux ou par les montures des verres, acquerrait des valeurs considérables, surtout dans les objectifs ramassés suivant l'axe, si des conditions de clarté et de netteté des images n'obligeaient à le restreindre de parti pris. La question de la clarté a déjà été suffisamment traitée; celle de la netteté est commune à tous les systèmes optiques.

98. **Champ net; courbure du champ.** — Il ne suffit pas, pour qu'un point puisse être considéré comme faisant partie du champ réel d'un instrument, que son image reçoive intégralement le flux incident. Il faut, plus encore, qu'elle possède une netteté suffisante.

Nous considérons d'abord un système optique, — tel un objectif photographique ou de lunette, — donnant une image réelle. L'objet étant un plan P , normal à l'axe, son image, nous l'exigeons, doit présenter le même caractère.

Le système (S) (fig. 21), étant aplanétique, donnera en général une image P' courbe, lieu des points géométriques images des points du plan P . *Aplanir* P' est une opération difficile qui complique, parfois outre mesure, le système (S); on peut lui conserver une certaine courbure grâce à la tolérance de l'organe récepteur, — œil ou plaque. Considérons l'image physique π

d'un point quelconque de P ; ses bases envelopperont deux surfaces π et π' , coupant l'axe en p et p' , et com-

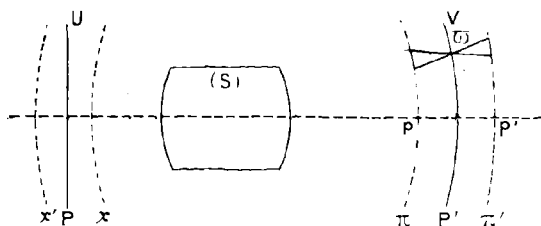


Fig. 21.

prenant entre elles un solide géométrique V , dit *volume de netteté*. Un plan Q (fig. 22), situé entre p et p' , sera coupé par π' suivant un cercle contenu dans V et sur l'étendue duquel l'image aura toute la netteté désirable. Ce cercle déterminera, pour la mise au point Q , l'étendue du champ apparent, si d'ailleurs, ce que nous supposons, le système (S) transmet intégralement les faisceaux incidents correspondants. Le champ, maximum quand Q sera tangent à π , deviendra nul lorsque le plan passera par p' ; en q , il aura une valeur intermédiaire, mais avec cet avantage que celle-ci subsistera pour toute position de Q entre p et q . Il y aura donc, dans ce cas, une tolérance de mise au point. Cette tolérance est d'ailleurs indispensable;

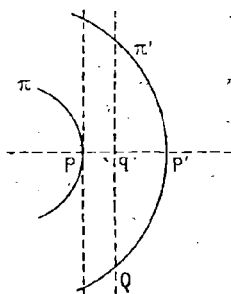


Fig. 22.

aussi doit-on arriver à une planéité suffisante de ces surfaces π et π' , presque parallèles à P' , de façon que la valeur prévue pour le champ reste acquise pour une variation convenable de mise au point.

Les aberrations ont pour effet de transformer l'image solide conique en image à cercle de gorge; sa longueur diminue, les surfaces π et π' se rapprochent; mais les conclusions précédentes subsistent.

Quand on suppose le plan objet P à l'infini, le volume V est dit alors *volume focal*, et son épaisseur pp' suivant l'axe est la *profondeur de foyer*.

99. **Effet des diaphragmes de limitation sur l'amplitude du champ net.** — L'épaisseur du volume de netteté est à peu près partout égale à la longueur de l'image solide. Cette dernière longueur, puisque les bases du solide sont de grandeur constante, dépend de l'aberration, diamètre du cercle de gorge, et de l'ouverture angulaire de l'image, c'est-à-dire de celle du faisceau qui la forme. En fermant le diaphragme, on réduit l'ouverture du faisceau et aussi les aberrations. Tant que la diffraction reste inférieure à l'aberration, l'image solide s'allonge à la suite de la manœuvre du diaphragme, et, par suite, le champ s'agrandit ou la profondeur de foyer augmente. Ces conséquences sont bien connues des photographes.

100. **Profondeur de champ; profondeur de foyer.** — L'image (fig. 21), à travers (S), du volume V , focal ou de netteté, est un volume U compris entre deux surfaces plus ou moins planes χ et χ' , situées de part et d'autre de P . Elles délimitent, pour la mise au point P' , le champ en profondeur. Leur intervalle P , suivant l'axe dit *profondeur de champ*, est donné en

fonction de la profondeur p de foyer par les relations approximatives équivalentes :

$$P = \frac{pF^2}{(D' - F) - \frac{p^2}{4}}, \quad P = \frac{pF^2(D - F)}{F^2 - \frac{p^2}{4}(D - F)},$$

D et D' étant les distances des plans P et P' à leurs points nodaux respectifs, et F la focale du système. Quand $D = \infty$, ou $D' = F$, la formule est inapplicable. La profondeur de champ est alors infinie, et sa surface la plus voisine est à une distance D_0 du point nodal antérieur donnée par

$$D_0 = \frac{F(2F - p)}{p} = \frac{2F^2}{p}.$$

Un objectif rigoureusement aplanétique, ouvert à $\frac{1}{\mu}$, possède une profondeur de foyer égale à

$$p = 0,0002 \mu \quad (p \text{ en mètres})$$

en admettant la netteté à 0,1 millimètre.

Pour $\mu = 10$ et $F = 30$ centimètres, on a

$$D_0 = 900 \text{ mètres.}$$

Si le diamètre du cercle de gorge est de 0,01 millimètre, on obtient aisément :

$$p = 2 (0,0001 - 0,00001) \eta = 0,00018 \mu,$$

et par suite dans les mêmes conditions :

$$D_0 = 1000 \text{ mètres.}$$

101. Champ net des lunettes. — Que les images soient réelles ou virtuelles, les considérations développées aux §§ 98 à 100 s'appliquent à tous les systèmes optiques ; mais elles sont plus délicates à mettre en

œuvre dans les lunettes qui rejettent l'image à l'infini, car ce dernier symbole est moins maniable en physique qu'en mathématique.

Répartissons en deux groupes les éléments optiques d'une lunette (fig. 23). L'un (S) comprendra, par exemple, l'objectif et, s'il y a lieu, quelques lentilles de l'oculaire ; l'autre (S'), les verres restants. Le point A

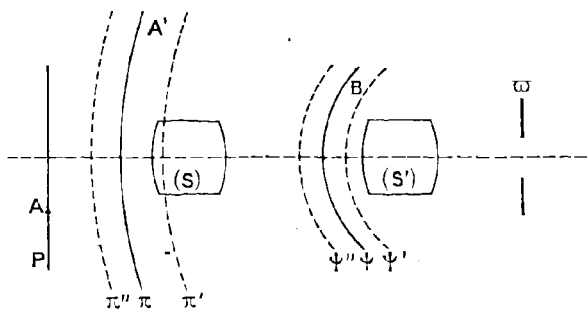


Fig. 23.

du plan objet P donne une image virtuelle en A', image ponctuelle, en supposant le système total aplanétique. L'œil, reçoit le faisceau de sommet A' et s'appuyant sur la pupille apparente ω .

L'œil, accommodé sur un plan ou une sphère telle que π , le sera également dans toute la région comprise entre les surfaces de même nature π' et π'' qui limitent, en la circonstance, la profondeur du champ de l'œil. La position de A' entre les plans limites sera donc indifférente.

Pour éliminer la considération du passage direct à l'infini de ces divers éléments, formons les images B,

ψ , ψ' , ψ'' de A' , π , π' , π'' à travers le système (S'); et remarquons que B n'est autre que l'image de A à travers (S), ou plutôt le sommet de l'image physique A'' .

Si cette image, lieu de A'' , était rigoureusement plane et de plus géométriquement ponctuelle (image physique de longueur nulle), les surfaces ψ' et ψ'' joueraient vis-à-vis de (S'), en ce qui concerne le champ possible de ce système partiel, le rôle des surfaces π et π' du § 98.

Si, le lieu du sommet de A'' étant un plan, l'image physique a une longueur δ , les surfaces ψ' et ψ'' devront être remplacées par des surfaces, extérieures et sensiblement parallèles à elles, à une distance δ .

Enfin, quand le lieu de A'' sera une surface courbe, c'est cette dernière qui remplacera, avec ses variations possibles de forme, le plan de mise au point considéré au § 98 précité.

Lorsque l'œil est accommodé pour l'infini, vision normale, π s'y transporte, et son image ψ devient la surface focale de (S'); on peut alors faire coïncider π'' et π , et par suite ψ'' et ψ , si l'on ne tient pas à user de la faculté que possède l'œil d'utiliser des faisceaux légèrement divergents; π' se dispose à 25 mètres environ de l'œil, et son image ψ' devient, par définition, la *surface hyperfocale* de (S').

102. — L'œil est supposé, jusqu'ici, conserver son accommodation. La souplesse de cette dernière permet d'espacer encore les surfaces π et π' , et par suite ψ et ψ' , en prenant pour π' celle qui répond à la distance minimum de la vision distincte, 250 millimètres environ. C'est souvent à la surface ψ' correspondante qu'on réserve le qualificatif d'*hyperfocale*. Lorsqu'on

utilise tout ce volume focal du système (S'), une certaine région du champ est vue distinctement par l'œil au repos ; dans l'autre partie, l'organe doit successivement s'accommoder afin que la vision soit nette. Il s'ensuit une certaine gêne, qu'il est utile d'éviter quand on le peut.

103. — Les considérations développées ci-dessus (101-102) sont générales ; elles ne visent aucun groupement spécial de verres. En pratique, il est avantageux de constituer les systèmes (S) et (S') de manière que le premier donne des images réelles, et, plus particulièrement, de le réduire à l'objectif. Dans ce dernier cas, (S') étant l'oculaire, les surfaces focale et hyperfocale s'y rapportent, et le volume compris entre eux est le *volume focal de l'oculaire* ; il est en relation étroite avec le champ apparent, dont la grandeur caractérise la qualité de cette partie de l'instrument.

104. **Mise au point variable et profondeur du champ.** — Les deux surfaces π et π' , qui, dans un système quelconque, limitent le volume de netteté, permettent de placer le plan P' de mise au point dont l'aire de netteté est maximum. Il n'y a pas lieu de chercher autre chose quand l'image doit être reçue par une plaque sensible ; mais si elle doit être observée par l'œil, il peut y avoir intérêt, après avoir examiné l'image nette formée sur P', à déplacer la mise au point en P'', par exemple¹, pour explorer la région mn $m'n'$, qui devient nette. Le champ total, limité par mn ,

¹ Se reporter à la figure 22. -- Marquer sur cette figure un point P'', à gauche de P', et mener, perpendiculairement à PP', une droite coupant les deux courbes π et π' respectivement en m , m' et en n , n' .

s'élargit dans cette opération ; mais la netteté n'apparaissant que successivement, suivant la région de l'image, on dit que le *champ* est *courbe*.

Dans les appareils, où l'un des systèmes partiels est mobile par rapport à l'autre (oculaire des lunettes se déplaçant par rapport à l'objectif, ou verre d'œil par rapport au restant de l'oculaire), cette variation de mise au point est obtenue, sans différence d'accommodation de l'œil, par le déplacement relatif des systèmes ; alors (fig. 23), si l'image due à (S) est nette sur une étendue assez grande, ses différentes régions peuvent entrer dans le volume de netteté de (S'), que ce dernier système entraîne avec lui. La courbure du champ peut tenir à l'un ou à l'autre des systèmes. Si (S) est un objectif de lunette ou de microscope, la courbure du champ, quand elle existe, doit être généralement attribuée à l'oculaire.

CHAPITRE VI

DE LA FIDÉLITÉ DES IMAGES ; DISTORSION ; ORTHOSCOPIE

105. **Cause de la distorsion.** — L'image d'un objet plan, normal à l'axe d'un système, est, nous le supposons, dans un autre plan parallèle au premier. Le système qui la fournit est achromatique. Dans ces conditions, la fidélité de l'image n'exige que sa similitude géométrique avec l'objet.

Quand cette propriété fait défaut, on dit que l'image présente de la *distorsion*.

La distorsion est une conséquence immédiate des aberrations de sphéricité.

Soit D le diaphragme matériel efficace de limitation (supposé réduit à un plan géométrique) pour un système optique (fig. 24) composé de deux systèmes partiels (S') et (S''), dont l'un pourra d'ailleurs disparaître sans que la théorie soit modifiée.

Un faisceau réel, φ , limité effectivement par D , sera virtuellement limité à son entrée par l'ouverture apparente D' et à sa sortie par l'ouverture apparente D'' , images respectives de D à travers (S') et (S''). Mais, si

D est un plan géométrique, il n'en est pas de même de D' et de D''.

L'ouverture D', par exemple, est, pour le faisceau φ , le lieu des images a' des points a d'intersection du faisceau par le plan D; l'image a' étant formée par le rayon, le pinceau qui, dans le faisceau φ , passe par le point a .

Dans ces conditions, D' pourrait être courbe; mais

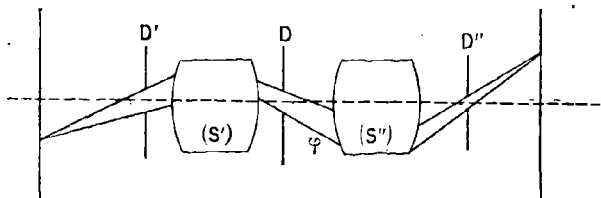


Fig. 24.

elle est une surface géométrique. Nous la supposons plane, admettant pour les systèmes partiels la planéité accordée au système total.

Quand on envisagera un faisceau autre que φ , l'image D', lieu des mêmes points a , se déplacera, à cause des aberrations, parce que le pinceau qui formera l'image de a , changeant d'inclinaison, tombera sur des régions différentes des surfaces du système (S').

L'image — sans autre spécification — de D par rapport à (S') est cet ensemble continu de plans, et par suite un petit solide cylindrique dont la hauteur, dirigée suivant l'axe, est finie : son existence est la conséquence de l'aberration de sphéricité.

Une autre conséquence de cette aberration est la suivante : soient α , α' , α'' les angles respectifs, avec l'axe,

des pinceaux centraux respectifs des faisceaux réfracté φ , incident et émergent. En général, ni $\text{tg } \alpha'$, ni $\text{tg } \alpha''$ ne sont proportionnels à $\text{tg } \alpha$. Il s'ensuit que le rapport de $\text{tg } \alpha''$ à $\text{tg } \alpha'$ est une fonction u de l'angle α .

Cela constaté, la fig. 25, qui est la reproduction géo-

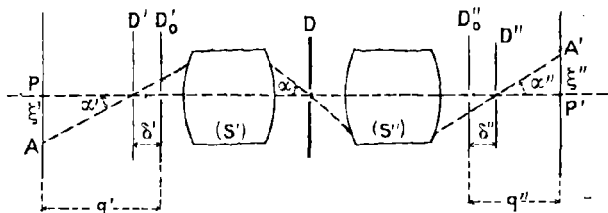


Fig. 25.

métrique de la précédente, donne aisément la relation :

$$\xi'' = \xi' \frac{u(q'' - \delta'')}{q' - \delta'}.$$

La proportionnalité de ξ'' à ξ' , qui est la condition de l'*orthoscopie*, exigerait donc que les trois fonctions u , δ' et δ'' de l'angle α fussent liées entre elles par une relation telle que :

$$k(q' - \delta') = u(q'' - \delta''),$$

k étant une certaine constante, qui n'est autre que le grossissement linéaire axial.

106. Distorsion nodale. — On peut, dans l'étude de la distorsion, substituer au grossissement central et aux ouvertures apparentes tels autres éléments géométriques qui paraîtront, suivant les circonstances, plus accessibles. En particulier, la considération des points nodaux offre un certain intérêt.

Supposons que, le diaphragme D s'ouvrant suffisamment, l'image A' du point A demeure un point physique. Il y aura alors deux rayons conjugués, un dans chaque faisceau (incident et émergent), et parallèles, qui couperont l'axe aux points nodaux N' et N'' répondant à l'angle α . A cause des aberrations, ces points seront distincts des nœuds centraux N'_0 et N''_0 que détermine la valeur nulle de α .

La géométrie donne alors sur la fig. 26 :

$$\xi'' = \xi' \frac{s'' + \varepsilon''}{s' + \varepsilon'}$$

La variation de position des ouvertures apparentes n'intervient plus, ce qu'explique l'élargissement des

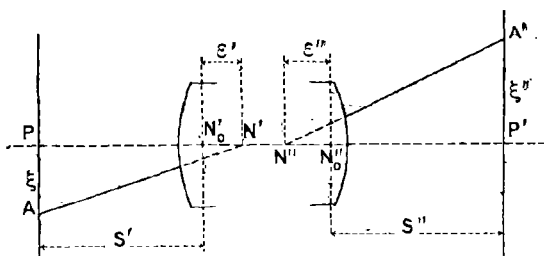


Fig. 26.

faisceaux. La cause directe de la distorsion paraît être la variation de position des points nodaux avec l'incidence des faisceaux. On a donné à ce mode de déformation des images le nom de *distorsion nodale*. Les hypothèses qui la concernent sont assez bien réalisées dans les objectifs de lunettes et les objectifs photographiques doubles travaillant à grande ouverture.

107. **Distorsion locale.** — Si l'on considère

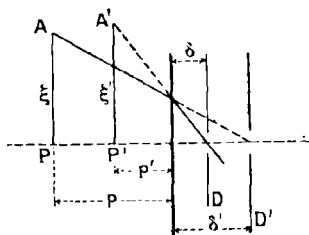


Fig. 27.

(fig. 27) une lentille infiniment mince étroitement diaphragmée en D, le faisceau incident, émané du point objet A, qui donne le faisceau émergent utile passant en D, a pour axe la droite joignant le point A au centre de l'image D' de D par rapport à la lentille. On a ici :

$$\xi' = \xi \frac{\delta'(p' + \delta)}{\delta(p + \delta')},$$

ou

$$\xi' = \xi \frac{\delta(p' + \delta')}{\delta'(p + \delta)},$$

suivant que le diaphragme est en arrière ou en avant de la lentille.

δ' étant variable, ξ' n'est pas proportionnel à ξ ; l'image présente donc de la distorsion. Caractérisée par la seule grandeur δ' , et par suite par la hauteur h du point sur lequel tombe le rayon axial du faisceau incident, on peut donner à cette déformation le nom de *distorsion locale*. C'est elle qui entre en jeu dans les diverses lentilles des oculaires, dans les objectifs photographiques simples.

108. **Formes des images distordues.** — Les considérations qui conduisent aux notions de distorsion nodale et de distorsion locale ne sont pas suffisamment précises pour qu'il y ait intérêt à utiliser les conséquences éloignées des formules qui leur correspondent.

La forme simple de ces dernières peut cependant rendre d'utiles services dans l'explication qualitative des phénomènes.

La relation générale et rigoureuse établie plus haut (105) doit en général leur être préférée; elle est parfois aussi maniable. Nous l'utiliserons d'abord pour la distinction des deux formes types des images distordues.

En se reportant à la figure et aux notations du § 105, considérons (fig. 28) une droite objet (M) perpendiculaire au plan du tableau et à l'axe du système, et à une distance h de celui-ci.

L'image de (M) à travers (S) est le lieu (M') des points A', images des divers points A de la droite; elle est dans un

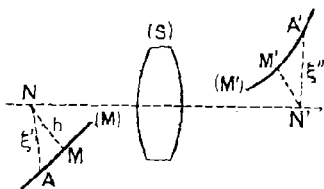


Fig. 28.

plan normal à l'axe en N', image de N. On a, pour déterminer les points A', la relation :

$$\xi'' = \xi' \frac{u(q'' - \delta'')}{q' - z'}.$$

D'ailleurs ξ' , ξ'' et l'axe sont dans un même plan.

Si le coefficient de ξ' dans la relation précédente était

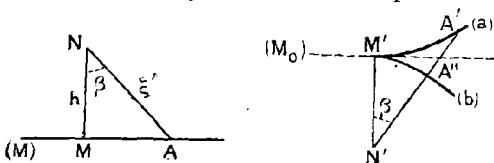


Fig. 29.

une constante, les images A'' de A (fig. 29) seraient

sur une droite (M_0) perpendiculaire à $M'N'$. Mais ce coefficient est, on l'a remarqué, une fonction de α , et on peut écrire la relation précédente :

$$\xi'' = \xi' \varphi(\alpha).$$

On tire aisément de cette relation, en désignant $N'A''$ par ξ_0'' :

$$\xi'' - \xi_0'' = \xi_0'' [\varphi(\alpha) - \varphi(\alpha_0)].$$

L'angle α varie avec β , et croît généralement avec lui. Si $\varphi(\alpha) > \varphi(\alpha_0)$, $\xi'' - \xi_0'' > \xi_0''$, c'est-à-dire que $A''A'$ sera positif, et A' se tiendra toujours au-dessus de la droite $M'A''$, et on aura, comme figure de MA , l'apparence (a); si, au contraire, $\varphi(\alpha) < \varphi(\alpha_0)$, on obtiendra l'apparence (b).

En considérant (fig. 30) un carré centré (c) sur l'axe, son image aura, suivant les circonstances, la forme (a) ou la forme (b).

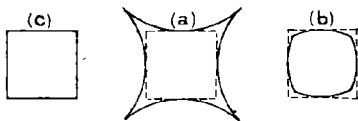


Fig. 30.

Dans le premier cas, on dit que la distorsion est en *croissant*;

dans le second, qu'elle est en *barillet* ou en *tonneau*. Si, au lieu d'un carré, on considère des cercles, à l'équidistance ε , centrés sur l'axe, la distance ε' entre les images de deux cercles de rayons ρ et $\rho + \varepsilon$ aura pour expression :

$$\varepsilon' = \varepsilon \varphi(\alpha_0) + (\rho + \varepsilon) [\varphi(\alpha) - \varphi(\alpha_0)].$$

L'intervalle des cercles images ira donc en augmentant, à mesure qu'on s'éloignera du centre du champ, lorsque la distorsion sera en croissant; elle diminuera dans la distorsion en barillet.

109. **Distorsion dans les lunettes et les microscopes.** — Dans les lunettes observant à grande distance et rejetant au loin l'image, la formule générale du § 105 se simplifie; δ' et δ'' ont en général des valeurs finies et très petites. La relation en question, puisque q' et q'' sont infinis, se réduit alors à :

$$\xi'' = u\xi';$$

le coefficient u de distorsion n'est autre que le grossissement linéaire.

En passant au grossissement angulaire G , on a :

$$u = GG_0^{-2},$$

G_0 étant le grossissement angulaire central. La constance de u , caractère de l'absence de distorsion, entraîne l'invariabilité du grossissement G .

Dans les microscopes, si leur construction annule δ' et δ'' , la disparition de la distorsion est liée aussi à la constance du grossissement angulaire ou linéaire. Mais, comme l'image se forme à distance finie, il est indispensable, pour qu'elle paraisse sans déformation, que l'œil se dispose au cercle oculaire C (fig. 31); sinon, l'œil, étant par exemple en arrière, voit un point image A' sous l'angle v' , différent de v , et c'est celui-ci seulement qui est déterminé en fonction de l'angle correspondant au point objet, de façon à assurer la constance du grossissement. C'est pour cette raison que le centre de l'anneau oculaire a reçu le nom de *point orthoscopique*.

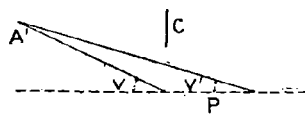


Fig. 31.

110. Correction de la distorsion. — La correction de la distorsion exige que l'on ait identiquement :

$$u_0(q' - \delta') - u(q'' - \delta'') = 0, .$$

quel que soit α , u_0 étant le grossissement linéaire central.

Il est, en général, impossible de satisfaire rigoureusement à cette identité. On se contente le plus souvent d'assurer l'égalité à zéro du premier membre de cette équation pour une, ou quelquefois deux valeurs de α , convenablement choisies dans le champ. C'est dans ce sens qu'on dit que la distorsion est annulée pour ces valeurs du champ : le grossissement linéaire y est alors égal au grossissement central. Si, en outre, on a pu réaliser, dans ces cas, la nullité de δ'' , le centre de la surface de sortie est point orthoscopique pour les mêmes valeurs du champ.

Les notions relativement simples de distorsion nodale de distorsion locale peuvent être utilisées dans une première approximation.

Toutes choses égales d'ailleurs, la distorsion change de forme avec le sens de déplacement des points nodaux par rapport aux nœuds centraux : les formules établies plus haut le montrent sans difficulté. En mettant l'un à la suite de l'autre deux systèmes identiques ou à peu près, mais symétriques par rapport à un plan normal à leur axe, la distorsion produite par l'ensemble sera, sinon annulée, du moins sensiblement réduite. C'est l'une des raisons de succès des objectifs symétriques doubles.

Quant à la distorsion locale, elle change de sens quand le diaphragme se porte d'un côté ou de l'autre

de la lentille, quand l'objet, de réel, devient virtuel, quand la lentille convergente est remplacée par un élément divergent. Ces simples remarques permettront, non de calculer, mais de se faire une idée de la façon dont on pourra réduire simplement la distorsion. L'une d'elles est utilisée dans l'objectif symétrique double cité ci-dessus : le diaphragme, postérieur pour la combinaison d'avant, est antérieur à l'autre.

On pourra, à l'aide des remarques précédentes, se rendre compte de la forme de la distorsion, en observant que la loupe (lentille convergente) donne à l'œil (pupille-diaphragme en arrière) une image distordue en croissant d'un objet réel.

III. Distorsion et grossissement dans la loupe.

— La distorsion est à éviter dans les instruments optiques. Elle est pourtant utilisée, involontairement, dans la loupe à lire.

La Physique élémentaire apprend que le grossissement d'une loupe est maximum quand l'œil y est appliqué le plus près possible. La pratique montre, sans contestation aucune, le contraire : lorsqu'on lit à la loupe, les caractères paraissent d'autant plus grands que l'œil est plus éloigné de l'instrument. La distorsion locale en donne une explication suffisante, à condition de ne pas attribuer une trop grande importance aux formules.

La loupe L (fig. 32) donnera à l'œil dont la pupille est en P une image virtuelle circulaire d'une petite circonférence, de rayon ρ , telle que ab . Le faisceau incident passera par l'image P' de P répondant à l'inclinaison de ce faisceau.

Désignons par ϵ l'aberration longitudinale de P' : elle place ce point entre la lentille et le foyer conjugué principal de P . En supposant, pour simplifier les calculs, que ab se trouve dans le plan focal de la loupe, la figure et l'équa-

tion des foyers conjugués centraux des lentilles minces conduisent à la relation :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\rho}{p} \frac{pf - \varepsilon(p - f)}{f^2 - \varepsilon(p - f)}.$$

Si $p = 0$, on sait que :

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\rho}{f}.$$

Si $p = mf$, avec $m > 1$, la formule donne :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{mf - (m - 1)\varepsilon}{mf - m(m - 1)\varepsilon} \operatorname{tg} \alpha_0.$$

α est donc toujours supérieur à α_0 , d'autant plus que m est

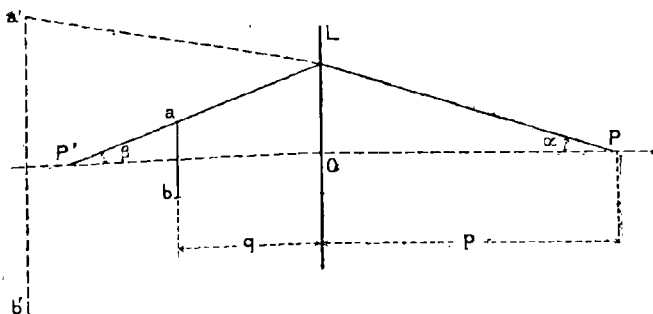


Fig. 32.

plus grand, c'est-à-dire que l'œil est plus loin de la lentille, — au delà d'ailleurs du foyer principal.

La distorsion se manifeste d'ailleurs parce que ε dépend de α , par suite de ρ .

Ajoutons que c'est aux dépens de la netteté qu'on obtient le grossissement en question ; mais tant qu'elle reste suffisante pour distinguer aisément les caractères d'imprimerie, il peut y avoir avantage à sacrifier la finesse des images. Il en serait autrement de la loupe de l'horloger : c'est à elle que s'applique la théorie classique.

CHAPITRE VII

DES IMAGES DANS LES INSTRUMENTS BINOCULAIRES

112. — La vision simultanée par les deux yeux est aidée, on le sait, par l'emploi de systèmes optiques spécialement appropriés. Pour l'observation à grande distance, les instruments en question, dénommés *jumelles*, sont constitués par deux lunettes donnant des images droites (longues-vues terrestres ou lunettes de Galilée), placées parallèlement et à l'écartement des yeux de l'observateur.

Nous supposerons ici les deux systèmes partiels identiques, et chacun d'eux réduit à deux lentilles infiniment minces, l'objectif O et l'oculaire ω ; on admettra en outre la coïncidence des centres optiques de l'œil et de l'oculaire correspondant. Cette organisation schématique simplifiera l'étude des instruments, et les formules en cause resteront suffisamment exactes pour les conclusions, d'ordre surtout qualitatif, que nous en tirerons. Les principes évoqués permettraient d'ailleurs, le cas échéant, de faire des calculs plus exacts, tout aussi élémentaires, mais plus prolixes.

113. **Superposition théorique des images.**

— Les axes des deux lunettes constituant la jumelle seront d'abord supposés parallèles.

Un point M (fig. 33) du plan des axes donne les deux images N et N', une dans chaque système partiel. Leurs positions sont données par les relations aisées à établir géométriquement :

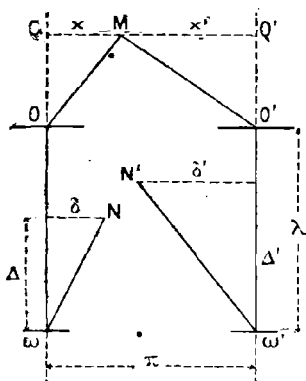


Fig. 33.

$$\delta = x \frac{F}{f} \frac{\Delta + f}{D - F},$$

$$\delta' = x' \frac{F'}{f'} \frac{\Delta' + f'}{D' - F'},$$

avec $x + x' = \pi$.

Quant à Δ et Δ' , elles sont déterminées par les valeurs λ et λ' des longueurs des lunettes, distances que l'observateur a cru devoir mettre entre les objectifs et les oculaires correspondants :

$$\lambda = \frac{F + f + Ff \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{D} \right)}{\left(1 - \frac{F}{D} \right) \left(1 + \frac{f}{\Delta} \right)} = D - F + \frac{\Delta f}{\Delta + f},$$

λ' s'en déduit en remplaçant, dans le second membre de la relation, Δ par Δ' .

Ces relations supposent l'objectif et l'oculaire, de focales respectives F et f , tous deux convergents. Quand (lunette de Galilée) l'oculaire est divergent, on doit attribuer à f un signe négatif dans la dernière

fraction de l'expression δ , et dans la formule qui donne λ .

Remarquons en outre que, la lunette ne renversant pas les images, ωN est du même côté de l'axe que OM , ou, en d'autres termes, que x et δ ont même signe (l'origine de ces abscisses étant sur l'axe ωO).

S'il était nécessaire que la vision de l'image s'effectuât dans les mêmes conditions que celle d'un objet, la coïncidence des points N et N' devrait être assurée. On aurait donc par suite :

$$\Delta = \Delta' = \frac{Df}{F} - 2f.$$

En appelant G le grossissement théorique de la lunette, donné par $F = Gf$, et négligeant $2f$ dans le second membre de l'équation précédente, celle-ci devient :

$$\Delta = \Delta' = \frac{D}{G}. \quad (a)$$

Cette relation est d'ailleurs rigoureuse, le calcul le prouve, pour la lunette de Galilée.

La longueur correspondante commune aux deux corps de la jumelle est donnée par la formule :

$$\lambda = D \left(\frac{F}{D-F} + \frac{f}{D+f} \right).$$

La condition (a) étant indépendante de x , la coïncidence assurée pour les images du point M l'est aussi pour celles des points de la droite QQ' ; un calcul élémentaire montrerait qu'il en est de même pour tous les points du plan passant par M et normal aux axes de l'instrument.

Donc, dans la vision binoculaire à l'aide d'un instrument de grossissement théorique G , tout se passe

comme si l'objet était ramené à une distance G fois plus faible et observé alors directement.

114. Superposition physique des images.

— La théorie de la vision binoculaire instrumentale ne saurait s'arrêter à cette constatation, car elle supposerait une précision infinie dans le réglage des longueurs des lunettes. Grâce aux propriétés de l'œil, la superposition des images se maintiendra sans que la coïncidence des points correspondants soit réalisée. Et d'abord, la perception visuelle resterait unique, si la coïncidence des points N et N' , au lieu d'être assurée géométriquement, ne l'était que physiquement, c'est-à-dire si les angles $N\omega N'$ et $N\omega' N'$ étaient tous deux inférieurs à l'acuité visuelle ($1'$ environ). Cette condition, soumise au calcul, exige, dans les cas usuels, un réglage, à quelques microns près, de la différence des longueurs des lunettes.

On pourrait encore demander que l'un des systèmes partiels étant réglé à la longueur λ , l'autre amenât l'image N' dans le champ de profondeur de l'œil mis au point sur N , et à une distance angulaire de ce dernier point au plus égale à une minute. Dans ces conditions, λ' devrait être égal à λ , à quelques centièmes de millimètre près.

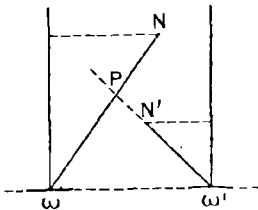


Fig. 34.

Ces exigences sont inutiles. L'œil placé en ω ne voit que l'image N , l'œil situé en ω' n'aperçoit que N' . Les lignes visuelles convergeront vers P (fig. 34) à l'intersection de ωN et de $\omega' N'$.

C'est en ce point qu'apparaîtra l'image unique de M, si toutefois chaque image N ou N' est dans le champ de profondeur de l'œil mis au point en P.

La différence maximum des longueurs des deux lunettes est :

$$\begin{aligned} L = \lambda - \lambda' &= f \left(\frac{\Delta}{\Delta + f} - \frac{\Delta'}{\Delta' + f} \right) \\ &= f^2 \frac{\Delta - \Delta'}{(\Delta + f)(\Delta' + f)}, \end{aligned}$$

Δ correspondant à la limite éloignée du champ de profondeur sur ωP , Δ' à la limite rapprochée sur $\omega' P$.

On pourrait exprimer Δ et Δ' en fonction de la distance Δ_0 de P à $\omega\omega'$. Les équations exactes sont, même dans l'hypothèse où nous nous sommes placé, pénibles à discuter; la précédente nous suffira si le champ est assez faible pour que l'on puisse confondre les lignes visuelles avec leurs projections sur les axes.

En traduisant algébriquement la règle indiquée (36) relative à la profondeur de la vision, on a :

$$\Delta = \Delta_0 + \frac{\Delta_0^2}{15 - \Delta_0}, \quad \Delta' = \Delta_0 - \frac{\Delta_0^2}{15 + \Delta_0},$$

l'unité de longueur étant le mètre,

$$\text{ou} \quad \Delta = \frac{15\Delta_0}{15 - \Delta_0}, \quad \Delta' = \frac{15\Delta_0}{15 + \Delta_0}.$$

On remarquera que si, au lieu d'images, on avait à considérer des objets, la valeur de Δ ne pourrait être négative. Pour $\Delta_0 \geq 15$, on devrait faire $\Delta = \infty$.

Dès que l'on peut négliger la focale f de l'oculaire devant la distance de mise au point Δ_0 , au moins égale

à 25 centimètres, les relations ci-dessus conduisent à la valeur simple :

$$L = \frac{2}{15} f^2. \quad (\text{unité : mètre})$$

En prenant un cas très courant d'une jumelle pour laquelle $G = 8$ et $f = 20$ millimètres, on a :

$$L = 0^{\text{mm}},05 \text{ environ.}$$

115. **Fusion physiologique des images.** — Un calcul plus exact ne modifierait pas l'ordre de grandeur de la différence L . Une pareille précision de réglage ne peut être atteinte que par un observateur exercé et dans des conditions de vision excellentes. Dans la pratique courante, il est difficile d'admettre que les images ne sortent pas des champs de profondeur respectifs des yeux qui les observent. La perception est cependant unique. C'est que chaque œil s'accommode à la distance particulière de l'image qu'il discerne; l'insensibilité de la vision monoculaire en ce qui regarde la profondeur permet ensuite de placer la double image au point unique d'intersection des deux lignes visuelles. Si une telle accommodation, différente pour l'un et l'autre œil, et, par suite, si peu naturelle, peut être effectuée, le fait tient à l'absence, dans le champ de vision, de point de repère réel qui puisse faire juger de la non-coïncidence de chacune des images avec la rencontre des lignes visuelles.

Cette anomalie d'accommodation se traduit d'ailleurs par une fatigue des organes de la vue, fatigue bien connue de tous ceux qui, sans précautions, se servent d'une jumelle : chaque œil est accommodé pour une

distance différente, dont l'une au moins ne correspond pas au degré de convergence des organes.

Cette convergence est, elle, presque invariable, quels que soient les réglages individuels des deux lunettes, Sa valeur est, en effet,

$$\beta = \text{arc tg } \frac{\delta}{\Delta} + \text{arc tg } \frac{\delta'}{\Delta'}$$

$$= \text{arc tg } \frac{G}{D-F} \frac{\varpi + f \left[\frac{x}{\Delta} - \frac{x}{\Delta'} + \frac{\varpi}{\Delta'} \right]}{1 - G^2 \frac{x}{D-F} \frac{x'}{D-F} \left(1 + \frac{f}{\Delta} \right) \left(1 + \frac{f}{\Delta'} \right)}$$

elle est très voisine de

$$\text{arc tg } \frac{G\varpi}{D}$$

dans la plupart des instruments : l'image unique binoculaire reste donc, comme dans le cas du réglage parfait, dans le voisinage de l'image théorique, c'est-à-dire de l'objet ramené à une distance G fois plus petite.

Il suit de là que dès qu'on observe un objet tant soit peu éloigné, la convergence est toujours faible; les yeux ont tendance à se régler pour l'infini, c'est-à-dire dans la disposition la moins pénible. Il est donc prudent, pour réduire la fatigue au minimum, de s'efforcer de régler chaque lunette de manière à rejeter l'image le plus loin possible. Cela impose le maximum de longueur de chaque corps (dans une lunette terrestre; le minimum dans la lunette de Galilée) compatible avec une netteté parfaite. Sans espérer atteindre le réglage à quelques centièmes de millimètre près, il est toujours possible de ne pas amener les images aux petites dis-

tances de vision distincte; car, de l'infini à la distance minimum de la vision (25 centimètres), la différence de réglage est perceptible. Pour l'instrument déjà considéré ($G = 8$, $f = 20$ millimètres), la formule plus haut indiquée donne :

$$L = 1^{\text{mm}}, 6.$$

116. **Jumelle à axes convergents.** — Le parallélisme des axes, supposé jusqu'ici rigoureux, n'est jamais qu'approximativement réalisé : il est utile d'examiner les conséquences de cette imperfection.

Supposons d'abord que les axes restent dans un même plan; il peut y avoir alors soit *convergence* des axes en avant des objectifs, soit *divergence* (convergence en arrière des oculaires).

Considérons (fig. 35) une jumelle à axes parallèles qui donne du point M l'image N ; admettons la constance du grossissement quel que soit le réglage des lunettes constituantes : cette hypothèse simplifie les calculs sans en modifier sensiblement les résultats; elle est presque rigoureusement exacte quand on rejette les images le plus loin possible.

Dans ces conditions, N est rapproché à une distance G fois plus petite que celle de M ; chaque lunette donne un faisceau émergent, tel ωN , G fois plus incliné sur l'axe que le faisceau incident correspondant, OM .

Admettons maintenant que la lunette de droite $\omega'O'$

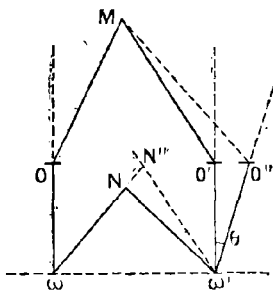


Fig. 35.

tourne autour de ω' d'un angle θ , très petit d'ailleurs. Pratiquement, l'angle $O'MO''$ est négligeable devant θ . Le rayon incident central fait donc avec $\omega'O''$ un angle égal à $\varphi + \theta$, et le rayon émergent $\omega'N''$ est incliné sur ce même axe de l'angle $G(\varphi + \theta)$. La nouvelle image se produit donc en N'' , et la figure donne sans difficulté la relation :

$$\alpha' = \alpha + (G - 1)\theta.$$

Si ωO s'incline à son tour, une même relation s'y applique; et la forme linéaire de cette dernière rend la formule unique, sauf que θ indique l'angle des axes convergent en arrière des oculaires.

Si la convergence a lieu en avant, les considérations précédentes conduisent à la même relation, à condition de donner le signe *moins* à l'angle des axes.

La discussion de l'équation ci-dessus n'offre aucune difficulté.

Quand les axes divergent (convergence en arrière), θ est positif; l'image se rapproche. Au lieu de se former à la distance $\frac{D}{G}$ correspondant à α , elle se forme à la distance E répondant à α' , et la relation précédente conduit à :

$$\frac{1}{E} = \frac{G}{D} + \frac{(G-1)\theta}{\varpi}.$$

Le rapprochement est très rapide : on en aura une idée en faisant $D = \infty$; supposant $\varpi = 63$ millimètres et exprimant θ en minutes, l'équation donne, pour $G = 8$:

$$E = \frac{27}{\theta} \text{ mètres.}$$

Une divergence d'une minute rapproche donc l'image de l'infini à 27 mètres; avec un peu plus d'un degré, on atteindrait la distance minimum de la vision distincte.

Dans le cas de la convergence, θ étant négatif, l'image s'éloigne; elle peut, même si elle était assez rapprochée, atteindre rapidement l'infini, et le dépasser (c'est-à-dire que les lignes visuelles convergent à l'intérieur de la tête; les yeux louchent en dehors).

117. — La conséquence immédiate de ces résultats est que le non parallélisme des axes accroît les difficultés de la vision binoculaire, déjà délicate en raison de la faible tolérance sur le réglage des longueurs des lunettes. La convergence et la divergence des axes ont pour effet de tendre à faire sortir les images monoculaires du champ de profondeur de l'œil correspondant; leur rôle s'ajoute à celui de la différence de longueur des axes.

La théorie ci-dessus indique des valeurs très faibles pour le maximum admissible de θ . En supposant les lunettes parfaitement réglées et rejetant à l'infini, lorsqu'elles sont parallèles, les images monoculaires et binoculaires d'un point de l'infini, la divergence maximum admissible sera celle qui ramènera vers 15 mètres l'image binoculaire. On aura donc, en minutes :

$$\theta = \frac{3000 \pi}{15(G-1)} = \frac{12,5}{G-1},$$

soit environ 2' pour $G = 8$.

La même valeur convient à la convergence des axes.

118. **Jumelles à axes déversés.** — Examinons maintenant l'effet d'un *déversement* des axes; et, pour

cela, supposons que, dans la jumelle à axes parallèles, $\omega'\Omega'$ tourne d'un angle très petit φ autour de $\omega\omega'$, en lui restant perpendiculaire. La ligne visuelle $\omega'N'$ sort du plan qui contient ωN , car elle tourne, à très peu près, de $(G - 1)\varphi$ autour de ω' en restant sensiblement dans un plan normal à celui des axes; le concours des lignes visuelles est impossible, géométriquement; il n'est assuré physiquement que si φ est au plus égal à l'acuité visuelle. Le quotient d'une minute par $G - 1$ serait donc le maximum de déversement admissible. Au delà, la duplication de l'image devrait se produire.

La pratique ne justifie pas cette conclusion. Les images se maintiennent superposées avec des déversements plus considérables. Avec une jumelle de grossissement 7.5, montée *ad hoc*, nous avons pu, sans entraînement spécial, maintenir la coïncidence des images en augmentant progressivement le déversement de zéro à une vingtaine de minutes. A ce moment, si on déplace légèrement les axes des yeux, la duplication s'opère, et ne peut être réduite sans revenir à un déversement moindre.

La possibilité de maintenir en coïncidence des images déversées ne paraît être susceptible d'explication qu'en faisant fonds sur la souplesse de l'organe visuel. En l'absence de tout repère dans le champ de la vision, les yeux se disposent de manière que les images rétiniennees correspondant aux points images produits par les deux lunettes se forment aux centres des fovea. La sensation cérébrale devient ainsi unique, et le demeure tant que l'œil peut ainsi déverser ses axes.

Cette disposition anormale ne va pas sans fatigue.

Quand la limite de ce strabisme dans l'espace est atteinte, le décalage des images se manifeste; les yeux, n'étant dès lors plus assujettis à la production d'une perception unique, reprennent leurs positions normales, et les deux images se séparent brusquement.

119. **Fusion instable des images.** — La même cause, disposition propice des yeux en l'absence de point de repère, peut seule expliquer la coïncidence des images dans le cas de convergence ou de divergence simples (sans déversement) très accentuées. Herschel (56) avait déjà remarqué que l'on peut obtenir la coïncidence d'une flamme de bougie et de son image¹, produite par un prisme, d'angle variable à partir de zéro, interposé sur le faisceau allant de la flamme à l'un des yeux : la convergence des lignes visuelles est, d'après lui, susceptible d'atteindre 20 ou 30° (normalement elle ne dépasse pas 15° pour la distance minimum, 250 millimètres, de la vision distincte); la divergence serait plus faible; le déversement, peu appréciable.

Dans le même ordre d'idées, et avec la jumelle mentionnée plus haut, nous avons obtenu, toujours sans précautions particulières, une divergence ou une convergence des axes de 1 degré et demi environ, ce qui donne un angle des lignes visuelles voisin de 10°. Ajoutons que les jumelles étaient réglées de manière à reporter le plus loin possible les images individuelles.

Tant qu'il s'agit de jumelles ayant leurs axes dans un même plan, il semble que l'on peut assigner, comme lieu de l'image unique perçue, la rencontre des

¹ Et même de deux flammes réelles.

lignes visuelles. Il paraît plus délicat de l'assurer (en prenant comme intersection la position de la perpendiculaire commune), lorsque les axes sont déversés.

120. — Nous concluons, de cette courte étude, qu'il est avantageux de rendre aussi parallèles que possible les axes d'une jumelle; mais que cependant, si des raisons, d'ordre économique surtout, s'opposent à un réglage trop précis, il n'est pas absolument nécessaire d'adopter les tolérances indiquées par la théorie physico-géométrique, trop rigoureuse. On peut, à notre avis, prendre pour la divergence ou la convergence des lignes visuelles une valeur voisine de 1° , et pour leur déversement, environ $30'$. La tolérance sur la position relative des axes s'ensuit quand on connaît le grossissement.

121. **Champ de la vision binoculaire.** — Le non-parallélisme des axes a une influence probable sur la netteté des images, ne fût-elle que la conséquence de la fatigue de l'œil; il diminue en outre le champ de la vision binoculaire.

Ce champ est la région commune aux champs individuels des lunettes, c'est-à-dire aux cônes ayant pour sommets les centres optiques des objectifs et comme ouverture l'angle γ de champ. D'amplitude γ , — pour la vision à l'infini, — quand les axes sont parallèles, le champ binoculaire est réduit de $\sqrt{\theta^2 + \varphi^2}$ quand les axes sont déversés de φ et convergent ou divergent sous l'angle θ . Le champ n'est d'ailleurs plus exactement un cône de révolution, puisque sa base est la partie commune à deux cercles égaux décalés angulairement de $\sqrt{\theta^2 + \varphi^2}$.

122. **Perception de la profondeur.** — En

ramenant à une distance G fois plus petite que le point objet l'image binoculaire. une jumelle à axes parallèles en augmente dans le même rapport la parallaxe visuelle. Elle facilite donc la perception de la profondeur. Deux points A et B (fig. 36) qui, vus directement, ne seraient distingués dans des plans différents que si

$$\beta - \alpha \geq r',$$

le seront, par leurs images A' et B' , si

$$\beta' - \alpha' \geq r',$$

c'est-à-dire, puisque

$$\alpha' = G\alpha, \quad \beta' = G\beta,$$

si

$$\beta - \alpha \geq \frac{r'}{G}.$$

Il existe un autre procédé, indiqué par Helmholtz (53), pour amplifier les parallaxes : la figure 37, où

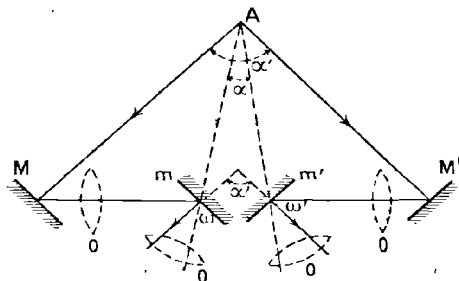


Fig. 37.

M, m et M', m' sont deux systèmes de miroirs parallèles, le décrit suffisamment. Le point A , vu directe-

ment par les yeux ω , ω' , aurait pour parallaxe α ; perçu à travers le système, sa parallaxe est α' ; et la géométrie donne aisément

$$\alpha' = \alpha \frac{\tau}{\sigma} = m\alpha,$$

m étant le rapport des écartements des miroirs extrêmes et intérieurs (ce dernier intervalle égal à celui des yeux).

En disposant dans le système d'Helmoltz des objectifs et des oculaires, figurés en pointillé, de façon à constituer une jumelle à axes brisés, de grossissement G , la parallaxe α devient

$$\alpha'' = Gm\alpha = k\alpha.$$

Le coefficient k s'appelle le *coefficient de profondeur*.

La formule relative à la perception de la profondeur devient, lorsque les yeux s'aident d'un pareil instrument :

$$\tau = \frac{p^2}{200 Gm - p} = \frac{p^2}{200 k - p}.$$

La relation s'applique aux jumelles ordinaires, en y faisant $m = 1$.

123. **Téléstéréoscope.** — En outre de l'augmentation de parallaxe, le dispositif d'Helmholtz amplifie la faculté stéréoscopique du système des yeux; car tout se passe comme si ceux-ci étaient reportés aux miroirs extrêmes: des régions différentes de l'objet sont alors aperçues, qui ne le seraient point par les yeux placés en ω et ω' , même armés d'une jumelle ordinaire. En munissant des lentilles mentionnées plus haut son système de miroirs, Helmholtz a pu appeler logiquement son appareil un *téléstéréoscope*. Il a fait (53),

à ce sujet, une remarque qui mérite d'être signalée, surtout depuis que sur le modèle de cet instrument on a construit des systèmes variés de jumelles stéréoscopiques.

Le système spéculaire d'Helmholtz, caractérisé par la valeur m , dont la signification a été indiquée plus haut, a pour effet de substituer à l'objet une image m fois plus rapprochée, et dont les dimensions linéaires sont m fois plus petites que celles de l'objet, et cela dans tous les sens (axe MM' de l'instrument parallèle à la ligne des yeux, axe de profondeur normal à MM' et dans le plan des normales aux miroirs, direction normale à ces deux axes). Les propriétés des triangles semblables suffisent pour établir cette propriété. L'angle visuel, grandeur apparente de l'objet, se conserve dans l'image; mais la parallaxe des plans en profondeur étant amplifiée m fois, l'image paraît m fois plus allongée que l'objet.

Dans une jumelle ordinaire à axes parallèles, de grossissement G , l'objet est amené à une distance G fois plus faible, les dimensions se conservant perpendiculairement aux axes. La grandeur apparente est G fois plus grande, la parallaxe est G fois plus grande aussi; mais l'objet semble G fois moins étendu en profondeur; car, amené matériellement à la distance de l'image, il aurait une parallaxe G fois plus grande que celle-ci.

Le dispositif d'Helmholtz paraît donc allonger l'objet dans le rapport m ; la jumelle, l'aplatir dans le rapport G (ce dernier fait, bien appréciable dans les instruments d'usage courant). Il suit de là qu'un téléstéréoscope dans lequel on aura $m = G$ conservera à l'image l'aspect monoculaire et binoculaire de l'objet,

qui sera vu comme s'il était matériellement rapproché à une distance G fois plus faible que son éloignement réel. Telle est la remarque d'Helmholtz, qu'il a d'ailleurs appliquée dans la construction de son appareil.

Dans ces conditions, la valeur G , égale à m , peut porter le nom de *coefficient de relief*.

124. **Microscope binoculaire.** — L'observation binoculaire, dans le microscope, procède d'un principe autre que celui qui régit la vision à l'aide de jumelles. L'objectif est, alors, unique ; l'instrument porte deux oculaires à l'écartement des yeux.

La figure 38 indique l'une des dispositions employées. Sa théorie peut être exposée, comme il suit, d'après Helmholtz (53). Supposons le microscope mis au point sur le plan passant par le point aplanétique P . Le système produira deux images ponctuelles P' et P'' .

Un point Q situé en arrière de P donnerait, si le corps O_2 de l'appareil n'existait pas, une image qui, ponctuelle ou non, ne serait pas dans le plan π passant par P' perpendiculaire à l'axe ; l'œil mis au point sur ce plan percevrait un cercle de diffusion concentrique à P' , intersection du plan π et du faisceau réfracté par l'objectif. Dans le système binoculaire, la moitié seulement du faisceau arrive sur le plan π , et donne un demi-cercle de diffusion situé, dans le cas de la figure, à gauche de P' ; l'autre moitié

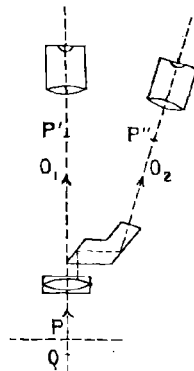


Fig. 38.

du faisceau produit un demi-cercle de diffusion, situé dans le plan π' , à droite de P'' . Chacun de ces deux demi-cercles produit, si Q est suffisamment rapproché de P , la sensation d'un point image, dont l'œil rapporte la position au milieu du rayon du demi-cercle.

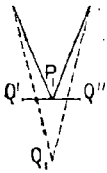


fig. 39.

Les yeux faisant converger (fig. 39) P' et P'' en P_1 , réunissent les deux images Q' et Q'' au point Q_1 , en arrière de P_1 . La parallaxe relative des points P_1 et Q_1 dépend de $Q'Q''$, qui est égal au rayon du cercle de diffusion. Si f est la focale principale du microscope (système total objectif et oculaire), p et q étant les distances de P et de Q au foyer antérieur du système, le rayon ρ de cercle de diffusion est donné par la formule :

$$\rho = f \frac{p-q}{p} \operatorname{tg} u,$$

u étant la demi-ouverture de l'objectif du microscope, — l'œil est supposé placé au second foyer du système.

La différence des parallaxes de P_1 et Q_1 est sensiblement égale à :

$$\beta = \frac{\rho}{\Delta} = \frac{\delta q}{f} \operatorname{tg} u,$$

δq étant l'écartement des points P et Q .

On peut l'écrire, Δ étant la distance de vision des images :

$$\beta = \frac{G}{\Delta} \delta q \operatorname{tg} u.$$

La profondeur minimum susceptible d'être perçue est donc, pour $\beta = 1'$ et $\Delta = 300$ millimètres :

$$\delta q = \frac{1}{10 G g u},$$

soit, pour $\sin u = 0,9$ et $G = 500$, $\delta q = 0,1 \mu$.



CHAPITRE VIII

INSTRUMENTS DE MESURE

125. — Le caractère commun à tous les instruments optiques de mesure est la faculté que leur donne leur organisation de pouvoir faire coïncider soit deux images entre elles, soit une image avec un objet réel. Cette superposition exige d'un organe mécanique, lié à l'instrument, un déplacement ou une déformation, *fonction connue de la grandeur à mesurer.*

- Quelle que soit la liaison mécanique en jeu, la précision de la mesure est d'abord en dépendance intime avec le degré d'exactitude de la coïncidence. C'est celle-ci qui doit être examinée.

126. **Coïncidence d'images réelles ponctuelles.** — Le rôle de l'instrument peut être de permettre la coïncidence de deux images réelles, soit par superposition intégrale des points correspondants, soit par juxtaposition de régions déterminées de ces images. C'est le cas général des télémètres purement optiques. La perfection de la coïncidence est jugée par un seul œil, armé, en général, d'un oculaire astronomique ou terrestre.

Le cas le plus simple est celui où le ou les objets

qui fournissent les images sont des points lumineux, des étoiles, par exemple. Nous supposons l'instrument organisé de façon que les petites images solides aient mêmes dimensions. La superposition des images réelles sera appréciée d'après celle des images virtuelles données par l'oculaire, c'est-à-dire, en fin de compte, par les images rétinienne.

Angulairement, la coïncidence des images virtuelles sera réputée parfaite si, ayant toutes deux un diamètre apparent inférieur à une minute, l'intervalle de leurs centres est au plus égal à l'acuité visuelle (une minute, également). Une minute est donc, dans ce cas, l'erreur maximum pratique qu'on peut raisonnablement commettre sur la coïncidence des images virtuelles. Les caractéristiques de l'oculaire permettent d'en déduire l'erreur sur celle des images réelles. En considérant tout l'appareil, oculaire compris, comme une lunette de grossissement G pour chaque image, on voit que l'erreur possible est, angulairement, égale au quotient d'une minute par G , et, linéairement, à

$$\frac{F}{3000 G}$$

F étant la focale du système qui a fourni l'une des images réelles.

Cette conclusion suppose que l'image virtuelle n'a pas de diamètre apparent sensible. Si ce diamètre dépasse une minute et est égal à ε minutes, la coïncidence n'est plus appréciée qu'à ε près, et par conséquent l'erreur linéaire sur la coïncidence des images réelles peut être égale à

$$\frac{F\varepsilon}{3000 G}$$

En profondeur, il paraîtra y avoir superposition quand les images solides auront une partie commune, si faible soit-elle ; car, dans ces conditions, la netteté peut être simultanément maximum pour les deux images. La règle s'applique tant aux images virtuelles qu'aux images réelles. Elle vise plutôt l'organisation de l'appareil que son maniement. La différence de position en profondeur des images n'aurait, en effet, d'in-

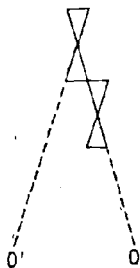


Fig. 40.

convénient que si elle permettait des coïncidences diverses dans le sens latéral ou angulaire, grâce à la variation possible de position de l'œil : on sait que le déplacement de ce dernier est souvent utilisé pour la mise au point par utilisation de la parallaxe. Mais si les images perçues possèdent la netteté maximum, il ne pourra jamais y avoir sensation de parallaxe. La figure 40 le démontre aisément : quelle que soit la position de

l'œil susceptible de recevoir des rayons des deux faisceaux, l'écart angulaire des images virtuelles sera au plus égal à une minute : zéro pour l'œil placé en O, 1' pour l'œil en O'.

127. Coïncidence d'images de grandeur finie.

— Lorsque les images à superposer ont des dimensions angulaires assez grandes, la précision de leur coïncidence diminue, à moins qu'on ne tourne la difficulté en se bornant à des détails assimilables à des points. C'est ce que l'on doit faire, dans la mesure du possible ; et les considérations précédentes s'appliquent encore. Sinon, la perfection de la coïncidence n'est jugée que par l'égalité de grandeur entre les images

individuelles d'une part, et l'image résultant de leur superposition, d'autre part. Les erreurs possibles peuvent devenir considérables; il serait difficile, ailleurs que dans des cas d'espèce, d'en assigner les limites.

128. Juxtaposition d'images. — La précision de la juxtaposition de deux images est soumise à la même règle que celle de la coïncidence de deux points, si toutefois les lignes à confondre sont parfaitement nettes. Ce sont, en général, des droites plus ou moins longues, provenant ou non du même objet réel. Mais il est rare qu'on puisse atteindre la précision indiquée; car la différence d'aspect et de coloration des lignes, l'inégalité de clarté dans les images qui les fournissent, sont autant de causes qui atténuent, sans qu'on puisse en évaluer l'effet, la perfection du contact.

129. Coïncidence d'une image et d'un objet. — La coïncidence peut être demandée entre une image réelle et un objet. Le plus souvent celui-ci est constitué par une droite matérielle et ténue (fil de réticule, trait micrométrique), ou le point de croisement de deux pareilles lignes; dans l'objet, s'il n'est pas ponctuel, on choisit un point net ou une arête bien tranchée.

Réduisant donc l'objet à un point, il s'agit d'apprécier la perfection de la coïncidence. Les considérations invoquées plus haut conduisent à la règle suivante.

Si le fil objet est opaque, le point image paraîtra en contact dès que, dans la perception des images virtuelles données par l'oculaire, il sera à une minute au plus de l'un des bords du fil, et en dehors de celui-ci; si le trait objet est transparent, la coïncidence semblera exacte, dans les mêmes conditions angulaires, l'image étant alors entre les bords du trait. La précision est,

dans ce dernier cas, plus élevée que dans l'autre.

On constitue de pareils traits transparents soit en prenant comme repère l'intervalle compris entre deux fils opaques parallèles, soit en amenant l'image au-dessus du trait, supposé court, ou dans l'espace situé

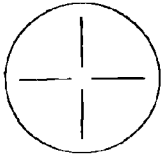


Fig. 41.

entre les deux portions (fig. 41) d'un trait interrompu. Alors, même quand les fils ou les traits sont larges ou que leur espace clair n'est pas très étroit, la précision est augmentée, si on rapporte la position de l'image au milieu idéal du trait ou de l'intervalle. L'œil apprécie avec assez d'exactitude cette ligne fictive, et l'on peut

assurer sa coïncidence avec l'image à une minute près. La pratique justifie assez bien cette règle.

130. Mise au point d'un instrument à réticule. — Lorsqu'on veut réaliser la superposition d'un point de l'image réelle et d'un fil de réticule, la première opération consiste à obtenir la coïncidence en profondeur par déplacements convenables de l'oculaire par rapport au réticule, et de l'ensemble relativement au système objectif. Un procédé assez employé utilise, à cet effet, la parallaxe optique qui se manifeste, quand on déplace légèrement l'œil, entre le fil de réticule et l'image, lorsque leur coïncidence n'est pas établie. Le colonel Goulier (39) trouve cette façon d'opérer insuffisante, susceptible seulement d'application aux lunettes médiocres non achromatiques, et cela à cause de la faculté d'accommodation de l'œil, qui s'opère inconsciemment. Il recommande de mettre d'abord au point le micromètre pour la vue la plus facile de l'observa-

teur, la lunette dirigée sur le ciel, et ensuite, sans s'occuper du micromètre, de disposer l'ensemble de manière à obtenir la netteté maximum du point visé; dans cette opération, d'ailleurs, les déplacements doivent être assez rapides pour que l'œil ne puisse s'accommoder, et le système mobile doit osciller autour de la position définitive de plus facile visibilité.

Les considérations développées plus haut peuvent justifier cette règle.

131. Coïncidence d'une image virtuelle et d'un objet. — Il est possible de faire coïncider une image virtuelle avec un objet réel lorsque les faisceaux qui en émanent sont reçus par des régions différentes de la pupille (généralement, les deux moitiés). La précision de la superposition angulaire ne saurait alors être mesurée par moins d'une minute; pour l'atteindre, il faut que l'image se trouve dans le champ de profondeur de l'œil mis au point sur l'objet, et que cette image soit sensiblement ponctuelle dans sa partie efficace.

132. Coïncidence successive en profondeur. — La coïncidence en profondeur peut être utilisée comme procédé de mesure, même quand la superposition angulaire n'est pas assurée. L'emploi du microscope et de la loupe est assez fréquent à cet effet.

Deux cas principaux peuvent se présenter.

Le premier concerne la mise au point successive sur deux images; on amène ainsi, à des époques différentes, les pinceaux émergeant de l'instrument à venir converger sur la rétine. Si, sur cette dernière, l'image d'un objet ponctuel était un point susceptible de n'être perçu tel que pour une accommodation bien déterminée de

l'œil, la sensation de netteté parfaite serait corrélative de la situation de l'objet par rapport au système optique. Ces conditions n'étant pas réalisées, il importe de déterminer l'erreur sur la position des objets qui peut résulter d'une mise au point en apparence exacte.

La mise au point d'un système (S) sur le point objet P de son axe (fig. 42) est assurée quand l'image

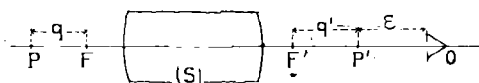


Fig. 42.

virtuelle ou réelle P' se trouve dans le champ total de profondeur de l'œil, c'est-à-dire entre l'infini et la distance minimum Δ_0 de la vision distincte. La variation possible de P est celle qui provient du déplacement possible de P'. La figure ci-dessus donne, en désignant par n l'indice du milieu dans lequel est plongé le point objet :

$$qq' = ff' = \frac{f^2}{n};$$

et comme q' peut varier entre ∞ et $\Delta_0 - \varepsilon$, la variation de position εq de P a pour expression :

$$\varepsilon q = \frac{f^2}{n(\Delta_0 - \varepsilon)}.$$

Dans la loupe ordinaire, ($n = 1$, et ε négligeable dès que l'instrument est un peu puissant) la formule se réduit à

$$\varepsilon q = \frac{f^2}{\Delta_0} = \frac{f^2}{250} \quad [\text{unité: millimètre}].$$

Une loupe de 10 millimètres de focale n'assure donc la mise au point qu'à 4 millimètres près.

Pour le microscope, de grossissement G , l'équation

$$G = \frac{\Delta_0}{f'} = n \frac{\Delta_0}{f},$$

conduit, en négligeant ε , à la formule :

$$\varepsilon q = n \frac{\Delta_0}{G^2} = n \frac{250}{G^2} \quad [\text{millimètres}].$$

Pour obtenir, dans l'air ($n = 1$), la précision du micron, $\varepsilon q = 1 \mu$, le grossissement G doit être, d'après l'équation ci-dessus, au moins égal à 500.

133. Coïncidence simultanée en profondeur.

— Lorsque la coïncidence en profondeur s'opère simultanément pour les deux images, ou lorsqu'on fait usage d'un réticule dont on assure la coïncidence successive avec chaque image, la précision augmente.

Si deux objets sont observés simultanément à travers le système (S), la coïncidence en profondeur semblera encore exister quand leurs images solides se toucheront par leurs bases (fig. 43). Admettons, pour simplifier les calculs, que l'œil se trouve au second foyer du système.

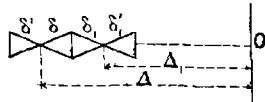


Fig. 43.

Les équations suivantes résolvent la question (voir § 114) :

$$q_1 \Delta_1 = q \Delta = f^2$$

$$\Delta - \Delta_1 = \varepsilon + \varepsilon', \quad \varepsilon = \frac{\Delta^2}{15 + \Delta}, \quad \varepsilon' = \frac{\Delta_1^2}{15 - \Delta_1}.$$

L'erreur possible ε , différence entre q et q_1 , prend la forme :

$$\varepsilon = \frac{2}{15} f^2 \quad [\text{unité : mètre}].$$

Comparant avec la formule du numéro précédent, on voit qu'ici l'erreur est 30 fois plus faible.

Quand la coïncidence a lieu à l'aide du réticule, la même relation s'applique; mais l'erreur étant possible dans les deux sens, il faut, évidemment, en doubler la valeur pour obtenir l'erreur possible entre les deux points dont les images sont successivement amenées sur le réticule.

134. Coïncidence en profondeur et netteté.

— Les calculs sommaires relatifs à la coïncidence en profondeur supposent le système aplanétique et la pupille normalement ouverte.

Quand cette dernière se ferme, ou, ce qui revient au même, lorsque l'anneau oculaire du système est étroit, la profondeur de champ, pour une distance donnée, augmente. On sait, en effet, qu'en regardant à travers un petit trou, la distance de la vision distincte diminue (avec un trou de $0^{\text{mm}},1$ on arrive à lire l'écriture à 30 millimètres); il s'ensuit que, dans ces conditions (le fait se présente avec les microscopes à fort grossissement dont les anneaux oculaires sont très petits), la précision de la mise au point peut s'affaiblir. Il est difficile de dire dans quelle proportion.

La profondeur de champ diminue, au contraire, à mesure que l'aberration sphérique augmente, l'image solide devenant alors, de conique, hyperboloïdale. Il en résulterait que la précision de mise au point s'accroîtrait. La conséquence n'est pas niable. Il ne faudrait pourtant pas annuler la profondeur de champ; car la mise au point deviendrait mécaniquement délicate, les images fatigueraient l'œil, qui se contenterait inconsciemment d'une netteté moindre.

DEUXIÈME PARTIE

ORGANISATION ET EMPLOI DES INSTRUMENTS

CHAPITRE IX

INSTRUMENTS D'OBSERVATION A GRANDE DISTANCE

Lunette astronomique.

135. **Organisation de la lunette astronomique.** — La lunette astronomique est constituée par deux systèmes convergents, *objectif* et *oculaire*, dont les foyers en regard sont voisins l'un de l'autre. Cet ensemble donne, d'un objet situé au delà du foyer antérieur de l'objectif, une image définitive virtuelle qui est renversée, c'est-à-dire qui se présente à l'observateur comme si l'objet avait tourné de 180° autour de l'axe de la lunette.

L'oculaire est mobile, suivant l'axe, pour la mise au point de l'instrument, laquelle consiste à amener l'image virtuelle dans le champ de profondeur de l'œil. Celui-ci se place de façon que sa pupille apparente soit centrée sur l'anneau oculaire et dans son plan.

L'anneau oculaire est réel ; il est l'image, à travers la lunette, de la surface extérieure de l'objectif.

L'instrument comporte un seul *diaphragme de champ* placé au droit de l'image réelle, et des diaphragmes de clarté. Il ne renferme aucun diaphragme de limitation ; dans les appareils bien construits, la monture extérieure de l'objectif en tient lieu.

La lunette astronomique est utilisée pour l'observation des corps célestes, le renversement des images n'ayant ici aucun inconvénient, puisque les notions de haut, de bas, de droite et de gauche n'ont aucune importance ; elle est employée pour l'examen des objets terrestres éloignés quand l'observateur se décide à subir le renversement des images ; enfin, munie d'organes spéciaux (réticules ou micromètre), elle se transforme en instrument ou organe de mesure.

136. — La figure 44 indique l'organisation schéma-

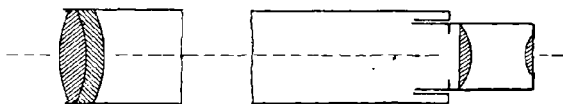


Fig. 44.

tique d'une lunette astronomique ; l'oculaire figuré est celui de Ramsden.

137. **Lunettes non achromatiques.** — La première lunette astronomique, celle de Kepler, imaginée vers 1615, consistait uniquement en deux lentilles, simples, convergentes. Huygens y apporta, en 1669, une première modification en remplaçant la lentille oculaire simple par une combinaison de deux lentilles

convergentes non contiguës. Le rôle de ce système doublé était d'augmenter le champ, à ouverture égale, des lentilles d'oculaire, et de réduire l'aberration sphérique que comportait la lentille unique.

L'aberration sphérique de l'objectif était peu à considérer; car le diamètre du cercle d'aberration sphérique n'était que le $\frac{1}{5000}$ environ de celui du cercle chromatique; l'oculaire simple avait plus d'influence, dès que le champ s'agrandissait, car les rayons tombaient sur ses surfaces sous des angles considérables.

Le défaut des lunettes résidait principalement dans les irisations des images. Heureusement, le diamètre du cercle d'aberration chromatique ayant pour expression, dans le cas de la vision d'objets à l'infini :

$$\Omega \frac{\delta\mu}{\mu - 1}$$

(Ω , ouverture de l'objectif; μ , indice moyen; $\delta\mu$, dispersion), est indépendant de la focale de l'objectif. En augmentant cette focale, et par suite, pour un oculaire déterminé, le grossissement, on peut réduire la proportion de la largeur du bord de coloré (qui reste constante) par rapport au diamètre de l'image, qui s'agrandit; d'autre part, l'oculaire simple jouit sensiblement de l'achromatisme apparent; l'oculaire d'Huygens possède la même propriété, à un degré plus élevé. On utilisait ces remarques, avant la découverte de l'achromatisme, pour augmenter la netteté des images. C'est la raison qui a fait porter les lunettes de l'époque à des longueurs de 30 à 50 mètres.

La possibilité d'obtenir des systèmes achromatiques

a permis de réduire la longueur des instruments, pour une netteté donnée. Dès lors la lunette est constituée par un objectif possédant, plus ou moins complètement, l'achromatisme absolu, et par un oculaire assurant avant tout, suivant l'indication d'Euler, la dispersion rectiligne des foyers, c'est-à-dire l'achromatisme apparent du système total.

138. Lunettes achromatiques. — Objectif. —

La plupart des objectifs de lunettes astronomiques comprennent une lentille convergente, extérieure, en crown et, tout près d'elle, sinon au contact, une lentille divergente en flint; le crown est le plus souvent biconvexe, la face extérieure plus aplatie que l'autre; le flint a la forme d'un ménisque se rapprochant du plan concave; les faces en regard des deux verres ont des courbures voisines¹.

Les deux types les plus courants sont celui de *Clairaut* (12) et celui de *Fraunhofer*. Dans les objectifs qui réalisent la condition de Clairaut, — égalité des courbures des faces en question ci-dessus, — les deux verres (fig. 45) sont appliqués l'un sur l'autre et souvent collés au baume de Canada, au moins quand leur diamètre ne dépasse pas 50 à 60 millimètres. Les trois rayons de courbure des surfaces réfringentes de l'objectif sont déterminés de façon à donner à ce dernier une focale déterminée, à réaliser pour deux radiations (D, F, en général) l'achromatisme absolu pour un pinceau

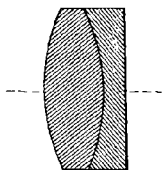


Fig. 45.

¹ Cauchois avait essayé jadis de substituer le flint au crown et le cristal de roche au flint (brevet français n° 3688).

parallèle centré sur l'axe, et à obtenir l'aplanétisme central (coïncidence des foyers dus aux rayons centraux et marginaux) pour un faisceau parallèle à l'axe et de couleur définie par la raie D.

Dans les excellents objectifs astronomiques construits par Fraunhofer, d'après des principes qu'il n'a pas divulgués, les faces en regard (fig. 46) ont des courbures presque égales, la face du flint étant toutefois plus aplatie que celle du crown; les deux lentilles sont en contact sur l'axe. D'après l'étude de ces objectifs, il semble qu'ils réalisent, en plus des conditions optiques du type de Clairaut, l'aplanétisme central pour un faisceau émanant d'un point de l'axe et situé à 40 fois environ la focale de l'objectif (67). Une condition presque identique a été indiquée par Herschel pour la construction des objectifs à deux verres.

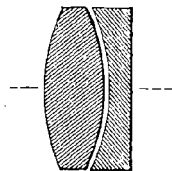


Fig. 46.

On rencontre encore des objectifs qui sont voisins du type de Clairaut, en ce sens que les surfaces en regard sont presque au contact et possèdent sensiblement les mêmes courbures; mais à l'inverse du type de Fraunhofer, la courbure du flint est un peu plus forte que celle du crown. Cette disposition a uniquement pour but de produire le contact des lentilles par leurs bords, lorsqu'on tient à éviter le collage au baume ou l'emploi d'une rondelle d'appui pour la lentille arrière. L'intervalle qui existe entre les lentilles est maintenu juste suffisant pour qu'il ne se produise pas d'anneaux colorés.

Bien d'autres combinaisons ont été proposées ou

expérimentées pour réaliser dans l'objectif à deux verres une quatrième condition optique, en dehors de celles que possède le type de Clairaut ; et cela, en n'assujettissant pas les lentilles à être en contact intime.

D'Alembert avait déjà indiqué la condition de l'aplanétisme central pour une seconde radiation. Gauss a calculé sur cette base un objectif, auquel on a depuis attaché son nom, et qui est aplanétique pour le rouge et le violet. Construit par Steinheil, avec les données de Gauss, la combinaison a été trouvée défectueuse (36). De meilleurs résultats semblent avoir été obtenus, en employant d'autres verres, par Steinheil et par Krüss. L'objectif de l'équatorial de l'observatoire de Princeton (États-Unis) aurait été calculé par Clark sur le principe de Gauss.

Klügel avait proposé, sans raisons péremptoires, de donner à la lentille de crown la forme équiconvexe ; plus tard, d'assurer dans le crown la déviation minimum du faisceau marginal parallèle à l'axe (67).

La solution d'Herschel, analogue à celle de Fraunhofer, est de réaliser l'aplanétisme pour un point situé à une distance de l'objectif telle que, dans les calculs, on puisse négliger le carré du rapport de l'ouverture de l'objectif à cette distance. Des tables, calculées dans cette hypothèse, ont été reproduites par Pretchl, et répandues dans la pratique en Allemagne.

Plus récemment, on a étudié des objectifs soit à plus de deux lentilles, soit comportant des verres autres que le crown et le flint habituels. Déjà le colonel Goulier avait employé, pour réduire la focale avec une ouverture donnée, deux objectifs du type Clairaut accolés. Reprenant l'une des idées de d'Alembert,

M. Harting (49) a calculé un objectif comprenant une lentille divergente en flint comprise entre deux lentilles convergentes en crown, les faces en regard étant appliquées, avec ou sans baume, l'une sur l'autre.

La variété des nouveaux verres introduits dans l'industrie optique depuis 1886 a permis la réalisation d'objectifs du type Clairaut possédant en outre la propriété d'être aplanétiques pour un point déterminé de l'axe (condition Herschel ou Fraunhofer). C'est par le choix des verres constituants qu'on parvient à satisfaire aux quatre équations de condition ne renfermant que trois rayons de courbure. M. Harting (47, 48, 50) et ensuite M. von Hoegh (58) (des Établissements Goerz, à Friedenau) ont, par des méthodes différentes, étudié le problème.

Signalons enfin l'emploi de surfaces non-sphériques dans la construction des objectifs, afin de leur donner le maximum de qualités; procédé utilisé par Alvan Clark dans les gros objectifs astronomiques, indiqué à nouveau par H. Schröder (36), puis par les Établissements Zeiss (d'Iéna) (80).

139. **Oculaire.** — L'oculaire primitif de la lunette astronomique était une lentille simple. Il n'a jamais été entièrement abandonné. Biot a démontré, — le fait était connu des opticiens, — que pour les forts grossissements, il n'y a que des avantages à employer des oculaires simples, qui font d'ailleurs perdre moins de lumière par réflexion. Un tel oculaire est constitué par une lentille plan-convexe, la face plane à l'arrière, l'ouverture étant au maximum les $\frac{3}{10}$ du rayon de la face antérieure, ou bien, quand ce rayon est inférieur à

1 millimètre, par une demi-sphère, ou enfin, par une sphère de rayon très faible. — Ainsi Herschel a employé une sphère de $0^{\text{mm}},24$ environ, donnant un grossissement de 6000 avec un objectif de $2^{\text{m}},164$ de focale et 16 centimètres d'ouverture. — Les oculaires simples restreignent considérablement le champ; ils donnent un point oculaire situé en avant de leur surface arrière, et, par suite, n'assurant pas, dans de bonnes conditions, la dispersion rectiligne des foyers, ils ne conviennent qu'à des observations axiales.

Les deux oculaires types de la lunette astronomique sont des combinaisons de deux lentilles plan-convexe, simples, taillées dans un même crown, et écartées l'une de l'autre.

Le premier système est l'*oculaire d'Huygens* (fig. 47), dit aussi de Campani, ou oculaire

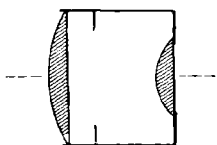


Fig. 47.

négalif; les deux surfaces convexes sont tournées vers la lumière. La lentille antérieure, dite *collectrice* ou *verre de champ*, placée en avant de l'image objective, rend celle-ci virtuelle, et lui substitue une image réelle, plus petite, et moins éloignée de l'objectif. La lentille arrière, ou *verre d'œil*, joue le rôle de loupe par rapport à l'image réelle.

Les caractéristiques de l'oculaire d'Huygens sont les suivantes, les lentilles étant supposées infiniment minces :

$$f = 4, \quad f' = \frac{4}{3}, \quad b = \frac{8}{3},$$

pour une focale totale $\varphi = 1$.

(f, f' focales respectives des lentilles avant et arrière, b intervalle des verres).

Ces données réalisent l'achromatisme apparent, assurent à la lunette un anneau oculaire réel. La disposition convexe des faces vers la lumière a pour but de diminuer les aberrations de sphéricité.

Ramsden a proposé le second système, qui n'est autre qu'une loupe composée, à deux verres, avec laquelle on observe l'image réelle. Les deux lentilles simples ont ici leurs convexités en regard (fig. 48).

Les caractéristiques de l'oculaire de Ramsden, — appelé aussi positif, celui d'Huygens étant dit négatif, — sont les suivantes (8) :

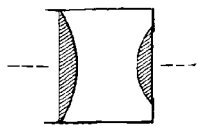


Fig. 48.

$$f = 1 - u^2, \quad f' = \frac{1 - u^2}{1 - 2u^2}, \quad b = \frac{(1 - u^2)^2}{1 - 2u^2},$$

u^2 étant plus petit que 0,5.

Ces données, qui assureraient la dispersion rectiligne des foyers, conduiraient à un anneau oculaire situé en avant du verre d'œil. On évite cet inconvénient en sacrifiant l'achromatisme apparent, et en adoptant les valeurs :

$$f = f' = \frac{4}{3}, \quad b = \frac{1}{3} (f + f') = \frac{8}{9},$$

pour $\varphi = 1$.

Les oculaires de Ramsden et de Huygens du type normal ne donnent qu'un champ apparent maximum de 0,40; il n'est pas d'ailleurs entièrement utilisable, en raison de sa courbure et de la distorsion des images, distorsion plus accentuée dans l'oculaire négatif que

dans l'autre. Lorsque le rôle de la lunette exige mieux que la seule netteté au centre du champ, les qualités des oculaires en question sont développées, grâce à la substitution, partielle ou totale, de lentilles composées aux verres constituants.

Karl Kellner (65) avait déjà, dans son *oculaire orthoscopique* (fig. 49), modifié l'oculaire d'Huygens, en

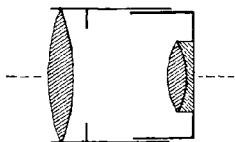


Fig. 49.

remplaçant le verre d'œil par une lentille crown-flint, et en donnant au verre de champ la forme biconvexe. La même modification a été, depuis, apportée au verre d'œil de l'oculaire de Ramsden, par divers opticiens, en vue de

détruire aussi parfaitement que possible l'aberration chromatique et de corriger la distorsion¹. Plus récemment, pour remédier à la courbure du champ et à l'astigmatisme, le verre d'œil composé s'est augmenté d'une lentille simple accolée ou non à lui.

Le colonel Goulier avait constitué l'oculaire positif de son tachéomètre du génie par deux lentilles doubles crown-flint. Dans l'oculaire de Gundlach, le verre collecteur est double, le verre d'œil triple (36).

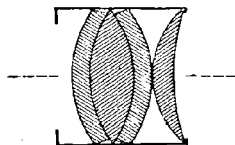


Fig. 50.

On a également constitué des oculaires composés uniquement de lentilles jointives, collées ou non. Tel est l'oculaire *euryscopique* de Mittenweg (fig. 50), à

¹ ZEISS. Brevets fr. 368043-375748.

quatre verres, et l'oculaire *monocentrique* de Zeiss, à trois lentilles accolées (36).

Dans ces divers oculaires à plus de deux lentilles simples, les focales des verres n'ont plus entre elles des relations simples comme dans les types normaux. Les courbures des faces dépendent de la nature des matières employées et du but poursuivi. On se bornera à indiquer l'un des progrès réalisables : le champ apparent peut être assez aisément porté à 0,60, et même atteindre 0,75, sa courbure étant négligeable, et la netteté des images convenablement assurée.

140. — Parmi les lunettes astronomiques, les plus intéressantes sont celles qui sont utilisées pour les observations célestes. Elles se caractérisent par la grande amplitude de leur ouverture. Le diamètre de l'objectif, qui ne dépassait pas 40 centimètres au milieu du XIX^e siècle, a été progressivement augmenté, et a atteint 105 centimètres (observatoire de Yerkes); il a été prévu à 125 centimètres dans la grande lunette de 1900. Parmi les lunettes d'observatoire à grande ouverture, on citera encore : 74 (Paris); 77 (Nice); 80 (Potsdam); 81 (Pulkowa); 84 (Meudon); 88 et 97 (Lick). Ces nombres expriment, en centimètres, les diamètres d'objectif.

L'objectif est généralement du type Fraunhofer. Certains spécimens, — objectifs astrophotographiques, — qui doivent être aussi utilisés pour la photographie céleste, sont corrigés visuellement et actiniquement. Parfois la lunette comporte deux objectifs, l'un pour les observations, l'autre pour les opérations photographiques.

Le rapport de la focale à l'ouverture, jadis voisin

de 12, a été porté à 15, puis à 25, et prévu à 40 dans la grande lunette de 1900. Le but de cette augmentation a été d'accroître les dimensions absolues de l'image objective, ce qui présente un certain intérêt pour la photographie.

Les grossissements employés dans ces lunettes dépassent, très largement parfois, le grossissement normal. La pénétration ne varie pas, mais l'observation est facilitée, et la clarté peut être accrue s'il s'agit d'étoiles. D'ailleurs, la question de l'amplitude du champ peut, dans des cas très étendus, être négligée.

Lunette terrestre.

141. — Le rôle de la lunette terrestre est de donner d'un objet éloigné une image définitive virtuelle, celle qu'observe l'œil, droite par rapport à l'objet, c'est-à-dire ayant la même orientation que lui relativement à la direction de la vision.

L'optique connaît deux types de cet instrument : le premier, auquel on réserve, le plus généralement, le nom de *lunette terrestre* sans qualificatif ou de *longue-vue*, est constitué par une lunette astronomique, dans laquelle un système optique opère le redressement de l'une des images ; le second est la *lunette de Galilée*, — plus souvent employée dans les jumelles, — dans laquelle l'oculaire redresse l'image objective en la rendant virtuelle avant sa formation.

142. **Longue-vue de Kepler.** — La plus ancienne longue-vue est celle de Kepler (fig. 51). Une lentille unique remplit le rôle du *véhicule* ; elle prend

l'image objective a réelle et renversée, et, la laissant encore réelle, la transporte en a' en la redressant. Cette seconde image est observée par un oculaire astronomique qui la rend virtuelle.

La lentille véhiculaire se place en général de façon que sa distance à l'image objective soit le double de sa focale propre ; le transport de l'image s'opère sans amplification ; mais, ce qui est le plus important, la disposition donne à la fois le minimum de longueur à

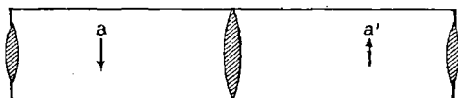


Fig. 51.

la lunette, et, aux verres, les plus petites ouvertures, — les focales étant données.

Les inconvénients du système tiennent d'abord au trop grand développement de l'instrument : à la longueur de la lunette astronomique, s'ajoute en effet le quadruple de la focale du véhicule, qui, à cause de l'ouverture du faisceau, ne saurait être faible, si la lentille est simple. La grandeur de la focale du véhicule oblige à donner à cette lentille une grande ouverture, pour mieux corriger les aberrations, et aussi pour permettre que les faisceaux provenant des points du champ réel l'atteignent ; sinon l'objectif ne travaillerait pas dans toute son ouverture, qui ne correspondrait plus ainsi au grossissement. D'autre part, la simplicité du système a pour conséquences la distorsion des images et la courbure du champ.

143. **Organisation de la longue-vue à véhicule.** — La réduction de longueur de la lunette précédente peut s'effectuer en remplaçant la lentille véhiculaire unique par un système de deux lentilles écartées, dont la première, — le *collecteur*, — est près de l'image objective, et dont l'ensemble a un foyer en arrière de celle-ci. Le rapprochement de la lentille vers l'image diminue l'ouverture nécessaire du premier verre, cette ouverture étant la section de l'ensemble des faisceaux réfractés par l'objectif, et qui divergent de l'image objective. Un écartement convenable du second verre, le *redresseur*, lui permet, avec une ouverture au plus égale à celle du collecteur, de recevoir les faisceaux réfractés par ce dernier et ayant coupé l'axe entre les deux lentilles du véhicule. La réduction des ouvertures amène celle des focales, et par suite de la longueur de l'instrument.

Les théories actuelles de l'optique géométrique déterminent aisément la meilleure disposition à donner au véhicule aussi conçu. Il n'est pas probable que le P. Rheita ait suivi cette voie. Peut-être eut-il l'idée d'examiner l'image objective avec un microscope, connu à son époque, ou, plus vraisemblablement, avec une seconde lunette astronomique : l'objectif de celle-ci constitue, avec l'oculaire de la première, le véhicule. En faisant varier la distance de ces verres, on peut déterminer expérimentalement la meilleure valeur à lui donner en vue de la production du champ maximum. Ces remarques expliqueraient l'organisation du véhicule indiquée par certains traités d'optique : égalité des focales des verres, coïncidence de leurs foyers avec les deux images réelles formées dans l'instrument.

En modifiant cette disposition véhiculaire de manière à rapprocher le plus possible le verre collecteur de l'image objective, et en substituant à l'oculaire simple la combinaison d'Huygens, l'opticien Dollond a donné à la lunette terrestre sa forme définitive.

La figure 52 en présente l'organisation schématique.

Bien qu'au fond le rôle véhiculaire de la lentille unique de la lunette primitive soit ici rempli par trois verres, c'est à l'ensemble des deux premiers qu'on a laissé le nom de véhicule. Le système des quatre derniers verres porte le nom d'*oculaire terrestre* : celui-

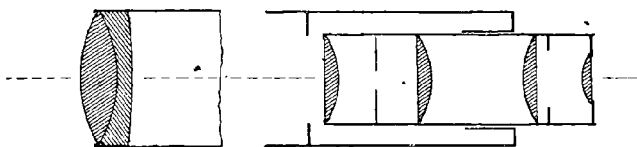


Fig. 52.

ci comprend donc le *véhicule* et l'*oculaire astronomique*, du type Huygens, en vue de l'augmentation de champ, à moins que les conditions d'emploi de l'instrument n'indiquent l'oculaire positif.

L'anneau oculaire est réel et extérieur à l'appareil. La mise au point s'effectue par déplacement soit de l'ensemble de l'oculaire terrestre, soit du verre d'œil seul (ou de l'oculaire de Ramsden, le cas échéant), soit des deux systèmes composants, en général : donc on met au point sur les images réelles.

La lunette comporte, en dehors des diaphragmes de clarté, deux *diaphragmes de champ* dans les plans des

images réelles, quand l'objet et l'image virtuelle dernière sont à l'infini : plan focal de l'objectif et plan focal du verre d'œil. En outre, un *diaphragme de limitation* est disposé dans le plan où les faisceaux réfractés coupent l'axe à l'intérieur de l'instrument : ce plan est l'image, située entre les verres du véhicule, de la surface antérieure de l'objectif par rapport à l'ensemble de l'objectif et du verre collecteur.

144. **Objectif.** — L'objectif de la lunette terrestre est identique à celui de la lunette astronomique. En général, on emploie le type de Clairaut ou celui de Fraunhofer. Sauf circonstances spéciales, les considérations économiques font rejeter les types complexes et les verres autres que le crown et le flint.

145. **Oculaire terrestre de Dollond.** — L'oculaire terrestre normal, celui de Dollond, comprend quatre lentilles plan-convexe, en crown, placées comme l'indique la figure 52. La disposition relative des faces courbes a pour effet de réduire les aberrations de sphéricité. Les valeurs relatives des focales et des intervalles des lentilles assurent, outre les conditions géométriques (grossissement, position de l'anneau oculaire, champ), la réalisation de l'achromatisme apparent et sa stabilité. Dans un travail remarquable (9), Biot a étudié longuement ces dernières questions, et en a appliqué les conclusions à l'examen d'oculaires existants construits par Dollond, Ramsden et Fraunhofer. Voici les caractères les plus simples de l'oculaire terrestre, tel qu'on le rencontre dans les longues-vues ordinaires.

Les focales des lentilles du véhicule sont égales ou peu différentes ; celle du redresseur est la plus grande ; leur rapport varie de 1 à 1,25 ; l'intervalle des verres

est environ les $\frac{2}{3}$ de la somme des focales ; le grossissement propre du véhicule est voisin de 2.

L'oculaire astronomique négatif n'a généralement pas les constantes indiquées plus haut. Le rapport des focales des verres, au lieu d'être 3, varie de 1,5 à 2 ; l'écartement des lentilles est en général plus grand que la demi-somme des focales, l'achromatisme apparent n'étant réalisé que pour l'ensemble de l'oculaire terrestre.

L'intervalle entre le verre redresseur et le verre de champ, rapporté à celui des verres véhiculaires, est d'environ 1,3 à 1,5.

146. Modifications apportées à l'oculaire terrestre. — L'oculaire de Dollond ne donne, principalement en raison de la courbure de son champ, qu'un champ apparent de 0,50 au maximum ; il faut davantage quand on veut accroître l'étendue du champ réel ou augmenter le grossissement.

On l'a modifié depuis longtemps en composant les lentilles qui sont les plus éloignées des images qu'elles transforment. En remplaçant le redresseur par une lentille double, flint et crown collés, on réduit la courbure du champ, et on améliore les bords du champ apparent, en lui laissant l'étendue de 0,50. En faisant subir, en outre, la même transformation au verre d'œil, le champ apparent peut être porté à 0,70, et même à 0,75.

Plus récemment, le commandant Daubresse a réalisé un oculaire à cinq lentilles simples en crown, qui donne un champ apparent de 1. Il lui a suffi de disposer, en avant et près du verre d'œil, une lentille biconvexe dont

la face antérieure est un peu plus aplatie que l'autre.

Enfin, pour certaines petites lunettes à main de faible grossissement (8 au maximum) et de grand champ, l'oculaire terrestre est constitué comme un véritable microscope; le véhicule en est l'objectif.

147. **Véhicule prismatique de Porro.** — La réduction de longueur des lunettes terrestres, surtout de celles qui doivent être tenues à la main, a toujours vivement préoccupé les praticiens. En 1850, un major du génie piémontais, Porro, devenu opticien, imagina une combinaison des plus remarquables. A l'aide de deux prismes à réflexion totale, remplaçant d'ailleurs le véhicule, il put raccourcir l'axe géométrique de la longue-vue, tout en conservant sa longueur à l'axe optique, qu'il brisait en cinq segments successivement rectangulaires.

Considérons (fig. 53) deux prismes en verre rectangles et isocèles A et B, dont les arêtes de l'angle droit sont parallèles, et dont les faces hypoténuses, aussi parallèles, se recouvrent par moitié. Un objet situé en P au-devant de la demi-face apparente de A, et dans le voisinage de la normale au milieu d'elle, sera vu par l'œil O placé sur la normale à la demi-face apparente de B. Les faisceaux incidents utiles subissent, en

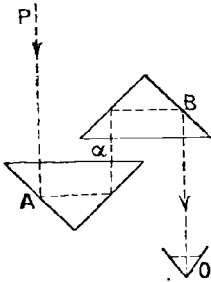


Fig. 53.

effet, quatre réflexions totales sur les faces de l'angle droit des prismes. L'image perçue par l'œil sera virtuelle, — c'est une image spéculaire, — non grossie et

droite. On se rend compte de cette dernière propriété soit en construisant l'image, soit, aussi simplement, en observant que les deux prismes équivalent à quatre miroirs plans, dont l'effet de chacun d'eux est de faire subir à l'image une rotation de 90° autour d'une parallèle à l'arête de l'angle droit, au total, une rotation de 360° .

Remarquons maintenant que, si un miroir plan tourne d'un angle θ autour d'un rayon incident, ou d'une parallèle à celui-ci, le rayon réfléchi tourne du même angle. Si donc on fait opérer au prisme B une rotation de 90° autour de la normale α aux centres des demi-faces en regard des deux prismes, l'image perçue par l'œil tournera, autour d'une parallèle à l'axe de rotation, d'un angle de 180° (90° pour chacun des deux miroirs plans que constituent les faces réfléchissantes du prisme B). L'image sera donc perçue renversée.

Que l'on interpose alors, en avant de A, sur le trajet du faisceau incident, un objectif convergent. Celui-ci donnera une image réelle et renversée, que le nouveau système des prismes, système croisé appelé *combinaison Porro*, renversera à nouveau, et maintiendra sûrement réelle, si le foyer de l'objectif se trouve au delà de la demi-face de sortie de B. En observant cette image réelle et droite à l'aide d'un oculaire positif, la *lunette-cornet de Porro* sera constituée (fig. 54).

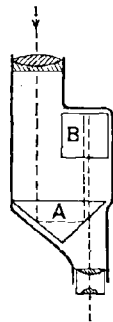


Fig. 54.

148. **Lunette à prismes.** — Le grand avantage de pareils instruments, — appelés aujourd'hui *lunettes à prismes*, — tient à la possibilité d'employer, dans

des appareils géométriquement courts, des objectifs à long foyer qui peuvent, par suite, être constitués simplement (à deux verres) tout en donnant des images bien nettes.

L'objectif est donc un objectif astronomique, analogue à celui des lunettes terrestres. L'oculaire sera astronomique, puisque le système des prismes remplace le véhicule (avec la seule restriction que le grossissement véhiculaire est l'unité). Il pourrait être d'un type quelconque ; mais le verre antérieur pouvant être placé aussi voisin de l'image qu'on le désire, le type Huygens est inutile. On lui préférera l'oculaire de Ramsden, qui donne moins de distorsion, et plus particulièrement celui à verre d'œil composé, dit *achromatisé*, qui conduit aisément à un champ apparent bien net de 0,65 à 0,70.

Les relations géométriques entre l'objectif et l'oculaire sont celles qui conviendraient à une lunette astronomique ayant les mêmes propriétés (au renversement près de l'image). Il faut cependant tenir compte, dans les calculs, de l'allongement de focale que produit le trajet du faisceau réfracté dans les prismes, trajet égal à la somme des longueurs des hypoténuses ; il est nécessaire, enfin, d'observer que le champ est physiquement limité par le phénomène de la réflexion totale, si l'on tient à avoir un champ de clarté uniforme.

L'effet du système véhiculaire prismatique est indépendant de la distance relative des prismes entre eux et à l'objectif et à l'oculaire. Par un choix convenable de ces intervalles, on pourra réduire au minimum la longueur d'une lunette dont l'objectif et l'oculaire sont donnés. Le problème est du ressort de la géométrie élémentaire. Il faudra cependant observer que les

dimensions des prismes sont d'autant plus grandes, et que, en conséquence, la focale objective s'allonge d'autant plus que les prismes sont plus rapprochés de l'objectif.

Avec une pareille combinaison, on peut constituer des lunettes aussi peu encombrantes que celles du type de Galilée, et ayant cependant un grossissement et une pénétration très supérieurs, et, en outre, un champ bien plus étendu et d'ailleurs uniformément éclairé.

149. **Dispositions diverses du véhicule Porro.** — L'effet du véhicule Porro ne change pas si l'on sectionne les prismes, et si on les déplace d'une façon quelconque, pourvu que les quatre faces réfléchissantes gardent les mêmes positions relatives, et qu'en outre, pour la conservation des qualités optiques des images, les faces réfringentes d'entrée et de sortie restent normales à l'axe général de l'instrument. On peut disposer tout ou partie des prismes en avant de l'objectif; on pourrait même les placer en arrière de l'oculaire. La disposition la plus convenable tient au but poursuivi.

Porro avait modifié sa première combinaison pour réduire à quelques centimètres la longueur de l'appareil dans le sens de l'axe : c'est la *lunette Napoléon III* (14). Dans la figure 55, le système des prismes *a*, *b*, *C* procède de celui de la figure 53 et produit les mêmes effets. La combinaison figurée ferait donc voir les objets renversés. Mais si l'on fait tourner de 90° , autour de α ,

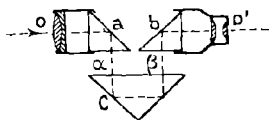


Fig. 55.

le prisme a et l'objectif o , de façon à amener celui-ci en arrière du plan de la figure ; et si, par une rotation de 90° autour de β , on porte l'ensemble b et o' vers l'avant, on obtiendra, comme précédemment, une lunette laissant les images droites. L'instrument sera très court suivant la normale au plan du tableau, c'est-à-dire suivant la ligne visuelle ; sa longueur se reportera sur la normale à l'hypoténuse du prisme C' , lequel sera éloigné en conséquence des deux autres, et logé dans une monture servant de poignée, verticale, à la lunette.

Quand on applique le système Porro à des lunettes munies d'objectif de grande ouverture absolue, les questions de netteté et de clarté de l'image et du prix de revient conduisent à placer les prismes dans le voisinage de l'image objective, afin que leurs dimensions restent faibles. Malgré cette sujétion, la longueur de la lunette demeure très inférieure à celle d'une longue-vue ordinaire ; car, dans celle-ci, l'oculaire terrestre a une longueur qui varie des $\frac{4}{10}$ aux $\frac{7}{10}$ de la focale de

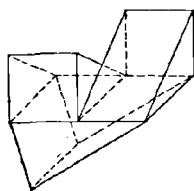


Fig. 56.

l'objectif. On peut alors adopter pour les deux prismes, ou mieux pour les quatre demi-prismes, la combinaison la plus commode au point de vue du montage. Telle est celle indiquée figure 56, où les trois éléments constitutants sont collés au baume de Canada, et qui n'est autre que la combinaison de la lunette précédente, les trois prismes étant réunis.

Lorsqu'on désire effectuer un transport latéral d'image l'un a des prismes peut être placé devant l'objectif. On obtient alors la lunette de la figure 57, qui renverse les images. On redressera celles-ci en faisant tourner

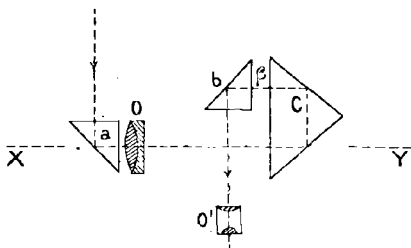


Fig. 57.

l'ensemble (Cbo') de 90° autour de xy , puis le système b, o' de 90° autour de la position prise par β . On obtient ainsi la combinaison employée dans la *jumelle-ciseau* de Zeiss.

150. Véhicule tétraédrique de M. Huet. —

La combinaison Porro n'est pas la seule qui réalise, avec la brisure de l'axe optique, le renversement de l'image. Le problème peut être posé et géométriquement résolu : il s'agit, en effet, de combiner des miroirs plans de manière à atteindre le but proposé, avec cette condition que les axes des faisceaux doivent les attaquer sous l'angle de 45° , et cela afin de pouvoir ensuite substituer des prismes aux miroirs. Le véhicule Porro se rapporte au cas de quatre miroirs : on peut s'en fixer moins ou davantage. L'étude de la question nécessiterait des développements que nous ne pouvons introduire ici. Nous nous bornerons à signaler la solution

élégante donnée par M. Huet¹ pour le cas de six miroirs.

Considérons le système (fig. 58, A) formé de trois prismes rectangles et isoscèles dont les arêtes sont perpendiculaires au tableau. Faisons tourner de 90° le prisme c autour de la normale à la face commune à a et à b de manière à amener la face γ en arrière du tableau; puis, faisons tourner le système total b, c autour de la normale à la face commune à a et à b , de

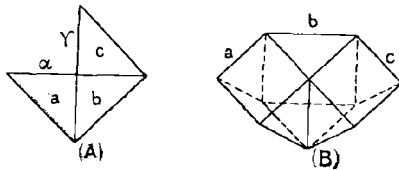


Fig. 58.

façon à amener c vers l'avant. Le système des trois prismes aura la configuration indiquée à côté (fig. 58, B). Un faisceau entrant normalement à la face α sortira normalement à la face γ , qui est alors dans le même plan, après s'être réfléchi sur les faces hypoténuses de chacun des trois prismes; en outre l'image aura tourné de 90° par rapport à l'axe du faisceau incident.

Que l'on prolonge les faces réfléchissantes et réfringentes, et l'on aura un tétraèdre, solide convexe et par suite taillable dans un seul bloc de verre. Ce *tétraèdre* change le sens de la direction des faisceaux et imprime à l'image une rotation d'un angle droit. L'ensemble de deux tétraèdres convenablement orientés remettra les

¹ Brevet fr. 277186.

faisceaux dans la direction primitive en donnant à l'image une rotation de 180° , c'est-à-dire en la renversant : la situation relative des tétraèdres est définie par le parallélisme des faces réfringentes et la symétrie des solides par rapport à un plan parallèle aux axes de l'objectif et de l'oculaire. Les deux tétraèdres d'une combinaison sont donc des figures symétriques, non superposables.

L'avantage de ce dispositif est de constituer des lunettes à la fois courtes, à cause du repliement de l'axe, et plates, car leur épaisseur dépend de celle d'un tétraèdre, les éléments n'y étant pas à angle droit, comme dans la combinaison Porro. La taille des tétraèdres est, cela va de soi, plus délicate et moins courante que celle des prismes isocèles rectangles.

151. **Véhicule à prismes de Wollaston.** — Les systèmes du type de Porro ou analogues opèrent le renversement de l'image consécutivement à son déplacement. On peut se proposer d'éviter ce dernier. Il suffit d'employer deux prismes de Wollaston (fig. 59)

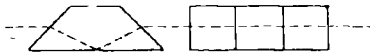


Fig. 59.

croisés ; chacun d'eux, agissant par une réflexion totale comprise entre deux réfractions, effectue une rotation de 180° autour d'une droite du plan de réflexion, perpendiculaire à la ligne visuelle. En disposant les plans de réflexion à angle droit, leur intersection parallèle à l'axe de la lunette, et les deux prismes entre l'objectif et l'oculaire, le renversement demandé se pro-

duira sans que l'image quitte l'axe primitif. Mais la solution est, sauf cas particuliers, toute théorique : car les prismes sont volumineux, par suite onéreux. Les pertes de lumière par réflexion et par absorption ne sont pas négligeables, et l'instrument perd rarement de sa longueur.

152. **Prisme en toit.** — Le prisme d'Amici (193), appelé quelquefois *prisme en toit* ou à *toiture*, a été également employé¹ dans le but de transporter l'image en la redressant et en la déplaçant, au besoin, parallèlement à elle-même. Le système employé dans la jumelle Forbes² paraît se rapporter à ce dispositif. Il n'est d'ailleurs pas le seul de cette espèce.

153. **Lunette de Galilée.** — La combinaison optique qui constitue la lunette de Galilée est des plus simples (fig. 60).

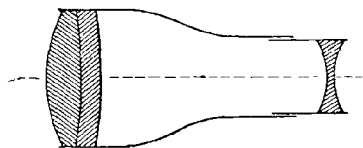


Fig. 60.

Un système objectif convergent donnerait, d'un objet éloigné, une image réelle et renversée; avant que celle-ci se forme, on dis-

pose, sur le trajet du faisceau réfracté, un oculaire divergent qui rend virtuelle l'image objective, et donne en outre une image virtuelle, droite et agrandie, que l'œil observe.

La mise au point s'opère par déplacement longitudinal de l'oculaire par rapport à l'objectif. L'instrument ne comporte ni diaphragme de champ, ni diaphragmes

¹ GOERZ. Brevet fr. n° 350557 de 1905.

² Brevet fr. 329246.

de limitation : ces derniers sont constitués par les montures des verres ; mais trop ouverts pour être, à ce point de vue, efficaces, ils laissent, en réalité, remplir leur rôle par la pupille de l'observateur. L'anneau oculaire est *virtuel*.

154. — L'objectif est généralement du type astronomique Clairaut à deux verres collés : crown biconvexe à l'extérieur, flint plan-concave à l'intérieur. L'oculaire est une lentille simple, biconcave, en flint ; sa focale n'est pas inférieure à 3 centimètres.

L'objectif est achromatique, ou sensiblement ; l'ensemble jouit approximativement de l'achromatisme apparent.

Les lunettes de cette espèce, associées par deux, constituent les jumelles de modèle courant, dites à six verres (trois par corps). Il existe des jumelles à 8, 10 et même 12 verres ; pour ces dernières, en particulier, les deux combinaisons de chaque lunette comportent chacune trois verres collés : à l'objectif, un flint biconcave entre deux crowns biconvexes ; à l'oculaire, un crown biconvexe entre deux flints biconcaves. La faible puissance de la lunette de Galilée, quoique l'instrument soit recommandable à d'autres égards, ne justifie pas une pareille complication ; le prix seul de l'instrument est augmenté ; il n'est pas rare que ses qualités propres soient amoindries.

155. **Lunette hyperdioptrique.** — La lunette de Galilée a un champ restreint. M. le commandant Daubresse (15) a montré qu'on pouvait y remédier en interposant une lentille convergente, dite *de champ*, entre l'objectif et l'oculaire. La combinaison ainsi constituée porte le nom de *lunette hyperdioptrique*.

En utilisant les notations du numéro 96, et désignant en outre par φ la focale du verre de champ, par λ l'intervalle de celui-ci à l'objectif, la géométrie donne la relation

$$\gamma = \frac{\Omega + G\rho}{G^2\varepsilon + (G - 1)F + G \left[G\varphi + \frac{F\varphi}{f} - F \right]}$$

Le champ augmentera donc si (Cf. la valeur de γ dans § 96) le troisième terme du dénominateur est négatif, les autres grandeurs restant constantes. Écrivant cette condition et tenant compte de la relation

$$\varphi = \frac{Ff}{F + f - \lambda},$$

on voit que le champ γ , — l'ouverture de l'objectif, sa focale et le grossissement restant invariables, — croîtra quand f et λ se rapprocheront de zéro.

Le champ de pleine lumière conserve, dans cette combinaison, le même rapport avec le champ total, que dans la lunette ordinaire : sa valeur absolue, — c'est l'important, — augmente donc.

156. Appréciation des variétés de lunettes terrestres. — Pour l'observation des objets terrestres éloignés, le choix de l'opérateur peut se porter sur la longue-vue, la lunette à prismes ou la lunette de Galilée.

La lunette terrestre, composée uniquement de lentilles centrées, donne, lorsqu'elle est bien construite, un champ net dans toute son étendue : la pénétration sur les bords peut ne différer qu'à peine de celle du centre. L'achromatisme peut être obtenu presque par-

faitement. Les pertes de lumière par réflexion ou par absorption restent généralement faibles. La fidélité des images est suffisante. L'amplitude du champ, qui est uniformément éclairé, est susceptible d'atteindre une valeur γ telle que son produit par le grossissement soit voisin de l'unité.

En présence de ces avantages, les lunettes ordinaires ont des inconvénients : elles sont longues, et par suite peu maniables ; leur clarté propre, qui dépend de la grandeur de l'anneau oculaire rarement supérieure à 2 millimètres, ne peut être augmentée qu'au prix d'une exagération des dimensions devant laquelle on recule souvent. Ce sont donc des instruments qui, pendant l'observation, doivent être maintenus fixes ; ils exigent un support. La netteté du champ dans toute son étendue permet de les utiliser dans ces conditions.

Les lunettes à prismes ont presque les propriétés inverses des précédentes. Moins volumineuses, elle sont mieux en main ; il est possible, sans se heurter à des difficultés matérielles, de leur donner un grand anneau oculaire (5 à 6 millimètres de diamètre). Mais si leur champ peut atteindre, avec le grossissement, les mêmes valeurs que dans la longue-vue, la constance de la netteté n'est pas obtenue. En dehors de l'axe, les faisceaux traversant les prismes acquièrent de l'astigmatisme, comme dans la traversée d'une glace épaisse à faces parallèles ; les images perdent de leur netteté à mesure qu'on s'éloigne du centre, et on perçoit fréquemment ce défaut dans le dernier tiers du champ. La correction de l'astigmatisme ne paraît pas possible, car l'astigmatisme est proportionnelle à l'épaisseur des prismes dans le sens de la traversée des fais-

ceaux. Les prismes occasionnent en outre, toujours comme une glace plane, un chromatisme latéral, qui se répercute sur l'espacement des anneaux oculaires dus aux diverses radiations : il est rare de trouver des lunettes à prismes bien achromatisées, surtout dès que le grossissement s'élève. Enfin les pertes par absorption ne sont plus aussi faibles que dans la lunette terrestre : les prismes doivent être taillés dans une substance bien transparente ; les anneaux oculaires doivent être plus ouverts.

Il résulte de ces remarques que les lunettes à prismes sont avant tout des lunettes à main ; le champ efficace d'observation est la partie centrale du champ total, vers laquelle l'objet peut être rapidement et presque instinctivement amené ; le reste du champ n'est guère qu'un champ de recherche. Ajoutons que la netteté centrale peut être aussi bonne que dans une lunette terrestre.

En leur donnant des anneaux oculaires très forts, les lunettes à prismes peuvent rendre des services dans l'observation par temps sombres.

Quant à la lunette de Galilée, on a déjà énuméré ses défauts : faiblesse du champ, éclairément non uniforme de celui-ci, pénétration très faible. Mais elle présente un avantage indiscutable, celui de la clarté, que les autres instruments n'acquerront jamais : la supériorité, à ce point de vue, de la lunette de Galilée se constate sans ambiguïté dans l'observation courante ; elle tient à son organisation sommaire, et, surtout, à la possibilité pour la pupille de recevoir des faisceaux d'autant plus larges que le champ s'obscurcit davantage. En raison, en outre, de son faible volume, la lunette

de Galilée sera par excellence l'instrument à main pour l'observation, et surtout pour la recherche, quand les objets seront faiblement éclairés (temps sombres ou brumeux, crépuscule, nuit).

157. **Lunette à grossissement variable.** —

Dans les lunettes bien organisées, le grossissement et, par suite, la puissance sont inversement proportionnels au champ. L'examen d'un objet qui demande une grande pénétration peut se contenter d'un champ restreint; mais sa recherche devient alors pénible.

On sait comment on a tourné la difficulté dans les lunettes astronomiques d'observatoire, en adjoignant à l'instrument une lunette-chercheur à grand champ et à faible grossissement; car, dans la recherche, la pénétration ne joue qu'un rôle secondaire.

La solution s'applique rarement aux lunettes terrestres : elle conduirait à doubler l'instrument. Aussi a-t-on cherché depuis longtemps à obtenir dans un même appareil des grossissements différents, en rendant variable la disposition des éléments optiques constituants.

Le grossissement, rapport des focales de l'objectif et de l'oculaire, se modifiera quand l'une ou l'autre des focales, ou toutes deux, varieront. On s'adresse généralement à l'oculaire qui comporte un plus grand nombre d'éléments. La lunette terrestre à *grossissement variable*, dite *polyalde* dans la première moitié du XIX^e siècle, date de loin : Dollond en construisait sur un principe qu'on a souvent suivi. Il consiste à modifier la focale de l'oculaire en faisant varier les positions du verre redresseur et du verre de champ; car on ne saurait s'adresser à la lentille collectrice, qui doit rester près de

l'image. Quant au verre d'œil, il suit le mouvement du champ, soit par déplacement convenable opéré par l'observateur dans la mise au point, soit par glissement automatique et réglé en conséquence, lorsqu'on tient à ce que la mise au point soit conservée pendant toute la variation du grossissement. Dans les appareils de ce genre, un bouton moletté déplace simultanément le verre de champ et le redresseur de leur écartement minimum, correspondant au plus faible grossissement, à leur intervalle maximum : la variation du grossissement est continue. En même temps, le verre d'œil, qui a été mis préalablement au point soit par déplacement individuel, soit par glissement d'ensemble de l'oculaire terrestre entier, se porte en s'appuyant sur un organe spécial (came, par exemple), qui le maintient à sa distance primitive de la seconde image réelle, laquelle suit, d'après les lois de l'optique, la déformation de l'oculaire.

On ne peut, en général, assurer pour tous les grossissements la correction des aberrations sphériques et chromatiques. Il est naturel qu'on l'opère d'abord pour le plus fort grossissement, afin de réaliser la puissance maximum de l'instrument, et ensuite, s'il est possible, pour le grossissement moyen, qui peut être celui du cas normal d'emploi de la lunette.

Remarquons que, puisqu'on ne touche pas à l'objectif, l'anneau oculaire grandit et que, par suite, la clarté augmente quand le grossissement diminue ; sa valeur sera réglée d'après le grossissement maximum ou moyen, suivant le parti qu'on voudra tirer de l'appareil.

La variation du grossissement peut encore être pro-

duite soit par déplacement relatif du véhicule et de l'oculaire astronomique consécutif d'un glissement total de l'oculaire terrestre entier (oculaire *pancratique*), soit par simple mouvement de la lentille collectrice qui est alors triple.

En modifiant la focale seule de l'objectif, le grossissement change. Dans ce cas, l'objectif est constitué comme un *télé-objectif* (5)¹, et les variations nécessaires sont obtenues par le déplacement de la lentille négative (divergente) : ce mouvement doit être accompagné d'un glissement automatique de tout l'oculaire terrestre. Le grossissement peut être continuellement variable, ou être seulement assuré, avec la mise au point, pour deux positions de la lentille mobile.

Les lunettes à prismes se prêtent difficilement à la variation du grossissement : la place peut faire défaut (si l'axe est replié) à la lentille divergente ; l'oculaire est trop simple pour être déformé. La solution adoptée consiste à munir l'instrument d'oculaires de forces différentes (deux en général), montés excentriquement par rapport à l'axe, et que, par un mouvement de rotation, on peut placer successivement dans le prolongement de cet axe. La mise au point n'est alors, cela est évident, nullement assurée ; elle doit être réalisée à chaque changement d'oculaire.

Quand les lunettes ne comportent que deux grossissements, l'un est souvent double de l'autre. Lorsque le grossissement est variable, on aura une idée de ses variations possibles en observant que des lunettes ont

¹ La combinaison télé-objective a été aussi utilisée dans le but de raccourcir les lunettes astronomiques ou terrestres. (STEINHEIL, in *Zeitsch. f. Instrk.*, t. XII, 1892.)

été construites dont les grossissements variaient respectivement de 7 à 17, de 15 à 25, de 20 à 40, de 60 à 150.

158. Périscope. — Un observateur étant au pied d'une masse couvrante opaque, il s'agit pour lui de voir ce qui se passe au delà. Le problème s'est posé depuis longtemps au défenseur d'une place forte pour reconnaître, en toute sécurité, les dispositions de l'assaillant. Si la solution, entrevue d'ailleurs, n'a pas été mise au point, c'est que l'accroissement aléatoire d'un danger permanent a paru moins redoutable que la complication certaine d'un appareil optique délicat.

La question s'est de nouveau posée récemment, et sans espoir cette fois, qu'on pût la négliger, à propos des sous-marins : la masse couvrante, ici, est la masse d'eau en avant et au-dessus du navire ; la région à explorer est la surface de la mer.

La solution est, dans tous les cas, la même : au-dessus de la masse couvrante, un organe optique sera disposé qui recevra les faisceaux émis par les objets du champ à observer et qui les renverra à un autre organe optique à proximité de l'observateur. Deux miroirs plans parallèles remplissent ce but : le dispositif est passé depuis longtemps dans la Physique amusante.

Un astronome hollandais, Jean Hevel (Hévélius), indiqua¹ un perfectionnement de ce *tube optique*, en lui adjoignant les éléments d'une lunette de Galilée. La figure 61, tirée des ouvrages du xviii^e siècle, donne une idée suffisante de cet instrument, auquel l'auteur avait donné le nom significatif de *polémoscope*.

¹ Dans la préface de sa *Selenographia, sive Lunæ descriptio*. Gedani. 1647.

Que l'on conserve le dispositif d'Hévélius, ou qu'on lui substitue les éléments d'une lunette terrestre, l'appareil conserve un grave défaut : la limitation excessive du champ. Il faut, en effet, remarquer que la distance entre les deux miroirs peut atteindre plusieurs mètres; les dimensions du miroir supérieur devraient donc être assez grandes, pour un champ un peu étendu. D'autre part, étant données les conditions d'utilisation de l'instrument, la substitution s'impose de prismes aux miroirs, dont il faut éviter la double image, l'argenture sur face unique active étant à rejeter; de là l'obligation de reporter l'objectif immédiatement en avant ou en arrière du prisme supérieur, c'est-à-dire en haut de l'appareil.

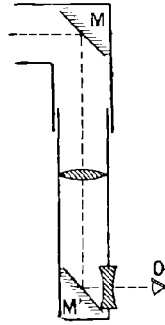


Fig. 61.

L'instrument n'est alors, aux prismes près qui produisent seulement la brisure de l'axe, qu'une lunette terrestre de très grande longueur. A cette condition absolue et non modifiable, le mode d'emploi ajoute que l'on peut se contenter d'un faible grossissement (4 ou 3, et même 1), mais qu'il faut le plus grand champ possible (10° ou 15°).

Si, avec ces conditions, on cherche à réaliser une lunette terrestre du type de Dollond ou du type de Galilée, un calcul sommaire d'optique géométrique montre que, pour des lunettes de 3 à 4 mètres seulement, on arrive à des ouvertures de verre invraisemblables, et qui sont de l'ordre des gros objectifs astronomiques. La solution est à rejeter, malgré l'acuité du problème : elle est trop onéreuse. Cette consta-

tation paraît avoir longtemps arrêté les chercheurs.

On aurait pu cependant passer outre¹. La condition gênante est relative à la grande longueur nécessaire à l'instrument. Or, la lunette terrestre de Kepler présentait ce défaut, qui est ici une qualité. La combinaison était tout indiquée.

C'est peut-être elle qui a été envisagée dans le *cleptoscope* Russo et Lauranti² et l'*hyphydroscope* de Grubb³ : nous disons peut-être, parce que les textes des brevets ne font pas allusion aux difficultés surmontées. Mais on y est parvenu indirectement dans les instruments de M. Ginssberg⁴, de M. Daubresse⁵, et probablement aussi dans le périscope Goerz⁶, en remarquant que, si dans une lunette astronomique on regarde par l'objectif, le champ devient très considérable en même temps que le grossissement s'affaiblit et descend au-dessous de l'unité. Si alors on observe cette image rapetissée avec une seconde lunette de grossissement convenable, le grossissement de l'ensemble pourra acquérir une valeur assez faible, sans que le champ diminue outre mesure, et cela en laissant aux ouvertures des verres leurs dimensions habituelles; quant à la longueur de l'instrument, elle double par l'emploi de deux lunettes.

¹ On voudra bien ne pas voir ici une critique de dénigrement à l'égard des inventeurs. Nous essayons de coordonner des idées et des faits; la méthode d'invention, s'il en est une, n'est pas en question. On invente comme on peut : l'essentiel est de produire. Il n'est pas ridicule d'enfoncer une porte ouverte, si l'on est le premier à s'apercevoir qu'elle n'était pas fermée.

² Brevet fr. 318076.

³ Brevet fr. 319961.

⁴ Brevet fr. 324736.

⁵ Brevet fr. 370853.

⁶ Brevet fr. 355349.

On est donc aussi conduit à associer, objectif contre objectif, deux lunettes astronomiques de grossissements G_1 et G_2 , et dont les champs réels sont γ_1 et γ_2 .

Le grossissement produit est $g = \frac{G_2}{G_1}$, la lunette de grossissement G_1 étant en avant. Quant au champ résultant, si les lunettes sont de même qualité ($G_1 \gamma_1 = G_2 \gamma_2 = k$), sa valeur sera $\gamma = G_1 \gamma_2$ pour un grossissement total $g > 1$, qui donne $\gamma_2 < \gamma_1$, ou encore

$$\gamma = k \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{k}{g}.$$

En faisant $k = 0,50$ ou $0,75$, valeurs possibles, on obtient $\gamma = 7^\circ$ ou 11° pour $g = 4$, et $\gamma = 27^\circ$ ou 35° pour $g = 1$.

Ces calculs approximatifs pourraient être rendus plus rigoureux en remplaçant les angles de champ par leurs tangentes, et en discutant la valeur admissible pour k ; ils suffisent pour montrer l'ordre de grandeur des constantes de l'instrument.

159. Périscope et lunette de Kepler. — La combinaison optique comprenant deux lunettes astronomiques placées bout à bout est identique à celle de la lunette de Kepler-Scheiner. car il est avantageux de donner aux deux objectifs des focales égales, cette condition conduisant à la longueur maximum pour une ouverture donnée des verres et pour des qualités équivalentes de ceux-ci.

On peut étudier simplement, au point de vue actuel, la combinaison de Kepler, qui réalise le transport des images sans leur amplification. Considérons (fig. 62) les trois systèmes convergents dont les ouvertures C, B, A

doivent être inférieures à un maximum Ω fixé d'après les conditions pratiques d'exécution.

Le grossissement de l'instrument est donné par $g = \frac{f}{f'}$.

Pour déterminer le champ possible, formons les images des différentes surfaces actives par rapport aux systèmes antérieurs. Nous négligerons la surface arrière

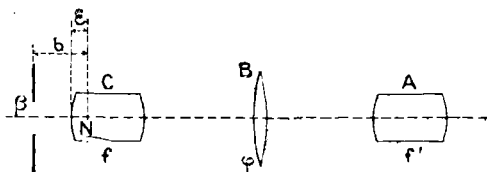


Fig. 62.

de C, et nous prendrons seulement les surfaces moyennes de B et de A; ces simplifications sont admissibles, comme le montre une discussion sommaire. On obtient sans difficulté les relations (N est le nœud antérieur de C) :

$$b = f \left[1 + \frac{f}{2\phi} \right], \quad \beta = \frac{f}{2\phi} B,$$

$$a = f \left[1 + g \left(1 + \frac{f}{\phi} \right) \right], \quad \alpha = \frac{f}{f'} A^{(1)}.$$

Les expressions possibles du champ sont alors :

$$\pm \frac{\beta - C}{b - \varepsilon}, \quad \pm \frac{\alpha - C}{a - \varepsilon},$$

(1) a, α sont relativement à A les analogues de b, β , qui se rapportent à B.

ou :

$$\pm \frac{\frac{h}{2} - k}{1 + \frac{f}{2\varphi} - \frac{\varepsilon}{f}}, \quad (1); \quad \pm \frac{k' - k}{1 + g \left(1 + \frac{f'}{\varphi}\right) - \frac{\varepsilon}{f}}, \quad (2)$$

h, k, k' étant les rapports des ouvertures des systèmes à leurs focales.

Les expressions (2) doivent être rejetées après examen sommaire, car le dénominateur renferme g , et, en outre, les systèmes A et C ayant des positions semblables par rapport aux images qui les concernent, on ne saurait faire k' bien différent de k .

Quant à l'expression (1), elle acquerra la plus grande valeur possible quand on fera φ et ε grands. Cela revient à prendre un système B de grande focale, et qui peut par suite être relativement mince, et un système C allongé, afin que la face antérieure soit bien en avant du point nodal d'incidence. Mais alors on peut ouvrir le verre de façon que l'on ait $k > \frac{h}{2}$. Alors, tant que le dénominateur reste positif, on doit prendre le signe négatif dans l'expression, et l'on voit que le système B travaille totalement dans toute son étendue, et l'objectif partiellement. C'est ce qui se passe dans le cas des lunettes bout à bout.

On remarquera encore que, pour que la pénétration corresponde au grossissement g , on devra avoir, en millimètres, $\beta = 2g$. On en déduit :

$$B = \frac{4g\varphi}{f}, \quad (\text{millim}), \quad C = 2g + (f - \varepsilon) \gamma + \frac{f\gamma}{2\varphi}.$$

En général on aura $B > C$, et ce sera à B qu'on

donnera l'ouverture maximum Ω . Quant à A, son ouverture sera aussi, en général, inférieure à celle de B.

On peut se demander les conditions d'un second transport, l'image définitive restant droite. Dans ce cas, réalisé géométriquement dans la figure 63, il sera logique de faire coïncider les ouvertures d'entrée données par B et B'. Il suit de là que B est l'image de B' à travers A. En donnant à B et à B' même ouverture et même focale, écrivant que B est l'image non agran-

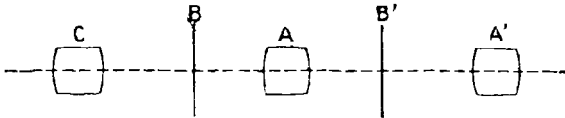


Fig. 63.

die de B' et que A ne donne à l'image objective à transmettre aucun grossissement, on trouve aisément que A doit avoir une focale infinie. Donc A, système focal, est constitué par deux lentilles convergentes dont les foyers en regard coïncident. En les rendant identiques, on réalise évidemment, en raison de la symétrie, la conservation du champ primitif. Le transport de l'image se trouve assuré sur une longueur quelconque, sans autre inconvénient que la perte de clarté qui résulte des nombreux verres traversés. L'ensemble revient à plusieurs lunettes de Kepler, oculaires contre oculaires, mais avec la condition de coïncidence de leurs foyers extérieurs.

160. **Périscope à miroir.** — Il ne semble pas, au moins par ce qui a été rendu public, que les appareils du genre précédent aient été les premiers utilisés

dans les sous-marins. Le dispositif primitif aurait été le *périscop*e, — le nom en a été étendu aux lunettes dont il a été question, — et qui, dû au commandant Mangin (30), consiste, en principe (fig. 64), en un miroir parabolique M concave, en forme de tore donnant dans son plan focal Φ l'image de l'horizon H. Le champ a une amplitude de 360° autour de la verticale et de 10 à 15° de part et d'autre de l'horizon. Mais les images sont distordues, et peu aisément observables.

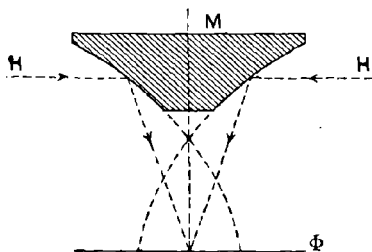


Fig. 64.

Pratiquement d'ailleurs, au miroir dont l'argenteure serait peu résistante, a été substitué un prisme à réflexion totale, à faces courbes, également en forme de tore.

161. **Lunette panoramique.** — Si grand que soit le champ d'une lunette périscopique, il est nécessaire de faire tourner l'appareil sur son axe quand on veut explorer l'horizon entier. L'observateur doit suivre le mouvement. On s'est proposé d'éviter cette sujétion, en organisant l'instrument de façon que l'image définitive reste fixe dans l'espace. Dans ces conditions, l'appareil, qui devient une *lunette panoramique*, comporte un système objectif mobile et un système oculaire fixe. Sa forme reste coudée, afin que les faisceaux incidents puissent atteindre l'objectif par-dessus la tête de l'observateur.

Si l'on se borne à faire tourner autour de l'axe vertical d'une lunette périscopique le prisme supérieur, et l'objectif supposé en avant, tout l'horizon défile devant l'observateur; mais les images tournent en même temps autour de l'axe horizontal de l'oculaire et, en particulier, se renversent quand l'objectif regarde vers l'arrière.

La solution suivante (fig. 65) a été appliquée par la

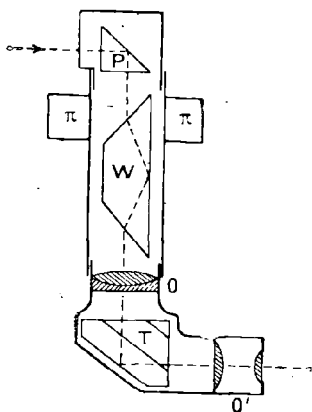


Fig. 65.

maison Goerz¹, pour éviter cet inconvénient. Entre l'objectif O et l'oculaire O' d'une lunette astronomique est interposé un prisme à toiture T, à réflexion presque totale; en avant de l'objectif sont disposés un prisme de Wollaston W et un prisme ordinaire P. Les prismes T et W redressent l'image comme le ferait un véhicule et la placent verticalement devant l'oculaire; les prismes P et W transmettent l'image à l'objectif.

Lorsque P tourne autour de l'axe vertical pour explorer l'horizon, l'image définitive reste droite, pourvu que W suive le mouvement de P avec une vitesse angulaire moitié moindre. Cette propriété est aisée à démontrer géométriquement. Les prismes P et W sont solidaires de pignons dentés, contenus dans une boîte π ,

¹ Brevet fr. 322890.

qui assurent le rapport de leurs rotations. En outre, le déplacement individuel de P autour d'un axe horizontal normal à celui de l'appareil permet, entre certaines limites, de balayer l'espace dans un plan vertical.

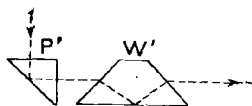


Fig. 66.

Le prisme à toiture T peut être remplacé dans l'appareil précédent par un prisme ordinaire P' et un autre prisme de Wollaston W', tous deux fixes (fig. 66).

Télescopes catoptriques.

162. — Le télescope dérive de la lunette astronomique ou terrestre par la substitution d'un miroir concave au système objectif. Des modifications de détail s'ensuivent quant à la constitution ou à la disposition de l'oculaire.

Les formules qui expriment le grossissement, la grandeur et la position de l'anneau oculaire, le champ réel ou apparent, seront les mêmes que pour la lunette astronomique : il suffira d'y faire entrer les focales des éléments réfléchissants. La relation qui donne la longueur matérielle de l'instrument subira, au contraire, des modifications tenant au retour des rayons qu'implique la présence de miroirs.

163. **Télescopes à vision directe.** — Le premier télescope réalisé est celui de J. Gregory, avec miroir objectif *annulaire* et miroir véhiculaire concave. Un siècle après, Cassegrain remplace ce dernier organe par un miroir convexe.

Dans ces appareils, décrits dans tous les traités de Physique, la direction de la vision instrumentale est la même qu'à l'œil nu.

164. **Télescopes à vision latérale.** — Quelques années après Gregory, Newton conçut un télescope à miroir objectif non ouvert dans sa partie centrale.

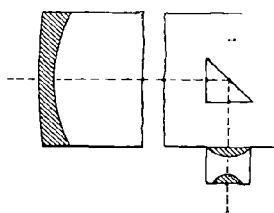


Fig. 67.

L'image produite est renvoyée latéralement (fig. 67) par un miroir plan, qui est placé à 45° sur l'axe et entre le miroir concave et l'image. C'est l'image latérale réelle qui est observée à l'aide d'un oculaire astronomique. Newton substitua d'ailleurs, dès le début, au miroir plan un

prisme à réflexion totale, — un *miroir de verre*, comme on disait alors ¹, — parce que cet organe donnait une image plus parfaite que les miroirs plans. C'est le premier exemple d'utilisation des prismes à réflexion totale.

La direction de la vision est ici normale à celle de la vision directe. Les images perçues subissent, par rapport à l'objet, une rotation de 180° autour d'une perpendiculaire à la direction de la vision; elles sont par suite symétriques.

En 1786, W. Herschel supprima, comme l'avait déjà fait Jacques Lemaire en 1728, le miroir plan du télescope de Newton. Il se borna à recevoir l'image objective sur le bord du tube en inclinant convenable-

¹ *Encyclopédie méthodique*. Édition Panckouke.

ment le miroir objectif. C'est le *front-view telescope*. Le sens de la vision est inversé relativement à la vision directe; l'image présente le même caractère de symétrie que dans le télescope de Newton.

165. **Miroirs de télescopes.** — L'idée première de la conception du télescope, — et, avant Gregory, elle était venue à l'esprit au P. Mersenne (1640) et au P. Zucchi (1652), — était de détruire le chromatisme de l'objectif de la lunette astronomique, en lui substituant une surface réfléchissante. Une conséquence immédiate s'ensuivait : la réduction de la longueur de l'instrument, à égale netteté d'images ; car dans la lunette l'atténuation des irisations n'était produite que grâce à des focales objectives très grandes. Même plus tard, après la découverte des objectifs achromatiques, le télescope conservera, au point de vue de la longueur, une légère supériorité sur la lunette, à ouverture égale ; car dans les lunettes, c'est la règle du pied pour pouce (un pied de focale par pouce d'ouverture) qui dominera. Dans les miroirs de télescope, ce rapport peut descendre pratiquement de 12 vers 8 ou 8,5 (télescope d'Herschel, installé à Slough).

Jusque vers le milieu du XIX^e siècle, les miroirs objectifs (et véhiculaires, s'il y a lieu) sont métalliques. L'alliage employé à leur fabrication est un bronze à environ 1 partie d'étain pour 2 de cuivre, durci par de faibles quantités de zinc, d'argent, d'arsenic, de platine, qui le rendent plus dur et plus blanc. Chaque astronome praticien, — car les savants s'occupent, à l'exemple d'Huygens, de la réalisation matérielle des instruments conçus, — a ses formules, variées, occasionnant parfois des déboires (métal trop mou au polissage, ou trop

cassant; — le mode de coulée influe autant que la composition de l'alliage). Les miroirs sont des calottes sphériques; lord Ross, en 1842, s'éloignera, le premier, de cette forme dans le but de réduire les aberrations sphériques.

En 1854, L. Foucault substitua aux miroirs métalliques des miroirs en verre; une couche d'argent, infiniment mince, était déposée sur la surface concave, puis brunie et polie. Dès lors, le miroir métallique est abandonné¹. En outre, à la forme sphérique succède la forme parabolique.

Ce n'est pas au point de vue économique que se manifeste la supériorité du miroir de verre argenté sur le miroir métallique. Sans doute, le miroir n'agissant pas par réfringence, la qualité *verre optique* est inutile; encore faut-il que la masse soit bien homogène, afin que la taille s'effectue régulièrement, que l'outil ne rencontre pas des régions de duretés diverses qu'il creuserait différemment. En outre, l'homogénéité doit être suffisante pour que le verre ne *travaille* pas de lui-même, ne se déforme pas, — il s'agit ici de quantités excessivement faibles. Ces conditions obligent généralement à rebuter, soit après coulée, soit après recuit, un certain nombre de disques.

Les qualités qui font rechercher le miroir en verre argenté tiennent à la perfection de sa taille, et à son pouvoir réfléchissant. Matière très dure, au sens minéralogique du mot, bien continue, plus homogène qu'un alliage métallique, le verre peut acquérir un poli plus

¹ On y revient cependant dans les études spectrométriques, car la couche argentée est relativement transparente pour les rayons très réfringibles (ultraviolet, surtout).

parfait que le métal, et des formes plus rapprochées des figures géométriques idéales. Les difficultés du polissage spéculaire des métaux, d'autant plus grandes que la matière est moins dure, sont bien connues des micrographes métallurgistes.

Quant au pouvoir réfléchissant, il est, relativement à un miroir métallique, bien supérieur avec un miroir en verre argenté, et se maintient plus aisément. Un miroir métallique fraîchement poli ne renvoie que les 0,60 de la lumière incidente; la proportion peut atteindre 0,95 dans le miroir argenté, et les couleurs se conservent mieux.

Les agents atmosphériques attaquent le miroir métallique, dont les constituants sont assez oxydables; dès que le miroir est terni, son repolissage, qui s'impose, exige un travail d'atelier presque aussi important que le polissage primitif, et dans lequel une fausse manœuvre peut le mettre hors de service.

L'argent est moins délicat. Les émanations sulfureuses sont surtout à redouter pour lui; elles le jaunissent en augmentant fortement son pouvoir absorbant. On peut, dans les observatoires, se garantir de ces accidents. D'autre part, si, pour d'autres causes, la surface argentée se ternit légèrement, elle peut être ravivée par un polissage effectué sur place et qui ne risque jamais de modifier la forme du miroir. Enfin, même s'il y avait lieu de procéder à une réargenture, ce n'est pas cette opération qui modifierait la qualité optique du miroir.

Le verre se prête malaisément à la confection de miroirs annulaires; aussi les télescopes du genre Gregory ou Cassegrain sont-ils entièrement abandonnés.

Le fait est sans importance. D'une utilité contestable dans les observatoires astronomiques, ces instruments ne pourraient être employés, à cause de leur faible longueur, que pour les observations terrestres; mais les appareils à miroirs demandent de tels soins, que les inconvénients certains dépassent les avantages probables.

166. **Télescope et lunette.** — Le télescope, qui avait, dès son apparition, supplanté la lunette astronomique, a, depuis, avantageusement lutté contre elle, malgré la découverte des systèmes achromatiques.

La puissance d'une lunette ou d'un télescope, — son pouvoir résolutif des nébuleuses, par exemple, — tient d'abord à la grandeur de l'ouverture objective. A dimensions égales, lorsqu'il s'agit d'ouvertures de 50 à 80 centimètres, de 1 mètre et même davantage, et à qualités égales, s'il se peut, le miroir argenté demeure le plus économique; car les masses de verre optique nécessaires aux *réfracteurs*, — ce sont les lunettes, — sont fort coûteuses.

Les télescopes sont plus courts. En donnant au miroir la forme parabolique qui détruit l'aberration sphérique pour les objets célestes, on peut réduire leur focale au triple seulement de leur ouverture.

Dans les lunettes, au contraire, la règle ancienne du pied pour pouce ne suffit plus, toujours à qualités égales: c'est par 20 ou 30 qu'il faut multiplier l'ouverture pour avoir la focale de l'objectif.

D'un autre côté, la luminosité des miroirs est très grande; on a vu plus haut que la proportion de lumière réfléchie était de 0,95. Les grandes lunettes, dont les verres sont nécessairement épais, n'en transmettent guère plus de 0,65.

La supériorité du télescope s'accroît quand l'image objective est reçue sur une plaque photographique. Dans le miroir, l'achromatisme est rigoureux pour toutes ces radiations. Dans l'objectif astronomique, il n'est obtenu que pour deux couleurs, car on ne peut guère songer, à moins d'augmenter les pertes de lumière, à constituer des objectifs à plus de deux verres. La netteté photographique ne s'obtient dès lors, semblable à celle que donne le miroir, qu'en allongeant la focale de l'objectif ; et l'on arrive à lui donner 50 fois l'ouverture. En outre, la lumière transmise tombe à 0,50 et même à 0,30 : il s'agit ici, bien entendu, de la lumière actinique, bleue, absorbée en bien plus grande quantité que les radiations jaunes ou vertes, par les crowns et les flints généralement employés dans les gros objectifs.

167. — W. Herschel, qui a construit plus de quatre cents miroirs métalliques, a atteint, dans l'un d'eux, l'ouverture de 1/7 centimètres (la focale avait 12 mètres). Lord Ross a fabriqué un miroir métallique de 183 centimètres (focale de 16^m,8), parabolique ; le plus grand écart avec sa sphère osculatrice dépasse à peine 2 μ .

Foucault a laissé quelques miroirs en verre argentés, d'un travail parfait. Les principaux sont ceux de 120 centimètres (observatoire de Paris), de 83 centimètres (Toulouse) et de 80 centimètres (Marseille). La focale est d'environ six fois l'ouverture.

Le Dr Common (Anglais) a construit un miroir de 150 centimètres. M. Ritchey, à l'observatoire de Yerkes, en a fabriqué un de 154 centimètres d'ouverture et de 7^m,50 de focale (78).

Jumelles.

168. — Une jumelle est constituée par deux lunettes ne renversant pas les images (lunettes terrestres, à prismes, de Galilée), dont les axes sont parallèles et situés à l'écartement des centres des pupilles de l'observateur. Une monture appropriée réunit les deux corps de l'appareil; son rôle est de maintenir l'écartement, fixe ou variable, des deux lunettes, et, s'il y a lieu, de permettre leur mise au point simultanée.

En pratique, les éléments constitutifs d'une jumelle sont des lunettes à prismes ou des lunettes galiléiques. Les premières ont détrôné les longues-vues à véhicule, trop longues, dont l'emploi dans les appareils à main n'était guère justifié.

169. **Montage des lunettes.** — Dans la plupart des jumelles de théâtre ou de campagne du type Galilée, les deux lunettes sont à un écartement invariable; la chose est sans importance tant que l'intervalle pupillaire des yeux de l'observateur ne diffère de cet écartement que de 1 ou 2 millimètres. Mais une pareille tolérance ne peut être admise quand les lunettes (terrestres ou à prismes) comportent des anneaux oculaires réels. Dans ce cas, l'écartement des oculaires doit pouvoir prendre toutes les valeurs comprises entre deux limites données : 56 à 72 millimètres, par exemple. Les deux corps sont alors mobiles autour d'un axe commun de rotation, ou se déplacent parallèlement grâce à un jeu de coulisses.

170. **Mise au point.** — Dans les jumelles ordinaires, la mise au point s'opère par déplacement d'ensemble des deux corps, par l'intermédiaire d'un bouton moletté et d'une vis à long pas. Dans les instruments soignés, il existe, en outre, un organe correcteur qui permet de porter l'un des oculaires de part et d'autre de sa position normale, lorsqu'il y a lieu de corriger une inégalité d'accommodation des yeux. Le plus souvent, cependant, dans ces derniers appareils, la mise au point doit s'exécuter séparément pour chaque corps. Ce dispositif, qui facilite la construction de la jumelle, est, à notre avis, moins commode que le précédent.

171. **Jumelle stéréoscopique.** — La disposition relative, dans une jumelle, de deux longues-vues ou de deux lunettes galiléiques, est unique. Il en est autrement des lunettes à prismes, au moins de celles, en majorité, qui comportent des axes différents, quoique parallèles, pour l'objectif et l'oculaire. Dans ce cas, l'écartement des objectifs peut acquérir toutes les valeurs comprises entre $\varpi + 2\eta$ et $\varpi - 2\eta$, ϖ étant l'intervalle pupillaire, η le déplacement d'un axe dans une lunette; la seconde valeur peut d'ailleurs être réduite si la distance de l'axe de l'oculaire à la partie extérieure de l'appareil, comptée dans le plan des axes et perpendiculairement à eux, est inférieure à $\frac{1}{2}\varpi$; il suffit d'indiquer cette restriction.

Le cas le plus intéressant est évidemment celui, toujours réalisable, où l'écartement des objectifs est maximum. La jumelle possède alors la faculté *stéréoscopique*, et elle en porte la désignation.

La combinaison Porro se prête naturellement à la disposition stéréoscopique. L'inventeur avait obtenu cette dernière. Si elle a reparu quarante ans plus tard comme une nouveauté, c'est que Porro avait dû abandonner et son invention et ses applications, la taille des prismes étant, à l'époque, trop onéreuse et les verres trop absorbants.

Dans la combinaison Porro, le déplacement η d'un axe est égal à la demi-hypoténuse d'un prisme; elle permet, dans une jumelle de modèle courant, de grossissement 8, de porter l'écartement des objectifs à $1,75 \varpi$. En employant des tétraèdres de M. Huet, dans lesquels la base est, dans des conditions analogues, plus grande, cet intervalle monte à 2ϖ .

172. **Jumelle à grand effet stéréoscopique.**
— L'écartement des objectifs peut être accru, et avec lui la faculté stéréoscopique, en augmentant η , c'est-à-dire les dimensions des prismes. La solution serait onéreuse, donnerait des instruments lourds et massifs, et conduirait à la production d'images très astigmatiques. La difficulté a été surmontée dans la jumelle à grand effet stéréoscopique de Zeiss, ou *jumelle-ciseau*, en scindant le dispositif Porro : un demi-prisme est placé à l'extérieur, remplissant le rôle d'un miroir plan renvoyant l'image à 90° de sa direction ; le reste de la combinaison est transporté près du foyer de l'objectif. de façon que, ses dimensions étant faibles, l'astigmatisme soit réduit. Les images restent ainsi acceptables quelque grand que soit l'écartement des objectifs. Celui-ci, pour des modèles courants, atteint 8, 15 et 20 fois l'intervalle pupillaire. Le grossissement individuel des lunettes s'élève aussi en sui-

vant, ou non, la relation d'égalité indiquée par Helmholtz.

La maison Goerz remplace, dans son stéréotélescope (Br. fr. 366886, de 1906), la combinaison interne de l'appareil précédent par un prisme de Wollaston suivi d'un prisme en toit.

173. **Appréciation des variétés de jumelles.**

— En pratique courante, le choix d'une jumelle est limité aux appareils à prismes et à la combinaison de Galilée. Il faut, en effet, mettre à part, comme instruments exceptionnels, les jumelles à deux longues-vues terrestres; ces derniers ne peuvent guère être utilisés que sur support, à moins que l'on ne se résolve à diminuer la longueur des lunettes; et cette amélioration ne peut être obtenue que par une complication des éléments optiques, qui rend l'appareil délicat et onéreux.

Entre la jumelle à prismes et la jumelle de Galilée, la décision est facile. Il suffit de se reporter à ce qui a été dit des lunettes (156). La première sera utilisée lorsque l'observation exigera une certaine puissance, la perception des détails, et que la clarté sera suffisante. La jumelle de Galilée sera, avant tout, l'instrument employé dans le cas d'un éclairage médiocre des objets; sa faible puissance la désigne comme jumelle de théâtre: tout en assurant une vision meilleure que l'œil nu, elle laisse encore le degré d'illusion indispensable; aussi doit-on regarder comme une superfétation les jumelles à prismes de spectacle, dont les inconvénients ne sont que trop certains (prix élevé, manque de clarté) et les avantages problématiques. D'ailleurs la jumelle de Galilée devra, avant tout, être simple: les

instruments à six verres sont, dans la majorité des cas, suffisants; quant au grossissement, de 2,5 à 4 en général, il sera imprudent de le porter au delà de 6. C'est celui qui correspond à une ouverture d'objectif de 60 millimètres environ, ouverture que l'on ne peut accroître dans une jumelle, car l'intervalle des centres entre les objectifs, égal à leur diamètre augmenté de l'épaisseur de leur monture, ne peut dépasser l'écartement pupillaire, dont la valeur moyenne est de 62 à 65 millimètres.

Pour les jumelles à prismes, le choix peut s'exercer entre les diverses combinaisons qui se différencient par le plus ou moins d'écartement des objectifs. Laissons de côté les appareils à grand relief, nécessairement volumineux, et dont l'emploi exige un pied ou un appui, et bornons-nous aux jumelles à main.

L'accroissement d'intervalle des objectifs augmente, toutes choses égales d'ailleurs, le volume de l'instrument. Cet inconvénient est-il compensé par l'avantage que présente l'appareil d'être plus stéréoscopique? La question offre un certain intérêt.

Dans les jumelles bien maniables, le rapport maximum de l'écartement des objectifs à celui des oculaires est voisin de 2; le nombre 3 serait déjà un peu fort. Dans ces conditions, il n'y a pas à considérer la faculté stéréoscopique proprement dite, c'est-à-dire la possibilité d'examiner un objet sous deux points de vue différents; un simple déplacement de tête produit une variation d'aspect de l'objet au moins aussi accentuée, et avec une rapidité suffisante qui équivaut pratiquement à la simultanéité de la vision. Il ne reste donc à envisager que l'appréciation de la profondeur.

La formule finale du § 122 peut se mettre sous la forme

$$Gm = \frac{p}{200} \left[1 + \frac{p}{\sigma} \right].$$

Apprécions la qualité d'une jumelle en évaluant la distance p telle qu'une variation du dixième de sa valeur soit perceptible. La relation précédente, dans laquelle on fait $p = 10\sigma$, donne $p = 18Gm$.

Pour la jumelle habituellement employée dans l'artillerie de campagne, $G = 8$; il en résulte que $p = 150$, 250 ou 300 mètres, suivant que $m = 1$ (objectifs à l'écartement des oculaires), $m = 1,75$ (valeur normale) et $m = 2$ (valeur maximum pratique).

Ces nombres, bien qu'on puisse en contester l'exactitude absolue, indiquent cependant qu'il ne faut pas s'exagérer l'importance de la faculté dite stéréoscopique des jumelles à main. Au delà de quelques centaines de mètres, la profondeur ne devient perceptible que pour des différences considérables.

Dès que l'observation se porte sur des objets éloignés, toute jumelle est optiquement équivalente à une lunette monoculaire. Si cependant son emploi est préférable, le fait tient à l'habitude humaine de regarder couramment avec les deux yeux ; la sensation cérébrale est plus agréable, plus complète et moins fatigante ; la raison est d'ordre physiologique ; l'optique instrumentale n'a rien à voir dans cette question.

174. Maniement d'une jumelle. — Quel que soit son modèle, la jumelle doit, pendant l'observation, être réglée de manière que les images se forment le plus loin possible, et que les centres des oculaires soient à l'écartement pupillaire.

Dans les instruments à oculaires individuellement réglables, la mise au point s'effectue séparément pour chaque corps, relativement à l'œil correspondant, dans les mêmes conditions que pour une lunette.

Quand la jumelle comporte un mouvement d'ensemble des oculaires, et un système correcteur, du côté droit, par exemple, la mise au point doit se faire d'abord dans la lunette gauche par déplacement simultané des oculaires, puis du côté droit sous la seule action complémentaire du dispositif correcteur.

La mise au point ayant été ainsi rendue correcte, de préférence sur des objets éloignés, la mise à l'écartement doit s'opérer de la façon suivante. La jumelle étant complètement ouverte, de façon que l'intervalle oculaire soit supérieur à celui des pupilles, est placée devant les yeux et fermée ensuite lentement, jusqu'à ce qu'on obtienne la superposition des deux champs en un seul. Dans cette opération, l'observateur dirige la vision sur une surface uniformément éclairée, le ciel, par exemple, dans la région opposée au soleil. Il a soin de maintenir les yeux au repos, dans le vague, c'est à-dire de ne pas porter son attention sur telle ou telle région du champ, en particulier sur les bords des diaphragmes. Alors les lignes visuelles restent parallèles, et les deux corps de jumelle se trouvent disposés dans les meilleures conditions; sinon, si les yeux convergent, et comme ils tournent autour de leurs centres de rotation, l'intervalle pupillaire diminue; l'écartement des oculaires devient trop faible; et lorsqu'ensuite les images seront rejetées à l'infini, les yeux reprendront leurs positions normales, et les anneaux oculaires sortiront partiellement des pupilles.

CHAPITRE X

INSTRUMENTS D'OBSERVATION A FAIBLE DISTANCE

Loupe.

175. — La loupe est un système optique convergent, de focale finie et généralement faible, — quelques centimètres dans la plupart des cas, — et qui s'interpose entre l'œil et l'objet à examiner. Celui-ci est placé entre le foyer antérieur du système et la face du même côté, ou face frontale, de la loupe. Toutes les images produites sont virtuelles.

L'instrument est constitué par une ou plusieurs lentilles simples ou composées fixées dans une monture convenable; l'intervalle des verres est rarement variable.

L'œil se dispose le plus près possible de la surface arrière de la loupe, la pupille centrée sur l'axe de celle-ci. Il faut compter entre la surface en question et la pupille apparente une distance η , qui n'est pas inférieure à 8 millimètres.

Le champ de la loupe s'évaluera, en tenant compte de la constitution spéciale à chaque type, comme dans les instruments à anneau oculaire virtuel ; mais on ne pourra qu'imparfaitement utiliser ce champ théorique, à cause des aberrations. Sa partie centrale, dont l'expérience déterminera l'étendue, pourra seule prétendre à constituer le véritable champ de la loupe.

Le grossissement angulaire de la loupe est, distorsion à part, égal à l'unité. Son grossissement, rapport des grandeurs apparentes de l'image et de l'objet, celui-ci étant placé à la distance Δ_0 de la vision distincte, est exprimé par

$$G = \frac{\Delta_0}{f},$$

quand l'objet est situé au foyer antérieur du système, l'image étant alors reportée à l'infini.

La *force* de la loupe, — on l'a aussi appelée puissance, — est l'angle sous lequel on voit l'unité de longueur de l'objet, quand l'image est amenée à la distance minimum Δ_0 . Son expression approchée est

$$\frac{G}{\Delta_0} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{f}.$$

176. Loupe simple. — Une lentille convergente simple constitue la loupe la plus vulgaire et souvent employée. La forme la plus convenable pour la correction des aberrations est le plan convexe, la face plane vers l'œil. Le champ angulaire ne dépasse guère 0,17, soit une dizaine de degrés ; ce sont les aberrations chromatiques qui le réduisent, l'achromatisme apparent n'étant réalisé que pour un point intérieur au système, où l'œil ne peut, par suite, se placer.

Quand la valeur de la focale s'abaisse, que la force de la loupe augmente, ce sont les aberrations sphériques qui interviennent pour restreindre le champ; on les réduit en diaphragmant les lentilles soit par un sillon avec (Coddington) ou sans (Wollaston) matière opaque (fig. 68, a), soit par la forme même (fig. 68, b) des surfaces latérales inactives (Coddington) : il s'agit ici de lentilles relativement



Fig. 68.

épaisses (par rapport à leur ouverture et à leur focale).

A la loupe simple se rattache la loupe de Stanhope (fig. 69), dans laquelle la surface antérieure plane s'appuie sur l'objet à examiner ou le reçoit (petites photographies).

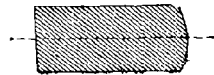


Fig. 69.

En utilisant des combinaisons achromatiques avec deux lentilles accolées, on peut porter le champ à 0,50 (soit 27°) pour des focales de 20 à 40 millimètres, ou à 0,35 (soit 20°) pour des focales voisines de 10 millimètres. Telle est, entre autres, la loupe dite *aplanétique* de Steinheil (36). Avec deux lentilles séparées par un espace lenticulaire d'air, la maison Zeiss¹ a indiqué une loupe (fig. 70) ayant un champ dépassant 30° et, en outre, corrigé de la distorsion et de l'astigmatisme dans une large mesure.

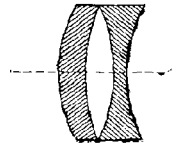


Fig. 70.

¹ Brevet fr. 338906.

177. **Doublets; loupes composées.** — L'oculaire de Ramsden et ses variantes peuvent être employés comme loupes composées. On leur préfère généralement,

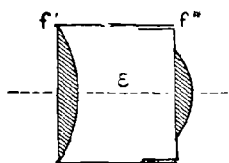


Fig. 71.

si l'on se borne à deux lentilles simples, le doublet de Wollaston (fig. 71) : c'est la loupe de mise au point des photographes, comprenant deux verres plan convexe ayant leurs faces planes tournées vers l'objet, avec les constantes suivantes (lentilles infiniment minces) :

$$f' = \frac{5}{3}f \quad f'' = 5f \quad \varepsilon = \frac{5}{2}f''.$$

La focale de l'ensemble peut descendre jusqu'à 5 millimètres ; le champ peut aller jusque vers 0,40 ou 0,50.

D'autres combinaisons à deux verres ont été employées : deux lentilles plan convexe égales ayant les sommets de leurs faces convexes en contact (Fraunhofer) ou à une distance égale au $\frac{3}{8}$ de leur focale (Wilson) : cette dernière donnerait un champ de 40°.

Ch. Chevalier avait organisé une loupe sur le type d'une lunette de Galilée qui est une véritable loupe de focale infinie : une lentille frontale double et achromatique, une lentille divergente simple à l'arrière.

En composant les lentilles des doublets, en utilisant les nouveaux verres optiques, on a pu améliorer le champ de l'instrument, réaliser un achromatisme plus parfait, réduire l'astigmatisme et corriger la distorsion

si sensible dans le doublet de Wollaston. Ce sont ces propriétés qui sont revendiquées par des loupes de mise au point, telle que la loupe *apodistortique* de Krauss.

Microscope.

178. Organisation générale du microscope.

— Le microscope comporte, comme la lunette astronomique, un système objectif et un système oculaire tous deux convergents, le premier donnant d'un objet une image renversée et réelle, que l'oculaire transforme en image virtuelle également renversée. La différence essentielle entre les deux instruments est, au point de vue optique, que la focale du microscope est finie, tandis qu'elle est infinie dans la lunette astronomique.

Le microscope d'observation ne constitue pas un instrument unique, bien défini, comme ceux que nous avons considérés jusqu'ici. Matériellement (raisons d'économie et de commodité d'emploi), il se compose, d'une part, d'une *monture* ou *corps* du microscope comprenant en particulier un tube métallique, et, d'autre part, d'une *série d'objectifs* et d'une *série d'oculaires*.

A l'une des extrémités du tube (fig. 72), dont la longueur reste, en principe, constante, se monte l'un des objectifs; à l'autre extrémité, on dispose l'oculaire. L'instrument est alors complet, et, suivant la combinaison réalisée, possède une certaine puissance. Par une association convenable des objectifs et des oculaires, l'opérateur peut faire varier cette puissance dans des limites étendues.

L'appareil ne comporte pas de diaphragmes de

clarté : le mode habituel d'emploi permet d'éviter les lumières latérales. D'ailleurs, si des réflexions intérieures se manifestent, on les évite en garnissant le tube par un cylindre en drap ou en papier noir mat ; il n'en résulte aucun inconvénient pour un instrument de laboratoire.

Les montures des verres des objectifs tiennent lieu



Fig. 72.

de diaphragmes de limitation ; quant au diaphragme de champ, c'est généralement l'oculaire qui le porte.

La mise au point s'effectue par un déplacement d'ensemble, relativement à l'objet, du tube armé de l'objectif et de l'oculaire convenables. L'image virtuelle que l'œil observe est amenée, dans la mesure du possible, à la distance minimum de la vision distincte.

179. Objectif ; ouverture numérique. — Les objectifs de microscope se classent généralement d'après les valeurs de leurs focales évaluées en millimètres ou en pouces. Pour les moins courtes focales, l'objectif porte d'habitude un numéro d'autant plus faible que la focale est plus longue (n^{es} 1 à 5, dans le système français). Pour de très courtes focales, celles-ci sont désignées en fraction de pouce, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{12}$, avec l'indication à sec, immersion à eau ou immersion homogène, suivant la nature du milieu à interposer entre l'objet et l'objectif.

Une autre caractéristique est tout aussi utile : c'est l'*ouverture numérique* de l'objectif, suivant la dénomination de Abbe, qui croît habituellement en sens inverse de la focale. Un objectif L de microscope est aplanétique (fig. 73) pour deux points P et P' conjugués de

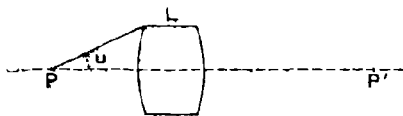


Fig. 73.

son axe. C'est en P que doit être amené le point objet à observer. Le faisceau incident utile possède alors une ouverture angulaire $2u$ qui est déterminée par la position de P et par l'ouverture utile de la frontale de l'objectif. Le milieu dans lequel se propage le faisceau incident utile ayant un indice n , l'ouverture numérique de l'objectif est définie par la relation

$$v = n \sin u$$

C'est cette grandeur qui est un des facteurs de la puissance d'un microscope. L'ouverture numérique varie de 0,10 à 1,65. Entre 0,5 et 1, elle est dite moyenne ; en dehors de ces limites, elle est faible ou grande. Au-dessous de 0,10, la puissance du microscope n'entre guère en jeu dans les observations ; seule la commodité d'emploi est à considérer.

180. Objectifs à faible ouverture. — Pour les faibles ouvertures numériques, l'objectif est employé à *sec*, c'est-à-dire sans interposition d'un milieu réfringent entre l'objet et la lentille frontale : objet et

microscope plongent dans l'air. L'objectif est constitué soit par une lentille triple (fig. 74) formée de trois verres collés ensemble, soit par un système de deux lentilles doubles achromatiques disposées à un intervalle convenable.

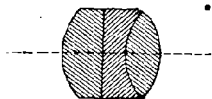


Fig. 74.

La lentille triple, utilisable jusqu'à l'ouverture de 0,15, permet de réaliser l'achromatisme du système pour deux radiations, l'aplanétisme central, et de détruire la distorsion. Par un choix convenable des verres, le spectre secondaire peut être considérablement réduit.

Au-dessus de 0,15 d'ouverture numérique, l'emploi de quatre verres, réunis deux par deux, assure plus efficacement la destruction des aberrations.

181. **Objectifs à moyenne ouverture.** — Dans les environs de l'ouverture de 0,5, le nombre des combinaisons doubles de l'objectif est porté à trois ; chaque lentille double a la forme plan convexe (fig. 75) et comprend un crown biconvexe et un flint plan concave, la face plane du côté de la lumière incidente.

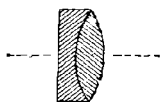


Fig. 75.

Quand l'ouverture augmente, on s'adresse souvent à la disposition pratiquée par Amici et qui met en œuvre les points aplanétiques des surfaces sphériques ou des lentilles épaisses. L'idée fondamentale est de borner le rôle des lentilles antérieures à réduire l'amplitude angulaire du faisceau incident, tout en le laissant homocentrique, et cela pour la radiation moyenne ; les combinaisons subséquentes assurent ensuite l'achromatisme.

Une lentille plan convexe épaisse L (fig. 76) possède deux points aplanétiques conjugués P et P' séparés par son foyer antérieur F , la face plane recevant la lumière incidente; l'aberration sphérique, positive entre P et P' , est négative en dehors de

ce segment. Un point lumineux placé en P donne une image aplanétique virtuelle en P' , le faisceau ayant diminué d'ouverture angulaire. Une seconde lentille L' peut à son tour rétrécir de nouveau

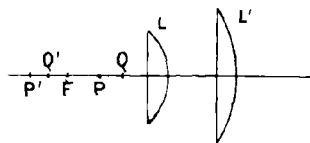


Fig. 76.

le faisceau en le laissant homocentrique; il suffit pour cela que son point aplanétique le plus rapproché coïncide avec P' .

On peut ne pas s'imposer cette sujétion et se borner à donner une partie commune aux deux segments PP' et QQ' limités par les points aplanétiques. Immédiatement hors de cette région commune, les deux aberrations seront de signes contraires, et la compensation de l'aberration sphérique se produira pour une position au moins de l'objet (6).

Dans les systèmes à *immersion homogène*, — le liquide interposé a le même indice de réfraction que la lentille frontale, — on utilise (20) les points aplanétiques des surfaces sphériques (fig. 77). Une lentille hémisphérique L de rayon r possède dans un milieu antérieur de même

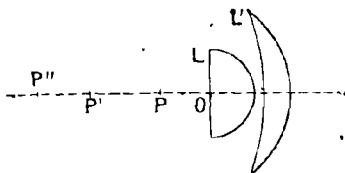


Fig. 77.

indice n qu'elle, deux points aplanétiques P et P' , tels que

$$PO = \frac{r}{n}, \quad P'O = nr.$$

Le faisceau incident issu de P sera, après réfraction, concourant en P' ; il restera homocentrique et sera moins divergent. Une seconde lentille L' le recevra, dont la face antérieure sera centrée sur P' , face ne produisant donc aucune nouvelle réfraction, et dont la surface postérieure sera telle que P' soit l'un de ses points aplanétiques. Le faisceau diminuera de convergence, car il aura pour sommet le second point aplanétique P'' de la surface postérieure de L' .

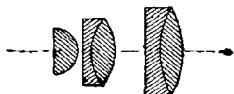


Fig. 78.

Dans les deux genres d'objectifs, des lentilles composées reprennent ensuite le faisceau relativement fermé, l'achromatisent et le font converger de l'autre côté de l'ensemble. La

figure 78 donne un exemple d'objectif d'ouverture moyenne.

182. **Objectifs à immersion.** — Dans les systèmes à sec, l'ouverture numérique, qui est alors égale à $\sin u$, ne peut croître qu'au prix de complications inadmissibles de l'objectif. En effet, u augmente avec l'ouverture de la lentille frontale et le rapprochement de l'objet par rapport à celle-ci. Mais la grande ouverture du faisceau nécessiterait l'emploi d'un nombre élevé de lentilles pour en diminuer successivement la divergence, car la grande ouverture absolue des verres n'est pas compatible avec une focale courte. D'ailleurs, $\sin u$ ne croît qu'assez lentement avec u ; ainsi, en pas-

sant de l'ouverture angulaire totale de 120° ($u = 60^\circ$, $\sin u = 0,87$) à l'ouverture limite et pratiquement irréalisable de 180° ($u = 90^\circ$, $\sin u = 1$), l'ouverture numérique n'augmenterait que de 15 %.

Il est préférable à tous égards d'agir alors sur n , c'est-à-dire sur le milieu interposé entre l'objet et l'objectif. En reliant par une goutte d'eau ($n = 1,336$) l'objet à la lentille frontale, l'ouverture numérique passe de $\sin u$ à $1,336 \sin u$, augmentant ainsi de 34 % environ. Amici, en 1840, avait indiqué ce procédé de l'immersion à eau. Elle permet de porter l'ouverture numérique jusqu'à 1,20; avec d'autres liquides, on peut atteindre 1,60.

Mais en accroissant ainsi l'ouverture numérique, on n'augmente le pouvoir résolvant qu'autant que les aberrations de l'objectif diminuent en conséquence. Le nombre de combinaisons augmente, leur organisation se modifie. La figure 79 indique la constitution d'un objectif de Leitz (36), dont l'ouverture numérique (immersion homogène) est de 1,30.



Fig. 79.

183. **Objectif apochromatique.** — Pour dépasser utilement cette ouverture numérique de 1,30, il est indispensable de réduire le spectre secondaire. On arrive alors aux combinaisons *apochromatiques*, dont les premières, remontant à 1886, sont dues à Abbe. Grâce à l'emploi des nouveaux verres, qui faisaient leur apparition à cette époque, l'objectif peut être rendu aplanétique pour deux couleurs, le spectre secondaire

ayant disparu. La figure 80 montre la composition d'un objectif apochromatique (20). L'ouverture numérique de 1,40 est obtenue avec une focale de 2 millimètres.

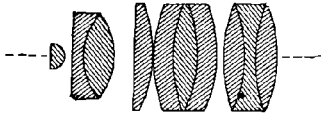


Fig. 80.

Abbe (2) a également employé, en combinaison avec les verres optiques, le spath fluor, dont l'in-

dice de réfraction est peu élevé ainsi que le pouvoir dispersif.

184. **Oculaire.** — L'oculaire du microscope est en général l'oculaire d'Huygens avec les constantes générales indiquées pour la lunette astronomique. La combinaison préférée est celle à deux verres simples, malgré la distorsion sensible qu'elle occasionne. L'oculaire de Ramsden est peu employé, à cause de la faiblesse de son champ, dans les microscopes d'observation; il n'intervient que lorsque l'instrument est utilisé pour des mesures.

Avec les objectifs apochromatiques, le verre de champ de l'oculaire d'Huygens est biconvexe; et si l'oculaire est fort, — c'est-à-dire si sa focale est courte. — le verre d'œil est en outre achromatisé. Ces dispositions ont pour but de conserver tout le bénéfice réalisé par la complication de l'objectif. L'oculaire est alors dit *compensateur*.

Le jeu d'oculaires d'un ensemble est en général de quatre. Le numéro s'élève à mesure que la focale diminue.

185. **Emploi du microscope.** — L'emploi du microscope d'observation nécessite que l'on dispose

d'abord l'objectif et l'oculaire choisis : le premier se monte à l'extrémité inférieure du tube, le second est glissé dans la partie supérieure de celui-ci. Le tube peut acquérir, par un tirage convenable, une longueur quelconque comprise entre certaines limites. En pratique, la puissance est maximum en même temps que la longueur du tube : objectifs et oculaires sont calculés en conséquence, et la diminution de longueur réduit le pouvoir de l'instrument à moins que l'objectif ne soit à longue correction.

Le choix des deux éléments optiques de l'instrument dépend naturellement de l'objet à examiner, et du genre d'étude entreprise. La seule règle générale à observer est de ne pas craindre de commencer par des objectifs et des oculaires faibles.

La mise au point rapide exige que l'on ait une idée assez exacte de la focale de l'objectif. Elle est amorcée par le mouvement de la crémaillère et achevée, jusqu'à ce que la netteté soit maximum, par celui de la vis micrométrique.

186. Éclairage des objets translucides. — Le microscope est utilisé dans l'observation soit des objets partiellement perméables à la lumière, soit des surfaces des corps opaques. Le premier cas concerne plus spécialement les physiologistes et les botanistes ; le second, les métallurgistes.

Dans les deux circonstances, l'éclairage de l'objet par la lumière naturelle diffuse suffit tant que le grossissement reste faible. Mais dès que la puissance de l'instrument s'élève, un éclairage intense devient indispensable.

Les objets de la première espèce sont généralement

constitués par des lames minces présentant dans leur structure des alternances de parties plus ou moins opaques, et d'autres plus ou moins translucides. L'éclairage a lieu par transparence, c'est-à-dire que l'objet est situé entre la source lumineuse et l'objectif : les images produites sont surtout des effets de diffraction.

Pour des grossissements peu considérables, — l'anneau oculaire est alors relativement large, — on peut se borner à concentrer la lumière de la source à l'aide d'un miroir concave placé sous l'objet, ou d'un miroir plan avec lentille convergente interposée entre lui et la source. Pour des grossissements élevés, c'est un système de lentilles formant condenseur qui s'intercale entre le miroir et l'objet, et qui doit avoir une ouverture au moins égale à celle de l'objectif. Le condenseur le plus simple est constitué par une demi-sphère dont la face plane regarde l'objet. Le condenseur imaginé

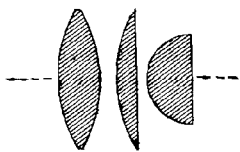


Fig. 81.

par Nachet en 1858, et modifié légèrement par Abbe en 1873, comprend en outre une lentille plan-convexe et une lentille biconvexe (fig. 81). Les ouvertures sont de 1,20, de 1,40 et de 1,60. Il existe des condensateurs achromatiques et apochromatiques, en particulier ceux des constructeurs anglais Powell et Lealand (57).

Le foyer du condenseur est amené sur l'objet ; un diaphragme iris sert à régler, le cas échéant, l'intensité lumineuse.

187. Éclairage des objets opaques. — L'éclairage

rage des surfaces des corps opaques est plus délicat. Il ne faut guère compter sur l'emploi d'une lentille projetant sur l'objet des rayons obliques. Le miroir préconisé par Lieberkhun en 1748 constituerait la solution idéale, s'il pouvait être efficace ; mais il ne convient qu'à des objectifs de grande longueur focale.

Les divers systèmes utilisables se réduisent à deux.

Au premier appartient le prisme de Nachet (fig. 82), prisme P à réflexion totale, qui peut se placer derrière l'objectif O et, par l'une des moitiés de celui-ci, transmettre sur l'objet le faisceau éclairant. Le prisme est disposé dans une monture qui s'intercale entre l'objectif et le tube du microscope ; un mouvement à crémaillère permet de l'effacer, le cas échéant.

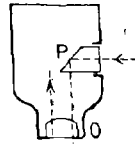


Fig. 82.

M. H. Le Châtelier (63) a, dans son microscope de métallurgiste, modifié ce dispositif, en allongeant considérablement la partie du prisme dont la section est rectangulaire, de manière à en former une tige carrée dont la base, taillée sphériquement, forme lentille. Le tube métallique qui contient ce prisme peut recevoir des diaphragmes. Un prisme à réflexion totale, ajouté par M. Charpy, permet de faire entrer dans l'appareil un faisceau provenant de sources diversement placées.

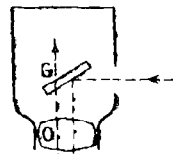


Fig. 83.

Le second système est représenté par le *vertical illuminator* de Smith (fig. 83), simple glace G à faces parallèles placée en arrière et près de l'objectif O, à 45° sur l'axe. Une ouverture du tube du microscope laisse passer le faisceau incident.

Cornu (fig. 84) a avantageusement remplacé ce dispositif par une pile de glaces G placée près de l'oculaire O' (11). Aucune modification n'est ainsi apportée à l'image objective, et, en outre, la quantité de lumière envoyée à l'objet est considérablement accrue.

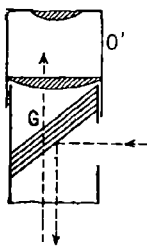


Fig. 84.

L'inconvénient commun à tous ces procédés tient à l'éclairage général du champ par les faisceaux réfléchis sur les diverses faces des verres d'objectif. On s'en rend compte, surtout avec les prismes, quand l'objectif est de faible numéro. Les systèmes à prismes ont en outre le défaut de ne pas laisser l'objectif travailler dans toute son ouverture : la puissance de l'instrument est nécessairement réduite. Le dispositif de Cornu se présente ainsi comme le meilleur au point de vue optique.

188. **Sources d'éclairage.** — La source éclairante doit, suivant les circonstances, satisfaire à diverses conditions relatives à son intensité lumineuse et à la nature des radiations.

En ce qui concerne l'intensité, qui doit être d'autant plus considérable que le grossissement est plus élevé, les sources lumineuses très intenses sont, aujourd'hui, assez variées : crayon de chaux ou boule de magnésie rendus incandescents par la flamme oxydrique (avec substitution à l'hydrogène du gaz d'éclairage, ou d'huile minérale, d'essence ou d'éther carburés), terres rares soumises à l'action du gaz d'éclairage (bec Auer) ou d'un courant électrique (lampe

Nernst à un ou plusieurs filaments), arc électrique entre pointes de charbon ou entre métaux. La seule précaution à prendre est d'éviter la transmission des rayons calorifiques de ces sources ; on les arrête en interposant entre la source et le condenseur une cuve contenant de l'eau pure ou mieux de l'eau alunée. Il est prudent, en outre, d'éliminer, le cas échéant, les radiations ultra-violettes, lorsqu'elles sont nombreuses, à l'aide d'une cuve renfermant du sulfate acide de quinine, quoique les nombreux verres optiques interposés entre l'œil et la source suffisent généralement à les absorber.

Dans certains cas, l'usage du microscope demande l'emploi d'une radiation simple ou peu complexe. En particulier, la pénétration de l'instrument est caractérisée par l'intervalle des détails séparables dont l'expression est, en lumière oblique :

$$\frac{\lambda}{2n \sin u}$$

Cet intervalle décroît avec λ , et par suite, dans ces conditions, la puissance augmente. Il y aura donc avantage à utiliser une radiation très réfrangible, qui doit cependant rester suffisamment perceptible à l'œil ; le bleu satisfait à ces conditions. On obtient cette couleur soit en la séparant par un prisme dans la lumière blanche et éliminant par des écrans les autres colorations, soit en interposant simplement entre la source et l'objet une cuve contenant du sulfate de cuivre ammoniacal, ou des verres bleus ; une épaisseur liquide de quelques centimètres (2 à 5) suffit généralement.

Dans d'autres cas, il y a intérêt à employer une

radiation simple sensible à l'œil (jaune ou verte) : ainsi en faisant usage de la lampe à vapeur de mercure dans le vide, très intense et n'émettant qu'un petit nombre de radiations simples, on peut ne laisser passer que la radiation verte, en absorbant le jaune par une cuve de chlorure de didyme, et les autres par une cuve de chromate de potassium. Les observations microscopiques acquièrent ainsi une douceur remarquable.

189. Objectifs à correction. — Assez fréquemment, l'observation au microscope exige que l'objet soit recouvert d'une lame transparente protectrice ; c'est le cas presque constant dans l'emploi des objectifs à immersion, le liquide interposé pouvant détériorer l'objet. Un objectif qui, sans la présence de cette lame couvre-objet, donnerait des images très nettes, perd de sa puissance quand la plaque transparente est mise en place, et cela quelle que soit la variation de mise au point qu'on opère. Le fait avait été remarqué par Amici en 1829, et par lord Ross en 1837 : il est dû aux aberrations propres de la glace couvre-objet.

Les constructeurs livrent leurs objectifs corrigés pour une épaisseur donnée du couvre-objet constitué par un verre bien déterminé. Lorsqu'on veut se passer de la glace protectrice, ou en utiliser d'autres espèces, il faut avoir recours aux objectifs à *correction* (les autres sont dits à *monture fixe*) ; le système inférieur de l'objectif (1 ou 2 lentilles) est mobile par rapport au système supérieur (autres verres).

Si la correction est assez *longue*, c'est à-dire le déplacement suffisamment grand, elle permet, la qualité optique étant conservée, d'employer ces objectifs avec d'autres longueurs de tube.

Dans certaines variétés d'objectifs, de très grande focale (par suite de faible numéro, à peu près exclusivement le n° 1), le déplacement des deux parties de l'objectif n'a d'autre rôle que de faire varier sa focale, afin de pouvoir modifier le grossissement avec un seul organe ; cette disposition a pour cause essentielle le prix assez élevé des objectifs de microscope.

190. **Liquides d'immersion.** — L'emploi des objectifs à immersion exige que l'on soit fixé sur la nature du liquide à interposer et, le cas échéant, du couvre-objet. Le but de l'immersion est de rendre $n \sin u$ le plus grand possible. En considérant dans la figure 85, le couvre-objet d'indice n_1 et le liquide d'indice n_2 , placés devant l'ouverture MN de l'objectif, on sait que

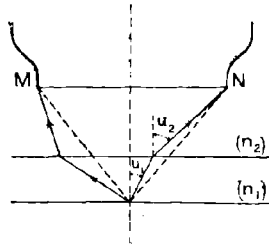


Fig. 85.

$$n_1 \sin u_1 = n_2 \sin u_2.$$

Que l'on ait $n_1 < n_2$ (côté droit de la figure), ou $n_1 > n_2$ (côté gauche), le maximum de l'ouverture numérique sera obtenu avec l'indice commun maximum, et avec $u_1 = u_2 = u$. On néglige ici la variation très faible de mise au point due aux variations possibles des indices.

La première conclusion à tirer de cette remarque est l'importance de l'immersion homogène, caractérisée par l'égalité des indices du liquide et du couvre-objet ; elle est réalisée depuis 1878, suivant les indications de Abbe, en employant une glace en crown ($n = 1,515$)

et de l'huile de cèdre pure, qui a même indice; la lentille frontale est du même crown ou d'un crown plus réfringent, afin que le faisceau n'augmente pas de divergence.

Quand la glace n'a pas exactement l'indice ci-dessus indiqué, on peut faire varier convenablement celui de l'huile de cèdre en la mélangeant, après l'avoir oxydée, à de l'huile d'olives.

Lorsque l'égalité des indices ne peut être obtenue, la figure montre aisément qu'il faut, dans tous les cas, réduire au minimum l'épaisseur du couvre-objet, afin de rapprocher u_2 ou u'_2 de u . Dans le procédé de l'immersion à eau, indiqué par Amici en 1840, et employé en raison de sa simplicité, $n_2 < n_1$.

L'immersion homogène, à l'huile de cèdre, permet de porter l'ouverture numérique jusqu'à 1,35. Au delà, les liquides employés sont le monobromure de naphthaline ($n = 1,658$), indiqué par Abbe, liquide incolore, oléagineux, à odeur de naphthaline, non volatil, mais irritant légèrement les yeux et dissolvant les résines; l'iodure de méthyle ($n = 1,743$), incolore, dense (2,27), un peu volatil, à odeur d'iodoforme; l'iodure de méthyle saturé par le soufre ($n = 1,787$); la solution ($n = 2,40$) du réalgar artificiel dans le tribromure d'arsenic, indiquée en 1884 par Smith, qui doit être employée chaude et qui s'altère rapidement (57).

C'est avec le monobromure de naphthaline qu'on a pu atteindre l'ouverture de 1,63.

191. Placement de l'objet par rapport au microscope. — La profondeur du champ du microscope est excessivement faible, surtout avec les objectifs à courte focale. Bien que le champ réel soit restreint,

il est indispensable que la surface de l'objet à examiner, toujours à peu près plane, soit normale à l'axe de l'instrument.

Quand il s'agit d'une lame mince (coupe histologique, par exemple), le parallélisme des faces est suffisant pour que, la lame étant appliquée sur la platine, — bien montée dans un appareil soigné, — la face vue de l'objet soit dans les conditions indiquées. Dans d'autres cas, par exemple dans l'observation des échantillons métalliques, il serait onéreux de s'imposer la mise à épaisseur constante de l'objet, dont la face inférieure n'est pas soumise à l'examen. On peut alors utiliser le microscope coudé employé pour l'examen des réactions chimiques ou le microscope de M. Le Châtelier, qui dérive du même principe et qui comporte le système éclairant spécial pour corps opaques (63).

Dans le même but, nous avons fait monter un microscope ordinaire, dépourvu de son pied et de sa platine, sur le support bien connu des physiciens : deux plaques reliées par trois ressorts de traction et maintenues à l'écartement convenable par trois vis, guidées dans la plaque supérieure et s'appuyant par leurs pointes mousses sur la plaque inférieure ; une double glissière intercalée entre la plaque supérieure et le corps du microscope permet de donner à celui-ci tous les déplacements nécessaires ; par le jeu des vis, on réalise l'inclinaison convenable de l'instrument, l'objet restant fixé sur son support.

192. **Microscope binoculaire.** — La théorie du microscope binoculaire a été donnée plus haut. La figure 86 montre deux autres dispositifs des systèmes

produisant le transport et la déviation des faisceaux; l'un (a) est dû à Abbe (57), l'autre à Nacet (14).

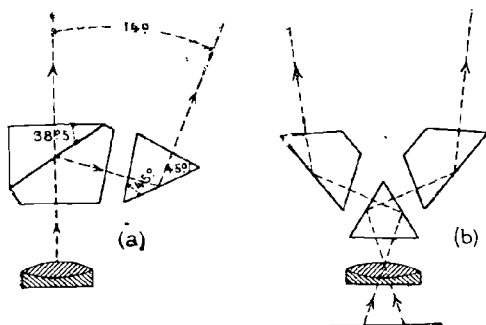


Fig. 86.

193. Organes accessoires du microscope. —

Comme organes optiques accessoires du microscope d'observation, on ne rencontre guère que les chambres claires, qui permettent de dessiner l'objet examiné, et les systèmes redresseurs d'image.

Les chambres claires sont constituées par des miroirs ou des prismes placés derrière l'oculaire (ou au-dessus de lui, suivant l'assiette de l'instrument), et qui laissent voir à la fois l'image virtuelle transportée et le papier. Il suffira ici de les signaler.

Le système redresseur a pour rôle de retourner l'image, afin de faciliter l'examen de l'ensemble. Nous indiquerons seulement le prisme rectangle à bases obliques d'Amici (fig. 87), employé dans ce but par Nacet et qui a été utilisé dans d'autres appareils pour le transport des images. Les faces actives sont à

angle droit en A, mais elles n'agissent que par réflexion partielle, les faisceaux ne tombant pas sur elles sous un angle voisin de 45° . Le prisme équivalent à un système de deux miroirs plans travaillant non successivement, mais simultanément, ou agissant comme un miroir plan unique normal à leur plan bissecteur et parallèle à l'arête, et qui donnerait, en outre, des images non symétriques. Les figures α et β permettent de se rendre compte du mode d'action du prisme.

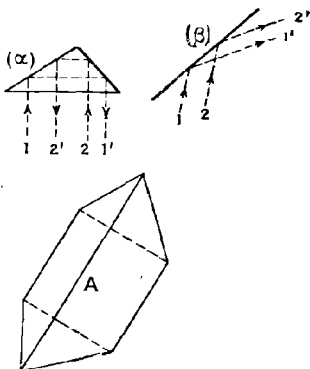


Fig. 87.

CHAPITRE XI

OBJECTIF PHOTOGRAPHIQUE ¹

194. Organisation de l'objectif photographique. — L'objectif photographique est un système optique convergent, de focale finie, donnant, des objets situés au delà de son foyer antérieur, une image définitive réelle; les images intermédiaires sont virtuelles.

Les systèmes optiques utilisés en photographie et qui forment plusieurs images réelles (deux, généralement), dont la seconde seule est reçue par la plaque sensible, peuvent être considérés comme des associations d'objectifs.

Matériellement, le photo-objectif est constitué par des *combinaisons* centrées sur un même axe. On appelle *combinaison*, — il y en a une ou deux, moins souvent trois, — un ensemble de lentilles plus ou moins épaisses, accolées les unes aux autres ou séparées par de faibles intervalles; le nombre de lentilles d'une combinaison dépasse rarement trois.

Les différentes combinaisons d'un objectif sont

¹ Pour ce chapitre, on a largement utilisé l'ouvrage (25).

réunies, formant ainsi un système invariable en général, à une monture métallique qui porte ou reçoit les diaphragmes et qui sert également à adapter l'objectif sur la chambre noire.

Les objectifs à une ou deux combinaisons, — *objectifs simples et doubles*, — ne sont munis que d'un seul *diaphragme de limitation*, à ouverture variable. Cette variation peut être obtenue soit par l'agencement même de l'organe (*diaphragme iris*, formé de lamelles opaques articulées, dont les bords déterminent un polygone d'un grand nombre de côtés limitant l'ouverture centrale sensiblement circulaire), soit par l'introduction, dans un logement *ad hoc* que présente la monture, de plaques (*diaphragmes à vannes*) percées d'ouvertures de diamètres et, s'il y a lieu, de formes convenables.

Les *triplets*, — objectifs à trois combinaisons, — comportent en outre un diaphragme de clarté.

Tous les objectifs sont munis de pare-soleils, souvent fixes.

195. Classification des objectifs. — L'étude des modifications subies par l'objectif photographique donne les raisons des diverses classifications dont il a été l'objet. D'ailleurs, autant de points de vue auxquels on peut se placer, autant de manières de grouper les types d'objectifs.

Le mode d'emploi ne peut guère être pris aujourd'hui comme base : il consiste dans la répartition des appareils en objectifs pour *paysages, monuments, portraits, groupes, reproductions*, etc. Sans atteindre à la création de l'objectif omnibus, les progrès de l'optique photographique ont cependant créé de larges zones

communes entre ces diverses catégories d'organes. Le groupement dont il s'agit ne peut être qu'un guide, pour le praticien, dans le choix d'un objectif étudié d'autre part.

La constitution optique offre, pour la classification, un meilleur point de départ. Elle répartit d'abord les objectifs, d'après le nombre de leurs combinaisons, en objectifs *simples*, *doubles* et *triples*.

L'extension considérable prise par la seconde classe, vis-à-vis de la première et surtout de la troisième, a conduit, par la considération d'un caractère géométrique, à grouper les objectifs à deux combinaisons en doublets *symétriques* et *asymétriques*; ces derniers ont d'ailleurs tendance à supplanter les autres.

La répartition en sous-groupes est ensuite opérée d'après les qualités optiques réalisées ou revendiquées. L'*amplitude du champ* a servi de guide dès l'apparition des *grands-angulaires*, ou encore l'absence de *distorsion* lors de la création des *rectilinéaires*. Aujourd'hui ces qualités passent, au point de vue de la classification pratique, après la *clarté théorique* de l'objectif.

Pour l'étude qui entre dans le cadre de cet ouvrage, nous examinerons seulement, dans chacune des trois classes précitées, les diverses organisations optiques des combinaisons; un historique succinct et nécessaire en précédera l'exposé. Des indications préalables seront données relativement aux qualités optiques requises par les objectifs suivant leur mode d'utilisation.

Une dernière remarque. La plupart des objectifs portent des noms expressifs; ce n'est pas sur eux qu'il faut faire fonds pour classer ces instruments ou en

déduire les propriétés. Même quand l'étymologie de ces expressions paraît certaine, ces marques commerciales ne renseignent pas toujours exactement sur le but poursuivi et les résultats atteints.

196. **Qualités optiques des objectifs.** — La notion de *finesse* d'un objectif procède de la netteté de l'image ; celle-ci, comme dans les autres instruments optiques, dépend du pouvoir séparateur, et par suite de la puissance de l'objectif. Sur l'image aérienne, la séparation possible des détails est réglée par les formules indiquées antérieurement, soit pour l'objectif astronomique, soit pour le microscope. Cette image est ici la seule à considérer, puisqu'il n'y a pas d'organe amplificateur, tel un oculaire. Mais la plaque recevant l'image ayant des propriétés particulières, la séparation aérienne ne se conservera que dans certaines conditions sur l'image réalisée. Nous avons fait observer que la faculté séparatrice propre à la plaque sensible dépendait de sa constitution et du traitement que subissait l'image latente ; c'est elle, plutôt que l'objectif, qui limitera la puissance de la chambre noire. Il est difficile, même avec des plaques au collodion, de produire deux traits fins, purs et noirs, espacés de moins de $0^{\text{mm}},01$. Cette grandeur, jointe à la connaissance des éléments optiques de l'objectif et géométriques de l'image, déterminera le pouvoir maximum d'un objectif. En général, on se tient au-dessous ; car, dans la pratique courante, la séparation des détails de l'image réalisée est fixée à $0^{\text{mm}},25$ ou $0^{\text{mm}},20$ si l'image doit être observée à l'œil nu, à $0^{\text{mm}},1$ ou $0^{\text{mm}},05$ si elle doit être examinée à la loupe.

La *clarté théorique* de l'objectif est exprimée sous la

forme $\frac{1}{m}$ ou $\frac{f}{m}$. La seconde indique l'ouverture maximum utile de l'objectif, dont f est la focale ; dans la première, m est le rapport de cette ouverture à la focale. Le nombre m varie dans des limites considérables. Sa valeur normale, entièrement arbitraire d'ailleurs, a été fixée à 10 : elle ne donne qu'un point de comparaison pour l'appréciation des clartés relatives de divers instruments. Les variations de m s'étendent de 3 à 30. Il a même été abaissé jusqu'à 0,5 dans des lentilles à liquides, plus curieuses que pratiques, au moins actuellement. Le jeu du diaphragme, — et alors on peut dire que l'objectif est différent, quoique restant matériellement le même, — fait monter m jusqu'à 40.

Le *champ* d'un objectif est exprimé habituellement par les deux dimensions en centimètres de la plaque rectangulaire couverte, ou par l'angle correspondant à la diagonale de la plaque (ouverture angulaire du champ réel). Sa valeur, dans la plupart des objectifs, — nous en exceptons les objectifs astronomiques, — ne descend pas au-dessous de 40°, peut atteindre assez fréquemment 80 à 100°, et même arriver à 135°. Ces valeurs considérables ne sont possibles que grâce au jeu du diaphragme ou à l'emploi de diaphragmes suffisamment étroits. Il est rare d'ailleurs que la netteté des bords ne soit pas sensiblement différente de celle du centre.

Le *champ*, sans autre spécification, doit s'entendre dans le cas des objets situés très loin (à l'infini) ; sa valeur augmente, pour une netteté déterminée, quand l'objet se rapproche, c'est-à-dire quand le grossissement linéaire augmente.

Les objectifs dont le champ peut atteindre 75° sont souvent appelés *grands-angulaires* ou objectifs *grand-angle*¹; vers 100° et au-dessus, ils portent le nom de *panoramiques*.

La *distorsion* n'est pas toujours parfaitement corrigée dans les objectifs, même dans ceux qui portent les noms de *rectiligne*, *rectilinéaire*, *orthoscopique*, et autres qualificatifs de même signification; elle est cependant alors peu perceptible, et ne devient nuisible que dans l'exécution de travaux spéciaux.

197. Caractéristiques numériques. — L'utilisation méthodique d'un objectif exige que l'on connaisse certaines caractéristiques qui peuvent être déterminées une fois pour toutes. Les principales sont : la valeur de la *focale*, la position des *points nodaux*, la situation par rapport à ceux-ci du plan du *diaphragme de limitation*, et les diverses *ouvertures* du diaphragme (quand il s'agit d'un diaphragme iris, des repères convenables sur la bague et le corps d'objectif définissent quelques ouvertures, les autres s'en déduisant par interpolation).

Ces renseignements devraient être indiqués sur la monture de l'objectif.

Le photographe peut, à la rigueur, et avec un peu d'habileté, déterminer ces constantes; mais il serait préférable qu'elles lui fussent données. Une précision de $0^{\text{mm}},5$ est, dans la plupart des cas, largement suffisante.

En dehors de ces caractéristiques numériques ou géométriques, il serait utile que l'on connût d'avance

¹ On donne aussi cette dénomination aux objectifs qui, travaillant à $f/10$, ont un champ d'au moins 60° .

le rapport entre la valeur optique (visuelle) et actinique de l'objectif.

198. **Objectif pour paysages.** — L'objectif pour paysages est certainement, au point de vue numérique, le plus commun ; il s'agit, dans ce cas, de la photographie d'objets inanimés à grande distance. Cette dernière expression signifie que les divers plans paraissent, du point où se trouve la chambre noire, confondus ; il suffit à cet effet que le premier plan se trouve à une distance d'environ 500 fois la focale de l'objectif.

Plus exactement, en supposant l'objectif rigoureusement aplanétique et la plaque placée au foyer, la mise au point a lieu à la fois pour l'infini et pour une distance p donnée par la relation :

$$p = \frac{f^2}{\eta} \left(\frac{\omega}{f} \right),$$

η étant le cercle de diffusion tolérée, et ω l'ouverture de l'objectif.

En prenant :

$$\frac{\omega}{f} = \frac{1}{5}, \quad \text{et} \quad \eta = 0,02 \text{ cm.},$$

on obtient :

$$p = 10 f^2 \quad (\text{unité : cm.}).$$

Pour $f = 50$ cm., valeur focale assez grande, on a :

$$p = 500 f.$$

Le coefficient diminue d'ailleurs avec f et avec l'ouverture. Pour la focale $f = 15$ cm., l'objectif travaillant au $1/10$, on a :

$$p = 75 f = 10 \text{ mètres.}$$

Les qualités à rechercher dans cet objectif concer-

ment d'abord la clarté et le champ. La clarté devra prédominer dans les appareils à main et dans le cas de la photographie instantanée; le champ, dans les appareils fixes où la pose sera la règle. La valeur absolue de la focale pourra être relativement courte, car la netteté sera largement assurée; en effet, la netteté caractérisée par la valeur de η donne le pouvoir séparateur α , en secondes

$$\alpha = 200\,000 \frac{\eta}{f} \quad [\text{unité: millimètres}];$$

et comme $\alpha\omega = 130$,
il en résulte :

$$\frac{\omega}{f} = \frac{130}{200\,000\eta}.$$

La valeur pratique du premier membre est toujours supérieure au second.

Quant à la distorsion, il n'y a pas généralement lieu de s'en préoccuper; si elle n'est pas très accentuée, l'aspect du paysage ne s'en ressent nullement.

Lorsque, cependant, l'objectif à paysages doit reproduire géométriquement le tableau, — le cas se présente dans les levers du terrain par la photographie (métrophotographie), — l'absence de distorsion est la qualité essentielle. La clarté vient ensuite si l'appareil est instantané, ou le champ si la pose peut s'effectuer.

199. **Objectifs pour monuments.** — Dans les objectifs pour monuments, la distorsion doit être inappréciable, car il s'agit alors d'objets ayant des formes géométriques bien caractérisées comportant de nombreuses lignes droites; l'amplitude du champ vient en seconde ligne; quant à la clarté, elle n'inter-

vient qu'ensuite, une longue pose étant généralement possible.

La focale de l'objectif peut être courte, s'il s'agit de photographies d'objets plans (façades, par exemple); elle doit être allongée, dès qu'on veut saisir la profondeur du bâtiment.

L'emploi d'une focale longue doit encore être la règle, quand il s'agit de photographier, à faible distance, des objets ayant une certaine profondeur dans le sens de l'axe de l'objectif (petits monuments, voitures, meubles, paysages très rapprochés); sinon les déformations perspectives deviennent inadmissibles. La distorsion a ici, en général, moins d'importance; elle ne doit cependant pas être trop accentuée.

200. **Objectifs pour portraits.** — L'objectif pour portraits exige avant tout une clarté considérable, plus grande d'ailleurs pour les travaux d'atelier que pour la photographie en plein air. La rapidité de l'opération est ici indispensable, non seulement en raison de la fatigue qu'une pose trop longue occasionnerait au sujet, mais aussi à cause de l'attitude facticive qu'elle lui imposerait. Le champ peut être faible; la netteté est généralement suffisante, d'autant plus que la retouche, nécessaire avec la nature des plaques actuelles, peut corriger bien des défauts. La focale doit être longue, afin que, les détails des premiers plans n'étant pas exagérés, l'image conserve une harmonie convenable. Quant à la distorsion, il est rare qu'elle soit perceptible.

Les mêmes conditions doivent être réalisées dans les objectifs pour groupes; il faut y joindre, naturellement, une amplitude du champ plus considérable.

C'est surtout pour les portraits qu'on a recherché des objectifs de grande ouverture utile. Le problème, dont l'intérêt, considérable quand on ne disposait que des plaques lentes au collodion, avait diminué à l'apparition des plaques au gélatino-bromure, s'est de nouveau posé, récemment, à propos de la photographie en couleurs par les plaques autochromes de MM. Lumière. Des objectifs travaillant à $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ seraient d'une utilité incontestable.

201. **Objectifs pour reproductions.** — On désigne habituellement sous le nom d'objectifs pour reproductions ceux spécialement utilisés à l'agrandissement ou à la réduction (mesuré par quelques unités, 1 à 10 au maximum) d'objets plans : dessins, cartes, documents. La fidélité des images est, dans ce cas, la condition essentielle : la distorsion doit être absolument corrigée; le champ rendu plan sur toute l'étendue, souvent grande, de la plaque, et la netteté constante dans tout le champ. Le problème, quoique ardu, est facilité par ce fait que l'objet est relativement près de l'objectif, et par cet autre qu'on n'a à se préoccuper qu'accessoirement de la clarté.

Ces objectifs, exclusivement destinés à la photographie industrielle, sont les plus délicats à établir, étant donné qu'on leur demande parfois de couvrir des plaques de dimensions absolues considérables ($1^m,20 \times 1^m,30$, pour reproduction en grandeur naturelle). La réalisation de pareils instruments devient encore plus pénible lorsqu'ils doivent être utilisés pour la confection des clichés destinés à la photographie par le procédé trichrome; la correction chromatique ordinaire est alors

insuffisante ; il est indispensable d'opérer la réduction du spectre secondaire, c'est-à-dire d'avoir recours aux objectifs apochromatiques.

202. Transformations successives de l'objectif photographique. — Primitivement, l'objectif photographique est une lentille convergente quelconque. En 1816, dans le cours de ses recherches, Niepce s'occupait surtout des lentilles dont les focales convenaient à sa chambre noire rigide. La partie centrale seule pouvait être utilisée ; un diaphragme placé sur le verre couvrait les parties inactives.

L'opticien Chevalier, qui mit en relations Daguerre et Niepce, dut leur signaler les avantages de la lentille plan-convexe et du ménisque convergent, — la face la moins courbe tournée vers l'objet, — ainsi que l'usage d'un diaphragme, placé en avant. La forme de la lentille laissait suffisant l'aplanétisme central ; l'emplacement du diaphragme élargissait le champ. Ce fut le même opticien qui fit substituer à la lentille simple un objectif achromatique de lunette astronomique.

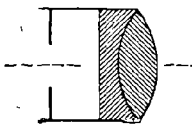


Fig. 88.

Cet objectif, retourné (le flint en avant) et muni d'un diaphragme antérieur situé au $\frac{1}{5}$ de sa focale (fig. 88), suffit, au point de vue optique, à l'achèvement des travaux de Daguerre, qui rendit son procédé public le 10 août 1839.

Un pareil objectif ne donne qu'un champ de 28° , quand l'ouverture du diaphragme descend à $\frac{1}{30}$ de la focale. La clarté est insuffisante pour l'exécution

d'un portrait. Chevalier lui substitua un objectif composé comportant (fig. 89) deux objectifs astronomiques écartés, l'ouverture du système intérieur étant la plus grande. Le diaphragme restait à l'avant.

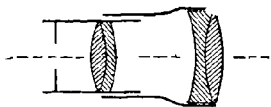


Fig. 89.

Mais, peu après, dans le courant de 1840, le professeur Petzval, de Vienne, imaginait son objectif double à portraits, qui était presque universellement adopté.

L'instrument (fig. 90) comportait deux combinaisons écartées : en avant, un objectif astronomique qui assurait l'achromatisme et l'aplanétisme suivant

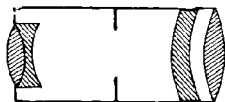


Fig. 90.

l'axe ; à l'arrière, un ménisque divergent en flint, suivi à faible intervalle d'un verre biconvexe en crown ; la seconde combinaison devait, par allongement des faisceaux, étendre le champ net en l'aplanissant et en réduisant les aberrations des pinces obliques. Le diaphragme, lorsqu'il était nécessaire, se disposait entre les deux combinaisons.

Pour une ouverture de $\frac{1}{3,7}$, le champ pouvait atteindre 15° ; il arrivait à 30° pour l'ouverture de $\frac{1}{10}$.

Pendant trente ans au moins, l'objectif Petzval a été, pour le portrait, sans concurrent sérieux ; des perfectionnements de détail lui ont été apportés dans cet intervalle et ensuite jusque vers 1880.

Pour l'exécution de photographies autres que les portraits, l'objectif simple à deux verres collés indiqué par Chevalier se modifiait : la forme ménisque remplaçait le plan-convexe ; le crown revenait à l'extérieur, comme dans l'objectif astronomique ; un troisième verre s'ajoutait aux premiers : cela dans le but de faire disparaître le foyer chimique et, à clarté égale, d'agrandir le champ de netteté. On atteignait ainsi un champ de 80° en diaphragmant à $\frac{f}{40}$.

Acceptables pour les paysages, ces objectifs laissaient à désirer pour les vues de monuments, et ne convenaient que médiocrement aux reproductions : la distorsion qu'ils donnaient aux images en était la cause.

Sutton indiqua, en 1857, le moyen de supprimer la distorsion, en constituant des objectifs symétriques ; ce procédé ne fut pas immédiatement adopté. Les études étaient dirigées sur la modification du système de Petzval ; Sutton y contribuait lui-même, et elles conduisirent à la réalisation des objectifs triples ou triplets, dont le plus connu est celui de Dallmeyer, construit en 1860.

Mais, peu d'années après, en 1866, Dallmeyer et Steinheil réalisaient indépendamment l'objectif symétrique sous les noms respectifs de *rectilinéaire* et *d'aplanat*.

L'objectif double, et ramassé dans le sens de son axe, — celui de Petzval est relativement long, — était constitué.

Pendant vingt ans, l'objectif ne subit plus, malgré ses innombrables variétés, que des modifications de détail. La plus importante, et qui s'est peut-être pro-

duite en dehors d'une idée théorique, est celle qui lui fait perdre sa symétrie. Quant aux autres, elles résultent de tâtonnements, de la nécessité pour les opticiens de ne pas copier leurs concurrents, d'essais en vue de donner aux objectifs telles ou telles qualités aux dépens d'autres : elles se bornent à faire varier les formes des verres, leur nombre, leurs emplacements.

En 1886, apparaissent sur le marché les nouveaux verres optiques dits verres d'Iéna (siège de la maison Schott et C^{ie}, qui les fabrique). Ils se caractérisent d'abord par le renversement du rapport entre les indices et le pouvoir dispersif. Associés aux anciens verres, ils permettent de réaliser, sans intervention du diaphragme, la planéité du champ, concurremment avec l'achromatisme, d'après la formule indiquée depuis 1847 par Petzval. A égalité de champ net, la clarté peut être augmentée, sans qu'il y ait lieu d'accroître les ouvertures relatives.

En outre, le nombre des nouveaux verres s'accroît rapidement; et, si quelques déboires se sont produits soit au point de vue économique, soit au sujet du degré de conservation ou de la transparence actinique des matières, il reste encore assez de substances réfringentes pour que l'on puisse, dans les calculs d'objectifs, considérer comme une variable, et non comme une donnée, le rapport entre l'indice moyen et le pouvoir dispersif. Sans doute, cette variable n'est pas continue, comme les paramètres géométriques de système optique; mais il suffit, dans la pratique, qu'elle puisse recevoir un certain nombre de valeurs échelonnées.

Les premiers objectifs construits avec les nouveaux

verres ont été lancés par la maison Zeiss, d'Iéna, en 1891, sous le nom d'*anastigmats*. C'étaient des doubles non symétriques comprenant une combinaison normale et une combinaison anormale, qui étaient séparément à peu près achromatiques. L'ensemble était achromatisé avec affaiblissement du spectre secondaire; la réduction de l'astigmatisme des pinceaux obliques était obtenue par voie de différence, les deux combinaisons produisant des astigmations de signes contraires. Des triplets ont été construits peu après. L'emploi des nouveaux verres a été d'ailleurs étendu aux objectifs simples.

Il convient d'ajouter que tous les bons opticiens ont suivi l'exemple donné. Aujourd'hui, tous les objectifs de valeur comportent d'autres verres que les anciens crowns et flints; ceux-ci sont réservés aux objectifs moyens, relativement peu coûteux, et qui peuvent, dans des cas encore assez nombreux, rendre d'excellents services.

203. **Objectif simple.** — L'objectif simple est constitué par une combinaison unique formée de lentilles collées ou rapprochées les unes des autres; le diaphragme est placé en avant.

L'objectif est toujours aplanétique au centre et achromatique, optiquement et actiniquement; les objectifs à foyer chimique ont actuellement disparu. La netteté des images hors du centre s'obtient souvent, aux dépens de la clarté, par le jeu du diaphragme. Tous ces objectifs présentent de la distorsion en croissant. Cependant, en utilisant les nouveaux verres, on a pu annuler le défaut en l'un des points du champ, et alors la distorsion, faible ailleurs, a des signes con-

traies de part et d'autre de ce point particulier. Le choix des matières permet également d'améliorer la netteté des images en réduisant l'astigmatisme.

Certains types d'objectifs doubles, symétriques ou non, sont conçus de façon qu'en retirant la combinaison antérieure, l'autre constitue un objectif simple ayant les qualités requises.

L'objectif simple est surtout un objectif à paysages. Bien que le diaphragme soit toujours étroit, dès que le champ est assez grand, la clarté peut être suffisante, surtout dans les objectifs ne comportant que des verres collés : les réflexions intérieures sont alors réduites au minimum, et la tache centrale s'évite aisément; les images restent donc brillantes. Les focales de ces objectifs doivent être relativement grandes; la couverture de la plaque n'est obtenue qu'à ce prix.

L'ancien objectif simple est composé de deux lentilles collées, crown et flint, celle-ci en dedans; la forme générale est celle d'un ménisque très accentué, la face concave en dehors; le diaphragme est placé au $\frac{1}{5}$ de la focale. Tel est l'objectif anglais de Grubb, de 1857. Le champ net atteint péniblement 48° à l'ouverture $\frac{1}{30}$. Quand cette combinaison sera reprise, plus tard, en utilisant les nouveaux verres, la forme s'adoucirait, se rapprochant du plan convexe dans l'objectif Voigtlander, de 1888, travaillant à $\frac{1}{15}$ sur un champ de 90° , et dans le *choroscope* de Goerz (fig. 91), où elle prendra la forme biconvexe avec une ouver-

ture de $\frac{1}{13,5}$ et un champ de 70° . En même temps, le flint reviendra à l'extérieur de l'objectif, comme dans la lentille de Chevalier.

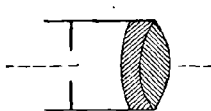


Fig. 91.

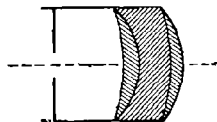


Fig. 92.

De bonne heure, une troisième lentille s'ajoute aux deux autres : un flint est collé entre deux crowns dans le grand-angulaire de Dallmeyer (fig. 92)

$$\left(1854; \gamma=92^\circ \text{ pour } \omega=\frac{1}{40}\right).$$

La forme est celle d'un ménisque peu accentué ; elle se conservera dans plusieurs objectifs du même constructeur. Plus tard, avec les nouveaux verres, ou bien la forme restera la même comme dans l'*eurygraphe* Berthiot¹, ou se changera en celle d'une lentille biconvexe dans l'anastigmat de Zeiss de 1894. La forme dépendra de la succession des indices : dans le premier objectif, ceux-ci vont en décroissant de l'extérieur à l'intérieur ; les pouvoirs dispersifs suivent la marche inverse. Le champ restant le même, voisin de 90° , le diaphragme s'ouvre à $\frac{1}{14,5}$.

En se bornant à l'emploi de trois verres, il est

¹ Et dans l'objectif Zeiss décrit dans le brevet fr. 374438.

quelquefois possible d'améliorer les qualités de l'objectif en les disposant judicieusement, sans que la condition de Clairaut soit réalisée. Dallmeyer avait tenté de corriger la distorsion en retournant, dans son rectilinéaire pour vues (fig. 93), la lentille double antérieure de son grand-angulaire. Le champ maximum est de 50° pour $\omega = \frac{1}{28}$; la distorsion est alors faible.



Fig. 93.

Postérieurement, la séparation des lentilles sera décidée en suivant les idées de Gauss sur l'objectif astronomique, qui conduisent à séparer les deux éléments constituants; mais en raison des conditions spéciales à la photographie, la lentille arrière devra être composée de deux verres collés. La maison Zeiss a construit, en 1896, un objectif simple, la lentille double arrière étant très rapprochée de l'autre; la forme générale est celle d'une lentille biconcave (fig. 94).



Fig. 94.

Les objectifs de cette nature comportent, en somme, quatre lentilles simples accolées, dont une d'air. On ne peut qu'y gagner, au point de vue optique, en substituant à la lentille d'air un élément solide; il reste ensuite à examiner le côté économique. Dès 1896, la maison Zeiss construisait des objectifs à quatre verres collés, dont deux constituaient une combinaison normale, et les autres un système anormal. Ces objectifs

(fig. 95) très lumineux sont devenus les éléments des doublets protars ; le champ de la combinaison simple est de 68° , avec une ouverture de $\frac{1}{12,5}$.

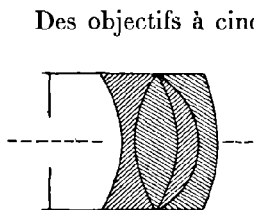


Fig. 95.

Des objectifs à cinq verres collés avaient été conçus, mais non exécutés, par Gundlach (de Rochester). M. Lacour, constructeur français, a fait breveter¹ un objectif extra-rapide et anastigmatique comprenant cinq lentilles. Par un choix convenable des matières, les trois verres antérieurs assurent

l'achromatisme et l'aplanétisme central ; les deux autres corrigent l'astigmatisme ; la forme est celle d'un ménisque très peu accentué.

Rappelons que la plupart des systèmes arrière des objectifs symétriques peuvent être utilisés comme objectifs simples. Les combinaisons indiquées ci-dessus se rencontrent, avec des variantes, chez de nombreux opticiens ; en particulier, le double anastigmat *celor*, de Goerz, donne un objectif simple comprenant deux verres écartés : l'un biconcave en avant, l'autre biconvexe à l'arrière.

204. **Objectif double.** — L'objectif double comporte deux combinaisons du genre des objectifs simples, séparées par le diaphragme. Il a été constitué pour la première fois par l'objectif à portraits de Petzval ; le problème était alors analogue à celui qui se présente pour un oculaire de lunette : il s'agissait

¹ Brevet fr. 374045.

surtout de répartir la réfraction des faisceaux entre deux systèmes optiques.

La nécessité de corriger la distorsion conduisit au doublet symétrique. La solution paraissait évidente : en combinant deux systèmes identiques, mais symétriques par rapport au diaphragme, on devait annuler à la fois la distorsion nodale et la distorsion locale. Nous avons insisté plus haut sur ce problème.

Le raisonnement, trop simple, avait un grave défaut : on n'en tirait pas toutes les conséquences. Puisque la disparition de la distorsion provenait uniquement de la symétrie de l'objectif, il devenait tout aussi évident qu'elle ne devait avoir lieu que pour la symétrie étendue à l'image et à l'objet : celui-ci devait donc être au double de la distance focale de l'objectif. Un calcul rigoureux démontre l'exactitude de cette assertion. En fait, les doublets symétriques réalisaient un tel progrès sur les objectifs simples, que la distorsion semblait négligeable. Les progrès de la construction optique ont montré qu'on pouvait obtenir mieux ; aussi, malgré la vogue encore persistante des combinaisons symétriques, s'adresse-t-on maintenant, pour les objectifs très soignés, aux systèmes asymétriques. Non seulement la distorsion peut être mieux corrigée, mais encore on dispose d'un nombre de paramètres presque double pour satisfaire aux conditions exigées. Le calcul des objectifs est moins simple ; les qualités optiques ne peuvent y perdre.

205. **Doublets symétriques.** — Dans les doublets symétriques, chaque combinaison est d'abord constituée par une lentille double collée, en forme de ménisque, la face convexe à l'extérieur. Telle est la

constitution du premier objectif symétrique, le globe lens d'Harrison, de 1860 (où les surfaces extérieures sont en outre sur une même sphère) (fig. 96); des pre-

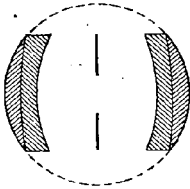


Fig. 96.

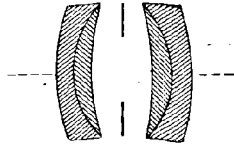


Fig. 97.

miers rectilinéaires de Dallmeyer (fig. 97) et aplanats de Steinheil, en 1866. Cette organisation se rencontre dans un très grand nombre d'objectifs; son grand avantage est d'être simple et, par suite, peu coûteux. L'amplitude du champ n'est obtenue qu'aux dépens de la clarté, ou vice versa. Les deux combinaisons moyennement écartées, — intervalle à peu près égal à l'ouverture, — dans les objectifs dits rapides, à champ moyen (de 40 à 55°), se rapprochent dans les grands-angulaires en même temps que les courbures s'accroissent et que le diaphragme se ferme. Pour les objectifs à portraits, les combinaisons s'éloignent, les courbures s'aplatissent. Ces objectifs se construisent encore actuellement, et se recommandent par leurs prix modérés; c'est dans leur catégorie que se rangent la plupart des objectifs dits *aplanétiques*, car leur simplicité ne permet guère que la correction de l'aberration centrale. L'emploi des nouveaux verres a cependant permis une amélioration sensible des anciens

types. A ce genre d'objectifs appartiennent, entre autres, le grand-angulaire d'Ad. Martin, les *concentriques* de Ross et de Schrœder, le *lynkéioscope* de Goerz.

On peut y ranger encore l'*hypergone* de Goerz, qui ne comporte que deux lentilles de crown, très minces, demi-sphériques, placées symétriquement par rapport au diaphragme et constituant par leur ensemble une sphère presque entière. L'objectif n'est ni achromatique ni aplanétique; la netteté des images ne s'obtient que par le jeu du diaphragme, qui peut se fermer jusqu'à $\frac{1}{31}$; le champ atteint 135°; la focale ne dépasse pas 20 centimètres.

Les objectifs dont chaque combinaison comprend trois verres collés constituent le modèle le plus courant; la forme générale de chaque système est celle d'un ménisque à bords minces ou épais, la face convexe à l'extérieur. L'emploi des verres récents a permis d'accroître les qualités de netteté et de clarté de ces instruments. C'est à eux qu'on réserve souvent, actuellement, le qualificatif d'*anastigmatique*. A ce genre appartiennent certains *eurygraphes* de Lacour, l'*orthostigmat* de Steinheil (fig. 98), les *collinéaires* de Voigtlander, l'anastigmat Turillon, le double anastigmat *celor* de Goerz.

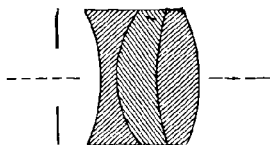


Fig. 98.

Pour augmenter encore la finesse des images, le nombre de lentilles de chaque combinaison a été porté

à quatre dans l'*aplanat-anastigmat* de Zeiss, le double anastigmat *pantar* de Goerz, certains eurygraphes de Lacour, le *double protar* Zeiss (fig. 99), le *linear* de Reitzchel.

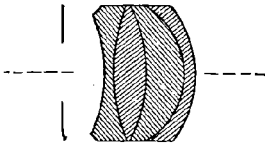


Fig. 99.

On n'a pas dépassé le nombre de cinq lentilles collées; on rencontre de pareilles combinaisons assez onéreuses dans quelques objectifs de Lacour, dans le

double anastigmat $\frac{1}{5,5}$ de Goerz.

La plupart des objectifs à trois verres par combinaison peuvent, avec des ouvertures de $\frac{1}{6,5}$ à $\frac{1}{10}$, avoir un champ net d'environ 65°. Le jeu du diaphragme permet de porter le champ vers 90°. Certains objectifs sont ouverts à $\frac{1}{5}$ avec un champ qui dépasse rarement 55°. Quant aux objectifs comprenant un plus grand nombre de verres, aucune indication d'ordre général ne peut être donnée sur eux; ils sont conçus en vue d'un rôle bien défini.

206. — En ne s'astreignant pas au collage des verres, il est possible d'améliorer soit la clarté, soit la netteté des images; on dispose, en effet, alors d'un plus grand nombre de paramètres, courbures et intervalles des verres. La difficulté consiste alors à ne pas perdre la clarté qu'on gagne en ouvrant le diaphragme, par les réflexions sur les verres ou par la production d'une tache centrale.

Des types d'objectifs de ce genre sont le *planar* de

Zeiss (fig. 100), ouvert à $\frac{1}{4}$; le *symétrique* von Hoegh, l'*unofocal* de Steinheil et le *lumar* de Rodenstock travaillant à $\frac{1}{4,5}$, le *celor* et le *syntor* de

Goerz, ouverts à $\frac{1}{4,5}$ et $\frac{1}{6,8}$; l'*alethar* de Goerz, travaillant à

$\frac{1}{11}$ avec spectre secondaire réduit.

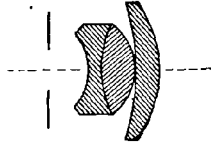


Fig. 100.

207. **Doublets asymétriques.** — Le premier type d'objectif double asymétrique se rencontre dans l'objectif à portraits de Petzval, dont la forme générale a été longtemps conservée, et dans son objectif *orthoscopique*, qui a été abandonné.

La symétrie primitive des rectilinéaires et des aplats a disparu, moins à la suite de considérations théoriques que d'essais pratiques, lorsqu'on a essayé d'agrandir le champ de l'objectif. L'asymétrie manifestée dans le rectilinéaire grand-angle de Dallmeyer par la différence d'ouverture des combinaisons devient plus accentuée, par l'épaisseur des verres, dans l'antiplanat pour groupes de Steinheil (fig. 101). Des différences de même ordre se rencontrent dans certains objectifs anciens.

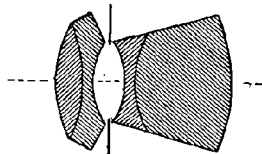


Fig. 101.

Dès l'apparition des produits d'Iéna, l'abandon de la forme symétrique est corrélative de l'adoption des nouveaux verres : l'association de deux combinaisons,

l'une normale, l'autre anormale, détruisait la symétrie optique; il n'y avait plus de raison pour conserver la symétrie géométrique. Les anastigmats de Zeiss; de 1892, sont asymétriques.

La constitution symétrique reparaitra quand on augmentera le nombre de verres de chaque combinaison; mais le nombre des objectifs asymétriques ira en s'accroissant rapidement soit qu'on améliore les anciennes formes, soit qu'on en crée de nouvelles. On rencontre les dispositions les plus variées, même au seul point de vue de l'aspect géométrique. Par exemple, l'objectif de Cooke (de Taylor et Hobson), le *stigmatique* $\frac{1}{4}$ de Dallmeyer, l'anastigmat Zeiss $\frac{1}{8}$, le *planigrphe* Turillon, qui a la même forme que le précédent, l'*uniar* de Zeiss, l'*héliar* de Voigtlander (fig. 102)

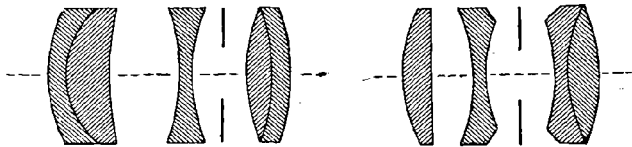


Fig. 102.

Fig. 103.

à $\frac{1}{4,8}$, le *kalloptat* de Krauss, le *tessar* de Zeiss (fig. 103). C'est dans la classe des objectifs asymétriques qu'on rencontre, le plus souvent, ceux qui réunissent au plus haut degré les qualités de netteté optique et actinique, de clarté, de champ et d'orthoscopie.

208. **Triplets.** — La catégorie des triplets ne comprend qu'un petit nombre d'objectifs. Porro en avait

réalisé un en 1847. En 1859, Sutton imagina son *triosymétrique*, qui, transformé, devint le triplet de Dallmeyer (fig. 104), exécuté dans le but de supprimer la distorsion. Les doublets actuels lui sont supérieurs.

On rencontre encore un triplet bien caractérisé dans l'antiplanat pour groupes de Steinheil, de 1881 ; dans

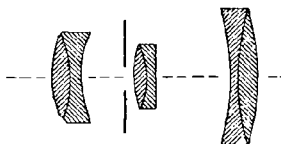


Fig. 104.

les triplets chromatiques et apochromatiques de Zeiss, de 1892 ; dans le collinéaire apochromatique de Voigtlander de 1900. Mais entre les doublets asymétriques actuels à lentilles séparées et les triplets, la ligne de démarcation est bien indécise.

209. **Objectifs à liquides.** — Pour augmenter le plus possible l'ouverture du diaphragme, et par suite la clarté des images, on a essayé d'interposer des liquides appropriés entre les verres des combinaisons ou entre celles-ci : objectif panoramique Sutton, à eau ; objectif Grün¹, employant les liquides des systèmes d'immersion du microscope. L'ouverture peut atteindre ainsi la valeur de la focale et même son double. La variation des propriétés optiques des liquides avec la température, les modifications qui se produisent dans leur constitution, limitent l'usage de pareils systèmes.

210. **Téléobjectif.** — Le pouvoir séparateur de l'objectif est, dans la pratique, limité par celui de la plaque photographique. Quelle que soit la pénétration

¹ Brevet fr. 318220.

du premier, deux objets paraîtront réunis si l'intervalle de leurs images sur le cliché descend au-dessous de $0^{\text{mm}},05$, par exemple. Pour un ensemble d'objets situé à n kilomètres, l'intervalle nécessaire entre eux pour qu'ils soient discernables est, en mètres :

$$q = \frac{50 n}{f},$$

f étant la focale de l'objectif exprimée en millimètres.

On ne peut diminuer q , — ou $\frac{q}{n}$, s'il agit d'un écart angulaire comme dans les observations astronomiques, — qu'en augmentant f . Pour la photographie céleste, f a pu être porté à 60000, comme dans la grande lunette de 1900 ou le télescope réflecteur de 200 pieds de l'observatoire de Lick. Le cas est tout spécial. Pour les observations terrestres, un objectif de 1 mètre de focale, $f = 1000$, est déjà encombrant ; il exige cependant que les objets situés à 1 kilomètre soient séparés par des intervalles de 5 centimètres ; cette séparation ne correspond qu'à celle d'une lunette de grossissement normal égal à 6 ou 7. Il faut d'ailleurs parfois modifier ces limites : on ne peut compter la plaque qu'à la séparation de $0^{\text{mm}},2$; les conditions d'emploi ne permettent pas de dépasser la focale de 60 centimètres ; la séparation exige alors, à 1 kilomètre seulement, un intervalle de $\frac{1}{3}$ de mètre. Il correspond à la vision directe, sans instrument. Le seul avantage de la photographie tient alors à la permanence de l'impression visuelle.

Cela n'est pas toujours suffisant. Les levers topographiques, les opérations de reconnaissance ou d'obser-

vation militaires nécessitent mieux. Un objectif spécial s'impose pour la téléphotographie.

Un problème analogue, au point de vue optique, se pose dans d'autres circonstances. L'exécution d'un portrait exige un certain éloignement du sujet, dépendant de la focale de l'objectif; sinon, la déformation perspective se produit dans les divers plans en profondeur. L'image est toujours, linéairement, plus petite que l'objet, si l'on n'emploie des objectifs de très grande focale qui conduisent à des distances souvent inacceptables.

Dans tous les cas, la conclusion est la même : il faut augmenter le grossissement linéaire de l'objectif.

211. **Téléobjectif à transport d'image.** — Le premier procédé consiste à reprendre par un autre objectif l'image aérienne du premier, qui, elle, ne subit pas l'influence de la plaque sensible. Ce second objectif, c'est ce qu'on nomme habituellement un *oculaire de projection*, et c'est aussi lui qui, dans la microphotographie, reçoit l'image réelle de l'objectif du microscope pour la transporter, agrandie, sur la plaque sensible. Son nom tient à ce que, dans ce but spécial, il prend la place de l'oculaire du microscope; sa constitution est, à la complication près des lentilles, celle d'un véhicule, ou encore d'un objectif double, à faible foyer, à grand intervalle des combinaisons. Quand l'image aérienne est très peu étendue, on peut la transporter à l'aide d'un objectif de microscope. Quelle que soit la combinaison adoptée, l'instrument comporte toujours une longueur assez considérable. Le procédé n'est pas susceptible d'applications généralisées.

212. **Téléobjectif galiléique.** — La caractéristique gênante, dans la photographie à grande distance,

n'est pas la longueur focale, c'est la distance de l'objectif à la plaque sensible. Celle-ci est toujours au foyer principal; dans la plupart des objectifs vulgaires, le point nodal d'émergence, qui est la seconde extrémité de la focale, se trouve dans le voisinage des verres de l'objectif. Il suffit, évidemment, de le porter en avant du système. Un instrument qui remplit ces conditions est bien connu, et qui est en outre de faible longueur : la jumelle de Galilée. L'image est toutefois virtuelle et ne peut être reçue par la plaque. Mais, puisque dans la lunette galiléique la focale est infinie, il suffira de faire varier l'intervalle des verres pour qu'elle devienne soit positive, soit négative. Dans l'un des cas, l'image sera réelle. La combinaison correspondante est celle d'un *téléobjectif* : grande focale, faible distance des verres entre eux et au foyer principal d'émergence.

La combinaison téléobjective se réalise en disposant en arrière d'un objectif ordinaire, généralement double et souvent symétrique, une lentille double ou triple, à verres collés, et formant système divergent. L'orthoscopique de Petzval et, même, son objectif à portraits sont une application timide de ce système. Les véritables téléobjectifs ne furent construits qu'en 1869 par Borie et Tournemin, et par l'Américain Tolles en 1870. Depuis, tous les constructeurs, Dallmeyer, Steinheil, Jarret, Zeiss, Hermagis, Goerz, etc., fabriquent des téléobjectifs basés sur ce principe.

Pour la photographie à grande distance, la combinaison peut produire la netteté à $0^{\text{mm}}, 1$, avec une ouverture assez grande; la mise au point est alors automatique. En ce qui concerne la photographie à faible distance, avec large agrandissement, — portrait en gran-

deur naturelle, par exemple, — la mise au point s'effectue par variation de focale du téléobjectif et déplacement de la glace dépolie ; car, dans ce cas, les données sont habituellement le recul, — distance peu variable du sujet à la chambre, — et l'agrandissement.

Dans le téléobjectif disposé pour la photographie éloignée, l'élément divergent est, comme dans les autres cas, entre l'objectif convergent et le foyer de celui-ci, afin qu'il ne se produise qu'une seule image réelle. En supposant les deux systèmes réduits à des lentilles simples, de focales absolues f et f' , et situés à la distance a , la focale du téléobjectif a pour valeur :

$$\varphi = \frac{-ff'}{f - f' - a}.$$

L'image est réelle quand φ est positif, c'est-à-dire quand on a :

$$f < f' + a.$$

L'emploi du téléobjectif conduit à des problèmes que le défaut d'espace ne nous permet pas d'envisager ici.

213. Accessoires de l'objectif. — Miroirs et prismes. — L'image photographique réalisée est droite, quand elle est vue à travers la plaque, car celle-ci peut être tournée autour de son axe ; vue du côté de la couche sensible, elle est, comparée à l'objet, symétrique de celui-ci, par rapport à un plan. Il y a intérêt à détruire cette symétrie, avant sensibilisation de la glace, pour certains travaux : photocollographie, photogravure, phototypographie, quand, pour des raisons de précision ou de manipulation, on ne veut

pas s'astreindre au retournement de la pellicule qui supporte l'image.

Le renversement nécessaire s'effectue en disposant en avant ou en arrière de l'objectif une glace, ou un prisme à réflexion totale, à 45° sur l'axe de la chambre. L'objet doit naturellement être reporté à 90° de l'axe. L'emploi du prisme est très onéreux : sa place serait, à cause de l'astigmatisme, en avant de l'objectif ; on perd toutefois, alors, un peu de champ, et la chose est à considérer. La glace est plus avantageuse : on en construit, à cet effet, en métal et en verre : sa place est en arrière de l'objectif. Le miroir en verre est préférable ; il agit naturellement par sa face argentée et polie, placée en regard de l'objectif. Un opérateur habile peut le polir et le réargenter, au besoin ; le polissage du métal est plus délicat. Ces miroirs doivent être excellents ; leur prix est alors élevé. Quand il s'agit d'un travail occasionnel, on peut utiliser une glace du commerce, choisie et préalablement argentée ; il faut la prendre assez épaisse, 6 millimètres au moins, et avoir soin de ne pas la comprimer en l'enchâssant. Si la glace n'est pas irréprochable, on peut, en diaphragmant suffisamment l'objectif, obtenir des résultats convenables.

214. Transport des images stéréoscopiques.

— Dans la photographie stéréoscopique, deux objectifs à axes parallèles donnent deux images presque identiques, mais séparées. Le cliché, vu par transparence, peut être introduit dans le stéréoscope ; mais non, vu directement, du côté de la couche sensible. Les images doivent être transposées, sinon la vision serait pseudoscopique, l'image relative à l'œil droit étant vue par l'œil gauche

et vice versa. C'est ce qui se passe quand on tire une photocopie sur papier; il est nécessaire de découper les deux images et de les disposer autrement. On peut éviter cette sujétion et les soins qu'elle entraîne en produisant optiquement la transposition dans la chambre.

Parmi les systèmes optiques employés à cet effet, nous signalerons le dispositif du commandant Dau-bresse¹, dont la figure 105 donne une idée suffisante. Les combinaisons peuvent être variées par sectionnement de prismes, déplacements relatifs des divers éléments et substitution aux prismes indiqués de miroirs ou de prismes de formes différentes.

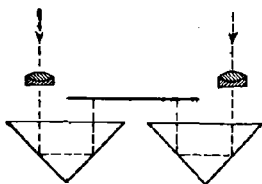


Fig. 105.

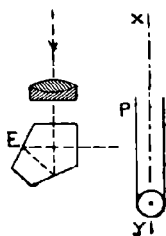


Fig. 106.

La figure 106 indique une transposition analogue, dans le cas d'un cliché sur pellicule P, à l'aide d'une équerre optique E (la figure doit être complétée par symétrie autour de xy).

215. Production de plusieurs clichés simultanés. — La photographie par le procédé trichrome exige la production de trois clichés géométriquement

¹ Brevet fr. 326634.

identiques ; la différence ne réside que dans la valeur relative des blancs et des noirs, et elle tient à l'interposition de glaces colorées en avant de l'image. On peut se proposer d'obtenir simultanément les trois clichés. La figure 107 indique le dispositif préconisé par

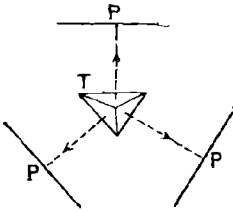


Fig. 107.

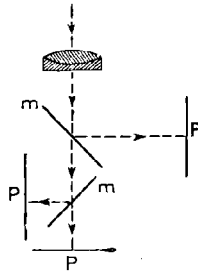


Fig. 108.

MM. Rigaud et Périère¹; la figure 108, celui de M. Nachet².

Dans le premier, T est un tétraèdre à trois faces réfléchissantes ; l'objectif est sur une perpendiculaire au plan de la figure, face à T. Dans le second, les m sont des miroirs semi-transparents..

¹ Brevet fr. 364883.

Brevet fr. 354781.

CHAPITRE XII

INSTRUMENTS ET ORGANES DE MESURE DÉTERMINATION DES DIRECTIONS

Lunettes-viseurs.

216. **Alidade. — Réticule.** — On sait comment, dans l'antiquité, était optiquement matérialisée une direction, c'est-à-dire une ligne droite ; une petite ouverture circulaire, l'*œilleton* derrière lequel se plaçait l'œil ; à quelque distance en avant, deux fils croisés, dont l'intersection constituait un point matériel. Si l'organe visuel était très rapproché de l'œilleton, et si la croisée des fils cachait un objet ponctuel A, celui-ci était sur l'une des directions passant par l'intersection des fils et l'un des points de l'ouverture circulaire. L'erreur angulaire géométriquement possible est égale à

$$\frac{\omega + \varepsilon}{\delta},$$

ω étant le diamètre de l'œilleton, ε l'épaisseur d'un fil, δ leur distance à l'ouverture. L'erreur moyenne est

beaucoup plus faible si l'observateur est assez habile pour bien centrer son œil afin de diminuer la valeur utilisable de ω .

Cet instrument, l'*alidade*, était d'ailleurs un instrument relativement perfectionné, par rapport à ceux qui l'ont précédé et dont les organes de visée des fusils, de chasse ou de guerre, sont des exemples qui ont survécu.

L'*alidade* comportait, outre l'erreur géométrique, une erreur optique. L'intervalle δ est toujours assez faible. Pour s'assurer de la superposition en direction de la croisée des fils et de l'objet, l'observateur est tenu à accommoder successivement et rapidement son œil à la distance des fils et à celle de l'objet; il ne perçoit donc que la coïncidence des images réliniennes à des époques différentes et à l'aide d'un organe déformable, le cristallin. La précision de la visée n'est obtenue qu'en réduisant, au prix de la fatigue visuelle, les intervalles entre deux accommodations successives. L'erreur commise dépend donc de l'état physiologique de l'observateur.

Un savant italien, Divini, paraît être le premier (43) qui eût, en 1640, l'idée de placer deux fils croisés au foyer de l'objectif de la lunette astronomique de Kepler. La coïncidence, avec le point de croisement des fils, d'un objet, — étoile, par exemple, — indiquait que celui-ci était dans une certaine direction. Celle-ci est fixe dans l'instrument. Cette propriété suffit dans bien des circonstances.

217. **Lunette à réticule.** — **Axe optique.** — L'intersection des deux fils du *réticule*, comme on dit aujourd'hui, est un point de la direction de la visée

instrumentale. Un autre point est un point quelconque de l'axe de la lunette, si cet axe passe par la croisée des fils ; et la coïncidence de l'image et du centre du réticule indique que celui-ci est sur l'axe de l'instrument.

Quand la croisée des fils est hors de l'axe, — et elle y est toujours plus ou moins, — la direction de la vision est conjuguée, par rapport à l'oculaire, de la droite qui joint le centre R du réticule au centre E de l'ouverture d'émergence du système objectif (fig. 109).

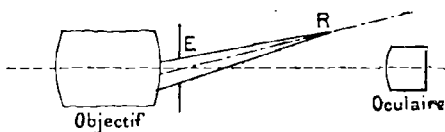


Fig. 109.

Elle passe donc par le point oculaire et par l'image, généralement à l'infini, de la croisée des fils que donne l'oculaire. Sa détermination géométrique est aisée, mais ne présente aucun intérêt.

Pour un observateur qui laisse invariable tout le système optique, la direction visuelle est constante ; cela lui permet de mesurer des différences de direction, écarts angulaires.

On demande parfois davantage à l'instrument : on exige que, pour n'importe quel observateur, l'orientation de la lunette soit déterminée quand l'image de l'objet est au centre du réticule. Cette condition nécessite la coïncidence avec l'axe du système optique, de la droite ER, dite *axe optique* de l'instrument en tant qu'appareil de mesure.

Quand l'objectif est mince, E coïncide avec le point

nodal ou le centre optique; de là la définition habituelle de l'*axe optique*.

On arrive à ce résultat en assurant la coïncidence des deux axes en question avec l'axe géométrique de la lunette. Celui-ci n'est autre que l'axe idéal d'un cylindre parfaitement tourné, limité généralement à deux portées qui font partie constituante du corps de l'instrument. En faisant tourner la lunette autour de son axe géométrique, — il suffit de faire constamment reposer les portées sur deux V fixes, — l'axe du système optique lui sera superposé si l'image d'un point fixe de l'espace reste fixe dans l'espace; c'est le constructeur qui assure cette propriété. La lunette étant ensuite munie du réticule, le point de croisement sera sur l'axe géométrique si, dans la même opération de rotation, ce centre du réticule est constamment perçu sur un même point fixe de l'espace.

218. **Formes du réticule.** — Le réticule est le plus souvent constitué par deux fils tenus et tendus à angle droit : fils de cocon, d'araignée ou fils métalliques, dont les extrémités sont fixées à la cire sur une plaque ouverte en son centre. Ces genres de réticules ne conviennent qu'à des instruments qui doivent être manipulés par des observateurs soigneux. Les fils d'araignée donnent les réticules les plus fins.

Il est quelquefois avantageux de déterminer une direction non par la coïncidence du fil et de l'image, mais en amenant un point de l'objet à bissecter un faible intervalle; le fil réticulaire correspondant est alors dédoublé en deux fils parallèles, à l'intervalle demandé.

Quand la lunette-viseur doit être soumise à des mani-

pulations qui détérioreraient un réticule à fils, on remplace celui-ci par une glace réticulaire portant deux traits opaques analogues à ceux des plaques micrométriques. Dans les lunettes à oculaire de Ramsden, on les a aussi tracés sur la face antérieure plane du verre collecteur; cette disposition, qui amène l'image sur le verre, nous paraît peu recommandable.

Avec les traits sur glace, le procédé de la bissection peut se passer de deux traits parallèles; il suffit d'interrompre la ligne réticulaire aux environs du centre; l'image de l'objet visé est alors amenée de façon à être bissectée par la ligne idéale qui prolonge les milieux des traits réticulaires.

Dans les instruments qui exigent la coïncidence des axes optique et géométrique, — lunettes d'appareils de nivellement, par exemple, — la plaque ou la glace réticulaire est mobile dans son plan; quatre vis, deux à deux opposées, prenant appui dans la monture de la lunette, serrent les côtés de la plaque ou de la monture de la glace; une manœuvre convenable de ces vis permet de donner au réticule la position demandée. On peut encore assurer la coïncidence des axes en déplaçant l'objectif, le réticule restant fixe.

Quand la lunette doit permettre le pointé à des distances différentes, le réticule est mobile dans le sens longitudinal; la coïncidence des axes doit alors être réalisée, s'il y a lieu, dans chaque position du réticule.

La mise au point, qui consiste à placer le réticule dans le plan de l'image objective, s'opère par déplacement de l'ensemble réticule-oculaire, à l'aide d'un bouton commandant soit un système pignon-crémaillère, soit, quelquefois, une bielle-manivelle qui agit alors sur

l'objectif. Ce mouvement ne doit être ni trop lent ni trop rapide. Le colonel Goulier (39) fait observer que l'œil tolère entre le réticule et l'image un écart longitudinal ϵ qui, dans le cas des lunettes astronomiques, peut être représenté par la formule empirique :

$$\epsilon = 0,01 \sqrt{f} \quad [\text{unité : millimètre}]$$

f étant la focale de l'objectif. Il indique que la correction de la mise au point exige : 1° pour la mise au point de l'oculaire sur le réticule, qu'un déplacement de 1 millimètre de l'appui des doigts sur l'organe de prise (bouton moletté) corresponde à une variation longitudinale de ϵ dans la position du système ; 2° pour la mise au point sur l'objet, que le pas de la rainure hélicoïdale qui guide généralement l'oculaire soit égal à la focale de la partie située en arrière du réticule.

219. **Éclairage du réticule.** — Dans les observations de jour, la lumière diffuse éclaire suffisamment le réticule. Un éclairage artificiel est nécessaire pendant la nuit ou dans une chambre obscure. On peut obtenir une illumination suffisante en disposant devant l'objectif un écran annulaire qui renvoie la lumière diffuse d'une lampe quelconque : procédé indiqué par Biot (8) ; on peut faire aussi entrer la lumière par un petit miroir ou un petit prisme disposé dans le tube de l'instrument, par exemple, à hauteur des tourillons dans la lunette astronomique d'observatoire.

Mais il est préférable que l'éclairage se fasse d'arrière en avant, afin que l'œil de l'opérateur ne perçoive pas cette lumière, qui illuminerait anormalement le champ. On emploie souvent dans ce cas l'oculaire éclairant de Cornu (fig. 110), portant une glace plane g à 45° sur

l'axe, entre le réticule r et le verre v le plus rapproché de lui. Cette disposition exige un certain espace pour le logement de la glace et ne convient qu'à des oculaires assez faibles.

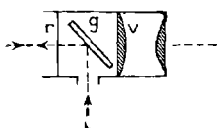


Fig. 110.

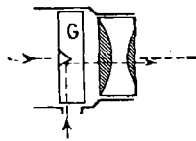


Fig. 111.

Le modèle de réticule suivant¹ peut servir pour les observations de jour et de nuit; il est constitué par une glace G assez épaisse (fig. 111) portant des traits réticulaires fins, profonds et ouverts sous un angle convenable. A la lumière diffuse, ils paraissent opaques; pendant la nuit, une petite lampe, électrique par exemple, envoie un faisceau qui est parallélisé dans le plan et à l'intérieur de la glace; une portion de ce faisceau se réfléchit d'avant en arrière sur l'une des lèvres du trait.

On a aussi indiqué² la possibilité de constituer un point réticulaire lumineux par le sommet recourbé d'un cône de verre très effilé. La lumière serait conduite, de la base au sommet, par réflexion presque totale intérieure.

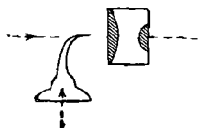


Fig. 112.

220. **Emploi des viseurs.** — Les viseurs, appa-

¹ Brevet fr. 345976.

² Brevet fr. 356495.

reils optiques munis de réticules, sont principalement des lunettes astronomiques, plus rarement terrestres, et des microscopes.

A l'exception des lunettes méridiennes, ces viseurs ne sont que des organes d'appareils mécaniques de mesure qui évaluent directement ou non l'angle formé par deux visées successives.

La lunette astronomique entre, à titre de viseur, d'abord dans les équatoriaux et les théodolites d'observatoire, puis dans la plupart des instruments géodésiques et topographiques qui mesurent des orientations ou des inclinaisons; enfin dans un grand nombre d'instruments de laboratoire, tant pour la vision éloignée que pour la vision rapprochée (goniomètres, spectromètres, cathétomètres, etc.).

Quant au microscope, il est surtout organe d'appareils de laboratoire; mais, à ce titre, il est plus souvent muni d'un micromètre.

Tant pour les lunettes que pour les microscopes, l'oculaire utilisé dans les viseurs est celui de Ramsden, qui laisse l'image objective en dehors de lui. La mise au point est plus aisée; et, en général, l'amplitude du champ peut être très réduite. Cependant, surtout dans les microscopes, on emploie quelquefois des oculaires Huygens; le verre d'œil est alors mobile.

Le réticule peut évidemment s'adapter à la longue-vue terrestre ou à la lunette à prismes, lorsque le renversement de l'image offre des inconvénients. On a, en particulier, essayé bien des lunettes de ce genre, pour le pointage des bouches à feu de campagne. En dehors de la fragilité de ces appareils, la faiblesse de leur champ a conduit à leur rejet. Ils ont reparu,

récemment, sous une autre forme. La lunette panoramique Goerz a été munie d'un réticule; celui-ci est fixe, comme dans les collimateurs; il est placé au foyer commun de l'objectif et de l'oculaire. La possibilité de choisir les pointeurs parmi les hommes à vue normale rend cette disposition acceptable. La société Krupp a fait breveter¹ un dispositif analogue au précédent, qui contient un système optique mobile permettant de passer du pointage indirect au pointage direct : le prisme en toit tourne de 90° autour de son axe, et reçoit alors le faisceau direct envoyé par une équerre optique. A la même idée, réalisée par des moyens différents, peuvent être rattachés la lunette de hausse de Zeiss² et divers instruments de la Société Goerz.

Collimateurs.

221. Principe du collimateur. — Une lunette-viseur, bien construite, de grossissement G , permet le pointé à un nombre de secondes près égal à $60/G$ environ. Cette précision, qui n'est acquise qu'aux dépens du champ, n'est pas toujours nécessaire. Lorsqu'on veut augmenter ce dernier, même en diminuant le grossissement, l'appareil devient plus volumineux qu'il n'est acceptable.

Le problème est cependant susceptible d'une solution très simple quand G est égal à l'unité.

Les astronomes et les physiiciens emploient, depuis longtemps, pour matérialiser une direction, un appa-

¹ Brevet fr. 359728.

² Brevet fr. 353449.

reil connu sous le nom de *collimateur*. Il comprend, montés invariablement sur un tube, une lentille convergente et, au foyer de celle-ci, un réticule. Le faisceau issu du centre du réticule donne un faisceau émergent parallèle, dont la direction est celle de la droite joignant la croisée des fils au nœud d'incidence.

Une lunette astronomique, réglée pour observer un objet situé à l'infini en y rejetant l'image, se transforme en collimateur quand on en retire soit l'oculaire, soit l'objectif. La seule différence entre les deux procédés réside dans la longueur utile de l'instrument résultant.

Si l'on coupe un collimateur par un plan parallèle à son axe et voisin de celui-ci, et que l'on conserve seulement la partie de l'instrument portant la croisée réticulaire, l'œil, situé en arrière du verre et placé de façon à être bissecté par le plan de section, verra à la fois directement le paysage et, à travers la lentille, le réticule. En réalisant la superposition de l'image du centre du réticule et d'un point du champ, la ligne de visée devient parallèle au faisceau donné par le collimateur, avec une approximation qui peut être déterminée.

A cet effet, supposons (fig. 113), puisqu'aucun instrument n'est parfait, que le réticule soit à la très petite distance ϵ du foyer, — ϵ positif quand la croisée des fils R est entre le foyer et la lentille; appelons a l'ouverture pupillaire et h la distance de son centre à l'axe du système.

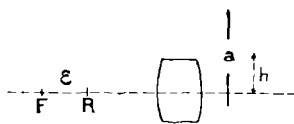


Fig. 113.

L'image du réticule se forme en R' à la distance p du point nodal d'incidence sensiblement égale à

$$p = \frac{f^2}{\varepsilon}.$$

Les directions possibles perçues sont (fig. 114) celles limitées par le cône du sommet R' et s'appuyant sur les positions extrêmes de la pupille; soit $MR'M'$ ce cône.

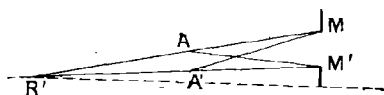


Fig. 114.

L'image du réticule coïncidera avec un point réel A situé à la distance q , si A est compris dans ce cône. Les variations extrêmes possibles de la direction seront les droites AM' et $A'M'$. Leur angle est sensiblement, en posant $MM' = b$:

$$\alpha = b \left(\frac{2}{q} - \frac{1}{p} \right), \quad \text{si } q < p,$$

ou $\alpha = \frac{b}{p}, \quad \text{si } q > p.$

Quant à la valeur possible de b , elle est égale à $2a$ pour un déplacement de l'œil dans le sens normal au plan de section du collimateur, et, pour un déplacement du centre de la pupille dans ce plan, elle est à peine supérieure à l'ouverture arrière ω du système, augmentée de $2a$.

Les positions extrêmes ne laisseraient sentir qu'un faisceau infiniment délié. Pratiquement, on peut limiter à $0,25 a$ la première valeur de b , et à ω la seconde.

222. **Collimateurs à lentille simple.** — Qu'il s'agisse d'un collimateur d'astronome, ou d'un *collimateur-viseur*, — c'est le précédent sectionné, comme il a été dit, — la précision avec laquelle il détermine une direction est, d'après les considérations exposées ci-dessus, d'autant plus grande que la focale est plus considérable, et la mise du réticule au foyer plus parfaite.

Dans les instruments d'observatoire ou de laboratoire, c'est en allongeant les focales qu'on augmente la précision nécessaire. Mais, pour les collimateurs destinés au pointage des bouches à feu, les conditions d'emploi fixent la longueur maximum admissible pour l'appareil; elle varie habituellement de 30 à 80 millimètres, atteignant rarement 100 millimètres. Les focales sont du même ordre de grandeur. La précision de la mise au point et la conservation du réglage dans les manipulations constituent les difficultés à surmonter.

Le plus simple des collimateurs-viseurs, — il ne s'agira dorénavant que de ce genre d'instruments, —

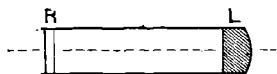


Fig. 115.

est constitué (fig. 115) par une lentille L convergente peu épaisse de faible ouverture (de 5 à 10 millimètres environ) et une plaque réticulaire R, montées aux

extrémités d'un tube. Extérieurement, le dernier verre est dépoli; sur la face qui regarde la lentille, on a déposé une couche mince opaque, sur laquelle ont été tracés ensuite deux traits minces, rectangulaires, mettant le verre à nu. La croix constituée par ces deux

lignes de foi est généralement disposée de façon que l'une des branches soit horizontale: celle-ci permet de pointer en hauteur, l'autre en direction. Pour la visée en direction, par exemple, l'observateur hoche la tête dans un plan vertical contenant la ligne de foi correspondante, de manière à apercevoir successivement l'objet visé et la branche de la croix: cette dernière ligne lumineuse est assez vive; la persistance de l'impression rétinienne suffit pour juger de la coïncidence demandée. Avec quelque habitude, les mouvements de tête sont imperceptibles.

La couche opaque de la glace-réticule est souvent constituée par du noir de fumée convenablement protégé ensuite, ou mieux par une mince couche d'argent, recouverte d'un vernis mat et sombre dont le rôle est d'éviter la réflexion de la lumière diffuse pénétrant par la lentille.

M. le commandant Estienne organise un collimateur fort simple (fig. 116) avec une demi-lentille plan-convexe L, au foyer de laquelle se place la pointe P d'un petit cône métallique, en métal très réfléchissant (nickel), et à angle un peu ouvert pour que l'éclairage soit suffisant en lumière zénithale. Pointe et lentille sont fixées invariablement sur une lamelle métallique.



Fig. 116.

Le stanhope, réglé de façon que sa face plane soit au foyer de la face courbe, — la longueur est alors $\frac{nr}{n-1}$, — et muni de lignes de foi; constitue un collimateur simple et robuste, qui se présente habituellement sous la forme d'une courte baguette de verre à section carrée,

et qu'on emploie comme le premier instrument décrit dans ce paragraphe. On évite parfois la sujétion d'un travail précis du verre, en exécutant séparément, et à des longueurs nécessairement plus courtes, une baguette lentille et une baguette porte-réticule. Le stanhope est ensuite réalisé par leur réunion bout à bout avec interposition, quant au réglage, d'une cale métallique ajourée d'épaisseur convenable; des jeux de cales variant de $0^{\text{mm}},05$ en $0^{\text{mm}},05$, par exemple, permettent un réglage parfait.

223. Collimateurs achromatiques. — Les collimateurs à lentille simple ne sont pas achromatiques, et ceux à ligne de foi présentent de la distorsion. Cette dernière ne nuit pas au pointage tant que l'œil se tient dans le plan de la ligne réticulaire et de l'axe de la lentille; il est prévenu qu'il en sort par l'aspect que prend le trait lumineux. Dès lors, la visée perdant toute précision, la distorsion n'a d'autre inconvénient que de limiter pour l'œil un déplacement qui n'est pas indispensable.

Le chromatisme n'a d'influence que sur la facilité du réglage. Celui-ci revient à la détermination d'une focale, la précision de la mesure étant fixée. Ainsi, par exemple, si $f = 50$ millimètres et $\omega = 10$ millimètres, la tolérance ε sur la mise au point est, d'après les formules établies plus haut :

$$\varepsilon = \frac{f^2}{3000 \omega} = \frac{50 \times 50}{30000} = 0^{\text{mm}},08.$$

Or, dans une lentille simple, le foyer n'est déterminé qu'entre les deux points qui répondent aux limites des radiations perceptibles. Sans atteindre les extrêmes, on

peut considérer en lumière blanche les couleurs orangé et bleu. La différence des foyers correspondants est assez sensiblement égale à

$$\frac{n' - n''}{n - 1} f,$$

f étant la focale des rayons moyens d'indice n . Dans le crown ordinaire, où $n = 1,5172$, et $n' - n'' = 0,01$, la différence en question atteindrait 0^{mm},33, soit le quadruple de la tolérance admissible. Aussi convient-il de déterminer la focale pour une des radiations les plus agréables à l'œil : lumière jaune ou vert franc. Pour la vérification de l'instrument construit, la lumière blanche suffit. La seule constatation qui s'impose est relative à l'absence de parallaxe dans le pointé; on s'en assure par visée soit directe, soit à travers une lunette de faible grossissement qui observe à la fois l'image réticulaire et l'objet.

On a cependant construit des collimateurs achromatiques, souvent constitués sur le modèle du stanhope, par un flint antérieur et un crown postérieur très épais.

224. **Collimateur clair.** — Les collimateurs dont il vient d'être question présentent un inconvénient : pendant les opérations de pointé, une partie du champ est nécessairement masquée par la monture de l'instrument; la région ainsi éliminée est en outre la plus importante : c'est celle qui avoisine l'objet visé quand elle ne le comprend pas. On ne remédie à ce défaut que par une éducation, simple à la vérité, mais qu'on peut se proposer de faire disparaître.

On ne saurait songer à disposer, en arrière du collimateur, une lunette qui recevrait à la fois l'image des

lignes de foi et celle de l'objet. Sans doute, verrait-on ainsi la croix lumineuse se projeter sur le champ, la perception du collimateur ayant disparu ; mais la solution, inacceptable avec une lunette terrestre ou à prismes, — il serait plus simple d'adapter un réticule à celle-ci, — reste médiocre avec une lunette de Galilée dont l'ouverture efficace d'objectif est insuffisante quand le grossissement est faible, et qui, pour un grossissement élevé, ne donnerait qu'un champ restreint et un réticule peu éclairé.

La solution idéale consisterait à projeter la croix lumineuse dans un champ qui aurait une amplitude comparable à celui de la vision directe, toute perception du reste du collimateur ayant disparu. Le collimateur clair de Grubb (45,

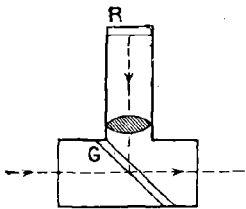


Fig. 117.

46) (fig. 117), basé sur un principe applicable à beaucoup d'instruments, remplit assez bien ces conditions : les faisceaux issus du réticule lumineux R (croix transparente sur fond opaque) d'un collimateur astronomique de courte focale (50 millimètres,

par exemple) tombent sur une pile de glaces ou une glace G faiblement argentée. La seule image virtuelle, fournie est celle de la croix, le reste du collimateur étant obscur ; l'image est d'ailleurs à l'infini.

Le champ réel peut être très grand ; il est limité par la pyramide, dont les arêtes, issues de l'œil, passent par le contour du miroir. La clarté générale du champ, quoique affaiblie, reste suffisante.

Le lieutenant Le Masne¹ a modifié cet instrument en supprimant l'argenteure de la glace; celle-ci (fig. 118) est disposée de façon que les faisceaux émergeant du collimateur tombent sous une incidence de 75° . La double réflexion produite sur les deux faces de la glace conserve à l'image de la croix lumineuse une intensité largement suffisante; le degré d'inclinaison superpose convenablement les images produites par les réflexions multiples.

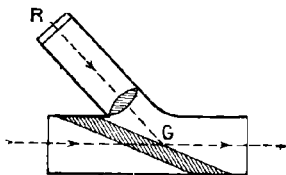


Fig. 118.

On peut constituer un collimateur clair relativement simple, en adjoignant à un collimateur ordinaire C un prisme de Govi G, comme l'indique la figure 119.

Le prisme de Govi (42) comprend deux prismes rectangles isocèles collés par leurs faces hypoténuses de façon à constituer un cube; préalablement, l'une des faces en contact a été recouverte d'une couche d'or ou d'argent demi-transparente. Cette pellicule produit une réflexion suffisante, tout en se laissant traverser par les rayons directs.

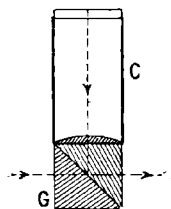


Fig. 119.

Le prisme de Govi peut être remplacé par le prisme qui entre dans la lunette autocollimatrice du commandant Dévé (270).

¹ Brevet fr. 353356.

225. **Emploi des collimateurs.** — Les collimateurs de laboratoire, — objectif astronomique et réticule à fils, — sont employés pour réaliser, dans de nombreux instruments, des faisceaux lumineux parallèles.

Dans les observatoires, deux courtes lunettes astronomiques à réticules peuvent être pointées l'une sur l'autre, objectif vers objectif, comprenant un intervalle plus ou moins grand; quand les points de croisée réticulaires coïncident, ils déterminent une ligne droite. En intercalant, dans l'intervalle des objectifs, une lunette d'instrument, on peut, par visées successives sur les deux réticules, étudier la flexion de l'organe en question.

Les collimateurs de visée sont, sous la forme stanhope, utilisés depuis longtemps dans les instruments topographiques; adaptés à un fil à plomb et réglés en conséquence, ils déterminent l'horizon de l'œil. Depuis une quinzaine d'années, ils ont reçu une autre application; ils remplacent la ligne de mire — œilleton ou cran de mire et guidon — des bouches à feu, évitant par leur organisation la mise au point successive de l'œil sur l'objet éloigné et sur le guidon, situé à un mètre au maximum de l'œil; et cela, tout en conservant, sous de légères restrictions, à la vision directe son champ naturel; condition d'une importance pratique capitale, et dont la non-réalisation a fait rejeter tant de lunettes de pointage.

Entre un collimateur ordinaire et un collimateur clair, le choix ne serait pas douteux, s'il s'agissait d'un instrument destiné à des expériences. Les conditions d'emploi peuvent modifier la conclusion. Le premier appareil est le plus rustique; cette constatation,

dont les conséquences se devinent aisément, influe sur la décision à prendre. En outre, optiquement, le collimateur ordinaire est toujours prêt au service. La croix du collimateur clair ne se détache nettement que sur un fond relativement sombre (terrain gris, prairies, bois, etc.) ; sur fond clair, sur le ciel, la perception ne s'obtient qu'à la suite d'un affaiblissement de la clarté du champ, produit par l'interposition, en avant de l'œil, de verres absorbants (lames noircies). Une pareille manœuvre peut présenter plus d'inconvénients qu'une obstruction partielle du champ, à laquelle une éducation appropriée peut remédier, sans qu'il soit nécessaire ensuite de réfléchir au moment où l'action seule s'impose impérieusement.

CHAPITRE XIII

INSTRUMENTS DE MESURE DES ANGLES

226. — En dirigeant successivement une même lunette à réticule sur deux points éloignés A et B, le déplacement angulaire de l'axe optique est évidemment égal à l'angle sous-tendu par AB du point d'intersection des deux positions de cet axe optique. Les appareils qui mesurent mécaniquement le déplacement angulaire en question sont d'usage courant et comportent de nombreuses variétés : cercles muraux astronomiques, goniomètres de laboratoire, théodolites, tachéomètres topographiques, etc. Le cadre de cet ouvrage n'en comporte pas la description.

227. **Lunettes à micromètre.** — On peut demander à l'organisation optique d'un appareil à mesurer des angles d'assurer à la fois les opérations de visée et celle de lecture. Les *lunettes à micromètre* résolvent ce problème.

Si une lunette, — et plus généralement un système optique quelconque, — contient dans son champ deux points A et B, la distance linéaire qui sépare leurs images A' et B' est une fonction bien déterminée de

l'angle AQB, Q étant un point fixe, mais choisi arbitrairement, sur l'axe de l'appareil. Les paramètres de cette fonction dépendent des éléments qui définissent le système optique et la position du point Q, ainsi que de la distance séparant Q des points A et B. Le rôle du micromètre est de mesurer A'B'.

La propriété ci-dessus énoncée concerne l'une quelconque, réelle ou virtuelle, des images produites par le système optique. Sa mise en œuvre est évidente quand on envisage l'une des images réelles. Il suffit alors de disposer dans le plan de celle-ci une graduation matérielle, étalonnée par avance, et, de la longueur interceptée sur elle par l'intervalle A'B', déduire, en utilisant la fonction considérée plus haut, l'angle cherché. Un calcul préalable ou un étalonnage expérimental peut, d'ailleurs, réduire toute mesure à une simple lecture.

La graduation en question est le plus généralement tracée sur la face antérieure d'une glace à faces bien parallèles, dont l'épaisseur est déterminée par des conditions de résistance. L'épaisseur des traits est d'autant plus faible, que leur écartement est moindre et que la précision exigée dans la mesure est plus élevée. Pour la détermination de ces grandeurs, dans les divers cas, on peut utiliser la remarque suivante: quand l'intervalle clair entre deux traits est vu, par l'œil, sous un angle d'environ dix minutes, un observateur moyen juge, sans autre point de repère, le $\frac{1}{5}$ de l'intervalle, et un observateur exercé arrive à l'appréciation du $\frac{1}{10}$, correspondant à l'acuité visuelle.

Dans les instruments d'ordre courant, de précision

moyenne, les traits micrométriques sont gravés à l'acide fluorhydrique et, ensuite, garnis de pâte grasse analogue à l'encre d'imprimerie. Si la précision exige des lignes minces et rapprochées, il faut les tracer au diamant plus ou moins *chargé*, suivant le cas; l'opacité des traits ne résulte alors que de la destruction du poli à l'endroit qu'ils occupent.

Ces micromètres tracés au diamant peuvent être très fins, mais leur visibilité est faible; ils exigent un éclairage convenablement orienté.

Pour des instruments de laboratoire, nous avons utilisé avantagement des micromètres photographiques sur pellicule de collodion caoutchouté.

Un dessin du micromètre, établi sur papier avec une amplification de 25 à 30, est photographié à sa grandeur définitive sur plaque au collodion humide, par deux réductions successives; la surface est ensuite recouverte d'une couche de solution de caoutchouc, la pellicule détachée et emprisonnée entre deux plaques, ajourées en leur centre, qui constituent la monture du micromètre.

On peut obtenir ainsi des traits purs, suffisamment noirs, et dont l'épaisseur n'atteint pas $0^{\text{m}},01$. La lecture de ces micromètres n'occasionne pas la fatigue qu'on ressent dans l'emploi des micromètres à traits au diamant. Leur déformation est insensible si on prend des précautions pour leur montage, et si l'on s'en sert exclusivement dans un laboratoire. La pellicule est d'ailleurs plus résistante qu'on ne pourrait le croire *à priori*; elle supporte le balayage des poussières à l'aide d'un pinceau. Enfin, elle offre l'avantage de ne pas produire, grâce à sa très faible épaisseur, une deuxième image du micromètre, due à la réflexion, quand l'éclairage est très intense.

228. **Particularités du micromètre.** — La face graduée de la glace micrométrique devant être dans le plan de l'image, les moindres poussières qui sont déposées sur elle arrêtent totalement les faisceaux qui atteignent ces corpuscules opaques nécessairement situés en leurs sommets. On peut éviter cet inconvénient, assez grave dans les appareils destinés à des observations à l'extérieur, en reportant les poussières en avant, ce que l'on obtient en doublant la plaque micrométrique par une autre glace collée sur la graduation.

Certaines lunettes, qui sont avant tout des instruments d'observation, doivent cependant, — les conditions d'emploi peuvent l'imposer, — être constamment munies d'un micromètre. Si celui-ci n'est pas toujours entretenu dans le plus grand état de propreté, la lunette pourra n'être qu'un médiocre appareil d'observation, si elle doit être à tout instant prête pour ce rôle. Tel est le cas des lunettes de batterie. Il est possible d'éviter en partie cet inconvénient, lorsque la graduation ne doit être étendue que sur la moitié du champ, en constituant la plaque micrométrique seulement par une glace demi-circulaire qui n'occupe que la moitié du champ. Il faut alors que le plan diamétral qui la limite soit bien net et rigoureusement perpendiculaire aux faces de la plaque; sinon le champ est coupé par une ligne bleuâtre, plus ou moins longue et franche, provenant de la déviation des faisceaux centraux, le bord de la glace agissant comme un prisme non achromatique.

Quand l'obstruction du champ, par le micromètre, doit être évitée, et qu'en outre les mesures n'exigent

pas une grande précision, on peut avoir recours au micromètre périphérique du commandant Daubresse¹. Il consiste en une mince pellicule de celluloïd, ouverte en son centre et qui remplace ou double le diaphragme de champ; le bord interne de l'ouverture porte les graduations nécessaires, qui sont d'ailleurs obtenues photographiquement, les pellicules sensibilisées étant d'usage courant.

229. Origine et évolution du micromètre.

— La première idée du micromètre paraît être due à Huygens, qui, en 1659, pour mesurer la distance angulaire de deux étoiles ou d'un astre, introduisait dans le plan de l'image objective de la lunette astronomique un triangle métallique allongé. De la largeur du triangle qui couvrait l'astre ou l'intervalle des étoiles et de la focale de l'objectif, il déduisait l'écart angulaire cherché. En 1662, Malvasia remplaça la lame triangulaire d'Huygens par un grillage de fils d'argent très déliés, formant des carrés égaux. L'idée avait été utilisée pour le même objet, par Moestlin, avec la chambre obscure. C'est, au fond, le type du micromètre sur glace. En 1667, Auzout ne laissa subsister du grillage de Malvasia qu'un fil fixe et un autre qu'il rendit mobile sous l'action d'une vis micrométrique: c'est le micromètre des lunettes d'observatoire (64).

Aucun micromètre ne peut être adjoint aux systèmes optiques ne formant pas d'image réelle. Pourtant Galilée a mesuré, à l'aide de sa lunette et avec une précision remarquable, des intervalles angulaires (43). Son procédé a même continué à être employé après

¹ Brevet fr. 317356.

l'invention de la lunette astronomique. Il était basé sur la connaissance du champ apparent de la lunette et du grossissement. La valeur du champ réel en était conclue ; elle était faible, en raison du grossissement considérable, 33, de l'instrument. L'amplitude du champ réel servait d'unité pour l'appréciation des écarts angulaires.

230. **Micromètre à fil mobile.** — Le micromètre d'Auzout est encore en usage dans les lunettes de précision ; il est généralement doublé d'un réticule destiné au pointé.

Il comprend un cadre portant un fil de réticule (fil d'araignée, par exemple) ; le fil est successivement amené sur les deux points qui déterminent l'angle ; son mouvement est commandé par une vis à pas très fin portant un tambour gradué, qui sert à évaluer les fractions du pas. En observant la graduation du tambour à chaque visée et comptant le nombre de tours de vis entre les deux pointés, on en déduit l'écart linéaire des fils : le pas de la vis a été taré d'avance. Généralement, dans le plan du diaphragme se trouve un peigne dont les dents sont à un écartement sensiblement égal au pas de la vis ; son rôle est, non de permettre une lecture précise, mais d'éviter une erreur dans le décompte du nombre entier des tours de vis.

Les meilleurs micromètres à fils mobiles accusent, à la lecture, des déplacements de $0^{\text{mm}},001$. Il est rare que l'on puisse compter sur une pareille précision ; l'imperfection du filetage s'y oppose généralement.

Avec ce genre de micromètre, l'instrument qui en est muni se rapproche des appareils goniométriques considérés au § 226.

231. **Emploi de la lunette à micromètre.** — Les instruments destinés aux mesures angulaires et que l'on munit de micromètres sont généralement des lunettes astronomiques, terrestres ou à prismes.

Le micromètre à fils est surtout réservé aux lunettes astronomiques ; il donne des écarts linéaires que l'on convertit en angles en utilisant les constantes de l'instrument, ou en ayant recours à un tarage préalable.

Le micromètre sur glace convient à toutes les lunettes. La graduation est habituellement chiffrée de telle sorte que l'angle soit lu directement, en fraction de circonférence ou par sa tangente.

Dans une lunette astronomique ou dans une lunette à prismes, la seule place du micromètre est dans le plan focal de l'objectif, si l'observation doit toujours avoir lieu sur des objets éloignés ; sinon, il est dans le voisinage de ce plan, et comporte la possibilité d'un léger déplacement pour sa mise au point sur l'image objective. Dans une lunette terrestre, il peut être indifféremment placé à proximité de l'une ou l'autre des images réelles ; en le disposant près de l'oculaire, les intervalles des traits répondant à un écart angulaire donné sont maximums. Si les objets à examiner sont toujours éloignés, il est préférable de le placer au foyer de l'objectif ; de cette façon, tout l'oculaire terrestre peut être constitué rigidement et, par suite, dans les meilleures conditions pour la correction des aberrations. La mise au point s'effectue simultanément sur l'image et sur le micromètre par déplacement d'ensemble de tout l'oculaire.

La graduation d'un micromètre sur glace pourrait se faire, surtout quand la lunette est destinée à la vision

lointaine, que le champ est restreint, par voie de calcul. Un intervalle micrométrique ε répond à un écart angulaire de $\frac{\varepsilon}{f}$, f étant la focale du système qui produit l'image réelle sur le micromètre. Mais il est toujours plus simple et plus exact de procéder par étalonnage direct, lequel est d'ailleurs nécessaire quand l'instrument n'est pas orthoscopique.

Pour les mesures très précises, un tableau de corrections doit être établi, pour que l'on puisse tenir compte des déplacements du micromètre, si celui-ci n'est pas fixe.

232. Collimateur-goniomètre. — Le collimateur de visée peut être adapté à la mesure des angles ; il suffit de remplacer les lignes de foi par des traits parallèles. A l'écartement ε , l'angle correspondant à un intervalle est le quotient de ε par la focale du collimateur.

Sous la forme très courte du stanhope, et avec des traits noirs sur fond clair, fixé à un perpendiculaire, le collimateur sert aux topographes à mesurer de faibles pentes. Le champ en est peu étendu : 5 à 6° ; l'erreur possible sur l'angle est au moins de 2'.

Pour la mesure de grands écarts angulaires, le commandant Estienne¹ a fait construire, sous le nom d'*octant de poche*, un instrument basé sur le principe du collimateur, dont l'amplitude atteint 45° (autrement dit 800 millièmes)². Il comprend (fig. 120), en principe,

¹ Brevet fr. 321814.

² Le millième de l'Artillerie est une unité angulaire qui équivaut à la 1600^e partie d'un angle droit ; soit 6.25 centigrades. Sa tangente trigonométrique est sensiblement égale à 0,001.

une lentille épaisse plan-convexe, de faible épaisseur dans le sens perpendiculaire à l'axe optique, mais de grande ouverture; une graduation convenable est tracée sur la surface focale

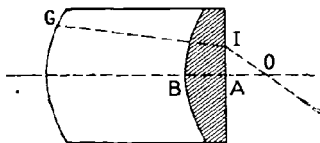


Fig. 120.

qui passe par le foyer situé du côté de la face courbe, et qui est ici concentrique à cette face. L'œil se place du côté de la face planée du verre.

Pour explorer le champ considérable de l'appareil, l'œil doit tourner autour de son centre de rotation O ; et le pinceau qui, issu d'un point G de la graduation, émerge en pinceau parallèle, doit passer par ce centre O . En posant $OA = \delta$, $AB = e$, $\widehat{IOA} = \theta$, désignant par r le rayon de la face convexe de la lentille, par n l'indice du verre, on a aisément, entre ces éléments et la focale $BF = f$ de la lentille, la relation :

$$f = \frac{r}{n-1} = \frac{1}{n-1} \left[e + \delta \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}} \right].$$

f étant constant, δ ne pourrait l'être, puisque θ entre dans cette expression. Mais il suffit que la relation soit vérifiée pour une valeur de θ plus rapprochée des extrémités de la graduation que du centre; car, dans le voisinage du foyer, la position de l'œil sur l'axe est indifférente.

Il est avantageux, pour l'emploi de l'instrument, d'en rendre la longueur minimum, et par suite de réduire f . Or on ne peut guère agir que sur n , et la discussion de la relation précédente montre qu'on doit prendre

des verres très réfringents : leur conservation limite n à la valeur 1,61. La focale f ne peut donc théoriquement descendre au-dessous d'une certaine valeur. En faisant $e = 8$ millimètres (valeur pratique), $\delta = 13,6 + 5 = 18^{\text{mm}},6$ (distances du centre de rotation à la pupille, et de celle-ci au verre), $\theta = 20^\circ$, on trouve $f = 64$ millimètres.

Toutefois, dans la pratique, on obtient des résultats satisfaisants en employant du crown ou de la glace, réduisant f à 50 millimètres environ, et remplaçant la surface focale par un cercle centré sur B et passant par le foyer. Ce sont les données du commandant Estienne, qui, en outre, termine (fig. 121) sa lentille par un prisme à réflexion totale PL, faisant corps avec elle, de façon que l'observateur place l'octant contre son œil O perpendiculairement à la direction du plan de visée;

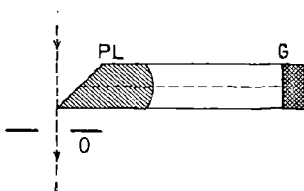


Fig. 121.

la pupille est bissectée par l'arête du prisme et aperçoit, dans le champ et à la hauteur des objets visés, l'image de la graduation. Celle-ci est formée de traits noirs de 2 à 3 millimètres de hauteur sur métal blanc. L'octant permet la mesure des angles à 15' près environ. Suspendu à la façon d'un perpendiculaire ou muni d'un niveau dont l'image est perçue en même temps que la graduation, il constitue un appareil très pratique pour la mesure des angles de site et des pentes.

233. **Sextant.** — L'angle de deux points lumineux, vus d'un point O, est déterminé par les pinceaux qui

en émanent et qui passent par O. Les instruments précédents évaluent l'angle en mesurant l'intervalle de ces pinceaux à une distance connue du sommet O. On peut aussi considérer l'un d'entre eux comme une déviation de l'autre et se proposer d'annuler cette déviation par un système optique qui, assurant leur coïncidence, superposera les images des objets, et dont la déformation ou le déplacement sera fonction de cette déviation, c'est-à-dire de l'angle à mesurer.

L'annulation de la déviation peut être obtenue par des miroirs plans, par des prismes ou par des lentilles.

A la première catégorie appartiennent les appareils du genre *sextant*.

Un miroir plan *m* (fig. 122) couvre, à quelques centimètres de distance, la moitié droite d'un objectif de lunette astronomique L. Par la moitié gauche de la

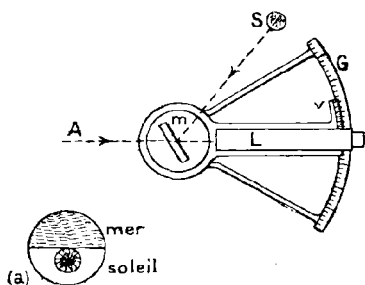


Fig. 122.

lunette, l'observateur voit directement le point A; par la moitié droite, il lui superpose l'image réfléchie du point S, situé en arrière, tel que l'angle AmS soit le double de celui formé par l'axe de la lunette et la normale au miroir.

C'est le dispositif imaginé par Hooke en 1664, réinventé par Grandjean¹ en 1732, et, sous

¹ GRANDJEAN. *Instrument pour observer les hauteurs en mer. Machines et inventions approuvées par l'Académie royale des Sciences de Paris*, t. VI, 1735.

le nom de secteur catadioptrique, par Segner (81). Le miroir est monté sur un plateau qui porte une graduation concentrique G , dont l'intervalle entre deux divisions vaut un demi-degré sur la circonférence, et par suite équivaut à un degré d'angle à évaluer. La lunette porte un vernier v , est mobile autour de la droite du miroir perpendiculaire au plateau et au plan de la graduation. Le mouvement relatif de la lunette et du reste de l'appareil permet de réaliser la coïncidence des images de deux objets quelconques, dans certaines limites de champ. La figure (a) montre comment on peut déterminer ainsi la hauteur apparente du soleil.

234. **Sextant à deux miroirs.** — L'instrument précédent exige que l'on tourne le dos à l'un des objets à observer; la recherche de son image peut être pénible. A peu près simultanément (81) et d'une façon indépendante, Newton et Hadley, en 1731, évitèrent cet inconvénient en employant deux miroirs (fig. 123). L'un M est solidaire de la graduation, et ne couvre, quant à sa face argentée, que la moitié de l'objectif; par la partie transparente, l'objet A est vu directement; par sa partie spéculaire, il transmet à la

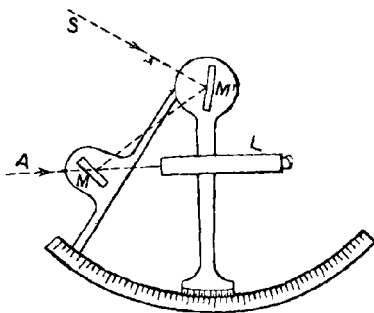


Fig. 123.

lunette l'image de l'objet S, une première fois réfléchi par un miroir M' solidaire de la lunette. L'angle visuel des deux objets est égal au double de l'angle des plans des miroirs : la démonstration de cette propriété est élémentaire. L'appareil d'Hadley, désigné sous le nom d'octant, permettait la mesure des angles de 0 à 45°. Newton, en portant l'angle à 60°, lui donna le nom de *sextant*, qui indique maintenant l'instrument à deux miroirs, quelle que soit l'amplitude de la graduation.

Les avantages du sextant sont de permettre, avec un instrument ramassé, et par suite portatif, la mesure de grands angles, sans que l'immobilité de l'appareil soit nécessaire. La lunette à micromètre exige la fixité ou la lecture simultanée, par suite délicate, en deux points de la graduation ; pour le sextant, il suffit que la double image ne sorte pas du champ de l'instrument. La précision qu'on peut obtenir avec le sextant est limitée à la demi-minute, au plus à 20". La présence d'images parasites dues aux réflexions sur les faces non argentées des miroirs, le défaut de planéité de ceux-ci, qui sont de faibles dimensions, ne permettent pas une précision plus grande. Pour l'obtenir, il est d'ailleurs nécessaire que l'instrument soit réglé de façon que les plans des miroirs soient perpendiculaires à celui de la graduation, et que l'axe optique de la lunette soit parallèle à ce même plan.

Les sextants de la marine, qui servent à la détermination des hauteurs angulaires des astres, — l'un des objets est alors la ligne d'horizon naturelle ou l'image du second réfléchi sur un horizon artificiel, — sont munis de lunettes astronomiques. Les instruments destinés

aux observations terrestres comportent des lunettes redressant les images.

Le champ du sextant ne peut guère dépasser 60° , qui répond à un angle de 120° pour les miroirs; en augmentant ce dernier angle, les pertes par réflexion sur la surface du verre s'accroissent ainsi que la production d'images parasites. On peut toutefois mesurer des angles plus considérables en rejetant le faisceau émané du point vu indirectement, à 90° , par exemple, de sa direction avant qu'il atteigne le premier miroir; il suffit d'interposer sur son trajet un prisme déviateur. C'est la solution adoptée par le commandant Aubry dans son sextant-télémetre¹.

Les miroirs plans du sextant peuvent être remplacés par des prismes à réflexion totale. La figure 124 donne un exemple² de cette disposition, employée dans un certain nombre d'instruments. Le prisme P, invariablement fixé à la lunette, couvre la moitié de son objectif; le prisme P', situé au-dessous de P, peut tourner autour d'un axe parallèle à la direction commune aux arêtes des prismes, qui sont d'ailleurs normales à l'axe de la lunette ainsi qu'une face réfringente de P. Le mouvement de rotation est convenablement amplifié pour faciliter la lecture. La précision de la mesure peut être assez grande, et atteindre celle du pointé; les angles mesurés sont faibles, 4 à 5° ; leur grandeur est limitée

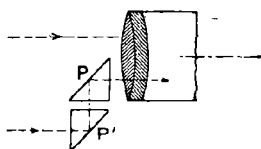


Fig. 124.

¹ Brevet fr. 289079.

² GABA. Brev. fr. 336879 et addition 3965.

par la valeur de la réflexion totale; au-dessus des nombres indiqués, l'image doublement réfléchie diminue rapidement d'intensité.

235. **Sextant goniomètre à prismes.** — M. le commandant Daubresse¹ a imaginé, sous le nom de *goniomètre portatif à prismes*, un sextant dans lequel les miroirs sont remplacés par des prismes rectangles et isocèles agissant à la façon des prismes de Wollaston (fig. 125). Le prisme inférieur P est fixe; l'autre P' mobile, et son déplacement mesure le double de l'angle visuel, comme dans le sextant. La figure indique la marche des rayons issus de A et de B, qui se superposent suivant le pinceau unique C. Celui-ci est reçu par une lunette placée en face de l'arête convenable π du prisme fixe; le plan de contact des deux prismes contient

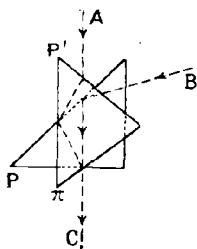


Fig. 125.

l'axe optique de la lunette. Celle-ci est coudée de façon à opérer un redressement partiel des images; en la remplaçant par un viseur uniquement formé d'un prisme de Wollaston agissant à 90° de ceux de l'appareil, le redressement optique est complet, mais le grossissement s'abaisse à l'unité. L'avantage de cet ingénieux dispositif est de permettre la mesure des angles jusqu'à 180° , tout en évitant les images parasites des miroirs. Cette propriété compense largement l'inconvénient dû aux pertes de clarté par réflexions sur les faces d'entrée et de sortie, et celui tenant à la nécessité de

¹ Brevet fr. 317597, de 1902. et *Revue d'Artillerie* (février 1902).

centrer convenablement l'œil pour assurer le même éclairement aux deux images. L'instrument n'a d'ailleurs qu'un faible volume.

236. **Goniomètres à réfraction.** — La superposition des faisceaux envisagée plus haut (233) peut être produite par un prisme intercalé sur l'un d'eux, de façon à le ramener en coïncidence avec le faisceau reçu directement, c'est-à-dire reçu en dehors de toute action du prisme.

La déviation produite par celui-ci doit être égale à l'angle α que forment les faisceaux dans la région de leur trajet où le prisme déviateur est interposé; car les faisceaux directs peuvent avoir déjà été rendus plus ou moins convergents par un système optique approprié, lunette par exemple.

Les formules classiques permettent de calculer α sous les formes :

$$\alpha = f(i, a, n),$$

ou

$$\alpha = g(e, a, n),$$

a est l'angle du prisme; i et e , ceux d'incidence et d'émergence; n , l'indice du verre.

En général, la mesure de i ou de e serait aussi pénible que la mesure directe de α . Aussi doit-on rendre constante l'une de ces quantités; la préférence doit être accordée à e . La mesure de α revient alors à celle de l'angle a du prisme. Elle exige, par suite, l'emploi de prismes à angles variables, de *diasporamètres*.

Une déviation un peu forte conduit à des prismes très ouverts; la netteté des images exigerait l'achromatisation individuelle des deux éléments du diasporamètre; mais la distorsion des images subsisterait. Aussi

n'a-t-on guère utilisé de prismes à grands angles.

Quand l'angle du prisme est assez faible pour que l'on puisse remplacer les sinus par les angles, — et cela dépend du degré de précision requis dans la mesure, — les relations précédentes se réduisent à :

$$\alpha = (n - i) a.$$

La constance de i ou de e n'est plus nécessaire, pourvu que ces angles restent faibles. C'est surtout dans ce cas, mesure de petits angles, que le diasporamètre a été employé.

Le procédé primitif consiste à interposer sur le trajet de l'un des faisceaux des prismes successifs dont les angles vont régulièrement en croissant, suivant une progression arithmétique dont la raison est égale ou peu supérieure à la précision demandée. Si la coïncidence des images ne peut être obtenue par l'emploi d'un prisme déterminé, leur situation relative se modifie pour deux prismes successifs d'angles α' et α'' . La moyenne de ces angles, corrigée au besoin par l'appréciation des rapports entre les distances angulaires des images, dans les deux cas, donne la valeur cherchée α . Un appareil basé sur ce principe a été employé : il comprend une série de très petits prismes montés sur la circonférence d'un plateau, et dont les angles varient de minute en minute.

Mais c'est surtout le diasporamètre de Rochon qui est utilisé, celui de Boscovich ne se prêtant pas à la réalisation de petits angles. Deux prismes identiques, d'angle faible α , sont accolés; si on leur donne un déplacement relatif, d'amplitude angulaire θ autour de la normale à leur face commune, ils constituent un

prisme résultant dont l'angle au sommet a' , qui est celui des faces extérieures de l'ensemble, est déterminé par la relation rigoureuse :

$$\sin \frac{a'}{2} = \sin a \sin \frac{\theta}{2},$$

qui devient, pour des angles au sommet faibles :

$$a' = 2a \sin \frac{\theta}{2}.$$

L'angle θ est nul quand les faces extérieures sont parallèles : cette condition détermine l'origine de la rotation.

Le diasporamètre a surtout été utilisé comme organe télémétrique.

237. **Micromètre parallèle.** — A la méthode précédente peut se rattacher l'emploi de glaces épaisses à faces parallèles, prismes d'angle nul. La relation générale $\alpha = f(i, a, n)$ se simplifie à cause de la nullité de a , et la mesure de i est facilitée par ce fait que cet angle est grand pour de faibles valeurs de α .

Si, devant une lunette à réticule pointée sur A, on interpose une glace à faces parallèles d'épaisseur e et d'indice n , dont la normale fait avec l'axe de l'instrument un angle ω , le point B, dont l'image se forme sur le réticule, est à un intervalle linéaire, ε , de A déterminé par les relations :

$$\varepsilon = e \frac{\sin(\omega - r)}{\cos r}, \quad \sin r = \frac{1}{n} \sin \omega.$$

De cette longueur ε , on conclura l'écart angulaire des points A et B, situés à une distance finie, généra-

lement faible, d'un point déterminé de l'axe de la lunette.

Porro, qui a revendiqué la paternité du dispositif, plaçait la glace entre l'objectif et l'oculaire (73).

238. **Prismes biréfringents.** — La superposition des pinceaux d'écart angulaire assez faible peut être obtenue en interposant sur leurs trajets des prismes composés, taillés dans des substances *biréfringentes* uniaxes (quartz, spath d'Islande, cristal de roche), à faces extérieures parallèles. Les deux variétés principales de ces organes sont le prisme de Rochon et celui de Wollaston.

Le prisme ou *micromètre* de Rochon est formé

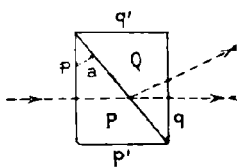


Fig. 126.

(fig. 126) de deux prismes triangulaires P et Q, habituellement en quartz, de même angle a , collés ensemble par leurs faces hypoténuses, à l'aide de térébenthine. L'ensemble constitue un parallélépipède. La face active p du prisme P est perpendiculaire à l'axe optique du

cristal; les arêtes de Q sont parallèles au même axe. Un faisceau parallèle, — onde plane, — tombant normalement sur la face active p de P reste unique et conserve la même direction dans la traversée de ce prisme; à la surface de séparation des deux prismes, le rayon ordinaire poursuit sa marche directe; l'autre γ est dévié, ainsi qu'à la face de sortie de Q. L'angle δ des faisceaux émergents est donné par la relation :

$$\sin \delta = \sin a [\sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 a} - n \cos a],$$

n et n' étant les indices ordinaire et extraordinaire de la substance.

L'angle δ croît très lentement avec a . Avec le spath, le rayon extraordinaire est éliminé par la réflexion totale quand l'angle a atteint 63° environ.

Dans le prisme de Wollaston, le prisme P est taillé de façon que l'axe cristallographique soit parallèle au plan de la face active et normal aux arêtes; le prisme Q est le même que précédemment. L'ensemble n'est autre qu'un prisme de Rochon dont les faces inactives p' et q' sont devenues actives. Le pinceau tombant normalement sur p' donne deux faisceaux superposés, ordinaire et extraordinaire, de même direction que le rayon incident. A la surface de séparation, les ondes se séparent; mais le second prisme, agissant comme polariscope, élimine deux des faisceaux, ne laissant que l'extraordinaire issu de l'ordinaire, et l'ordinaire provenant de l'extraordinaire. Ces faisceaux sont de nouveau déviés à l'émergence sur la face de sortie; leur écart angulaire, δ' , ou déviation due à l'appareil, est, a étant l'angle d'un prisme (égal au complément de l'angle a du prisme de Rochon), donné par les relations :

$$\delta' = \delta_1 + \delta_2$$

$$\sin \delta_1 = \sin a [n' \cos a - \sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 a}]$$

$$\sin \delta_2 = \sin a [\sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 a} - n \cos a].$$

Le prisme de Wollaston donne une déviation plus grande que le prisme de Rochon; mais les images ne sont pas achromatiques. Dans le dispositif de Rochon, l'image non déviée, seule, n'est pas irisée.

En supposant δ et δ' faibles, on a, pour les déviations données par les deux prismes, la relation :

$$\delta' = \delta + \sin a [n' \cos a - \sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 a}] = \delta + \delta_1.$$

239. Duplication de l'image. — Le prisme de Rochon a été utilisé pour réunir, du côté de la face p , deux faisceaux tombant sous un angle convenable sur la face opposée du parallélépipède¹.

Mais Rochon s'en est surtout servi pour faire coïncider, quand deux faisceaux tombent à peu près normalement sur la face p , l'image ordinaire de l'un avec l'image extraordinaire de l'autre. Le prisme est placé

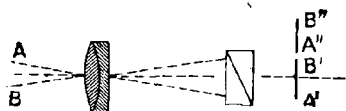


Fig. 127.

(fig. 127) entre l'objectif d'une lunette astronomique et l'image réelle qu'il fournit de deux points A et B, dont l'angle apparent est η . Il se

forme alors dans le plan focal deux images ordinaires A' et B' et deux images extraordinaires A'' et B''. En déplaçant le prisme le long de l'axe, on peut produire la coïncidence de A'' et de B'. L'angle η est alors donné en fonction de x , distance de la face de sortie du prisme au foyer, de l'angle de duplication δ évalué plus haut, et de la focale f de l'objectif par la relation :

$$\operatorname{tg} \eta = x \frac{\operatorname{tg} \delta}{f} = kx,$$

¹ La maison Zeiss (brevet fr. 376157) associe deux prismes de Rochon portant en outre chacun une lame biréfringente formant polarisateur circulaire. L'ensemble constitue un prisme à angle variable.

k étant une constante. Une graduation *ad hoc* fait connaître le déplacement x effectué.

Arago, pour la mesure des diamètres angulaires des astres, plaçait le prisme en dehors et près de l'oculaire. L'angle η est alors donné par l'équation

$$\operatorname{tg} \eta = k' \frac{\operatorname{tg} \delta}{G},$$

G étant le grossissement de la lunette et k' une constante qui dépend de la position du prisme et qui est déterminée expérimentalement. Pour satisfaire à cette relation, Arago faisait varier δ en interposant des prismes dont l'angle de duplication croissait de $30''$ en $30''$, et modifiait en outre G en utilisant un oculaire à focale variable. Biot attribue à ce dispositif une supériorité sur l'héliomètre (6).

La précision des mesures est limitée par le chromatisme de l'image extraordinaire, quoique l'angle de duplication soit toujours faible.

240. **Héliomètre.** — La duplication des images peut être obtenue par l'emploi de lentilles (fig. 128). Si deux objectifs o, o' astronomiques identiques ont leurs axes parallèles, les images des points éloignés A et B seront confondues quand on aura :

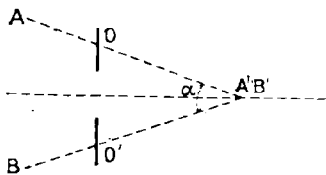


Fig. 128.

$$e = 2f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

La mesure de α résulte de celle de e . C'est le système imaginé par Bouguer, en 1748 (8) ; il ne permet d'ailleurs que la mesure d'angles supérieurs à la limite donnée par l'équation ci-dessus, où l'on remplace e par le diamètre de l'objectif (monture comprise).

En modifiant ce dispositif, Dollond en a fait un instrument tout différent, l'*héliomètre*, qui permet la mesure d'angles aussi petits qu'on le désire.

Le *micromètre* de Dollond, comme on l'appelle aussi, est constitué par une lunette astronomique ou terrestre dont l'objectif est scié suivant un plan diamétral que l'on fait coïncider avec celui qui passe par les points A et B visés. La formule indiquée ci-dessus s'applique à cet instrument ; e désigne la distance, qui peut atteindre zéro, des centres des deux moitiés de l'objectif. Une vis micrométrique à tambour gradué, commandant le déplacement des demi-objectifs, mesure leur écartement ; le mouvement déplace, en général, chaque verre symétriquement par rapport à la position moyenne de coïncidence des centres.

241. **Emploi des goniomètres optiques.** — L'emploi des lunettes à micromètre est général et commode pour la mesure des petits angles ; la grandeur de ceux-ci ne peut évidemment dépasser celle du champ réel de l'instrument, et ce dernier prendrait des dimensions trop exagérées si, conservant la précision, on voulait agrandir le champ embrassé. L'usage de ces instruments nécessite leur immobilité.

Les appareils à duplication ou à coïncidence n'exigent pas cette condition. Les sextants sont utilisés lorsque la précision des mesures doit être faible, les angles étant alors assez considérables. L'emploi des prismes

monoréfringents convient à la mesure de petits angles ; celui des prismes biréfringents et de l'héliomètre donne, dans ce cas, des résultats généralement plus précis, car la taille régulière des petits prismes ordinaires est assez délicate, et la disposition de ces organes n'est arbitraire qu'entre certaines limites, qui se rapprochent d'autant plus que l'on demande plus de précision dans la mesure.

Instruments de laboratoire, de topographie, d'astronomie, ces dispositifs se retrouvent avec de légères variantes dans les appareils de mesure des distances.

CHAPITRE XIV

INSTRUMENTS DE MESURE INDIRECTE DES LONGUEURS TÉLÉMÈTRES

242. Dans la très grande majorité des circonstances, toute mesure d'une longueur, d'une distance, est liée à la résolution numérique ou matérielle d'un triangle dont un côté au moins est connu, qu'il soit donné ou mesuré. Les instruments optiques n'interviennent, en réalité, dans cette opération que pour l'évaluation des angles nécessaires à la détermination du triangle. Leur rôle est surtout utile quand il s'agit soit de faibles intervalles, de l'ordre du millimètre par exemple, soit de distances qui ne descendent guère au-dessous de 20 à 30 mètres, et qui souvent sont supérieures à quelques centaines de mètres. Entre ces limites, les procédés mécaniques sont plus rapides, aussi précis et moins onéreux.

Tous les instruments de mesures angulaires envisagés au chapitre précédent sont applicables à l'évaluation des longueurs et des distances. Leur choix dépend des conditions de la mesure et de la précision exigée. Inversement, tout *macromètre* peut servir de *gonio-*

mètre; ces deux mots sont pris dans leur acception étymologique. La différence d'organisation ne tient qu'à leur *mode normal d'emploi*; mais elle suffit souvent pour transformer en un instrument nouveau et original un appareil déjà connu.

243. **Le problème télémétrique**¹. — Pour la mesure des distances à l'aide d'appareils optiques, télémètres, un côté seulement du triangle est généralement mesuré; nous l'appelons la *base*. L'une des extrémités de la longueur à évaluer est le troisième sommet du triangle; l'autre extrémité est connue de situation relativement à ce triangle. Celui-ci est donc seul à considérer pour la précision des opérations.

Dans le triangle AMN (fig. 129), de base MN, la géométrie donne les relations :

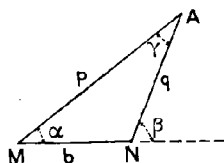


Fig. 129.

$$p = b \frac{\sin \beta}{\sin (\beta - \alpha)}, \quad (a)$$

$$q = b \frac{\sin \alpha}{\sin (\beta - \alpha)}.$$

L'erreur ∂p possible sur p , par exemple, est donnée par l'équation :

$$\frac{\partial p}{p} = \frac{\partial b}{b} + [-\cot \beta + 2 \cot (\beta - \alpha)] \delta \varepsilon, \quad (a')$$

en admettant la même erreur possible $d\varepsilon$ sur chaque angle.

¹ Voir à ce sujet : (22).

On en déduit aisément que, pour une base b donnée, l'orientation la plus convenable à lui donner serait déterminée par la relation :

$$\sin 2(\beta - \alpha) - 2 \sin 2\beta = 0.$$

Cette équation ne pourrait être utilisée que si on connaissait d'avance une valeur approchée de p . Il suffira ici de remarquer que, si le triangle est isocèle, le premier membre de cette équation se réduit à

$$2 \sin \gamma + \sin 2\gamma,$$

γ étant la parallaxe de la base vue du point A. La quantité ci-dessus est très faible dès que A est assez éloigné. De là l'avantage des triangles isocèles.

Quand la base peut être quelconque sans que la précision relative de sa mesure diminue, il y a naturellement avantage à la prendre la plus grande possible, dans le but d'accroître les angles α et β , tout en restant dans le voisinage de la forme isocèle, afin d'augmenter $\beta - \alpha$.

Dans le cas du triangle isocèle, les formules précédentes deviennent :

$$p = \frac{b}{2 \cos \alpha} = \frac{b}{2 \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (b)$$

et
$$\frac{\partial p}{\partial \alpha} = \frac{\partial b}{b} + \operatorname{tg} \alpha \delta \alpha = \frac{\delta b}{b} + \cot \frac{\gamma}{2} \delta \gamma. \quad (b')$$

Si le triangle est rectangle en N, les mêmes formules se transforment dans les suivantes :

$$p = \frac{b}{\cos \alpha} \quad q = b \operatorname{tg} \alpha = b \cot \gamma, \quad (c)$$

$$\frac{\partial p}{p} = \frac{\partial b}{b} + 2 \operatorname{tg} \alpha \partial \alpha,$$

$$\frac{\partial q}{q} = \frac{\partial b}{b} + (2 \operatorname{tg} \alpha + \cot \alpha) \partial \alpha. \quad (c')$$

Le coefficient 2 est nécessaire, parce que l'angle droit n'est déterminé qu'à l'erreur angulaire près $\partial \alpha = \partial \varepsilon$.

244. Emploi de triangles quelconques. — L'évaluation de la distance d'un point M à un point A, qu'on tient pour inaccessible, peut s'effectuer par les mesures successives d'une base $MN = b$, et des angles α et β . C'est le cas des opérations géodésiques de plus ou moins d'envergure. Les organes optiques qui interviendront ne sont ici que des lunettes à réticule. Les formules (a) doivent être appliquées rigoureusement pour la résolution du triangle.

L'emploi de théodolites ou instruments analogues visés dans ce cas assure une grande précision aux mesures, mais n'est pas compatible avec la rapidité des opérations. On peut se contenter, dans certaines circonstances, d'une approximation assez large : par exemple, dans les levés topographiques expédiés ou dans la détermination des distances du tir des bouches à feu. Si la base peut être convenablement orientée, suffisamment étendue et assez exactement mesurée, les angles peuvent n'être évalués qu'avec une approximation voisine de la minute. L'usage du sextant est alors indiqué.

Angles et base peuvent être mesurés par des opérateurs différents ; alors, comme dans les mesures géodésiques, c'est le supplément de β , c'est-à-dire l'angle à la base du triangle, qui est directement évalué, chaque

station déterminant avec le point A un angle dont l'autre station est le sommet. Mais, dans un grand nombre de cas, le même opérateur exécute toutes les mesures. Le point A est toujours sur l'un des côtés de chaque angle ; l'autre côté passe par un point fixe choisi sur le prolongement de la base et dans le sens que celle-ci est parcourue entre les deux mesures. Le sextant doit permettre la mesure de grands angles ; il pourra être un goniomètre à prismes, si on ne veut le munir d'une équerre optique. Son organisation sera presque purement mécanique, dans le but de faciliter visées et calculs. Ainsi le sextant-télémetre Aubry comporte une lunette de Galilée, de faible grossissement, qui redresse les images, et une règle à calcul permettant de résoudre rapidement les équations (a) ; de plus, la lecture des angles s'effectue par tambour et non par vernier, plus sujet à erreur. Dans le goniomètre du commandant Daubresse (235), on a signalé l'emploi d'une lunette ou d'un viseur ; la résolution du triangle est effectuée par un abaque.

Les appareils de ce genre sont nombreux ; leur organisation mécanique, plutôt que leur composition optique, les différencie.

245. Emploi de triangles rectangles. — Le calcul du triangle est singulièrement facilité quand, la base étant petite par rapport à la distance, les angles à la base sont voisins de 90°. Les formules (a) donnent alors, comme dans le cas du triangle isocèle ou du triangle rectangle :

$$p = \frac{b}{\gamma}.$$

Si, en outre, la longueur de la base b est déterminée,

une simple lecture donne, en lieu et place de γ , la distance cherchée p .

Parmi les instruments qui conviennent à ce genre d'opération, nous citerons d'abord (59) le *télomètre*¹ Goulier (fig. 130), destiné à la mesure des distances de tir, et encore réglementaire dans l'artillerie de campagne. L'appareil est, en principe, à deux opérateurs opérant simultanément; il résout un triangle sensiblement rectangle, et comprend deux instruments diffé-

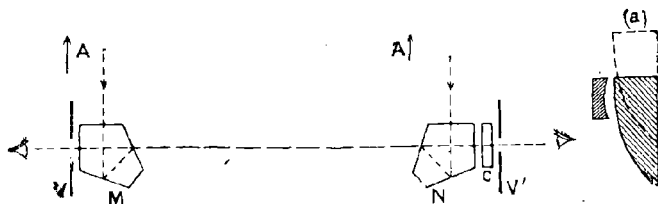


Fig. 130.

rents. L'un M n'est autre qu'une *équerre optique* (261), prisme réfléchissant comportant sous l'angle de 45° deux faces argentées; son rôle est de placer le second appareil N à 90° de la ligne AM; cette disposition est réalisée quand la ligne de foi tracée sur le voyant V' de l'appareil N est dans la direction de l'image du but A vu par double réflexion dans le prisme. La ligne de visée directe dans M est assurée par une lunette ou un viseur à fente remplissant le rôle de réticule. L'instrument N porte les mêmes organes que M; en outre, devant le prisme se trouve un système correcteur c qui permet de modifier la direction du

¹ Τέλος, but.

faisceau venant de A, et qui comprend (fig. 130, a) deux lentilles plan-convexe et plan-concave, à même rayon de courbure, les faces courbes en regard. Quand les axes des deux lentilles coïncident, leur ensemble agit comme une glace à faces parallèles. Si le viseur de N est dirigé sur la ligne de foi du voyant V de M, le point A ne peut se superposer à celle-ci que s'il est à l'infini; dans le cas contraire, un déplacement relatif d'une lentille par rapport à l'autre assurera la coïncidence, et ce déplacement ε donnera la parallaxe γ par l'équation $f\varepsilon = \gamma$, f étant la focale de la lentille convergente. Ce système équivaut à un prisme déviateur à angle variable.

L'instrument indique la distance avec la précision que lui assignent les formules, s'il est manié par des observateurs exercés qui peuvent assurer, à des instants déterminés, la simultanéité des visées sur le même point du but et sur les lignes de foi respectives.

Un même opérateur, muni de l'instrument N, peut exécuter toutes les opérations : déterminer d'abord en M la direction de la base, la lentille déviateur étant placée au repère *infini* (axe des lentilles en coïncidence); puis, se transportant en N, en mesurant la distance, opérer, avec le système correcteur, la coïncidence du but et d'un signal placé préalablement en M.

246. — Un grand nombre d'instruments sont basés sur le même principe : déviation à 90° avec dispositif correcteur. En particulier, le télémètre Gautier, dans lequel l'équerre optique est formée de deux miroirs à 45° , le système correcteur étant un diasporamètre de Rochon; le télémètre Amici, qui produit la déviation à 90° par un prisme newtonien à réflexion totale et

assure la correction par une lentille divergente, coupée comme dans l'héliomètre. Dans d'autres appareils, l'image directe est reçue sur un réticule de lunette, la rotation de miroirs ou de prismes nécessaire pour assurer la coïncidence de la seconde image est mesurée mécaniquement. L'exécution de la plupart de ces instruments est malheureusement aussi simple que leur conception ; elle ne donne pas la précision qu'on pourrait en attendre.

Les formules (c) s'appliquent à ces télémètres. En admettant que l'on puisse atteindre pour le pointé la précision de la minute ($\delta x = \frac{1}{3000}$), on obtient, pour l'erreur absolue possible sur la distance, la relation

$$\delta p = \frac{p}{b} \delta b + \frac{2}{3000} \frac{p^2}{b}.$$

Cette formule n'est suffisamment approchée que si $p > 10 b$.

247. **Emploi du triangle isocèle.** — L'emploi d'un triangle isocèle a conduit à une solution remarquable au point de vue optique; elle est donnée par le *Distanzmesser* de Bauernfeind (59). Ce petit instrument est du genre des équerres optiques; c'est un simple prisme, en verre (fig. 131), à peu près rectangle et dont la face hypoténuse PQ est argentée; l'angle en P est égal à $45^\circ + \varepsilon$; l'angle en O, double de P, vaut $90^\circ + 2\varepsilon$. Un faisceau issu de A, qui suit un trajet tel que *AabcdA'*, sort en faisant un

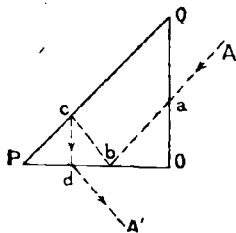


Fig. 131.

angle de $90^\circ - 2\varepsilon$ avec sa direction primitive, et cela, quelle que soit son incidence sur la face QO , pourvu que le faisceau reste dans la section droite du prisme. La démonstration de cette propriété s'effectue en appliquant la loi de Descartes et celle de la réflexion sur miroirs plans.

Le prisme permettra donc de déterminer une direction MN faisant avec la distance MA à mesurer un angle de $90^\circ - 2\varepsilon$. On se transportera ensuite sur MN jusqu'au point N qui donnera une direction NA faisant avec NM l'angle $90^\circ - 2\varepsilon$; il suffira de viser, suivant le cas, soit par la face PO , soit par la face QO , les réfractions et réflexions se produisant toujours sur les mêmes faces et dans le même ordre relatif.

Dans ces conditions, la distance $MA = p$ est, pour un prisme donné, proportionnelle à la base $MN = b$; le coefficient de proportionnalité n'est autre que l'inverse de $2 \sin 2\varepsilon$.

D'autres prismes présentent les mêmes propriétés que le précédent; entre autres, le prisme pentagonal de Bauernfeind (38), qui comporte quatre parcours différents, et le *prisme télémètre* Souchier¹.

248. **Appréciation des procédés télémétriques utilisant une grande base.** — Les appareils précédents nécessitent des mesures à deux stations plus ou moins éloignées. Avec un observateur unique, opérant successivement, leur emploi est incompatible avec la rapidité de la mesure, et se trouve en défaut quand le but est mobile; avec deux observateurs, il est indispensable que les visées soient simultanées sur un

¹ *Revue d'Artillerie*, t. XLI, 1893.

but mobile, et même sur un objet fixe si les instruments sont tenus à la main ; il faut, de plus, que les deux opérateurs s'entendent sur le point exact à viser : une erreur d'une dizaine de centimètres est souvent inadmissible. Or cette difficulté de préciser le but, quand celui-ci n'est pas un véritable signal, est parfois assez grande. Même à un observateur unique qui se transporte de l'une des extrémités de la base à l'autre, il arrive fréquemment de perdre ou d'échanger le but, tant l'aspect du paysage peut se modifier, même pour un déplacement du point de vue d'une quarantaine de mètres.

• Parmi les appareils qui n'exigent qu'une station, les uns supposent connue la grandeur d'une base située, qui passe par le but ; ce sont les lunettes à micromètre, dites alors stadimétriques, et les instruments qui mettent en jeu la duplication des images, et qu'on peut appeler *télémètres à décalage d'images* ; les autres, auxquels on réserve habituellement la qualification de *télémètres monostatiques*, portent en eux-mêmes la base linéaire nécessaire à toute évaluation métrique.

Lunettes stadimétriques.

249 — Une lunette à micromètre mesure des angles. Si son axe est normal au milieu de la base qui passe par le but A, l'angle sous-tendu par la base connue b déterminera la distance de celle-ci à un point fixe de l'instrument.

En effet, on a dans ce cas (fig. 132), par les formules classiques des lentilles simples, la relation

$$D - f = f \frac{b}{r},$$

donnant la distance du milieu de b à l'objectif O . Le

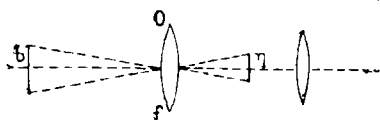


Fig. 132.

triangle résolu est ici isocèle; et les conditions pratiques permettent de confondre les distances à A et à un autre point de la base.

En général, le micromètre est divisé en parties égales, et c'est le nombre h de divisions couvertes par l'image de la base que lit l'observateur. Si chaque intervalle entre deux traits vaut $\frac{1}{m}$ de millimètre, la formule ci-dessus peut s'écrire :

$$D - f = mf \frac{b}{h} = k \frac{b}{h}, \quad (a)$$

k étant une constante de l'instrument.

Lorsque l'éloignement de l'objet est assez grand, on peut négliger f devant D , c'est-à-dire faire usage de la formule

$$p = k \frac{b}{h}.$$

C'est elle qui est appliquée dans l'évaluation des distances de tir; en campagne, b est la hauteur d'un homme, d'un cavalier; dans le tir à la mer, la base est la hauteur de mâture (distance entre la ligne de

flottaison et un point remarquable d'un mât ou l'extrémité d'une cheminée). La précision qui ressort, pour la distance, de la mesure tient surtout au degré d'exactitude d'appréciation de la base; les bases sensiblement verticales sont préférables; on a rarement une idée suffisante de l'orientation des bases horizontales.

250. **Lunette anallatique.** — La formule (a) du paragraphe précédent doit être conservée, lorsque la focale f de l'objectif ne peut être négligée devant la distance qui sépare A de l'appareil. Le cas se présente dans les levés topographiques à grande échelle, où les distances des cheminements sont faibles et doivent être obtenues avec une grande précision (celle qui répond, sur le dessin topographique, à 0^{mm},1).

La base b est ici constituée par une mire ou règle divisée, dite *stadia*, tenue verticalement ou horizontalement: position et longueur sont bien connus.

La distance qui intéresse est celle qui sépare la mire de l'axe vertical de rotation de la lunette, lequel est placé à l'aplomb du sommet de cheminement. Un calcul serait nécessaire pour passer de la valeur de D à la distance en question.

Porro, en introduisant entre l'objectif et le micro-mètre une lentille convergente, dite verre *anallatiseur*, convenablement calculée, a modifié l'instrument de façon à reporter sur l'axe de rotation vertical l'origine des distances p , telles que la formule de leur calcul se présente sous la forme simple

$$p = k' \frac{b}{h},$$

k' étant une constante.

La théorie sommaire de cette *lunette anallatique*

résulte de la figure 133. Les formules des lentilles simples donnent :

$$D + f \frac{e - \varphi}{f + \varphi - e} = \frac{b}{r_1} \frac{f \varphi}{f + \varphi - e}.$$

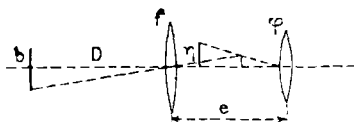


Fig. 133.

Cette relation se réduira à la précédente si l'on fait

$$p = D + f \frac{e - \varphi}{f + \varphi - e}, \quad k' = \frac{f \varphi}{f + \varphi - e}.$$

La distance p est donc comptée à partir d'un point de l'axe optique situé en arrière de l'objectif à l'intervalle λ donné par

$$\lambda = f \frac{e - \varphi}{f + \varphi - e}.$$

Cette équation est la relation d'*anallatisme*. Elle déterminera, λ étant la distance de l'objectif à l'axe vertical de rotation Λ de la lunette, la place ou la focale du verre anallatiseur V. On peut remarquer que Λ est le foyer conjugué par rapport à l'objectif du foyer principal antérieur du centre optique de la lentille V.

Ces lunettes ont en réalité un oculaire négatif à trois verres ; les formes des deux lentilles extrêmes sont différentes de celles de l'oculaire Huygens, dans le but de corriger les aberrations sphériques (41).

Télémetros à décalage d'images.

251. — Si, à l'aide d'un appareil de duplication, à axe sensiblement horizontal, — pour fixer les idées, — on observe un objet ayant une hauteur verticale convenable, on peut, pour une certaine position de l'organe mobile ou déformable (prisme, demi-lentilles, miroirs), disposer les deux images produites dans le prolongement l'une de l'autre, et telles que le sommet de l'une coïncide avec la base de l'autre. L'instrument mesure alors la grandeur apparente, angulaire, de l'objet. Si la hauteur de celui-ci est connue, une formule, en principe identique à celle des lunettes à micromètre, permettra d'en déduire la distance de l'appareil.

Pratiquement, la distance à mesurer est toujours assez grande; il n'y a pas lieu d'envisager les dimensions de l'instrument. Le triangle à résoudre est sensiblement isocèle. La relation

$$P = \frac{b}{\gamma}$$

suffit à la théorie des télémetros en question.

Ces appareils se substituent aux lunettes stadimétriques quand la fixité nécessaire à ces derniers ne peut être assurée.

Tous les instruments de duplication usités dans les laboratoires de physique ou les observatoires astronomiques ont été transformés en télémetros à décalage d'images. Les modifications apportées sont surtout d'ordre mécanique: disposition des organes en vue de réduire l'encombrement et de faciliter la mise en main,

lectures métriques, amplification des déplacements, adjonction d'abaques qui suppriment tout calcul, etc.

252. **Prisme monoréfringent.** — La duplication produite, concurremment avec la vision directe, par un prisme monoréfringent d'angle faible, a été appliquée jadis dans la marine. L'appareil était constitué par une série de prismes, à angles régulièrement échelonnés, disposés sur la circonférence d'un plateau. L'œil se plaçait de façon à faire bissecter sa pupille par le plan passant par le milieu du but et l'arête du prisme.

Ce principe a été repris, récemment, par le commandant Gérard ¹, sous la forme du diasporamètre de Rochon.

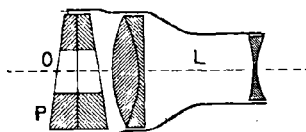


Fig. 134.

Les deux prismes P composants (fig. 134), d'angle faible, comportent, dans leur partie centrale, une ouverture circulaire O centrée sur l'axe de rotation du système. Une lunette de Galilée L permet l'ob-

servation des images par l'ouverture et à travers les verres. L'opérateur effectue la duplication en tournant les deux prismes en sens inverses et du même angle. L'observation ayant lieu surtout sur des objets verticaux (hommes, cavaliers, mâtures, etc.), l'égalité des rotations est suffisamment décelée par le maintien de la verticalité apparente des images : l'œil est moins tolérant que l'instrument n'est précis.

La transformation du résultat angulaire γ en dis-

¹ Brevet fr. 352028. — *La Nature*, 23 mars 1907. — *Revue d'Infanterie*, 1907.

tances p est effectuée automatiquement par les montures des prismes qui, avec un index mobile et dont la position se règle d'après la valeur de b , constituent une règle à calcul.

253. **Prisme biréfringent.** — Le prisme biréfringent ou micromètre de Rochon a été utilisé comme moyen de duplication, en particulier, dans la jumelle du colonel Souchier. Le prisme est ici placé en arrière de l'oculaire d'un des corps d'une jumelle; il peut se rabattre dans la bonnette, quand la jumelle doit être utilisée comme instrument d'observation.

Le prisme est dans une position invariable, longitudinalement, par rapport à l'oculaire. Le décalage des images ne peut donc, sauf exception, être complet; les images empiètent l'une sur l'autre. L'observateur juge du rapport ρ entre la partie détachée de l'une des images et la partie recouverte par l'autre image. La longueur b de la base constituée par l'objet est réduite dans le rapport ρ en question.

254. **Lentilles fendues.** — La marine a adopté depuis longtemps (59), comme télémètre à décalage, l'héliomètre de Dollond, sous la forme donnée par Lugeol, officier de vaisseau, et avec la modification apportée, dans la mesure du déplacement des lentilles, par l'opticien Lorilleux; ce déplacement est amplifié par un dispositif multiplicateur dont l'organisation est uniquement mécanique.

Le principe de la duplication par demi-lentilles n'implique pas que celles-ci constituent l'objectif; la séparation des images se produira si le système de décalage est interposé en un point quelconque du trajet du faisceau. En 1823, Amici a proposé de

placer les demi-lentilles entre l'objectif et l'image réelle, dans une lunette astronomique ou terrestre. L'avantage tient à l'emploi de lentilles de petites dimensions; l'inconvénient est de réduire le déplacement de l'organe mobile.

Giraud-Teulon (35), en 1875, a opéré la duplication en sectionnant l'oculaire. Le déplacement est alors égal à l'étendue de l'image objective; comme dans l'héliomètre de Dollond, les défauts d'aberration sont moins perceptibles.

255. **Miroirs et prismes à réflexion.** — Le sextant peut être employé, comme appareil de décalage, dans les mêmes conditions que les instruments précédents. Il n'y a cependant aucun intérêt à utiliser le modèle courant, surtout destiné à la mesure de grands angles. Il en est autrement du sextant à prismes associé à une lunette fixe qui peut devenir un télémètre précis, quant à l'évaluation de l'angle.

Télémètres monostatiques.

256. **Précision à demander à l'appareil.** — Les appareils à décalage d'images présentent l'inconvénient d'exiger la connaissance d'une base, voisine de l'objet, de position à peu près déterminée, et dont la grandeur est, dans la majorité des cas, évaluée à l'estime. On s'est proposé, depuis longtemps, d'organiser un instrument qui renferme implicitement la base, laquelle deviendra une constante de l'appareil, et dont on n'aura pas à se préoccuper dans les calculs ou les lectures.

La base, qui doit être invariable, constante, sera déterminée par deux des points d'un système rigide; elle sera donc courte, dans les environs de 1 ou de 2 mètres, pour que le télémètre soit réalisable; peut-être pourra-t-on atteindre 4 ou 5 mètres. A chacune de ses extrémités, un système optique produira une image; un opérateur unique examinera la position relative des deux images.

Les systèmes optiques seront équivalents quant à leurs effets; la base placée de façon que les faisceaux incidents, en atteignant les extrémités, tombent symétriquement, ou à peu près, sur elle. Le triangle à résoudre sera donc, étant donnée la faiblesse admise de la base par rapport à la distance, isocèle ou rectangle. La position des images évaluera la parallaxe.

Géométriquement, donc, on aura la relation :

$$p = \frac{b}{\gamma};$$

d'où, en supposant la base constante :

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{b}{p\gamma^2} \delta\gamma = \frac{p}{b} \delta\gamma,$$

$$\delta p = \frac{p^2}{b} \delta\gamma.$$

En évaluant $\delta\gamma$ en secondes, cette équation donne :

$$(\delta\gamma) = 200\,000 \frac{b\delta p}{p^2}.$$

On aura une idée de la précision à exiger dans les mesures angulaires, — car tout télémètre est un goniomètre, — en supposant qu'avec une base de 2 mètres, on se propose d'évaluer à 50 mètres près, comme erreur maxi-

mum pratique, une distance de 2000 mètres. La formule ci-dessus donne $(\delta\gamma) = 5''$. C'est la plus grande erreur qu'on puisse se permettre sur la mesure de la parallaxe.

257. **Télémetre à lunettes parallèles.** — Si deux lunettes à réticule, identiques, L et L', sont disposées de façon que leurs axes optiques soient parallèles, et si la première est dirigée sur un point éloigné A, dont l'image viendra se placer sur le centre du réticule, l'image de A dans la lunette L' se trouvera à une distance η de la croisée des fils du réticule correspondant; η est compté parallèlement à la base b , intervalle des axes optiques. La distance cherchée p est alors donnée par la relation

$$p = \frac{bf}{\eta}.$$

On évaluera η en adjoignant au réticule de L' un micromètre sur glace ou à fils, et alors L' agira comme une lunette stadimétrique, le système des deux lunettes n'ayant d'autre but que de constituer et de porter en avant une base b , dont le point visé est l'une des extrémités. On pourra encore évaluer η en mesurant le déplacement angulaire α , qui est nécessaire pour assurer la coïncidence, dans la lunette L', de l'image et du centre du réticule, quand L' tourne autour du centre optique de son objectif. Dans ce dernier cas, $\eta = f\alpha$, et par suite:

$$p = \frac{bf}{\alpha}.$$

Sous cette dernière forme, le télémetre à deux lunettes a été proposé un peu avant 1737 par de Gen-

sanne¹, et présenté à l'Académie des Sciences de Paris. Les rapporteurs de la proposition émirent des doutes sur la précision de l'appareil.

L'idée a été reprise vers 1877, par le général américain Berdan (59), dont le télémètre est identique à l'appareil qui vient d'être cité, à cela près que la base est horizontale, et que l'ensemble est plus complètement étudié au point de vue mécanique.

À la même époque, le colonel autrichien Roskiewicz (59) faisait construire un télémètre du même genre, mais à lunettes fixes, l'une d'elles comportant un réticule à fil mobile.

Ces appareils n'ont donné de résultats satisfaisants qu'immédiatement après leur réglage, lequel exige l'observation préalable soit d'un point situé à une distance parfaitement connue; soit d'un point lumineux à l'infini (un astre, en principe).

En admettant les caractéristiques du télémètre considéré au § 255, et remarquant que l'emploi de l'instrument comporte deux visées et, par suite, une précision de pointé de 2",5, on voit que l'angle de rotation de la lunette doit être évalué avec cette précision. Avec le télémètre Roskiewicz, le déplacement du fil réticulaire devrait être mesuré avec une précision de $\frac{2,5}{200\,000} f = 0^{\text{mm}},08$, en faisant $f = 700$ millimètres, valeur convenable pour la focale d'un objectif devant être ouvert à 55 millimètres au moins; en vue de son pouvoir séparateur; la lunette reste d'ailleurs

¹ DE GENSANNE. *Machine pour mesurer d'une seule station de petites distances inaccessibles. Machines et inventions approuvées par l'Académie royale des Sciences de Paris*, t. VII, 1737.

suffisamment courte. Facile à atteindre dans un instrument de laboratoire, cette précision se conserve rarement au dehors.

258. **Télémetres à superposition d'images.** — **Base variable.** — Un autre inconvénient des télémetres à deux lunettes est de nécessiter soit des observations successives, quoique à intervalles rapprochés, par un même opérateur, soit l'emploi de deux observateurs. On a tenté d'éviter ce défaut en transportant optiquement, dans le voisinage l'une de l'autre, les images objectives de manière qu'elles puissent être observées simultanément par un même opérateur. De leur position relative ou de la déformation à faire subir à l'instrument pour assurer la superposition des images, on déduira la parallaxe du but.

Le plus ancien instrument de ce genre paraît être

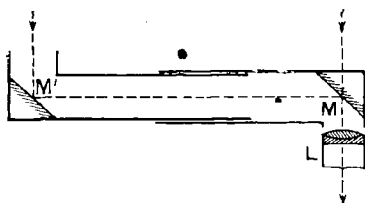


Fig. 135.

celui construit par Magellan (59) en 1775 (fig. 135) : deux miroirs situés à une distance *variable* *b* font entre eux un très petit angle γ ; une lunette *L* reçoit à la fois

l'image directe (le miroir *M* ne couvrant que la moitié de l'objectif) et l'image doublement réfléchiée par *M'* et *M*. En faisant varier la distance des miroirs, la superposition des images peut être obtenue, et on a alors :

$$p = \frac{b}{\sin 2\gamma} = kb.$$

Ce dispositif, plus ou moins perfectionné, a été repris depuis par Salneuve vers 1867; il se rencontre dans les télémètres plus récents proposés par M. Aragno¹, M. Neilson², MM. Lawford, Capper et Beck³.

La difficulté à vaincre dans la réalisation de ce principe est le maintien de la constance, à un petit nombre de secondes près, de l'angle γ des axes des lunettes, pendant que la base varie.

259. **Base invariable.** — Dans la plupart des monostatiques les plus récents, la base est invariable; la superposition des images est obtenue par le déplacement ou la déformation d'un organe optique qui agit sur l'un des faisceaux. Ceux-ci, après avoir atteint les extrémités de l'appareil, se replient, en se dirigeant l'un vers l'autre, dans la direction de la base, puis sont renvoyés dans une direction unique, sens compris, sur un système oculaire.

Les premiers télémètres de ce genre paraissent être ceux de Steinheil, d'Adie et de Tavernier (59), construits un peu avant 1860.

Leur organisation schématique est la suivante (fig. 136) : deux miroirs plans M et M' sont placés aux extrémités de la base, à 45° de sa direction; ils renvoient à 90° de leur direction primitive et, par suite, à peu près sur la base mm' les faisceaux, issus du point A, qui les atteignent; chaque faisceau rencontre un objectif O, O', à proximité du miroir correspondant, puis, vers le milieu de la base, un prisme P, P' à réflexion totale. Il se forme donc deux images

¹ Brevet fr. 345478.

² Brevet fr. 321255.

³ Brevet fr. 362653.

réelles A' et A'' à la sortie de ces prismes (la focale de l'objectif est déterminée en conséquence); ce sont ces deux images que l'œil observe par l'intermédiaire d'un oculaire Ω terrestre ou astronomique, muni au besoin d'un système déplaçant l'ensemble des deux images afin d'en faciliter l'observation.

Les deux prismes centraux ont leurs hypoténuses

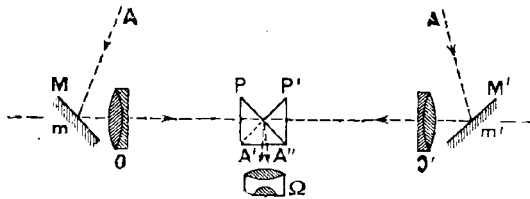


Fig. 136.

réfléchissantes respectivement parallèles aux miroirs, comme dans le téléstéréoscope d'Helmholtz; ils sont d'ailleurs l'un sur l'autre (en supposant, pour fixer les idées, la base horizontale), afin que l'écartement des images ne soit pas augmenté de celui des centres des faces réfléchissantes, et que les faisceaux déviés par elles puissent atteindre l'oculaire sous des angles faibles avec l'axe. Il en résulte que chaque prisme ne reçoit que la moitié du faisceau tombant sur l'objectif; ceux-ci ne travaillent que sur la moitié de leur ouverture, l'un sur la moitié supérieure, l'autre sur la moitié inférieure.

Si le point A était à l'infini, les deux images A' et A'' coïncideraient. Quand le but est à une distance p , l'écartement η de ces images ou de celles de deux

points correspondants est lié à p par la même relation que dans les télémètres à deux lunettes :

$$p = \frac{bf}{\eta};$$

car, tant que les images sont dans le champ de l'oculaire, le triangle, très allongé, est sensiblement isocèle. La parallaxe seule intervient, et non, individuellement, les angles à la base.

La superposition des images A' et A'' , d'où résultera la mesure implicite de η , est obtenue par un dispositif analogue au suivant, et dont le principe est de produire, entre l'un des objectifs et l'image correspondante, une déviation convenable du faisceau intéressé.

Si, entre l'objectif et l'image réelle, et à une distance x de celle-ci comptée sur le trajet du faisceau, on dispose un prisme à angle très faible θ , la déviation linéaire de l'image, dans son plan, sera exprimée par $(n-1)\theta x$, et la superposition de A' et de A'' sera obtenue quand on aura $\eta = (n-1)\theta x$; la distance p sera donc donnée par la formule :

$$p = \frac{bf}{(n-1)\theta x} = \frac{k}{x}.$$

Comme, en général, l'organisation de l'appareil s'oppose à ce que x puisse devenir nul, — le prisme déviateur devant se mouvoir entre l'objectif et les prismes centraux, — on dispose, sur le trajet de l'autre faisceau, un prisme déviateur fixe, calculé de façon que la coïncidence des images ait lieu pour des faisceaux incidents parallèles, quand $x = x_0$, x_0 étant la valeur minimum qui peut prendre la distance du prisme déviateur

mobile à l'image. La formule précédente devient alors :

$$p = x - x_0 \frac{h}{x}$$

Lorsqu'on observe avec un télémètre de ce genre un objet vertical (par exemple, un paratonnerre), — la base de l'instrument étant horizontale, — se présente sous l'aspect de la figure 137; l'image de l'objet est coupée en deux parties décalées dans le sens horizontal; chacune d'elles est dans le demi-champ visible donné par la moitié efficace de l'objectif correspondant, la ligne de séparation des champs pouvant être perçue

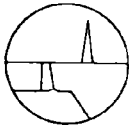


Fig. 137.

si les images objectives se forment tout près des prismes centraux. Le jeu du prisme déviateur permet la réunion en une seule image continue des deux fragments aperçus; la coïncidence des images est alors assurée, bien que celles-ci ne soient pas discernées dans leur ensemble. De là le nom de *télémètres à coïncidence* donné à ce type d'instruments.

260. **Éléments optiques essentiels des télémètres monostatiques.** — Les causes qui peuvent influencer sur l'exactitude des indications de l'appareil tiennent : 1^o à la position des miroirs M et M' par rapport à la base; 2^o à la position relative des hypoténuses des prismes centraux; 3^o à la variation de forme de la base par suite de flexions de l'instrument; 4^o à la non-homogénéité des milieux traversés par les faisceaux lumineux

Cette dernière cause est commune à tous les instruments d'optique. Si elle peut ici produire un effet sen-

sible, cela tient, malgré la faiblesse de la base, à la grande précision exigée dans la mesure des angles. La non-homogénéité en question est celle des couches d'air traversées. Quoique les faisceaux incidents soient toujours peu écartés, il suffit, par exemple, que l'un d'eux rase de plus près un corps plus chaud que le milieu ambiant, pour qu'une déviation différente lui soit donnée, en raison de la moindre densité de la couche d'air. On perçoit cette influence dans le tremblement continu des images quand le télémètre est à peu de hauteur au-dessus d'un sol trop échauffé.

Les erreurs dues à cette cause ne peuvent être évitées qu'en réglant les conditions d'emploi de l'appareil — son organisation optique ne peut y remédier.

En outre, au point de vue de la valeur absolue de la mesure, il est à remarquer que tout télémètre ne résout pas le triangle géométrique considéré jusqu'ici, mais seulement celui qui est formé par la base et les tangentes issues de ses extrémités aux trajets des faisceaux lumineux qui y aboutissent. Il sera donc nécessaire de tenir compte, le cas échéant, quand la précision s'imposera, de la réfraction atmosphérique. La graduation de l'instrument ne peut être établie en conséquence que si le télémètre doit être uniquement employé dans des conditions bien déterminées.

261. **Équerres optiques.** — Les miroirs extrêmes ont été remplacés depuis longtemps par des prismes à réflexion totale. Cette substitution améliore la clarté des images; elle laisse subsister la nécessité d'une position précise des organes extrêmes. Or un déplacement angulaire β d'un prisme inflige à l'image un déplacement double 2β ; comme l'appareil comporte deux

prismes, la précision angulaire $\delta\gamma$, dans la mesure, ne sera obtenue qu'autant que l'on aura $\beta \leq \frac{1}{4} \delta\gamma$. Une telle précision β , qui est alors voisine d'une seconde, exige que les points d'appui du prisme aient des positions relatives presque invariables. Avec un prisme de 60 millimètres de côté, le déplacement relatif des points d'appui ne doit pas être, pour

$$\delta p = 4'', \text{ ou } \beta = 1'',$$

supérieur à $0,3\mu$.

Cette précision se conserve difficilement; un instrument de ce genre exige de fréquents réglages. On les évite en remplaçant les miroirs ou prismes-miroirs par des *équerres optiques*.

Les équerres optiques sont des systèmes de forme invariable, qui dévient un faisceau incident, d'un angle constant, en principe égal à 90° , en pratique très voisin d'un droit, et cela quelle que soit l'incidence sous laquelle le faisceau est reçu. Une condition supplémentaire doit être ajoutée, sans laquelle l'équerre optique est impossible à réaliser : le faisceau doit rester normal à une direction déterminée.

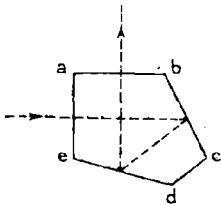


Fig. 138.

Une équerre optique simple est constituée par le prisme en verre de la figure 138; les deux faces bc et de sont argentées et se coupent à 45° ; l'angle a est droit; les angles b et e valent 135° ; la face cd n'a aucune action optique, elle supprime uniquement l'angle aigu du prisme. Un faisceau tombant sur

ae sort en émergeant de ab , les directions faisant un angle de $90^\circ + 2\varphi$ si l'angle des faces bc et de est de $45^\circ + \varphi$. La propriété subsiste, quelle que soit l'incidence du faisceau sur la face d'entrée, pourvu que les rayons restent normaux à l'intersection des faces réfléchissantes bc et de . C'est l'équerre optique employée par le capitaine Gautier, en 1865, dans son télémètre instantané; par le colonel Goulier, en 1863, dans le nautomètre à prismes et dans les appareils de son télémètre. C'est actuellement l'équerre la plus employée, malgré l'absorption lumineuse due aux miroirs, parce qu'elle est la plus simple.

La combinaison prismatique Porro, à laquelle on retranche un demi-prisme, constitue une équerre optique à trois réflexions totales, — et par suite sans argenteure, — dont l'axe (direction à laquelle les faisceaux doivent rester normaux) est l'intersection des faces d'entrée et de sortie. Cette équerre a été mentionnée dans les brevets¹ relatifs au télémètre Barr et Stroud. Les difficultés de travail ne permettent pas de la tailler dans un seul bloc de verre, car les faces polies ne forment pas un polyèdre convexe; on doit se borner à coller au baume un prisme et un demi-prisme. On ne peut alors répondre de l'invariabilité du système.

On a constitué des équerres optiques en assemblant des miroirs. La solution est défectueuse; les appuis ne sont jamais suffisamment assurés.

La nécessité d'avoir le faisceau incident perpendiculaire à une certaine direction fixe de l'équerre optique n'est pas un inconvénient. En effet, la variation d'inci-

¹ Brevets français 199368, 239528, 317396, 333047, 338670, 375711.

dence du faisceau peut toujours être attribuée au déplacement du prisme-équerre; si celui-ci tourne autour de son axe, l'image reste fixe; s'il tourne autour d'une autre droite, l'image monte ou descend dans le champ de l'oculaire. On s'en rend compte par l'aspect de l'image totale qui présente alors des points reproduits dans les deux champs ou dans laquelle des parties sont éliminées (image allongée ou raccourcie); il suffit de modifier en conséquence l'orientation du prisme. Quand l'image est complète et sans points doublés, la condition nécessaire à l'emploi de l'équerre est réalisée. L'axe de l'équerre est disposé normalement au triangle à résoudre; la rotation du prisme autour d'une perpendiculaire à cet axe est alors corrigée comme il vient d'être dit.

262. **Système optique central.** — Les prismes centraux sont cimentés l'un sur l'autre. Une rotation

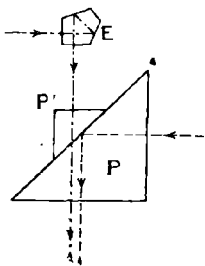


Fig. 139.

de leur ensemble n'influe pas sur la position relative des deux images: elles se déplacent de la même quantité et dans le même sens. Mais ce collage en porte-à-faux est assez délicat, et on ne peut cependant compter que sur lui pour assurer l'invariabilité du système.

La combinaison suivante¹ (fig. 139), indiquée par MM. Barr et Stroud, peut remplacer le double prisme central; elle comprend deux prismes P, P', de

¹ Un dispositif analogue est employé par la maison Zeiss. (Brevet fr. 364740.)

dimensions différentes, collés au baume de Canada par leurs faces hypoténuses, et par suite sans porte-à-faux. La marche des rayons est suffisamment indiquée dans la figure; les uns traversent la partie centrale des deux prismes, agissant alors comme lame à faces parallèles; les autres subissent, en dehors de la région collée, la réflexion totale ordinaire. Cette disposition détruit la symétrie primitive du télémètre et exige l'emploi d'une équerre optique intérieure E ramenant l'un des faisceaux perpendiculairement à l'autre.

Les mêmes constructeurs emploient, dans un de leurs types de télémètres, comme système central, un prisme à réflexion totale dit *séparateur*, dont une face est taillée suivant un angle très obtus. L'instrument est constitué alors de manière à superposer d'abord en direction et sens les faisceaux tombant sur les extrémités de la base; ces faisceaux sont séparés ensuite par le prisme obtus, qui en outre les réfléchit vers l'oculaire dans une direction déterminée. Ce prisme séparateur est aussi employé dans d'autres instruments des mêmes opticiens; il est joint au système central ordinaire ou à des prismes redresseurs d'images. Son but n'est alors que de fixer la ligne de séparation des deux champs.

263. **Flexion de la monture.** — La flexion de l'instrument est l'un des points les plus délicats de la construction d'un télémètre monostatique. Cette flexion peut tenir au poids même de l'appareil, aux secousses qui lui sont infligées, à la dilatation de la monture. Si l'axe de l'appareil fléchit de façon à prendre une courbure circulaire de flèche ϵ par rapport à la base primitive b , la déviation relative φ des faisceaux, égale

à celle des tangentes extrêmes, a pour expression approchée :

$$\varphi = \frac{4\varepsilon}{b}.$$

Elle doit être de l'ordre de la seconde pour que son influence soit insensible. Pour $b = 2$ mètres et $\varphi = 1''$, on aurait $\varepsilon = 2,5\mu$. Même en diminuant la précision, on ne saurait tolérer une valeur bien considérable de la flèche.

Le maintien de la rigidité de l'instrument est d'ordre mécanique. Nous nous bornerons à signaler ici que, dans le télémètre Barr et Stroud, les éléments optiques (à l'exception des équerres optiques de base) sont assemblés dans une monture qui est protégée par une enveloppe extérieure, à laquelle la monture est reliée par des articulations dérivant du joint à la Cardan, de manière à assurer une certaine indépendance entre les deux corps du télémètre.

Dans le nautomètre à prismes du colonel Goulier (59) et dans le télémètre Wild (brevet fr. 350963), un objectif unique reçoit les deux faisceaux. La flexion n'a aucune influence. Mais cette disposition oblige à donner de grandes dimensions aux éléments réfléchissants.

264. **Organe déviateur.** — L'emploi du prisme déviateur mobile le long de l'axe est le mode le plus commun pour produire la superposition des images. Bien que la relation qui lie la distance au déplacement du prisme se présente sous la forme hyperbolique $p(x - x_0) = k$, l'amplitude du déplacement total est assez grande pour satisfaire aux exigences de la pratique. Le déplacement $x - x_0$ peut être lu directement sur une graduation

linéaire tracée en conséquence, que celle-ci se déplace devant un index fixe ou inversement; le cas est assez fréquent. Dans des spécimens de télémètres Barr et Stroud, la lecture s'opère sur le long d'une hélice cylindrique qui amplifie le mouvement du prisme ou sur une graduation tracée sur glace reliée au prisme, que l'on observe, par un second oculaire, à l'aide de l'œil non occupé par les images.

Dans ses télémètres, Gautier (33) employait une lame épaisse à faces parallèles, mobile autour d'un axe normal à celui de l'instrument. Le déplacement linéaire ainsi produit, quand la normale à la lame fait avec le faisceau incident sur elle un angle θ , est :

$$n - e \frac{\sin(\theta - r)}{\cos r},$$

avec :

$$\sin r = \frac{1}{n} \sin \theta,$$

e étant l'épaisseur de la glace.

Goulier (59), dans son *nautomètre*, utilisait le même système déviateur à lentille que dans le télémètre.

Le prisme biréfringent de Rochon peut remplacer, sans avantage d'ailleurs, le prisme déviateur simple. La lentille fendue de Dollond est susceptible d'application quand les faisceaux ont été ramenés dans le même sens.

265. **Télémètre stéréoscopique.** — Un autre procédé, qui ressortit à l'optique physiologique, a été employé pour assurer la superposition des images. L'instrument est alors identique, en principe, au téléstéréoscope.

Voici comment on peut concevoir la transformation

de ce dernier instrument en télémètre, telle que l'a réalisée la maison Zeiss.

Imaginons l'appareil d'Helmholtz : dans le paysage, un sentier tracé en lacets sur un plan incliné, et, sur son parcours, des bornes, hectométriques, par exemple, dont la chiffraison indique leur distance à l'instrument. Supposons deux plaques sensibles dans les plans focaux des objectifs, et admettons que, ces plaques restant à demeure, le sentier puisse être photographié, les images développées et fixées, et que dans les clichés définitifs il ne reste plus que les bornes et la chiffraison. Si maintenant on dirige l'appareil de manière à faire apparaître dans le champ un objet situé à q hectomètres, on percevra une différence de parallaxe quand on passera de la coïncidence des images du but à la coïncidence de deux bornes dont le numéro commun est trop différent de q . On amènera, par tâtonnements méthodiques, la double image superposée du but à proximité d'une borne q' , dont les images photographiques paraîtront en coïncidence, en même temps que celles du but, sans qu'on perçoive une variation de convergence visuelle. La loi d'Helmholtz étant admise, la formule établie antérieurement donne :

$$\text{mod}(q' - q) \leq \frac{q'^2}{200 Gm - q'}$$

La distance du but est donc q' , avec une erreur possible exprimée par le second membre de cette inégalité.

Dans le télémètre stéréoscopique Zeiss, les bornes en question sont figurées par des virgules sur les plaques micrométriques établies d'après les données géométriques ; un des spécimens comporte pour G et m des

valeurs égales entre elles et voisines de 23; le coefficient constant du dénominateur vaut 100 kilomètres; c'est l'infini de l'appareil. Il devrait donner à 40 mètres près la distance de 2000 mètres; à 100 mètres, celle de 3000 mètres.

L'organisation pratique de ce télémètre est du même ordre que celle des monostatiques¹: équerres optiques, etc.; les causes d'erreur sont analogues; sinon identiques. On peut y ajouter celles qui tiennent au déplacement possible, si faible soit-il, des micromètres.

Chaque micromètre peut ne comporter que l'image d'un seul petit objet, un ballon, par exemple. Suivant l'intervalle linéaire qui séparera ces deux images, leur coïncidence s'établira simultanément avec celle des images d'un objet du champ; tant que cet écartement ne répondra pas à la distance du but, on sentira le ballon flotter dans l'espace quand on passera de son observation à celle de l'objet. Une vis micrométrique mesurera l'intervalle convenable à la stabilité de la perception; la valeur de la distance cherchée s'ensuivra. Le procédé a été indiqué, croyons-nous, par le constructeur anglais M. Forbes; nous ignorons si l'instrument a été réalisé.

266. **Appréciation des télémètres monostatiques.** — La conservation du réglage, c'est-à-dire le maintien du degré très élevé de précision qu'on peut atteindre dans un télémètre monostatique, a été jusqu'ici la pierre d'achoppement dans leur utilisation. L'emploi d'équerres à prismes, le transport des objectifs vers le centre de la base, où ils peuvent être réunis

¹ Société Carl Zeiss. Brevet fr. 375682.

en un seul, ont apporté des améliorations indiscutables au type primitif. Mais ces perfectionnements n'ont pas toujours assuré la constance des indications.

Lorsqu'on dispose de temps et d'espace, on peut vérifier, d'une façon suffisante, le réglage d'un télémètre en s'assurant que sa graduation marque l'infini quand on vise un astre; si cette condition n'est pas réalisée, il suffira généralement de déplacer en conséquence l'origine de la graduation pour que les visées sur d'autres buts conduisent à des mesures exactes. A cet effet, — comme aussi pour la visée sur points lumineux, tels que phares, feux de navires, etc., — MM. Barr et Stroud interposent, en temps utile, une lentille cylindrique dite *anastigmatiseur* entre l'oculaire et les images objectives; l'image se transforme en une ligne droite parallèle à l'axe du cylindre; elle peut donc déborder la ligne de séparation des champs.

La visée sur un astre est, en plein jour, un cas exceptionnel. Si le télémètre est disposé à poste fixe, — comme il le serait dans une batterie de côte, — on aura généralement des points de repère suffisamment éloignés et dont la distance sera parfaitement connue, qui permettront la vérification de l'instrument. Pour un appareil mobile, si d'ailleurs le temps ne fait pas défaut, on pourra utiliser le procédé¹ du colonel Souchier, qui consiste à vérifier l'infini à l'aide d'une mire, égale à la base, placée à 25 mètres environ de celle-ci et parallèlement à elle: les deux lignes de foi qui limitent la longueur utile de la mire doivent se superposer; les points de la mire à faire coïncider

¹ Employé déjà dans le télémètre Roskiewicz (59).

doivent être déterminés avec une précision linéaire au moins égale à $0^{\text{mm}},125\pi$, si la précision angulaire du télémètre est de π secondes.

Ces genres de réglage ne permettent pas toujours de conserver aux monostatiques la dénomination de télémètres instantanés, qu'on leur accorde généralement. On a essayé d'adjoindre à l'appareil les organes qui permettraient un réglage rapide sans observation d'objet extérieur. On a eu recours au procédé de la collimation employé dans l'étude de la flexion des lunettes astronomiques ; les télémètres précités de Berdan et de Roskiewicz comportent des lunettes collimatrices spéciales. Le Cyre, qui a construit de nombreux spécimens de monostatiques, a fait intervenir (59) la collimation sous toutes ses formes, et, en outre, le principe du retournement, mis constamment en œuvre dans le réglage des appareils topographiques. Mais, en général, la difficulté n'est que reculée : la conservation du réglage doit alors être réalisée dans les organes accessoires ; l'examen des dispositions de détail met cette conclusion en évidence.

Le problème ne paraît cependant pas insoluble. En adoptant rigoureusement la méthode de collimation astronomique, le réglage serait possible ; mais les dimensions de l'instrument, dans le sens de la base, devraient être au moins doublées. Le mode d'emploi du télémètre peut faire rejeter *a priori* cette condition.

267. **Emploi des télémètres monostatiques.**

— L'utilisation des télémètres ressort des propriétés qui ont été indiquées pour chaque système. Plus la base sera étendue, moins les mesures angulaires pourront être précises ; mais alors il y a lieu de tenir

compte de la possibilité de commettre des erreurs, des fautes même, sur le point de visée. La méthode exige des buts fixes, bien définis, du temps et du calme de la part de l'opérateur.

Les télémètres à grande base, résolvant un triangle rectangle, demandent en outre un espace convenable; il faut que la base puisse s'étendre sur un terrain sensiblement horizontal, et dans une direction bien déterminée.

Les appareils qui nécessitent l'observation d'une base à hauteur du but sont très précis quand cette base est une mire topographique. Quand on ne possède sur elle que des renseignements incertains, le télémètre ne peut avoir d'autre objet que d'éviter les erreurs grossières que l'on peut commettre sur l'appréciation des distances dépassant quelques centaines de mètres.

Les télémètres monostatiques sont des instruments remarquables quand leur réglage se conserve. Mais quand celui-ci n'est pas assuré, des erreurs invraisemblables peuvent être commises; car il faut peu de chose pour produire dans l'un des faisceaux une déviation de quelques secondes.

Pour les télémètres stéréoscopiques, il faut observer que leur théorie repose sur la loi d'Helmholtz, qui n'a pas été suffisamment vérifiée. Mais, fût-elle exacte, au moins pour des observateurs choisis, il est indéniable que l'état physiologique de l'individu peut faire varier rapidement, et sans que celui-ci s'en doute, sa faculté de perception de la profondeur. Cette propriété que possède la vision binoculaire de sentir la variation de convergence des lignes visuelles est soumise à des

modifications plus importantes et moins visibles que la propriété, pour un œil unique, de percevoir, par la coïncidence des images, l'identité de deux directions. Ingénieux dans son principe, le télémètre stéréoscopique le cédera toujours au monostatique ordinaire.

Mesure de petits intervalles.

268. — Le microscope se prête naturellement à la mesure d'intervalles séparant deux points ou deux traits situés sur un plan ou sur une arête de surface réglée. A cet effet, à l'oculaire négatif habituel est substitué un oculaire du même type, mais à verres mobiles, et portant entre ces derniers une plaque micrométrique.

Quand il n'y a pas intérêt à utiliser un champ étendu, et que le microscope est destiné uniquement à des mesures, il y a avantage à le munir d'un oculaire de Ramsden, et à laisser le micromètre fixe. Celui-ci sera soit une glace graduée, soit mieux un micromètre à fil mobile.

La précision de ces mesures au microscope peut être considérable.

Si l'objectif ne peut être suffisamment approché de l'objet, on pourra opérer sur son image, produite à peu près en vraie grandeur par une lentille convergente de faible focale.

Un autre procédé, utilisé dans l'ophtalmoscope d'Helmholtz, consiste à employer une lunette à réticule de laboratoire, qui est identique à un microscope à très long foyer, dont l'objectif porte en avant de lui

une glace parallèle épaisse. En amenant successivement les deux extrémités de l'intervalle en coïncidence avec le réticule, par simple jeu de la lame, la variation angulaire de celle-ci détermine la valeur de l'intervalle en question.

Tout appareil de mesure d'angles peut être transformé, plus ou moins efficacement, pour la mesure de petits intervalles. Nous signalerons en particulier l'emploi du prisme de Wollaston, utilisé par le capitaine Lafay dans la mesure des écrasements des crushers¹.

¹ *Congrès internat. des méthodes d'essai des matériaux de construction*. Paris, 1900.

CHAPITRE XV

INSTRUMENTS BASÉS SUR LE PRINCIPE DE L'AUTO-COLLIMATION

269. **Principe de l'auto-collimation.** — Le principe de l'auto-collimation peut être énoncé sous la forme générale suivante : si (fig. 140) un faisceau lumineux, issu d'un point P, tombe, après passage à travers un système optique S quelconque, sur une surface réfléchissante M, de façon que tous ses rayons soient alors

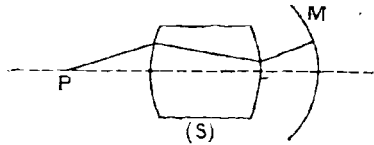


Fig. 140.

normaux à cette surface, le faisceau reviendra en arrière en suivant un parcours exactement contraire, et formera une image réelle qui coïncidera avec P.

La surface M peut d'ailleurs être l'une des faces d'un élément réfringent, car il existe toujours un faisceau réfléchi ; il suffira, pour l'utiliser, d'augmenter convenablement l'intensité de la lumière incidente.

Le procédé de l'auto-collimation a été utilisé par Foucault, — avec les variantes nécessaires, — pour

contrôler, par la pureté de l'image formée, la forme de la surface M, lorsque celle-ci doit être normale à un faisceau donné. Ad. Martin (66) s'en est servi pour examiner les défauts et mesurer les indices des verres optiquement taillés.

Dans un certain nombre d'applications, la surface M qui produit l'auto-collimation est un miroir plan; le système optique S transforme en faisceau parallèle le faisceau divergent issu de P. Dans ces conditions, la coïncidence de P avec son image assure à la fois la position du point P à l'un des foyers du système S et l'orientation du miroir M perpendiculairement à l'axe optique du même système.

Quand le miroir M se déverse d'un très petit angle sur l'axe optique, l'image produite, tout en restant suffisamment nette dans le plan focal de S, cesse de coïncider avec P. De la mesure de l'écartement linéaire ainsi produit, on peut déduire la variation angulaire du miroir; car si le miroir tourne d'un angle θ , l'angle entre le faisceau incident direct et le faisceau rétrograde est 2θ ; l'écartement linéaire η a pour valeur $\eta = 2f\theta$, f étant la focale du système interposé.

L'intervalle η est indépendant de la distance du miroir au système optique S.

270. **Oculaires pour auto-collimation.** — Les physiiciens utilisent le principe si délicat de l'auto-collimation sur miroir plan pour disposer les faisceaux parallèles dans des directions bien déterminées; par exemple, dans la mesure des angles des prismes avec le goniomètre de Babinet, pour placer l'axe optique de la lunette (qui a la direction du faisceau reçu) perpendiculairement à l'axe de rotation de l'appareil et

aux faces des prismes ; de même avec les spectroscopes et spectromètres, etc. Dans ce cas, l'objet P est constitué par le réticule à fils d'araignée, muni de l'oculaire éclairé Cornu. Quand la glace (ou face du prisme) est sensiblement perpendiculaire à l'axe optique, on perçoit dans le champ de la lunette un second réticule, image à intensité faible du réticule réel. En effectuant la superposition des images fournies par l'oculaire, l'axe optique et celui du miroir sont amenés au parallélisme.

L'emploi, comme objets lumineux, de réticules à fils n'est pratique que lorsque le plan d'auto-collimation n'est pas trop éloigné de l'objectif (2 à 3 mètres, au maximum), sinon l'image est à peine visible ; en outre, en raison de la présence de la glace éclairante, l'emploi d'oculaires à court foyer est impossible. Dans ses ingénieux appareils pour le contrôle des surfaces optiques, M. Laurent (62) utilise, comme objet lumineux (fig. 141), une très petite ouverture circulaire o (de 0^{mm} , 3 de diamètre), fortement éclairée par l'intermédiaire d'un très petit prisme p à réflexion totale.

L'image ne peut plus être placée en coïncidence avec l'objet, puisque celui-ci est caché à l'œil ; elle est amenée tangentielle-

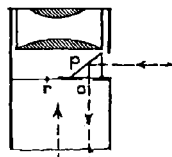


Fig. 141.

ment aux deux fils d'un réticule r . L'axe optique fait alors un angle fixe, non nul, avec la normale au miroir auto-collimateur. Cette circonstance ne présente aucun inconvénient, car il s'agit de mesures différentielles.

271. Vérification des droites et des surfaces planes étendues. — Si, devant une lunette auto-

collimatrice fixe, se déplace le support auquel est invariablement relié le miroir de collimation, l'angle accusé par le déplacement de l'image sera un des éléments qui déterminera la position, par rapport à l'axe optique, de la droite qui joint les deux stations du miroir; l'autre élément sera la distance de ces deux stations. Le plus ou moins d'éloignement du miroir à la lunette n'interviendra pas dans les mesures.

Sur ces propriétés, et grâce à la sensibilité de la méthode, le commandant Duvé (16) a établi une série d'appareils destinés au contrôle de la rectitude et de la planéité des organes de machines, à la vérification des barres et des trous cylindriques allongés, à la mesure des faibles courbures (ou arcure) de ces cylindres.

L'un d'eux est utilisé pour la vérification du dressage des canons de fusil, pour lequel l'ouvrier emploie déjà un procédé optique simple, mais demandant une longue pratique; les défauts de rectitude de l'axe lui sont, en effet, révélés par les déformations ou l'aspect de l'image anamorphique que la surface cylindrique intérieure du canon donne d'une droite lumineuse.

L'appareil Duvé (fig. 142) comporte une lunette L à

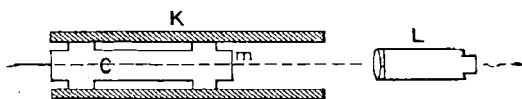


Fig. 142.

réticule à fils, fixe; à l'intérieur du canon K, également fixe, se déplace un calibre C, cylindre en acier, dont la base m, tournée du côté de l'objectif, est polie spéc-

lairement; deux portées du calibre sont appuyées contre la paroi par des segments sciés formant ressorts. Si l'axe du canon est horizontal, ainsi qu'un des fils du réticule, et si on fait déplacer le calibre sans lui imprimer de rotation, les déplacements du fil horizontal du réticule mesureront les inclinaisons successives de la génératrice, plus ou moins déformée, parcourue; ceux du fil vertical évalueront ses déviations par rapport à un plan vertical.

Le même principe, à l'aide d'autres organes, est appliqué aux autres appareils. La lunette est agencée de façon à avoir un champ plus étendu que ne le comportent les instruments déjà énumérés. Dans ce but, en avant de l'oculaire est placé (fig. 143)

un *prisme P à lame d'air* (lame de $0^{\text{mm}},1$ d'épaisseur, dont les faces font entre elles un très petit angle) qui laisse voir à travers lui, par l'oculaire. La lame donne, d'une ouverture circulaire ω (trou entouré d'un anneau), deux images superposées dans le plan focal de l'objectif, et dont le diamètre commun est de 1 millimètre. Cette

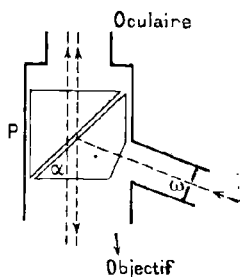


Fig. 143.

doublé image joue le même rôle que la petite ouverture de l'oculaire de Laurent; l'œil ne la perçoit pas; il ne reçoit que l'image renvoyée par le miroir. Quant au prisme, il est calculé de façon que l'intensité de cette dernière image soit maximum; cette condition conduit à donner à l'angle α la valeur de 35° , qui est, sauf une légère correction, celle déterminée par la for-

mule de Fresnel. La lunette est dite *auto-collimatrice à longue portée*.

La disposition de l'organe de collimation varie avec le rôle de l'appareil. S'il s'agit de vérifier une ligne droite ou un plan (marbre d'atelier, par exemple; sa vérification revient à celle d'un certain nombre de droites méthodiquement tracées sur lui), on utilise un miroir porté sur un chariot à pieds étroits; l'écartement de ces derniers peut être fixe ou variable. Le chariot est successivement conduit le long de la ligne à vérifier, de façon que les pieds postérieurs prennent exactement la place des pieds antérieurs, ou vice versa; à chaque station, l'image perçue dans la lunette est centrée sur le réticule. Les organes qui produisent le déplacement nécessaire évaluent l'angle des deux positions du miroir, et par suite la pente du côté du cheminement.

La précision des mesures peut être doublée en remplaçant le miroir par un prisme P à réflexion totale, et en adjoignant à la lunette L une glace G dont une faible région *a* est argentée. La figure 144 montre cette disposition et indique la marche des rayons.

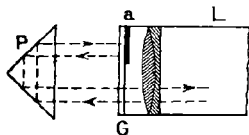


Fig. 144.

Pour la vérification des barres prismatiques ou cylindriques, le chariot ordinaire à miroir est disposé sur un support, dit *équerre à trois branches*, qui s'interpose entre lui et la barre, et qui comporte des surfaces d'appui rigoureusement réglées. En outre, dans le chariot, le miroir de collimation est rendu exactement normal aux lignes d'appui, par comparaison avec un

chariot de réglage qui porte, au lieu de miroir, une glace à faces parallèles ; celle-ci est réglée normalement aux appuis par la méthode de retournement.

Les mêmes dispositions sont prises, à la forme près des appareils, pour la vérification des trous cylindriques.

Quand il s'agit de mesurer les variations de diamètre de l'âme cylindrique d'une bouche à feu, l'appareil entier porte le nom d'*étoile mobile optique*. Le chariot est alors cylindrique ; ses pieds ne servent qu'à le faire porter sur la surface intérieure du canon. A l'avant, deux glaces coupées en forme de secteur à 120° sont montées sur les petits bras de leviers dont les grands bras reposent respectivement sur chacun de deux pistons ou touches diamétralement opposés. L'angle des miroirs, traduit dans la lunette par l'écartement des images qu'ils donnent, est proportionnel à la somme des saillies des touches, comptées à partir du diamètre de réglage, qui produit des images superposées, les miroirs étant alors parallèles. On peut obtenir ainsi les variations successives des diamètres, suivant un parcours déterminé, génératrice ou rayure. L'espace laissé libre par les deux miroirs est rempli par un troisième, dont l'image correspondante sert à évaluer l'arcure. La confusion des images est évitée par la coloration différente des trois miroirs, qui sont blanc (glace ordinaire), vert et rose.

En dehors des usages indiqués, les appareils se prêtent à la vérification du parallélisme et de la perpendicularité des droites et des plans, qu'elles que soient, dans la majorité des circonstances, les conditions qui définissent ces éléments.

Ces instruments sont évidemment d'un **maniement délicat**; mais on n'a jamais obtenu de mesures à un petit nombre de microns près qu'au prix de quelques efforts; à moins qu'on ne tienne pour de la précision l'obtention de nombres comportant beaucoup de décimales, sans s'occuper du rang à partir duquel elles sont inexactes.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

- | | |
|--------------------|--|
| 1. ABBE (E.). | 1. Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. <i>Archiv für Mikroskopische Anatomie</i> , herg. von Max. Schultze. Bonn, t. IX, 1873. |
| 2. — | 2. Ueber die Verwendung des Fluorits für optische Zwecke. <i>Zeit. f. Instk.</i> , t. X, 1890. |
| 3. ALEMBERT (d'). | Mémoire sur les moyens de perfectionner les lunettes. <i>Histoire et Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris</i> , 1764-1765-1767; et <i>Opuscles mathématiques</i> (principalement le t. III). |
| 4. ANDRÉ (Ch.). | Étude sur la diffraction dans les instruments d'optique (thèse). <i>Annales scientifiques de l'École normale supérieure</i> , 2 ^e série, t. V, 1876. |
| 5. BARBOTTE | et ROSSIN. Note sur un oculaire astronomique polyvalde. <i>C. R. Académie Sc.</i> , t. XXVI, 1848. |
| 6. BAILLAUD (B.). | <i>Cours d'Astronomie</i> , à l'usage des étudiants de la Faculté des Sciences, 1893, 1 ^{er} volume. Paris, Gauthier-Villars. |
| 7. BERTHELOT (D.). | Sur une méthode optique nouvelle pour la mesure des températures en valeur absolue. <i>Ann. de Ch. et Phys.</i> , 7 ^e série, t. XXVI, 1902. |
| 8. BIOT (J.-B.). | 1. <i>Traité élémentaire d'Astronomie physique</i> , 3 ^e édition, 1841-45 (1 ^{er} et 2 ^e volumes). |
| 9. — | 2. Mémoire sur les lunettes achromatiques à oculaires multiples. <i>Mém. de l'Ac. royale des Sc.</i> (nouvelle collection), t. XIX, 1845. |

10. BRUNS (H.). Das Eikonale. *Abh. der math.-phys. classe der kön. sächs. Gesellschaft der Wissenschaften*. Band XXI. Leipzig, 1895.
11. CHARPY (G.). Appareils pour l'examen microscopique des corps opaques. *Revue gén. des Sciences*, t. VII, 1896.
12. CLAIRAUT. Mémoire sur les moyens de perfectionner les lunettes d'approche par l'usage d'objectifs composés de plusieurs matières diversement réfringentes. *Hist. et Mém. de l'Ac. des Sc. de Paris*, 1756-1757.
13. CZAPSKI (S.). *Theorie der optischen Instrumente nach Abbe*. Breslau, 1894.
14. DAGUIN (P.). *Traité élémentaire de Physique théorique et expérimentale*. 4^e édit., 1878, 4^e volume. Paris, Delagrave.
15. DAUBRESSE (A.). Étude théorique sur les jumelles, et sur une combinaison permettant d'en augmenter le champ et la puissance. *Revue d'artillerie*, oct. 1895.
16. DÉVÉ (Ch.). 1. Vérificateurs optiques des lignes et surfaces des machines et procédés de rectification. *Bull. de la Soc. d'Encouragement*, juillet 1899.
17. — 2. Sur un phacomètre à oscillations. *C. R. de l'Ac. des Sc.*, juin 1899.
18. DONGIER (R.). Appareil de mesure des courbures et des éléments d'un système optique quelconque. *Journ. de Physique*, 3^e série, t. X, 1901.
19. DRAPER (H.). Construction d'un télescope à miroir argenté de 15 pouces et demi d'ouverture (1864); traduit dans les *Mémoires de la Soc. d'Enc.* (Supplément au Bulletin d'octobre 1905.)
20. DRUDE (P.). *Lerbuch der Optik*. 1900, Leipzig. Traduit en anglais sous le titre : *Theory of optics*.
21. DUTIROU. Mémoire sur la détermination des indices de réfraction des sept raies de Fraunhofer dans une série nombreuse de verres... *Ann. de Ch. et de Phys.*, 3^e série, t. XXVIII, 1850.

22. ESTIENNE (J.-E.). Note sur les Télémètres. *Revue d'Artillerie*, novembre 1904.
23. EULER (L.). 1. Précis de Dioptrique. *Hist. et Mém. de l'Ac. des Sc. de Paris*, 1765.
24. — 2. *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de Physique et de Philosophie*. Saint-Petersbourg, 1768-1772. (Réimprimées plusieurs fois depuis.)
25. FABRE (Ch.). *Traité encyclopédique de Photographie*. 8 vol., 1889-1907. Paris, Gauthier-Villars.
26. FABRY (Ch.) et PÉROU (A.). 1. Méthodes interférentielles pour la mesure des grandes épaisseurs et la comparaison des longueurs d'onde. *Ann. de Ch. et de Phys.*, 7^e série, t. XVI, 1899.
27. — 2. Sur un nouveau modèle d'interféromètre. *Ann. de Ch. et de Phys.*, 7^e série, t. XXII, 1901.
28. — 3. Mesure en longueurs d'onde de quelques étalons de longueurs à bouts. *Ann. de Ch. et de Phys.*, 7^e série, t. XXIV, 1901.
29. FÉRY (Ch.). Méthode nouvelle pour la détermination des constantes des lentilles. *Bull. des séances de la Soc. fr. de Phys.*, 1903.
30. FOREST (F.) et NOALHAT (H.). *Les Bateaux sous-marins*. 2 vol. Dunod, 1900.
31. GABRIEL (C.-M.). *Études d'optique géométrique*. Nony, 1889.
32. GAUSS (C.-F.). Dioptrische Untersuchungen, traduites par BRAVAIS dans *Ann. de Ch. et de Phys.*, 3^e série, t. XXXIII, 1851.
33. GAUTIER. Sur des appareils et des procédés propres à régler le tir des bouches à feu dans les batteries de côte. *Rev. d'Art.*, t. VIII, 1876.
34. GEHLER. *Physikalisches Wörterbuch.*, 4 vol. Leipzig, 1789. (A été réimprimé et mis à jour.)
35. GIRAUD-TEULON. Sur une nouvelle méthode et sur un nouvel instrument de télémétrie. *C. R. Ac. Sc.*, t. LXXX, 1875.

36. GLRICHEN (A.). 1. *Lerbuch der geometrischen Optik*. Teubner. Leipzig, 1902.
37. — 2. *Leitfaden der praktischen Optik*. Hirzel. Berlin, 1907.
38. GOEDSEELS (P.-J.-E.). Étude sur les prismes à réflexions intérieures. *Annales de la Soc. scient. de Bruxelles*, t. XXIV, 1900.
39. GOULIER (C.-M.). 1. Études théoriques et pratiques sur les levers topométriques. *Mémorial de l'officier du Génie*, t. XXVIII, 1892. (Publié séparément.)
40. — 2. Du choix des jumelles et des soins à leur donner. *Annuaire du Club alpin*, 1879.
41. — 3. Lunette anallatique. *C. R. Ac. Sc.*, t. LXXX, 1875.
42. GOVI. 1. Intorno a una nuova Camera-lucida. *Rendiconti delle sedute della R. Acad. dei Lincei*, 4^e série, t. V, 1889.
43. — 2. Della Invenzione del micrometro per gli strumenti astronomici. *Bulletino di Boncompagni*, t. XX, 1887.
44. — 3. Sur l'inventeur des lunettes binoculaires. *C. R. Ac. Sc.*, t. XCI, 1880.
45. GRUBB (Sir HOWARD). 1. A new collimating-telescope gun-sight for large and small ordnance. *The Scient. Trans. of the Roy. Dublin. Soc.*, 2^e série, t. II, 1901-1902.
46. — 2. Some new forms of geodetical instruments (même référence que ci-dessus).
47. HARTING (H.). 1. Zur Berechnung astronomischer Fernrohrobjektive. *Zeitsch. für Instrumentkunde*, t. XIX, 1899.
48. — 2. Ueber Astigmatismus und Bildfeldwölbung bei astronomischen Fernrohrobjektiven (même référence que ci-dessus).
49. — 3. Zur Berechnung dreitheiliger Fernrohr- und Mikroskopobjektive. *Zeit. f. Instk.*, t. XX, 1900.
50. — 4. Zur Theorie der zweitheiligen verkitteten Fernrohrobjektive. *Zeit. f. Instk.*, t. XVIII, 1898.

51. HAUDIÉ (E.). 1. Étude photométrique des images formées par les systèmes optiques. *Bull. des séances de la Soc. fr. de Phys.*, 1905.
52. — 2. Détermination, au moyen d'un appareil photographique, du grossissement et du champ des lunettes galiléiques ou astronomiques (même référence que ci-dessus).
53. HELMHOLTZ (R.). 1. *Optique physiologique*. Traduction de JAVAL et KLEIN. Paris. Masson, 1865.
54. — 2. Die theoretische Grenze für die Leistungsfähigkeit der Mikroskope. *Annalen der Physik und Chemie*, 1874-Jubiläum.
55. HENRIVAUX (J.). *La Verrerie au XX^e siècle*, 1903.
56. HERSCHEL (J.-F.-W.). *On Light*, traduit sous le titre : *Traité de la Lumière*, par VERRULST et QUÉTELET. 2 vol. 1829.
57. HEURCK (Van). *Le Microscope*, 1891.
58. HOEGH (Von E.). Zur Theorie der zweitheiligen verkitteten Fernrohrobjektive. *Zeit. f. Instk.*, t. XIX, 1899.
59. JACOB DE MARRE. Instruments pour la mesure des distances. Extrait du *Mémorial de l'Artillerie de la Marine*, t. VI et VII, 1878-1879. (Publié séparément.)
60. LAGRANGE. 1. Sur la théorie des lunettes. *Nouv. Mém. de l'Acad. roy. des Sc. et Belles-Lettres de Berlin*, 1778, et *Œuvres complètes*, t. IV.
61. — 2. Mémoire sur une loi générale d'Optique. *Nouv. Mém. de l'Acad. de Berlin*, 1803, et *Œuvres*, t. V.
62. LAURENT (L.). Mémoire sur les méthodes et dispositifs pour le contrôle et l'exécution des surfaces optiques planes ou courbes à l'usage des instruments de précision. *Bull. de la Soc. d'Encourag.*, 1891.
63. LE CHATELIER (H.). La technique de la métallographie microscopique. *Bull. de la Soc. d'Encourag.*, 1902.
64. LIBES (A.). *Histoire philosophique des progrès de la Physique*. 4 vol. 1810-1813.

65. KELLNER (K.). *Das orthoskopische Okular.* 1849.
66. MARTIN (Ad.). 1. Sur une méthode d'autocollimation des objectifs et son application à la mesure des indices de réfraction des verres. *C. R. Ac. Sc.*, t. XCI, 1880.
67. — 2. Mémoire sur les méthodes employées pour la détermination des courbures des objectifs. *Ann. sc. de l'Ecole norm. sup.* Supplément au t. VI, 2^e série, 1877.
68. — 3. Détermination des courbures d'un objectif grand angulaire pour vues. *Bull. de la Soc. fr. de Photographie*, 1892.
69. — 4. Méthode directe pour la détermination des courbures des objectifs de photographie. *Bull. de la Soc. fr. de Phot.*, 1893.
70. MARTIN (Th.). Sur des instruments d'optique faussement attribués aux anciens par quelques savants modernes. *Bulletino di Boncompagni*, t. IV, 1871.
71. MÖBIUS. Principales propriétés d'un système de lentilles. *Nouv. Ann. de Mathémat.*, t. IV, 1845 (d'après le *Journ. de Crelle*, t. V, 1830).
72. PRAZMOWSKI. Sur l'achromatisme chimique. *C. R. de l'Ac. des Sc.*, t. LXXIX, 1874.
73. PORRO (J.). Note sur le micromètre parallèle indépendant. *C. R. Ac. Sc.*, t. XLI, 1855.
74. PRECHTL. *Praktische Dioptrik.* Wien., 1828.
75. RAYLEIGH (lord). 1. Notes, chiefly historical, on some fundamental propositions in Optics. *Philosophical magazine*, 5^e série, t. XXI, 1886.
76. — 2. On the theory of Optical images, with special reference to the microscope. *Philos. Magaz.*, 5^e série, t. XLII, 1896.
77. — 3. Investigations in Optics, with special reference to the Spectroscope. *Phil. Magaz.*, t. VIII, 1879.

78. RITCHEY (G.-W.). Sur le télescope moderne à réflexion. Fabrication et essais des miroirs optiques. Traduit dans les *Mémoires de la Soc. d'Encourag.* (Supplément au *Bulletin* d'octobre 1905.)
79. ROHR (VON). 1. *Theorie und Geschichte des photographischen objektivs.* Berlin, 1889.
80. — 2. *Die Bilderzeugung in optischen Instrumenten, vom Standpunkte der geometrischen Optik*, bearbeitet von den wissenschaftlichen Mitarbeitern an der optischen Werkstätte von Carl Zeiss P. CULMANN, S. CZAPSKI, A. KÖNIG, F. LÖWE, M. VON ROHR, H. SIEDENTOPF, E. WANDERSLEB. Berlin, J. Springer. 1904.
81. SMITH (R.). *Cours complet d'Optique*, traduit de l'anglais de Robert Smith, avec des additions considérables, par le P. P. [PÉZ-
NAS]. Avignon et Paris, 1767. 2 vol.
82. STEINHEIL UND VOIGT. *Handbuch der angewandten Optik.* Leipzig, Teubner. 1891.
83. STONEY. On microscopic vision. *Phil. Magaz.*, 5^e série, t. XLII. 1896.
84. VERDET. — *Œuvres.*
85. WALLON. 1. *Leçons d'Optique géométrique.* 1900. Paris, Gauthier-Villars.
86. — 2. *Traité élémentaire de l'objectif photographique.* 1891. Paris, Gauthier-Villars.
87. WANDERSLEB (E.). Ueber die Verzeichnungsfehler photographischer Objektive. *Zeit. f. Instk.*, t. XXVII. 1907.
88. WINKELMANN. Zur Demonstration der Abbeschen Theorie des Mikroskopes. *Annalen der Physik.*, t. XIX. 1906.

PRINCIPALES PUBLICATIONS PÉRIODIQUES

Comptes rendus de l'Académie des Sciences.

Journal de Physique.

Bulletin de la Société française de Physique.

Bulletin de la Société française de Photographie.

Annales de Chimie et de Physique.

The Astrophysical Journal.

The London, Edinburgh and Dublin *Philosophical Magazine and Journal of Science.*

Zeitschrift für Instrumentenkunde, avec son supplément actuel *Deutsche-Mechaniker Zeitung*. (Cette publication, qui a commencé en 1880, est unique en son genre; il est regrettable qu'une revue analogue n'existe pas en France.)

On trouvera une bibliographie assez étendue dans l'ouvrage porté ci-dessus sous le n^o 80, et de nombreuses indications dans les ouvrages n^{os} 4, 25, 36, 53, 59, 67, 79.

Dans le cours de cet ouvrage, les références bibliographiques sont indiquées en **caractères gras**, par les nombres, *entre parenthèses*, qui se rapportent à l'index ci-dessus.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS ET DES MATIÈRES

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ABBE, 55, 82, 231, 234, 239, 242. | DALLEMEYER, 260, 264. |
| Aberration chromatique, 75. | DAUBRESSE, 181, 191, 200, 275, 310. |
| Aberration sphérique, 60. | DESCARTES, 1. |
| Accommodation, 35. | DÉYÉ, 362. |
| Achromatisme, 13. | Diaphragme, 6, 110. |
| Acuité visuelle, 36, 56. | Diaphragme apparent, 51. |
| ALEMBERT (d'), 14, 170. | Diasporamètre, 311. |
| AMICI, 190, 228, 242, 326, 335. | Diffraction, 50. |
| Anastigmat, 258. | Diffusion, 61. |
| Annulatisme, 331. | Dispersion rectiligne des foyers, 78. |
| Anneau oculaire, 91. | Distorsion, 23, 126. |
| Aplanat, 264. | DOLLOND, 14, 179, 318. |
| Aplanétisme, 60, 264. | Doublet, 224, 262. |
| Apochromatisme, 82, 231. | DUPIN, 62. |
| Astigmatisme, 65. | Duplication, 333. |
| Auto-collimation, 359. | |
| Axe optique, 279. | |
| | Éclaircissement, 87. |
| BARR et STROUD, 347, 350, 354. | Éclat, 88, 98. |
| BAUERNEFEIND, 327. | Équerre optique, 325, 345. |
| BERDAN, 339. | ESTIENNE, 289, 303. |
| Binoculaire (vision), 42, 137, 241. | EULER, 13, 25, 77. |
| BIOT, 14, 77, 171, 317. | |
| | Fidélité des images, 22. |
| Champ, 20, 110. | Flux, 86. |
| Champ apparent, 111. | Focales de Sturm, 62. |
| CHEVALIER, 224, 254. | FOUCAULT, 54, 210. |
| CLAIRAUT, 14, 168. | FORBES, 190, 353. |
| Clarté, 19, 86. | FRAUNHOFER, 52, 55, 168. |
| Coefficient de profondeur, 151. | FRESNEL, 102. |
| Coefficient de relief, 153. | |
| Collimateur, 285. | |
| Coma, 67. | GALILÉE, 11, 300. |
| CORNU, 236, 282. | GAUSS, 170. |
| Correction (objectif à), 238. | GAUTIER, 326, 347, 351. |
| Courbure du champ, 118. | GÉRARD, 334. |

376 TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS ET DES MATIÈRES

- GIRAUD-TEULON**, 336.
GOERZ, 200, 206, 217, 259, 285.
Goniomètre, 303, 311.
GOULIER, 69, 174, 282, 325, 347, 350.
GOVI, 278, 293.
Grossissement, 23, 56.
GRUBB, 292.
GUINAND, 15, 81.
- HADLEY**, 307.
HARTING, 171.
Héliomètre, 317.
HELMHOLTZ, 42, 43, 55.
HERSCHEL, 40, 52, 208.
HÉVÉLIUS, 198.
HORGH, 171.
HOOKE, 36.
HUET, 187, 216.
HUYGENS, 166, 172.
- Image solide**, 38, 60, 75.
Immersion, 229, 239.
- Jumelle**, 137, 214.
- KELLNER**, 174.
KEPLER, 11, 176, 201.
- LE CHATELIER**, 235.
LE CYRE, 355.
Loupe, 10, 135, 221.
LUGKOL, 335.
Lunette astronomique, 11, 93, 165.
Lunette à prismes, 183.
Lunette-cornet, 183.
Lunette de Galilée, 11, 72, 115, 190.
Lunette Napoléon III, 185.
Lunette panoramique, 205.
Lunette polyalbe, 195.
Lunette terrestre, 11, 176.
- MALUS**, 62.
MANGIN, 205.
Micromètre, 159, 296.
Microscope, 11, 95, 153, 225.
Millième, 303.
MITTENWEG, 174.
- NACHET**, 234, 242, 276.
Netteté, 17, 48.
NEWTON, 13, 208, 307.
- Objectif de lunette**, 53, 168, 175.
Objectif de microscope, 54, 226.
Objectif photographique, 14, 117, 244.
Oculaire, 171, 180, 232.
Œil, 29.
Œil schématique, 31.
Orthoscopie, 23, 126, 249.
Ouverture numérique, 56, 226.
- Périscope**, 198, 205.
PETZVAL, 255.
Photographique (plaque), 45.
Pinceau, 7, 63.
Polémoscope, 198.
PORRO, 182, 268, 314, 331.
Pouvoir séparateur, 18, 53.
Prisme de Rochon, 314.
Prisme de Wollaston, 189, 315.
Prisme en toit, 190.
Prisme newtonien, 208.
Profondeur de champ, 120.
Profondeur de foyer, 120.
Profondeur (perception de la), 43, 149.
- Radiant**, 52.
RAMSDEN, 91, 172.
Rectiligne, rectilinéaire, 249, 264.
Réticule, 278, 280.
RHEITA, 11, 178.
ROCHON, 312, 314.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS ET DES MATIÈRES 377

SCHNEIDER, 11.	Télémetre, 320.
SCHOTT, 15, 81.	Téléobjectif, 197, 269.
Sextant, 305.	Télescope, 207.
SOUCHIER, 328, 335, 354.	Téléstéréoscope, 151.
Spectre secondaire, 81.	
Stadimètre, 329.	Véhicule, 11, 178.
STANHOPE, 223.	Viseur, 277.
STEINHEIL, 197, 223, 264, 341.	
Stéréoscopie, 43, 215, 351.	WOLLASTON, 189, 223, 224, 315.
STURM, 62.	
	ZEISS, 82, 171, 175, 223, 260, 285,
Tache centrale, 52, 106.	316.

TABLE SYSTÉMATIQUE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

Généralités	1
Historique sommaire	8
Divisions de l'ouvrage	15

PREMIÈRE PARTIE

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES INSTRUMENTS

CHAP. I. — <i>Des qualités optiques des instruments.</i>	17
CHAP. II. — <i>Rôle de l'œil dans la vision instrumentale</i> . .	28
CHAP. III. — <i>De la netteté des images dans les instruments optiques</i>	48
Diffraction	50
Aberrations de sphéricité; aplanétisme	60
Aberrations de réfrangibilité; achromatisme.	75
CHAP. IV. — <i>De la clarté des instruments.</i>	86
CHAP. V. — <i>Du champ des instruments.</i>	110
CHAP. VI. — <i>De la fidélité des images; distorsion; orthoscopie.</i>	126
CHAP. VII. — <i>Des images dans les instruments binoculaires.</i>	137
CHAP. VIII. — <i>Instruments de mesure</i>	156

DEUXIÈME PARTIE

ORGANISATION ET EMPLOI DES INSTRUMENTS

CHAP. IX. — <i>Instruments d'observation à grande distance.</i>	165
Lunette astronomique.	165
Lunette terrestre	176
Télescopes catoptriques.	207
Jumelles	214
CHAP. X. — <i>Instruments d'observation à faible distance.</i>	221
Loupe	221
Microscope.	225
CHAP. XI. — <i>Objectif photographique.</i>	244
CHAP. XII. — <i>Instruments et organes de mesure. — Détermination des directions.</i>	277
Lunettes-visuels	277
Collimateurs	285
CHAP. XIII. — <i>Instruments de mesure des angles.</i>	296
CHAP. XIV. — <i>Instruments de mesure indirecte des longueurs. — Télémètres.</i>	320
Lunettes stadimétriques.	329
Télémètres à décalage d'images	333
Télémètres monostatiques.	336
Mesure de petits intervalles.	357
CHAP. XV. — <i>Instruments basés sur le principe de l'autocollimation.</i>	359
INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.	367
TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS ET DES MATIÈRES	375
TABLE SYSTÉMATIQUE DES MATIÈRES	379

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

Publiée sous la direction du D^r TOULOUSE

Nous avons entrepris la publication, sous la direction générale de son fondateur, le D^r Toulouse, Directeur à l'École des Hautes-Études, d'une ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE de langue française dont on mesurera l'importance à ce fait qu'elle est divisée en 40 sections ou Bibliothèques et qu'elle comprendra environ 1000 volumes. Elle se propose de rivaliser avec les plus grandes encyclopédies étrangères et même de les dépasser, tout à la fois par le caractère nettement scientifique et la clarté de ses exposés, par l'ordre logique de ses divisions et par son unité, enfin par ses vastes dimensions et sa forme pratique.

I

PLAN GÉNÉRAL DE L'ENCYCLOPÉDIE

Mode de publication. — L'*Encyclopédie* se composera de monographies scientifiques, classées méthodiquement et formant dans leur enchaînement un exposé de toute la science. Organisée sur un plan systématique, cette Encyclopédie, tout en évitant les inconvénients des Traités, — massifs, d'un prix global élevé, difficiles à consulter, — et les inconvénients des Dictionnaires, — où les articles scindés irrationnellement, simples chapitres alphabétiques, sont toujours nécessairement incomplets, — réunira les avantages des uns et des autres.

Du *Traité*, l'*Encyclopédie* gardera la supériorité que possède

un ensemble complet, bien divisé et fournissant sur chaque science tous les enseignements et tous les renseignements qu'on en réclame. Du Dictionnaire, l'*Encyclopédie* gardera les facilités de recherches par le moyen d'une table générale, l'*Index de l'Encyclopédie*, qui paraîtra dès la publication d'un certain nombre de volumes et sera réimprimé périodiquement. L'*Index* renverra le lecteur aux différents volumes et aux pages où se trouvent traités les divers points d'une question.

Les éditions successives de chaque volume permettront de suivre toujours de près les progrès de la science. Et c'est par là que s'affirme la supériorité de ce mode de publication sur tout autre. Alors que, sous sa masse compacte, un traité, un dictionnaire ne peut être réédité et renouvelé que dans sa totalité et qu'à d'assez longs intervalles, inconvénients graves qu'atténuent mal des suppléments et des appendices, l'*Encyclopédie scientifique*, au contraire, pourra toujours rajeunir les parties qui ne seraient plus au courant des derniers travaux importants. Il est évident, par exemple, que si des livres d'algèbre ou d'acoustique physique peuvent garder leur valeur pendant de nombreuses années, les ouvrages exposant les sciences en formation, comme la chimie physique, la psychologie ou les technologies industrielles, doivent nécessairement être remaniés à des intervalles plus courts.

Le lecteur appréciera la souplesse de publication de cette *Encyclopédie*, toujours vivante, qui s'élargira au fur et à mesure des besoins dans le large cadre tracé dès le début, mais qui constituera toujours, dans son ensemble, un traité complet de la Science, dans chacune de ses sections un traité complet d'une science, et dans chacun de ses livres une monographie complète. Il pourra ainsi n'acheter que telle ou telle section de l'*Encyclopédie*, sûr de n'avoir pas des parties dépareillées d'un tout.

L'*Encyclopédie* demandera plusieurs années pour être achevée ; car pour avoir des expositions bien faites, elle a pris ses collaborateurs plutôt parmi les savants que parmi les professionnels de la rédaction scientifique que l'on retrouve généralement dans les œuvres similaires. Or les savants écrivent peu et lentement : et il est préférable de laisser temporairement sans attribution certains ouvrages plutôt que de les confier à des auteurs insuffisants. Mais cette lenteur et ces vides ne présenteront pas d'in-

convénients, puisque chaque livre est une œuvre indépendante et que tous les volumes publiés sont à tout moment réunis par l'*Index de l'Encyclopédie*. On peut donc encore considérer l'Encyclopédie comme une librairie, où les livres soigneusement choisis, au lieu de représenter le hasard d'une production individuelle, obéiraient à un plan arrêté d'avance, de manière qu'il n'y ait ni lacune dans les parties ingrates, ni double emploi dans les parties très cultivées.

Caractère scientifique des ouvrages. — Actuellement, les livres de science se divisent en deux classes bien distinctes : les livres destinés aux savants spécialisés, le plus souvent incompréhensibles pour tous les autres, faute de rappeler au début des chapitres les connaissances nécessaires, et surtout faute de définir les nombreux termes techniques incessamment forgés, ces derniers rendant un mémoire d'une science particulière inintelligible à un savant qui en a abandonné l'étude durant quelques années ; et ensuite les livres écrits pour le grand public, qui sont sans profit pour des savants et même pour des personnes d'une certaine culture intellectuelle.

L'*Encyclopédie scientifique* a l'ambition de s'adresser au public le plus large. Le savant spécialisé est assuré de rencontrer dans les volumes de sa partie une mise au point très exacte de l'état actuel des questions ; car chaque Bibliothèque, par ses techniques et ses monographies, est d'abord faite avec le plus grand soin pour servir d'instrument d'études et de recherches à ceux qui cultivent la science particulière qu'elle représente, et sa devise pourrait être : *Par les savants, pour les savants*. Quelques-uns de ces livres seront même, par leur caractère didactique, destinés à devenir des ouvrages classiques et à servir aux études de l'enseignement secondaire ou supérieur. Mais, d'autre part, le lecteur non spécialisé est certain de trouver, toutes les fois que cela sera nécessaire, au seuil de la section, — dans un ou plusieurs volumes de généralités, — et au seuil du volume, — dans un chapitre particulier, — des données qui formeront une véritable introduction le mettant à même de poursuivre avec profit sa lecture. Un vocabulaire technique, placé, quand il y aura lieu, à la fin du volume, lui permettra de connaître toujours le sens des mots spéciaux.

II

ORGANISATION SCIENTIFIQUE

Par son organisation scientifique, l'*Encyclopédie* paraît devoir offrir aux lecteurs les meilleures garanties de compétence. Elle est divisée en Sections ou Bibliothèques, à la tête desquelles sont placés des savants professionnels spécialisés dans chaque ordre de sciences et en pleine force de production, qui, d'accord avec le Directeur général, établissent les divisions des matières, choisissent les collaborateurs et acceptent les manuscrits. Le même esprit se manifestera partout : éclectisme et respect de toutes les opinions logiques, subordination des théories aux données de l'expérience, soumission à une discipline rationnelle stricte ainsi qu'aux règles d'une exposition méthodique et claire. De la sorte, le lecteur, qui aura été intéressé par les ouvrages d'une section dont il sera l'abonné régulier, sera amené à consulter avec confiance les livres des autres sections dont il aura besoin, puisqu'il sera assuré de trouver partout la même pensée et les mêmes garanties. Actuellement, en effet, il est, hors de sa spécialité, sans moyen pratique de juger de la compétence réelle des auteurs.

Pour mieux apprécier les tendances variées du travail scientifique adapté à des fins spéciales, l'*Encyclopédie* a sollicité, pour la direction de chaque Bibliothèque, le concours d'un savant placé dans le centre même des études du ressort. Elle a pu ainsi réunir des représentants des principaux Corps savants, Établissements d'enseignement et de recherches de langue française :

Institut.

Académie de Médecine.

Collège de France.

Muséum d'Histoire naturelle.

École des Hautes-Études.

Sorbonne et École normale.

Facultés des Sciences.

Facultés des Lettres.

Facultés de Médecine.

Instituts Pasteur.

École des Ponts et Chaussées.

École des Mines.

École Polytechnique.

Conservatoire des Arts et Métiers.

École d'Anthropologie.

Institut National agronomique.

École vétérinaire d'Alfort.

École supérieure d'Électricité.

École de Chimie industrielle de Lyon.

École des Beaux-Arts.

École des Sciences politiques.

Observatoire de Paris.

Hôpitaux de Paris.

III

BUT DE L'ENCYCLOPÉDIE

Au xviii^e siècle, « l'Encyclopédie » a marqué un magnifique mouvement de la pensée vers la critique rationnelle. A cette époque, une telle manifestation devait avoir un caractère philosophique. Aujourd'hui, l'heure est venue de renouveler ce grand effort de critique, mais dans une direction strictement scientifique; c'est là le but de la nouvelle *Encyclopédie*.

Ainsi la science pourra lutter avec la littérature pour la direction des esprits cultivés, qui, au sortir des écoles, ne demandent guère de conseils qu'aux œuvres d'imagination et à des encyclopédies où la science a une place restreinte, tout à fait hors de proportion avec son importance. Le moment est favorable à cette tentative; car les nouvelles générations sont plus instruites dans l'ordre scientifique que les précédentes. D'autre part, la science est devenue, par sa complexité et par les corrélations de ses parties, une matière qu'il n'est plus possible d'exposer sans la collaboration de tous les spécialistes, unis là comme le sont les producteurs dans tous les départements de l'activité économique contemporaine.

A un autre point de vue, l'*Encyclopédie*, embrassant toutes les manifestations scientifiques, servira comme tout inventaire à mettre au jour les lacunes, les champs encore en friche ou abandonnés, — ce qui expliquera la lenteur avec laquelle certaines sections se développeront, — et suscitera peut-être les travaux nécessaires. Si ce résultat est atteint, elle sera fière d'y avoir contribué.

Elle apporte en outre une classification des sciences et, par ses divisions, une tentative de mesure, une limitation de chaque domaine. Dans son ensemble, elle cherchera à refléter exactement le prodigieux effort scientifique du commencement de ce siècle et un moment de sa pensée, en sorte que dans l'avenir elle reste le document principal où l'on puisse retrouver et consulter le témoignage de cette époque intellectuelle.

On peut voir aisément que l'*Encyclopédie* ainsi conçue, ainsi réalisée, aura sa place dans toutes les bibliothèques publiques, universitaires et scolaires, dans les laboratoires, entre les mains

des savants, des industriels et de tous les hommes instruits qui veulent se tenir au courant des progrès, dans la partie qu'ils cultivent eux-mêmes ou dans tout le domaine scientifique. Elle fera jurisprudence, ce qui lui dicte le devoir d'impartialité qu'elle aura à remplir.

Il n'est plus possible de vivre dans la société moderne en ignorant les diverses formes de cette activité intellectuelle qui révolutionne les conditions de la vie ; et l'interdépendance de la science ne permet plus aux savants de rester cantonnés, spécialisés dans un étroit domaine. Il leur faut, — et cela leur est souvent difficile, — se mettre au courant des recherches voisines. A tous, l'*Encyclopédie* offre un instrument unique dont la portée scientifique et sociale ne peut échapper à personne.

IV

CLASSIFICATION DES MATIÈRES SCIENTIFIQUES

La division de l'*Encyclopédie* en Bibliothèques a rendu nécessaire l'adoption d'une classification des sciences, où se manifeste nécessairement un certain arbitraire, étant donné que les sciences se distinguent beaucoup moins par les différences de leurs objets que par les divergences des aperçus et des habitudes de notre esprit. Il se produit en pratique des interpénétrations réciproques entre leurs domaines, en sorte que, si l'on donnait à chacun l'étendue à laquelle il peut se croire en droit de prétendre, il envahirait tous les territoires voisins ; une limitation assez stricte est nécessaire par le fait même de la juxtaposition de plusieurs sciences.

Le plan choisi, sans viser à constituer une synthèse philosophique des sciences, qui ne pourrait être que subjective, a tendu pourtant à échapper dans la mesure du possible aux habitudes traditionnelles d'esprit, particulièrement à la routine didactique, et à s'inspirer de principes rationnels.

Il y a deux grandes divisions dans le plan général de l'*Encyclopédie* : d'un côté, les sciences pures, et, de l'autre, toutes les technologies qui correspondent à ces sciences dans la sphère des applications. A part et au début, une Bibliothèque d'introduc-

tion générale est consacrée à la philosophie des sciences (histoire des idées directrices, logique et méthodologie).

Les sciences pures et appliquées présentent en outre une division générale en sciences du monde inorganique et en sciences biologiques. Dans ces deux grandes catégories, l'ordre est celui de particularité croissante, qui marche parallèlement à une rigueur décroissante. Dans les sciences biologiques pures enfin, un groupe de sciences s'est trouvé mis à part, en tant qu'elles s'occupent moins de dégager des lois générales et abstraites que de fournir des monographies d'êtres concrets, depuis la paléontologie jusqu'à l'anthropologie et l'ethnographie.

Étant donnés les principes rationnels qui ont dirigé cette classification, il n'y a pas lieu de s'étonner de voir apparaître des groupements relativement nouveaux, une biologie générale, — une physiologie et une pathologie végétales, distinctes aussi bien de la botanique que de l'agriculture, — une chimie physique, etc.

En revanche, des groupements hétérogènes se disloquent pour que leurs parties puissent prendre place dans les disciplines auxquelles elles doivent revenir. La géographie, par exemple, retourne à la géologie, et il y a des géographies botanique, zoologique, anthropologique, économique, qui sont étudiées dans la botanique, la zoologie, l'anthropologie, les sciences économiques.

Les sciences médicales, immense juxtaposition de tendances très diverses, unies par une tradition utilitaire, se désagrègent en des sciences ou des techniques précises ; la pathologie, science de lois, se distingue de la thérapeutique ou de l'hygiène, qui ne sont que les applications des données générales fournies par les sciences pures, et à ce titre mises à leur place rationnelle.

Enfin, il a paru bon de renoncer à l'anthropocentrisme qui exigeait une physiologie humaine, une anatomie humaine, une embryologie humaine, une psychologie humaine. L'homme est intégré dans la série animale dont il est un aboutissant. Et ainsi, son organisation, ses fonctions, son développement, s'éclairent de toute l'évolution antérieure et préparent l'étude des formes plus complexes des groupements organiques qui sont offerts par l'étude des sociétés.

On peut voir que, malgré la prédominance de la préoccupation pratique dans ce classement des Bibliothèques de l'*Encyclopédie scientifique*, le souci de situer rationnellement les sciences dans leurs rapports réciproques n'a pas été négligé. Enfin il est à peine besoin d'ajouter que cet ordre n'implique nullement une hiérarchie, ni dans l'importance ni dans les difficultés des diverses sciences. Certaines, qui sont placées dans la technologie, sont d'une complexité extrême, et leurs recherches peuvent figurer parmi les plus ardues.

Prix de la publication. — Les volumes, illustrés pour la plupart, seront publiés dans le format in-18 jésus et cartonnés. De dimensions commodes, ils auront 400 pages environ, ce qui représente une matière suffisante pour une monographie ayant un objet défini et important, établie du reste selon l'économie du projet qui saura éviter l'émiettement des sujets d'exposition. Le prix étant fixé uniformément à 5 francs, c'est un réel progrès dans les conditions de publication des ouvrages scientifiques, qui, dans certaines spécialités, coûtent encore si cher.

TABLE DES BIBLIOTHÈQUES

DIRECTEUR : D^r TOULOUSE, Directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études.

SECRÉTAIRE GÉNÉRAL : H. PIÉRON, agrégé de l'Université.

DIRECTEURS DES BIBLIOTHÈQUES :

1. *Philosophie des Sciences*. P. PAINLEVÉ, de l'Institut, professeur à la Sorbonne.

I. SCIENCES PURES

A. Sciences mathématiques :

2. *Mathématiques* J. DRACH, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse.
3. *Mécanique* J. DRACH, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse.

B. Sciences inorganiques :

4. *Physique* A. LEDUC, professeur adjoint de physique à la Sorbonne.
5. *Chimie physique*. . . . J. PERRIN, chargé de cours à la Sorbonne.
6. *Chimie* A. PICTET, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Genève.
7. *Astronomie et Physique céleste*. J. MASCART, astronome adjoint à l'Observatoire de Paris.
8. *Météorologie* B. BRUNHES, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Clermont-Ferrand, directeur de l'Observatoire du puy de Dôme.
9. *Minéralogie et Pétrographie* A. LACROIX, de l'Institut, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
10. *Géologie*. M. BOULE, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.

11. *Océanographie physique* J. RICHARD, directeur du Musée Océanographique de Monaco.

C. Sciences biologiques normatives :

- | | | |
|-----------------------|-------------------------------|--|
| 12. <i>Biologie</i> . | A. <i>Biologie générale</i> . | M. CAULLERY, professeur de zoologie à la Sorbonne. |
| | | B. <i>Océanographie biologique</i> . |
13. *Physique biologique* A. IMBERT, professeur à la Faculté de Médecine de l'Université de Montpellier.
14. *Chimie biologique* G. BERTRAND, professeur de chimie biologique à la Sorbonne, chef de service à l'Institut Pasteur.
15. *Physiologie et Pathologie végétales* L. MANGIN, de l'Institut, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
16. *Physiologie* J.-P. LANGLOIS, professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris.
17. *Psychologie* E. TOULOUSE, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études, médecin en chef de l'asile de Villejuif.
18. *Sociologie* G. RICHARD, professeur à la Faculté des Lettres de l'Université de Bordeaux.

19. *Microbiologie et Parasitologie* A. CALMETTE, professeur à la Faculté de Médecine de l'Université, directeur de l'Institut Pasteur de Lille; et F. BEZANÇON, professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris, médecin des Hôpitaux.

- | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|--|---|
| 20. <i>Pathologie</i> . | A. <i>Pathologie médicale</i> . | M. KLIPPEL, médecin des Hôpitaux de Paris. | |
| | | B. <i>Neurologie</i> . | E. TOULOUSE, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études, médecin en chef de l'asile de Villejuif. |
| | | C. <i>Path. chirurgicale</i> . | L. PICQUÉ, chirurgien des Hôpitaux de Paris. |

D. Sciences biologiques descriptives :

21. *Paléontologie* M. BOULE, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.

22. Botanique.	{ A. <i>Généralités phanérogames.</i> B. <i>Cryptogames.</i> . . .	H. LECOMTE, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
		L. MANGIN, de l'Institut, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
23. Zoologie		G. LOISEL, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études.
24. Anatomie et Embryologie		G. LOISEL, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études.
25. Anthropologie et Ethnographie		G. PAPILLAUT, directeur adjoint du Laboratoire d'Anthropologie à l'École des Hautes Études, professeur à l'École d'Anthropologie.
26. Économie politique		D. BELLET, secrétaire perpétuel de la Société d'Économie politique, professeur à l'École des Sciences politiques.

II. SCIENCES APPLIQUÉES

A. Sciences mathématiques :

27. <i>Mathématiques appliquées</i>	M. D'OCAGNE, professeur à l'École des Ponts et Chaussées, répétiteur à l'École Polytechnique.
28. <i>Mécanique appliquée et génie</i>	M. D'OCAGNE, professeur à l'École des Ponts et Chaussées, répétiteur à l'École Polytechnique.

B. Sciences inorganiques :

29. <i>Industries physiques</i>	H. CHAUMAT, sous-directeur de l'École supérieure d'Électricité de Paris.
30. <i>Photographie</i>	A. SEYEWETZ, sous-directeur de l'École de Chimie industrielle de Lyon.
31. <i>Industries chimiques.</i>	J. DERÔME, professeur agrégé de physique au collège Chaptal, inspecteur des Établissements classés.
32. <i>Géologie et minéralogie appliquées</i>	L. CAYEUX, professeur à l'Institut national agronomique, professeur de géologie à l'École des Mines.
33. <i>Construction</i>	J. PILLET, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers et à l'École des Beaux-Arts.

C. Sciences biologiques :

34. *Industries biologiques*. G. BERTRAND, professeur de chimie biologique à la Sorbonne, chef de service à l'Institut Pasteur.
35. *Botanique appliquée et agriculture*. . . . H. LECOMTE, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
36. *Zoologie appliquée* . . J. PELLEGRIN, assistant au Muséum d'Histoire naturelle.
37. *Thérapeutique générale et pharmacologie*. . G. POUCHET, membre de l'Académie de médecine, professeur à la Faculté de Médecine de l'Université de Paris.
38. *Hygiène et médecine publiques* A. CALMETTE, professeur à la Faculté de Médecine de l'Université, directeur de l'Institut Pasteur de Lille.
39. *Psychologie appliquée*. E. TOULOUSE, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études, médecin en chef de l'asile de Villejuif.
40. *Sociologie appliquée*. . TH. RUYSSSEN, professeur à la Faculté des Lettres de l'Université de Bordeaux.

M. ALBERT MAIRE, bibliothécaire à la Sorbonne, est chargé de l'*Index* de l'Encyclopédie scientifique.

