

62,261.

Etudes expérimentales

sur les

aberrations de l'œil

Thèse

pour le grade de

Maitre-ès sciences physiques

publiée, avec la haute autorisation

de la Faculté physico-mathématique de

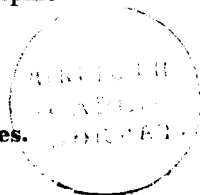
l'Université Impériale de Dorpat,

par

A. Hołowinski,

Licencié-ès sciences de l'Université de Paris, ancien Ingénieur
de l'Ecole Centrale, Docteur-en-philosophie

avec deux planches lithographiées.



Imprimerie de G. Gläser.

Dorpat 1869.

139,50

Etudes expérimentales sur les aberrations de l'œil.

Deux faits dominent la théorie de la vision: l'accommodation de l'œil aux distances et son accommodation aux couleurs. Malgré les progrès de la théorie et de brillantes expériences, ce sujet est bien loin d'être épuisé. L'explication de l'accommodation de l'œil aux distances a fait un pas décisif depuis les expériences de M. Helmholtz sur les changements de courbure du cristallin. L'achromatisme de l'œil possède encore moins de données expérimentales.

Le présent mémoire s'occupe dans sa première partie des aberrations monochromatiques et en particulier de l'aberration dite de sphéricité; il y est traité incidemment de quelques unes des notions classiques de la vision. La seconde partie fournit quelques indications nouvelles sur le chromatisme de l'œil.

I.

Diverses expériences ont démontré depuis longtemps l'asymétrie de l'œil dans les méridiens passant par l'axe optique. M. Helmholtz a classifié les aberrations des images qui en résultent. Il décrit ¹⁾, pour son œil, les apparences présentées par un point lumineux placé 1) au-delà de la distance de la vision distincte et 2) au-dessous de cette distance avec une accommodation trop éloignée. Dans le premier cas il obtient des formes rayonnées ²⁾ plus allon-

1) Helmholtz Optique physiologique traduite par Javal et Klein p. 188—204.

2) H. O. ph. p. 189.

Gedruckt auf Verfügung der physiko-mathem. Facultät.
Dorpat, den 6. October 1869.
Nr. 78.

Dr. P. Helmling,
d. Z. Decan der physiko-mathem. Facultät.

126927275

gées de haut en bas, que de droite à gauche; dans le second, la plus grande dimension de ses figures lui paraît être horizontale. Ces images varient d'ailleurs de l'œil droit à l'œil gauche et le sens de leur allongement d'un observateur à l'autre. En effet, M. Scheffler décrit ¹⁾ la forme rayonnée des étoiles qui, quoique placés audelà du punctum remotum, sont plus allongées dans le sens horizontal; il en est de même pour mon œil. Ces différences prouvent que chez M. Helmholtz, l'épanouissement des faisceaux lumineux, depuis leur point de concours en avant de la rétine, est moindre dans le méridien horizontal que dans le méridien vertical, et que celui-ci fait concourir les rayons plus en avant de la rétine. Chez M. Scheffler ces effets s'accusent en sens inverse, comme chez moi. En collant mon œil contre un trou rond, éclairé, percé dans un écran, je le vois d'abord sensiblement circulaire. M'éloignant un peu mais en restant encore audessous ²⁾ de la distance de la vision distincte, je le vois s'allonger verticalement. A la distance de l'accommodation exacte, je l'aperçois rond et net. Audelà, en m'éloignant de plus en plus, l'image devient plus étoilée et s'allonge horizontalement. J'ai constaté ces mêmes rayonnances par une autre expérience. En fixant le point lumineux à travers une fente étroite, faite dans un papier mince et opaque et en me plaçant à quelques mètres de distance, j'aperçois (fig. I. pl. I) une bande lumineuse éclatante CD parallèle à la fente et une bande plus pâle AB perpendiculaire. Ces deux bandes tournent en même temps que la fente. a) La ligne perpendiculaire AB s'explique par la diffraction; l'on y distingue mais sans grande netteté les couleurs du spectre comme dans les réseaux. Les points opaques des milieux de l'œil projettent en raies obscures et parallèles les ombres de la fente placé contre l'œil. Ces réseaux irréguliers et les bords de la fente

1) Scheffler. Physiologische Optik, II p. 116.

2) Je le constate facilement en avançant un petit écran par devant la pupille (par exemple de droite à gauche) — je le vois avancer de gauche à droite sur l'image éclairée, attaquée d'abord par son bord gauche.

étaient la lumière perpendiculairement à leur direction. En diminuant la largeur de la fente, et en rendant ainsi les raies plus fines, l'image du point lumineux (supposé rond) s'entoure, dans le sens perpendiculaire à la fente, d'images multiples semi-circulaires, brillantes, d'intensité décroissante et séparées par des intervalles obscurs. Plus la fente est resserrée et plus l'on voit s'étaler chacune des images. L'on finit par voir une bande pâle rayée de traits noirs.

b) La bande CD parallèle à la fente n'est que l'image élargie du point lumineux. Pour mon œil, elle est surtout longue et brillante quand la fente est placée horizontalement; elle est plus courte et moins nette quand la fente est verticale. Cette bande correspond évidemment aux aberrations décrites dans la vision à l'œil libre. Transporte-t-on la fente parallèlement à elle-même, l'on voit les deux bras CL et LD suivre ce mouvement dans le même sens. A l'ieu d'une bande rectiligne et parallèle CLD , l'on aperçoit successivement les courbes lumineuses $C'LD'$, $C''LD''$, CLD , $C'''LD'''$ etc. Si la fente CD était verticale, l'on aurait les mêmes apparences tournées de 90° , avec des bras lumineux plus courts. La cause de ces bras ou ailes s'agitant avec le mouvement de la fente est évidente. La bande est rectiligne dans la position moyenne, alors que le plan passant par le point lumineux et la fente coupe la cornée symétriquement de part et d'autre. Dans le déplacement de la fente, ce plan devient oblique; sa section par la surface convexe de la cornée donne une courbe dont les bras seront d'autant plus inclinés que la fente sera plus éloignée du plan symétrique. L'on comprend donc que les rayons réfractés engendrent les images signalées par l'expérience.

Je n'insisterai pas autrement ici sur la description de ces phénomènes subjectifs étudiés par un grand nombre d'observateurs ¹⁾

1) Voir la bibliographie dans l'Optique de Helmholtz, et Scheffler Ph. O. II. p. 111—148.

et qui tiennent à la structure étoilée du cristallin, aux différences de réfringence et de courbure pour les différents méridiens, aux larmes, au battement des paupières, etc.

3) Je ne m'arrêterai pas également aux rayonnances signalées par M. Helmholtz pour les lumières intenses même à la distance de l'accommodation exacte ¹⁾. L'explication de ces phénomènes peut aujourd'hui être sûrement établie.

4) L'on peut prévoir la forme des images des lignes lumineuses déliées, en construisant pour chacun de leurs points les images de diffusion rayonnées.

5) Les phénomènes, résultant de l'inégalité de l'accommodation de l'œil pour les lignes verticales et horizontales, ont été étudiés par M. M. Donders et Knapp sous le nom d'astigmatisme régulier; il faut les attribuer surtout aux différences de courbure suivant les divers méridiens. — C'est à l'étude expérimentale de la polyopie monoculaire que je m'arrêterai particulièrement.

L'on définit ainsi les phénomènes visuels résultant de ce que les rayons passant dans un même plan méridien de l'œil ne se réunissent pas rigoureusement en un même foyer; M. Donders les désigne sous le nom d'astigmatisme irrégulier; il affirme, que dans les yeux privés de cristallin, l'on ne trouve plus ce genre de l'aberration, et que par contre l'astigmatisme régulier s'y manifeste plus nettement que dans les yeux normaux. M. Donders déplaçait un petit trou, percé dans un écran, suivant les différents secteurs de l'œil et il conclut, de ses expériences, que les foyers des différents secteurs ne coïncident pas, et que les rayons, passant dans un même secteur, ne convergent pas exactement en un même point. M. Helmholtz en citant ces expériences ajoute ²⁾: „Les rayons plus rapprochés de l'axe paraissent avoir un point de convergence plus éloigné que les rayons marginaux. Aussi, dans le cercle de diffusion de chaque secteur, les

1) H. p. 189 et p. 331.

2) H. p. 194

rayons s'accumulent-ils vers la périphérie quand la rétine est en avant du point le plus resserré du faisceau, et se condensent-ils, au contraire, vers la partie du cercle de diffusion plus voisine de l'axe, quand la rétine est plus en arrière.“

Il me semble, qu' il est difficile de conclure de ces expériences quelque chose de certain relativement à la distance du point de concours des rayons centraux et marginaux. M. Volkmann a cherché, après Young, à reconnaître si l'œil possède une aberration de sphéricité. Il regardait, à travers ¹⁾ un écran à quatre ouvertures disposées en ligne courbe, une aiguille que l'on plaçait à différentes distances de l'œil. Si les rayons centraux se réunissent avant les rayons marginaux, les images des ouvertures médianes doivent se réunir avant celles des ouvertures latérales, dès que l'œil s'adaptera à la distance de l'aiguille, que l'on éloignera successivement. L'on tirerait la conclusion inverse, si ce sont les images extrêmes qui se confondent avant les images médianes pendant le travail de l'accommodation. M. Volkmann trouva, sous ce rapport, des résultats opposés suivant les observateurs; M. Helmholtz en conclut, que, pour la plupart des yeux, les points où les rayons réfractés coupent le rayon central ne forment pas de série continue — de sorte que l'idée de l'aberration de sphéricité n'y trouve aucune application, surtout à côté d'autres aberrations plus grossières. C'est ce jugement trop sommaire, que je tiens à réformer. Sans doute, l'œil normal n'a pas d'aberration de sphéricité en ce sens, qu'il ne peut être assimilé à nos lentilles bien centrées et qu'il ne possède pas d'axe de symétrie pour tous les azimuts. Chaque méridien présente des différences individuelles et particulières, comme l'étude de l'astigmatisme l'a déjà prouvé. Mais cette symétrie autour de l'axe existe dans un même plan méridien, et de plus, pour tous les plans méridiens, les rayons plus rapprochés de l'axe convergent au delà des rayons marginaux. Les écarts entre ces points de convergence

1) H. p. 201.

varient certainement d'un méridien à l'autre, mais leur sens n'en est pas modifié. L'expérience de M. Volkmann n'a pu donner, sous ce rapport, des résultats bien nets — ce qui explique les contradictions des observateurs. Il n'en pouvait être autrement dans une expérience aussi délicate et faite sans précautions. — A mesure que les faisceaux lumineux s'écartent de l'axe oculaire, leur angle d'incidence augmente rapidement sur les surfaces convexes de la cornée et du cristallin: ils sont donc éliminés par réflexion dans une proportion rapidement croissante. Cette cause d'affaiblissement agit avec autant plus d'effet pour les faisceaux, toutes circonstances restant les mêmes, que le point lumineux est plus rapproché de l'œil. Il est donc inutile d'appuyer sur les autres causes possibles de l'affaiblissement des images latérales — telles que les différences de transparence, les aberrations dues à l'inégalité de réfringence produisant l'éparpillement des faisceaux, l'aberration de sphéricité etc.

L'on comprend donc combien il est important pour voir nettement les images latérales, formées par des faisceaux tant soit peu écartés de l'axe, d'employer des objets très déliés — tels que des fils fins et brillants vivement éclairés sur un fond bien sombre. C'est ce que M. Volkmann n'a pas fait en employant des épingles placées sur un fond lumineux. Dans ces conditions, les images des trous extrêmes sont pâles et comme noyées dans la lumière du fond. — Une seconde difficulté de cette expérience gît dans l'impossibilité de voir doubles des objets trop rapprochés à travers deux trous oculaires tant soit écartés de part et d'autre de l'axe. L'on étudiera en effet plus loin, à propos de la vision à travers de petits trous, les raisons qui font que l'on ne peut répéter l'expérience de Scheiner pour un point situé audessous de la vision distincte, lorsque les deux cercles de diffusion (images des trous) ne s'entrecoupent pas mutuellement. Personnellement je ne puis y parvenir, malgré tous les artifices de l'accommodation, avec un écart des trous oculaires supérieur à 6 mm, 3. Ce fait limite déjà considérablement l'écart

des faisceaux latéraux, qui sont précisément les plus intéressants au point de vue de l'aberration de sphéricité. Enfin ce qui rend l'expérience de M. Volkmann si douteuse, c'est que 1) les quatre images de l'épingle sont peu écartées l'une de l'autre, les quatre trous de l'écran étant nécessairement resserrés; 2) que la netteté de la vision de ces images est encore diminuée par l'éclat du fond — surtout pour les images extrêmes 3) qu'en éloignant l'épingle pour voir si les images extrêmes se réunissent avant les images centrales, tous les intervalles diminuent et deviennent confus, surtout quand l'objet est aussi peu délié qu'une épingle. — Il est bien difficile, dans des conditions aussi désavantageuses, de porter un jugement certain — et c'est ce qui explique les divergences des résultats. En opérant dans d'autres conditions expérimentales, l'on constate pourtant que les effets de l'aberration de sphéricité sont très nettement appréciables. A cette fin, j'emploie, comme première expérience, un fil très fin, en argent, tendu verticalement 1) sur un cadre en bois. Ce fil est éclairé latéralement 2) par une lumière quelconque (en s'aidant au besoin d'une lentille cylindrique), et se détache en blanc sur un fond collé de papier noir et placé à la distance de la vision distincte. Une plaque métallique, noircie et percée de trous équidistants de millimètre en millimètre, est fixée à ce fond noir; elle sert de micromètre et ses trous, éclairés par la lumière venant de l'arrière du fond noir, se dessinent en traits de division 3). L'œil est placé contre un écran métallique percé de trous équidistants et horizontaux comme les trous micrométriques. A l'aide de précautions, dont je parlerai

1) Si c'est dans le méridien horizontal que l'on veut apprécier l'aberration.

2) Il serait peut être commode d'employer un fil de platine rendu faiblement incandescent par un courant galvanique, et placé dans boîte obscure entièrement fermée.

3) Il ne faut pas que le diamètre des trous micrométriques soit trop petit, ou que ceux-ci soient trop serrés. Autrement l'accommodation de l'œil est peu nette et difficile. Même remarque pour les trous de l'écran oculaire.

plus tard en décrivant l'appareil optique, l'on cherche à éliminer toute lumière étrangère et l'on accomode la vue aux traits micrométriques du fond, afin de les voir bien nets et non multiples. Le fil en argent, placé entre l'œil et le micromètre, se détache alors en images multiples verticales, qui s'affaiblissent rapidement en s'écartant de l'axe oculaire. Avec un peu d'habitude, l'on distingue facilement, dans la position moyenne de l'œil et au-dessous de la vision distincte, les images d'un fil formées par deux trous oculaires distants de plus de six millimètres. Cet écart de trois millimètres, de part et d'autre de l'axe optique, donne déjà des images d'une telle faiblesse relative, que l'on ne les distinguerait plus sur un fond un peu trop illuminé. La dispersion des couleurs est très peu sensible et ne nécessite pas l'emploi d'une lumière monochromatique.

Le résultat des expériences est constant et nettement apparent même sans aucune mesure. Au-dessous de la vision distincte, la série des images du fil se présente toujours avec des intervalles mutuels décroissants à partir de l'axe oculaire. L'écart des images centrales est dans quelques expériences plus de deux fois plus grand que celui des images marginales. C'est le seul résultat important, que je puisse relever comme certain. La mesure précise de ces écarts est très difficile. Il est facile de voir que dût-on disposer d'instruments d'une grande précision micrométrique (qui m'ont fait défaut dans ces recherches) l'on n'atteindrait encore qu'une approximation très relative. Dans cette manière de faire les lectures d'intervalles sur le micromètre existent en effet des éléments que l'on ne saurait apprécier avec rigueur — on le fera voir dans la suite. Ce n'est donc qu'avec réserve, que je cite les résultats numériques de deux expériences. Je place mon œil dans une position bien symétrique tout contre l'écran oculaire percé de six trous distants de millimètre en millimètre. Si les précautions d'éclairage ont été bien prises, j'aperçois simultanément six fils verticaux placés symétriquement de part et d'autre de l'axe.

Les divisions micrométriques (en millimètres) sont vues bien nettes à une distance de l'écran égale environ à 200 mm; le fil objectif est à une distance de 78 mm. L'intervalle (3—4) (fig. 2) pl. I des fils centraux couvre environ ¹⁾ 1,8 divisions. Les intervalles (2—3) et (4—5) sont égaux et valent chacun plus de 1,5 divisions. Enfin les intervalles extrêmes (1—2) et (5—6) un peu moins d'une division. — Dans une autre expérience (fig. 3) pl. I en conservant les mêmes distances pour le fil objectif et le micromètre, j'employais un oculaire de trois trous écartés de 2 mm en 2 mm. Je vis trois fils avec un intervalle de 3 divisions pour les fils centraux et de 1,6 pour les deux fils extrêmes. Ces deux expériences ne prouveraient pas encore, à elles seules, que dans l'azimut horizontal les rayons excentriques coupent l'axe avant les rayons centraux. En effet (fig. 4) pl. I si l'écran est percé de trous équidistants 1, 2, 3, 4, les faisceaux lumineux découperont sur les surfaces de la cornée et du cristallin des arcs inégaux, qui iront en croissant plus rapidement pour les faisceaux marginaux. L'on ne peut pourtant pas en conclure que ces faisceaux, supposé qu'ils convergent en un même point u, iront découper sur la rétine placée en R des intervalles croissant depuis (1—2) jusqu'à (3—4). L'on peut facilement s'assurer, par le calcul ou une épure, que c'est le contraire qui arrive dans le cas où les arcs découpés à la surface postérieure du cristallin seraient égaux. Il y a plus, l'arc (3—4) pourrait être beaucoup plus grand que l'arc (1—2) — ce qui n'empêcherait pas que l'intervalle (3—4) sur la rétine R pût être moindre que 1—2. Si tous les faisceaux convergent en un même point u, l'on ne peut faire a priori qu'une seule conclusion c'est que la série de ces intervalles variera dans le même sens, que la rétine soit d'ailleurs placée en R ou en R', c'est à dire que l'œil soit accomodé au-delà ou en avant du point f. Or, tel n'est pas le résultat de l'expérience. La série est nettement décroissante à partir de

1) Les fractions des divisions micrométriques se jugeaient à l'œil.

l'axe quand l'œil est accomodé audelà de l'objet; elle est au contraire nettement croissante si la vue est accomodée pour une distance plus rapprochée que l'objet. L'on doit donc en conclure nécessairement, qu'un rayon marginal coupera l'axe quelque part en u' plus avant qu'un rayon central.

Les deux expériences précédentes, audessous de la vision distincte, ont montré, que dans l'azimut horizontal la série était rapidement décroissante. Il n'est pas aussi facile de le constater numériquement dans l'azimut vertical de l'œil, bien que d'autres expériences, audessus de la vision distincte, démontreront bientôt que le sens de l'aberration y est le même. L'observation de cet effet dans le méridien vertical est difficile, pour mon œil, parceque l'aberration y est moins apparente, le foyer des rayons du méridien vertical étant plus long que celui du méridien horizontal, toutes circonstances restant les mêmes; l'allongement horizontal des étoiles et des lumières très éloignées me l'avait déjà prouvé.

Cette circonstance, jointe à la difficulté de fixer longtemps une distance plus grande, tend à masquer partiellement les différences entre les intervalles (3—4) et (1—2) fig. 4 pl. I. Les séries sont toujours décroissantes en R et croissantes en R', mais moins rapidement que dans le méridien horizontal. De plus, dans le méridien vertical, les écarts possibles des trous oculaires sont beaucoup moindres à cause des cils et des paupières. Ainsi, ce n'est qu'avec une extrême difficulté, que je puis voir simultanément les images multiples horizontales à travers des trous écartés de 2^{mm} de l'axe. L'aberration, dont il s'agit, ne s'accusant un peu sensiblement que pour les faisceaux très excentriques, n'est donc pas facilement observable. Pour constater le sens de l'aberration, le mieux est de recourir à d'autres expériences faciles et très sensibles.

L'on couvre la flamme d'une lampe ou d'une bougie d'un écran noir opaque percé d'un petit trou, et l'on observe ce point lumineux à quelques mètres de distance. En habituant l'œil droit à l'obscurité, en couvrant l'œil gauche et en éliminant toute lumière étran-

gère, j'ai pu voir encore nettement les deux images du point lumineux formées par deux trous écartés de 4^{mm} de part et d'autre de l'axe. J'expliquerai plus loin, pourquoi de si forts oculaires, impraticables quand l'objet est trop rapproché, sont possibles quand il est trop éloigné. En employant les deux séries ¹⁾ de trous écartés de 1^{mm} et de 2^{mm}, l'on peut observer très facilement dans le premier cas six à sept images à intervalles croissants de près du double vers les extrémités, et dans le second trois images avec de fortes différences dans le même sens. Dans le méridien vertical je vois les images relativement plus resserrées : aussi est-il plus commode, pour la netteté des résultats, de se servir alors de la seconde série à quatre trous écartés de 2^{mm}; les intervalles des images sont ainsi plus grands, et leur grandeur relative — plus facilement appréciable.

Quand on transporte les trous oculaires, parallèlement à leur direction dans un azimut quelconque, l'on constate que les images du point lumineux suivent le mouvement dans le même sens — ce qui s'explique facilement puisque les rayons coupent alors l'axe avant la rétine, et que l'on voit un point dans la direction normale à la rétine.

De plus (fig. 4) si l'écran *EE'* se transporte par ex. dans le sens de la flèche, l'image (4) en R' est la première éliminée et au moment de sa disparition l'intervalle (3—4) est maximum. A mesure que les trous 3, 2, 1, viennent occuper des positions plus excentriques, les intervalles augmentent successivement, tandis que l'on observe inversement une diminution des intervalles pour les images 5, 6, 7 tant que les trous correspondants n'ont pas dépassé l'axe. Ce mouvement des intervalles des images est très saisissant même dans l'azimut vertical, surtout quand on n'emploie que l'écran à quatre trous écartés de 2^{mm} en 2^{mm} et que l'on part de la position symétrique. Je ne pense pas que sous ce rapport, et pour

1) Le diamètre des trous employés était de 0^{mm},4 environ.

tous les yeux normaux, il y aie des différences individuelles sur le sens des variations. — Avec deux trous (écartés par ex. de 2^{mm}) transportés dans tous les méridiens, les mêmes différences s'accusent nettement : l'intervalle des images est minimum dans la position symétrique, et maximum dans les positions excentriques. Les images extrêmes s'affaiblissent et s'éparpillent irrégulièrement avant de disparaître.

Avant de passer à d'autres expériences, il est utile de présenter le calcul de ces aberrations pour un cas particulier et un œil „simplifié“. Reduisons en effet (fig. 5) pl. I l'œil à une lentille biconvexe et à un milieu moins réfringent placé derrière cette lentille 1). Admettons que les dimensions et la réfringence de cet œil simplifié correspondent approximativement aux valeurs moyennes de l'œil humain. Soit $DC = r = 8^{\text{mm}}$ le rayon de la première surface; le rayon de la seconde surface égal à $r' = 5^{\text{mm}} = C'H$, soit c l'épaisseur de la lentille $DG = 7^{\text{mm}}$. Imaginons un écran vertical élevé en D perpendiculairement à l'axe et soit $DL = m$ la distance à laquelle il est percé par un rayon lumineux venant du point A , situé sur l'axe, et éloigné de $AD = a$ du sommet.

Imaginons un autre écran élevé en Q à la distance $d = 200^{\text{mm}} = QD$. Soit φ l'angle ECD , si E est le point d'intersection du rayon avec la première surface de la lentille. Soit $\varphi' = HC'C$ l'angle analogue à la seconde surface de la lentille, EHF étant le chemin que suit le rayon dans le milieu de la lentille prolongé.

Ce rayon se réfracte une seconde fois en H et rencontre l'axe à une distance $GF' = y'$.

Soit $n = 1,4$ l'indice de réfraction de la lentille et $n' = \frac{1,4}{1,3} = 1,08$ celui du second milieu.

Par un calcul très simple, et qui n'est d'ailleurs qu'approximatif, l'on trouve la formule :

$$(1) DF = y = r \left\{ \frac{n}{n-1} \frac{r}{a} \frac{\sin \varphi}{\varphi} + 1 - \cos \varphi \right\}$$

L'on tire ensuite la valeur de φ' par la relation approchée:

$$(2) r'\varphi' = r\varphi \left\{ 1 - \frac{(n-1) \frac{r}{a} c}{nr} \right\}$$

Pour connaître φ , l'on a les relations

$$\frac{EB}{m} = \frac{a+r(1-\cos \varphi)}{a}$$

$$\text{d'où (3) } r \sin \varphi = \frac{m[a+r(1-\cos \varphi)]}{a}$$

$$\text{car } DB = r(1-\cos \varphi)$$

$$\text{et } EB = r \sin \varphi.$$

Pour résoudre l'équation (3) par rapport à φ , l'on emploie un artifice bien connu en calculant un angle auxiliaire γ tel que $\text{tg } \gamma = \frac{m}{a}$

$$\log \text{tg } \gamma = \log m - \log a$$

$$\text{d'où } \gamma$$

Alors l'équation (3) devient:

$$\text{a. r. } \sin(\varphi + \gamma) = m(a+r) \cos \gamma$$

$$\text{ou } \log \sin(\varphi + \gamma) = \log m + \log(a+r) + \log \cos \gamma - \log a - \log r$$

$$\text{d'où } (\varphi + \gamma) \text{ et par conséquent } \varphi.$$

Ayant calculé les valeurs de φ et de y l'on trouve la distance ($GF' = y'$) du rayon après la seconde réfraction par la formule

$$(4) y' = r' \left\{ \frac{1}{n'-1 + \frac{n'r'}{y-c}} \frac{\sin \varphi'}{\varphi'} - 1 + \cos \varphi' \right\}$$

Calculons à l'aide de ces formules les distances y'_c et y'_m du point de concours des faisceaux centraux et marginaux partant d'un point Q situé à 200^{mm} de l'écran. $QD = 200^{\text{mm}}$.

1) Scheffler. P. O. I, p. 100.

1) P. O. Scheffler I. p. 101

a) pour les rayons centraux $m = 0$, $\varphi = \varphi' = 0$; l'on trouve successivement

$$y_c = 31^{\text{mm}}, 11 \text{ et } y'_c = 16^{\text{mm}}, 447.$$

b) posons $m = 3^{\text{mm}}$, pour les rayons marginaux ou extrêmes;

c. a. d. admettons que l'ouverture maxima de l'écran $= 6^{\text{mm}}$

l'on trouve successivement

$$\varphi_m = 22^\circ . 5' . 32'', 6$$

$$y_m = 30^{\text{mm}}, 9768$$

$$\varphi'_m = 27^\circ . 23' . 8'', 16$$

et substituant ces valeurs dans (4) $y'_m = 15^{\text{mm}}, 2135$

Le centre rationnel de la rétine est au second point nodal k' situé à une distance $k' = 0^{\text{mm}}, 42$ en arrière de la seconde surface¹⁾. Le premier point nodal k (Listing) est calculé, d'après les données de notre œil simplifié, toujours par cette condition que tout rayon dirigé extérieurement vers k passe (après s'être réfracté deux fois) par k' en restant parallèle à lui-même. Ces rayons, conservant ainsi leur parallélisme, sont dits rayons principaux et le point k a cette propriété d'être le point de concours de tous les rayons principaux extérieurs, dont les parties intérieures convergent toutes au second point nodal k' . La distance KG vaut $0^{\text{mm}}, 9$. Les images de tous les points, situés sur un rayon principal, se recouvrent sur la rétine. — Ceci dit, décrivons de k' comme centre, avec un rayon R' , la surface de la rétine, et choisissons ce rayon tel, que pour une accommodation de l'œil à une distance de 200^{mm} , R' soit compris entre le foyer des rayons centraux et celui des rayons, marginaux. Cette condition donne:

$$R' + k' = y'_m + \frac{y'_c - y'_m}{2}$$

$$k' = 0,42, y'_m = 15,2135, y'_c = 16,447$$

$$\text{d'où } R' = 15^{\text{mm}}, 41.$$

Cette accommodation de l'œil étant ainsi fixée pour le point Q , calculons pour un autre point A , situé à une distance $a = 78^{\text{mm}}$,

les valeurs successives de y' , m variant par demi-millimètres depuis $0^{\text{mm}},5$ jusqu'à 3^{mm} . — Ayant obtenu ainsi les distances y' pour chacun de ces rayons, il faudra joindre k' avec le point d'intersection O du rayon par la rétine, et déterminer l'angle $OK' F' = x$.

Puis l'on conduira par l'autre point nodal k une parallèle à $K'O$ que l'on prolongera jusqu' à l'écran micrométrique QZ ; cette parallèle le coupera à une distance q de l'axe qu'il s'agit de calculer. L'on a:

$$(5) \quad WO = K'O. \sin. OK'S = WF'. \text{tg } OF'S$$

$$\text{or } WO = R'. \sin x, K'O = R'$$

$$\text{et } OK'S = x, WF' = F'S + WS = (y' - k' - R') + R'(1 - \cos x) \\ = (y' - k' - R'. \cos x)$$

$$\text{tg } OF'S = \frac{TH}{TF'} = \frac{r' \sin \varphi'}{r'(1 - \cos \varphi') + y'}$$

Substituant ces valeurs dans l'équation (5) l'on a:

$$(6) \quad R'. \sin x = \frac{(y' - k' - R'. \cos x) r'. \sin \varphi'}{(r'(1 - \cos \varphi') + y')}$$

L'on en tire x par un artifice déjà employé en calculant un angle auxiliaire γ' tel que $\text{tg } \gamma' = \frac{B}{R'}$

$$\text{Posons } \frac{R'. r'. \sin \varphi'}{(r'(1 - \cos \varphi') + y')} = B, \text{ et } \frac{(y' - k') r'. \sin \varphi'}{(r'(1 - \cos \varphi') + y')} = C'$$

L'équation (6) devient:

$$(7) \quad R'. \sin x + B. \cos x = C'$$

$$\text{ou } (8) \quad R'. \sin (x + \gamma') = C'. \cos \gamma'$$

d'où par logarithmes $(x + \gamma')$, et

par suite (γ' étant calculé) x .

$$\text{Enfin: } q = QK. \text{tg } x = (d + c - k) \text{tg } x \quad (9).$$

L'on trouvera de même q' pour une autre valeur de m accrue de $0^{\text{mm}},5$ et les différences $(q' - q)$, $(q'' - q')$ etc. donneront les intervalles micrométriques des images successives. L'on voit, par ce qui précède, que ce calcul est long et complexe; je l'ai effectué

1) Scheffler P. O. I, p. 113.

pour les valeurs de m allant jusqu' à 3^{mm} , 5 et je n'en présente ici que les principaux résultats dans le tableau suivant :

m	φ	y	φ'	y'	x	q	$(q' - q)$
$0,5^{\text{mm}}$	$3^{\circ}25'2'',3$	$37,65088^{\text{mm}}$	$4^{\circ}40'6'',6$	19,47935	$0^{\circ}16'59'',5$	1,01869	1,01869
1	$7^{\circ}11'11'',7$	37,62688	$9^{\circ}21'37'',4$	19,3536	$0^{\circ}32'55'',4$	1,9739	0,9552
1,5	$10^{\circ}49'37'',2$	37,5772	$14^{\circ}6'0''$	19,1346	$0^{\circ}46'34'',8$	2,7927	0,8188
2	$14^{\circ}31'33'',7$	37,51328	$18^{\circ}55'17'',4$	18,8356	$0^{\circ}56'56'',6$	3,41418	0,62148
2,5	$18^{\circ}18'28'',2$	37,42656	$23^{\circ}50'52'',1$	18,4362	$1^{\circ}2'22'',3$	3,73972	0,32475
3	$22^{\circ}12'2'',3$	37,15864	$29^{\circ}2'38'',4$	17,8565	$0^{\circ}59'24'',6$	3,56212	-0,1776
3,5	$26^{\circ}14'22''$	35,35328	$34^{\circ}10'43'',3$	16,6196	$0^{\circ}28'20'',1$	1,6988	-1,8633

L'on voit donc que pour un œil » simplifié », l'intervalle des images va en diminuant de plus en plus pour les images marginales, et devient négatif pour un écart oculaire axial de 3^{mm} . Comparons maintenant les résultats du calcul et de deux expériences dans l'azimut horizontal. Avec six trous oculaires écartés de 1^{mm} chacun, nous aurions dû avoir pour les distances des images de part et d'autre de l'axe :

1^{mm} , 019, 2^{mm} , 793 et 3^{mm} , 74.

L'expérience a donné 0^{mm} , 9 2^{mm} , 4 et 3^{mm} , 4.

Dans l'autre expérience, avec trois trous écartés de 2^{mm} chacun,

Calcul: 1^{mm} , 974 et 3^{mm} , 562

Expérience: 1^{mm} , 5 et 3^{mm} , 1.

L'on voit donc, que pour mon œil et l'azimut horizontal, l'aberration est un peu plus grande que ne l'indiquerait le calcul d'après les données de l'œil » simplifié ». Je n'insiste pas autrement sur ces faibles différences pour en tirer la conséquence d'une plus grande courbure ou d'une plus grande réfringence des bords du cristallin. En effet les données de l'œil diffèrent individuellement dans une mesure inconnue, et, de plus, l'assimilation de l'œil simplifié à l'œil réel n'est pas assez exacte pour justifier une pareille conclusion. Le calcul démontre, que les rayons prin-

cipaux ne sont pas rigoureusement les plus efficaces ¹⁾ pour la formation des images; la position des points nodaux est loin d'être rigoureusement fixe; l'angle visuel intérieur et l'angle extérieur ne sont pas toujours identiques ²⁾. D'ailleurs il y a encore d'autres éléments d'incertitude dans les lectures ainsi faites: le jeu entre l'œil et l'écran qui influence la grandeur ³⁾ apparente des intervalles, la verticalité et la symétrie du plan oculaire, le jugement des fractions des divisions micrométriques avec des images éparpillées et d'une certaine largeur. Les données relativement aux distances, aux courbures, aux réfringences relatives sont encore aujourd'hui trop incertaines, pour permettre autre chose qu'une conclusion sur le sens des aberrations.

Description de l'appareil optique.

Bien que l'appareil optique, qui m'a servi à ces études, ait besoin d'un remaniement complet pour être rendu plus précis et plus commode, je le décris pourtant ici tel que les circonstances m'ont permis de le construire primitivement. Il se compose (fig. 6) pl. II d'une forte règle en bois, divisée et percée de deux rainures longitudinales ll (fig. 7) pl. II. La règle est supportée par un pied à hauteur variable, et trois pièces, ou coursiers en bois, glissent suivant sa longueur: 1) l'oculaire 2) le cadre objectif et 3) le micromètre. Chacune de ces pièces est percée d'une ouverture rectangulaire.

1. Oculaire.

Le cadre oculaire O supporte une plaque en tôle TT' qui peut glisser suivant sa hauteur ou être maintenue fixe à l'aide de deux vis v et v' fixées au cadre en bois (fig. 7). Cette plaque de tôle est découpée d'une ouverture rectangulaire, et sert à supporter une

1) P. O. Scheffler I. p. 137.

2) Ibid. p. 138.

3) Helmholtz P. O. p. 127.

autre plaque P en tôle, découpée également à jour et pouvant glisser horizontalement dans deux rainures r, r . Cette deuxième plaque P peut enfin en supporter une troisième Q , dessinée (fig. 7 bis) pl. II à part: celle-ci peut se déplacer verticalement dans deux rainures s, s ménagées à cet effet dans la plaque $P-P$. L'on aura à sa disposition plusieurs plaques Q de rechange, qui entreront dans les mêmes rainures, et qui pourront être orientées à l'aide des deux mouvements de coulisse vertical et horizontal. La plaque Q (fig. 7 bis) porte le tracé d'un triangle rectangle ABC dont les côtés AB et AC seront divisés en parties égales et pointés à l'épingle aux points de division. L'on aura ainsi une série de doubles ouvertures oculaires dont l'écart ira en croissant proportionnellement depuis O . Deux petites plaques (fig 7) p et p' glissant à coulisse permettent de régler la largeur de la fente horizontale f faisant corps avec la plaque $P-P$, et en même temps la hauteur des trous oculaires défilant devant cette fente f . L'on pourrait à volonté régler le diamètre des trous dans le sens horizontal par une disposition analogue, non figurée sur le dessin. Au lieu d'employer une plaque Q , percée d'ouvertures dont l'écart va en augmentant par sauts brusques, l'on pourrait avoir tous les écarts en série continue, si les côtés AC et AB du triangle étaient découpés en fines fentes percées à jour, qui en se déplaçant verticalement seraient coupées par la fente horizontale f ; l'on lirait l'écart des deux trous, à un moment donné, par la grandeur du déplacement de la plaque Q dans les rainures s, s . Dans ce but, l'un de ses côtés porterait des traits de division. D'autres plaques Q porteront des fentes ou des trous diversement espacés pour les expériences.

Le cadre oculaire porte deux queues (fig. 7) d'hironde $H-H$, qui permettent son glissement horizontal sur la règle AB , et une vis R fixée à une pièce de fer, qui peut l'arrêter et le fixer dans une position donnée. Du reste cette dernière disposition est commune aux deux cadres objectifs F et micrométrique M . Pour compléter la description du cadre oculaire, il ne me reste plus qu'à parler

de deux écrans latéraux en carton noir (non figurés sur le dessin), que l'on pourra enfoncer en arrière en les appuyant contre les rainures du toit t . Ces écrans empêcheront l'arrivée de la lumière latérale, qui générerait les observations. Quelques étoffes noires dont on se couvrira la tête au besoin, ou que l'on attachera aux divers cadres, permettront dans chaque cas de régler convenablement l'expérience. Une lentille L , qui peut être relevée et placée derrière la fente f ou rabattue à volonté, complète ces pièces diverses; son rôle sera expliqué dans la suite.

2. Cadre objectif.

Le cadre objectif, comme le cadre oculaire, consiste en une pièce en bois F glissant sur la règle AB et portant une ouverture rectangulaire. Un autre cadre en bois G , appliqué contre cette ouverture, porte un fil vertical très fin tendu à volonté à l'aide de vis. Sa verticalité peut être réglée à l'aide de deux autres vis latérales g et de petits fils à crochet qui les enveloppent. Un autre fil horizontal forme croix avec le fil vertical. Quand on voudra observer diverses fentes, dessins, écrans découpés en tôle, l'on se servira d'un autre cadre de rechange appliqué comme celui-ci derrière l'ouverture rectangulaire par des ressorts en acier a . Les pièces observées seront placées entre les deux cadres.

3. Micromètre.

Le micromètre (fig. 8) pl. II est une plaque de verre fin portant des traits de division en millimètres et en demi-millimètres. Audessus et audessous de ces traits s'en trouvent d'autres isolés et très fins, qui serviront de témoins du non dédoublement, le micromètre étant toujours placé à la distance de la vision distincte. La plaque micrométrique sera fixée entre un système de deux cadres M déjà décrit à propos de l'objectif; des ressorts d serviront à le maintenir. 1) L'on s'est déjà servi, dans une expérience, d'un micromètre

1) Des cartons noirs et opaques serviront au besoin à combler les vides laissés par l'ouverture rectangulaire.

cromètre formé de trous percés dans une plaque de laiton et fixé comme le micromètre en verre.

L'on voit au bout de l'appareil en *B* un miroir *U* supporté par des pièces, qui permettent d'en régler la hauteur et l'inclinaison. L'on peut ainsi réfléchir, dans le champ de la vision, la lumière diffusée par le ciel, un mur éclairé etc. Le soir, l'on emploie un cadre supplémentaire portant un verre mat et diffusant la lumière d'une lampe. Ce même cadre permettrait aussi l'emploi des verres de couleur. Pour ne pas fatiguer la vue par une lumière trop vive, et dans des lectures demandant une grande attention, il vaudra encore mieux (sauf le cas des couleurs à constater) couvrir entièrement le miroir d'un drap noir. Le fil objectif en argent et les traits sur verre, éclairés par la lumière latérale, paraissent alors blancs et argentés sur ce fond noir. — L'on voit fixée au miroir une petite plaque *p* percée d'une ouverture de 4^{mm} (*p*') environ et qui peut tourner autour d'une vis. Si l'on retourne le miroir et que l'on le place verticalement, l'on peut voir, à travers le trou *p*', les deux trous *t* *t*' de repaire de la plaque *Q* oculaire, et la ligne horizontale du micromètre perpendiculaire aux traits. En élevant on en rabaisant convenablement l'œil, l'on jugera si ces deux lignes se superposent sensiblement sur leur longueur. Elles seront alors parallèles, et le dédoublement des images dans l'azimut horizontal sera mesuré par des divisions micrométriques bien verticales — ce dont il est nécessaire de s'assurer.

L'on voit, par la description de cet appareil, qu'il n'est guère précis, mais, tel qu'il est, l'habitude de son maniement compense ses défauts dans une certaine mesure.

Vision à travers de petites ouvertures.

Je tiens d'abord à analyser critiquement les conditions de la vue à travers de petits trous. Imaginons, (fig. 9) pl. II pour le raisonnement, un écran *EE'* percé de deux trous *O* et *O'* et, pour simplifier, remplaçons l'œil par une surface réfringente placé en

EE'. Eclairons le champ de la vision par la lumière diffusée du ciel et regardant à travers les deux trous *O* et *O'*, avec l'œil droit, nous appercevons tout d'abord deux cercles éclairés, qui limitent le champ de la visibilité. Les champs coniques *FOG* et *F'O'G'* représentent tous les faisceaux pouvant converger (par ces points) sur la rétine.

Suivant Brewster, le champ, ou l'espace angulaire des points que l'œil entier et nu peut embrasser simultanément, comprend approximativement 120° dans le sens vertical et 150° dans le sens horizontal. Il y a encore sur ce point toute une étude à refaire, mais il est évident que pour un point isolé *O* de la cornée l'angle *FOG* est beaucoup plus petit¹⁾ que l'angle de Brewster, qui est l'angle enveloppe des faisceaux coniques construits sur tous les points de la surface convexe de la cornée. Les deux faisceaux coniques *OGF* et *O'G'F'* convergés par la cornée transparente, limités par la pupille, puis convergés par le cristallin, formeront deux cônes divergents et conjugués *HOS* et *TO'Q*; leur section par la rétine donnera les deux images sensiblement circulaires, que l'on aperçoit, et qui marquent les limites des deux champs. La grandeur et la position de ces cercles (vraies images des trous oculaires et des sections traversées de la cornée et du cristallin) varieront avec le diamètre des trous oculaires, avec leur écart, avec la réfringence de la cornée et du cristallin aux points traversés, avec le diamètre et la distance de la pupille et avec l'état d'adaptation de l'œil. En changeant l'écart oculaire ou l'adaptation de l'œil, l'on pourra voir facilement ces deux cercles (que j'appellerai „cercles limites“) s'entrecouper tantôt partiellement, se toucher tangentiellement,

1) L'on trouverait par expérience les éléments de l'angle *FOG*, si l'on pouvait mesurer avec quelque précision les distances *S'C'* et *S'Q*. La première se laisserait apprécier en déplaçant un fil éclairé le long de l'axe optique jusqu'au moment, où il commencerait à être visible. La distance *S'Q* s'obtiendrait par un déplacement latéral de ce même fil jusqu'à l'instant de sa disparition. Les déterminations ainsi faites manqueraient de précision.

ou se séparer tout à fait par un intervalle obscur — image de l'intervalle des deux trous. La réfringence du cristallin, changeant d'un moment à l'autre, modifie naturellement la position relative des deux sections, des champs conjugués, par la rétine; donc, ces deux cercles oscillent conséquemment tantôt pour s'écarter tantôt pour se rapprocher l'un de l'autre.

Tout point devra être compris dans l'un des deux champs coniques pour être vu, et être compris dans l'espace de leur intersection commune pour se peindre sur chacun des deux cercles limites. Dans ce dernier cas son image réelle devra nécessairement se former dans l'espace $RVKL$ de leur intersection commune conjuguée. Bouchons l'un des trous oculaires, le trou O de droite par exemple, ce sera toujours, quelle que soit l'adaptation, le cercle-limite vu à droite qui disparaîtra.

Donc on peut en conclure, avec certitude, que la rétine est toujours placée par rapport à ces cônes conjugués audelà du plan MM' de leur mutuelle pénétration. En effet, l'image étant toujours renversée sur la rétine, supposons que celle-ci soit placée suivant les sections I, II, III antérieurement au plan MM' — ce serait forcément le cercle limite de gauche qui disparaîtrait dès que l'on boucherait le trou de droite — or, cela n'arrive dans aucun cas. — Les cercles limites ne se superposent jamais dans l'expérience et sont toujours séparés au moins partiellement; l'on comprend donc, que leur empiètement partiel corresponde à une position relative de la rétine telle que IV, que leur tangence se produise pour une position V, et leur séparation complète pour une position VI de la rétine. Bien entendu la rétine reste toujours fixe, mais ce sont les points O et O' qui augmentent leur courbure ou leur réfringence quand les deux cercles limites s'écartent l'un de l'autre. Fixe-t-on au contraire des points très éloignés (ce qui tend à diminuer l'action réfringente des points O et O') et l'on voit aussitôt les deux cercles limites se rapprocher l'un de l'autre. Les surfaces de la cornée et du cristallin étant convexes, les cônes ou champs

qu'il faudra élever par la pensée sur chacun de leurs points, formeront un angle de plus en plus ouvert à mesure que l'on s'écartera de l'axe optique — de sorte qu'un point tel que S' s'éloignera de plus en plus de la cornée à mesure que OO' croîtra. Donc le point K, conjugué de S', s'en rapprochera au contraire et, toutes circonstances restant les mêmes, l'intervalle obscur TS augmentera. Cet intervalle variera donc pour une triple raison 1) celle de la variation de la position des sommets O et O' des cônes conjugués 2) de la variation de la distance KC' avec la distance S'C' et 3) de la variation de la réfringence aux points découverts. Pour fixer les idées par un exemple, je dirai qu'avec ma vue, dans son état normal et sans adaptation particulière, je vois ordinairement les deux cercles s'entrecouper partiellement avec des écarts oculaires allant jusqu'à 3^{mm} 5, Avec un oculaire de 3^{mm} 5, les deux cercles-limites sont ordinairement tangents au premier moment et s'entrecoupent ensuite dès que l'on cherche à fixer des points éloignés. Avec des oculaires de 4^{mm} et au delà 1) les cercles sont ordinairement entièrement séparés par un intervalle obscur, qui varie suivant l'effort d'adaptation à des points éloignés. Avec de l'habitude et quelques efforts, j'arrive encore à rapprocher les deux cercles jusqu'à la tangence et même l'empiètement partiel pour des écarts oculaires de 6^{mm} 3. Je n'ai jamais pu y réussir avec un oculaire de 7^{mm}; en fixant des points éloignés, l'intervalle obscur entre les deux cercles diminue, mais jamais assez pour s'annuler ou devenir négatif. A plus forte raison n'y ai je pas pu parvenir avec des écarts supérieurs.

Cet intervalle obscur entre les deux cercles indique, que la rétine est dans une position relative VI (fig 9) pl II. Or le lieu $RVKL$ de la formation des images doubles étant alors en avant de la rétine — l'on ne pourra dédoubler des points que par excès

1) L'on voit encore simultanément ces deux cercles limites avec des écarts de plus de 20 mm

de distance, ceux dont l'image coupe l'axe avant la rétine. Les points, placés audessous de la vision distincte, ne pourront pas être vus doubles. Cette observation donne la raison d'un fait, que l'on constate aisément quand on cherche à adapter l'œil à une petite distance: l'on s'y adapte facilement avec de faibles oculaires mais non avec le forts. Ainsi, par exemple, mon œil pouvait facilement s'adapter à une distance de 120^{mm} avec écarts oculaires ne dépassant pas 3^{mm}5. Il me fallait un certain effort pour y arriver et encore momentanément avec un oculaire de 4^{mm}3; je n'y arrivai pas avec des écarts supérieurs. Ce n'est pas que la réfringence relative de ces points soit inférieure à celle des points centraux du cristallin — mais il n'est pas étonnant qu'après le travail de diminution de la réfringence, effectué pour rapprocher les deux cercles limites (première condition pour voir un trait objectif rapproché), le trait ainsi vu soit dédoublé ensuite par défaut. — Il semblerait résulter d'un passage des Physiologies de M. Helmholtz ¹⁾ et de M. Scheffler ²⁾ que généralement les images doubles n'apparaissent que dans l'espace de l'intersection commune des deux cercles-limites, et qu'en dehors de cet espace les images sont toujours simples. Cette condition n'est pas du tout nécessaire, quand le point fixé est à une très grande distance et que l'œil est accomodé pour un point plus rapproché. Non seulement l'on peut alors voir les deux images apparaissant en dehors de l'intersection commune des cercles, mais l'on peut, avec de forts oculaires, voir un trait lumineux éloigné ou la pointe d'un paratonnerre se dessiner sur chacun des deux cercles, alors qu'ils sont complètement séparés par un intervalle obscur.

Vision à travers de petits trous.

Quelques observateurs ont voulu nier que les rayons marginaux puissent converger avant les rayons centraux. Ainsi Pouillet ³⁾ fonda

1) H. p. 138.

2) S. I, p. 418.

3) Pouillet. Physique II. p. 220.

autrefois sa théorie de l'accomodation sur la prédominance réfringente du centre du cristallin. Il expliqua la netteté de la vision des objets trop rapprochés à travers de petits trous par ce fait, que l'on réservait ainsi la partie de l'œil dont le foyer est le plus court et qui dévie encore assez l'image pour qu'elle vienne tomber sur la rétine.

Mr. Jamin ¹⁾ se rattache à l'opinion de Pouillet et arrive à la même conclusion, qui ne me semble pas du tout justifiée. Cette théorie est contredite par les expériences précédentes et ce fait que la netteté est sensiblement la même que le trou coïncide avec le bord ou le centre de la pupille — bien entendu sauf la déformation et l'éclat de l'image dus à l'obliquité: les faisceaux lumineux très minces donnent une impression à peu près nette, qu'ils coupent la rétine un peu avant ou un peu après leur point de convergence mathématique.

Si les contours des images des points trop rapprochés apparaissent plus nets à travers des trous ou des fentes minces, ils accusent d'autres particularités moins saillantes à l'œil nu. Quand le trou oculaire diminue, l'image de diffusion diminue en même temps et paraît de moins en moins éclairée. Ces différences provenant des variations du diamètre du trou s'accusent bien mieux pour les objets trop rapprochés que pour les objets trop éloignés. Le calcul démontre, en effet, que, dans le premier cas, les cercles de diffusion ²⁾ augmentent avec une rapidité beaucoup plus grande que dans le second. — Si l'on place un fil fin très près de l'écran oculaire, avec un trou de 0^{mm}5 par exemple, l'on voit que son image de diffusion est pâle et rayée parallèlement de franges fines, dont la distribution n'a rien de régulier. Ces franges s'expliquent par l'inégalité dans la variation de la réfringence et de la transparence

1) Jamin. Physique III. p. 790.

2) P. O. Helmholtz p. 137.

des milieux de l'œil ¹⁾. Une surface lumineuse, vue à travers une fente étroite, est aussi rayée de lignes fines et obscures parallèles à la fente. Pecllet regarde ces raies comme formées par l'ombre des points opaques de l'œil. — J'ai remarqué qu'à l'œil nu un fil très fin, trop rapproché, présentait des raies de diffusion moins écartées, qu'on en peut voir, au même instant, à travers deux trous suffisamment distants.

Influence de l'éclairément sur l'accomodation.

Cette différence tient moins à un changement possible de l'accomodation, qu'à l'éclairément des images. A l'œil nu, et sur un fond bien éclairé, les divers points du cristallin envoient de la lumière qui se superpose aux images noires du fil et les affaiblit assez à une certaine distance de l'axe optique, pour que la limite de la sensibilité soit dépassée. Alors l'impression de ces images disparaît noyée dans le fond éclairé, tandis que ces mêmes images du fil apparaissent nettes et noires, là ou on ne les apercevait pas auparavant, quand on isole seulement deux points oculaires. Cette présence ou cette absence des images multiples suivant l'éclairément d'un objet par rapport au champ, rend compte pourquoi l'œil sent d'autant plus le besoin de s'adapter à une distance, que l'objet est plus éclairé. L'accomodation aux objets peu éclairés n'a pas besoin d'être absolue. La flamme d'une bougie, vue à l'œil droit par exemple, ne présente pas des images latérales bien sensibles à la distance de notre vision distincte. A la distance de quelques mètres, et avec un peu d'attention, nous distinguons facilement des flammes multiples plus pâles entourant de part et d'autre la flamme vive centrale. En couvrant, au même moment, l'œil d'un oculaire un peu fort (5^{mm} 5 par exemple), l'on voit aussitôt deux flammes nettes et complètement séparées par un intervalle obscur. L'oculaire n'a fait qu'isoler deux points particuliers de

la cornée, et éliminé ainsi l'image centrale et les images des autres points de la cornée. Les deux images paraissent plus éclairées n'étant plus noyées. Les conséquences de cette expérience me paraissent très importantes pour la théorie de l'adaptation aux distances. Voici en effet une flamme de bougie que, dans le langage ordinaire, l'on aurait dit voir nettement dans les deux cas de la vision à 20 ou 30 centimètres et à 4 ou 5 mètres de distance — et pourtant l'on a acquis la preuve, dans le second cas, que l'image centrale était accompagnée d'images bien plus pâles formées par des faisceaux ayant convergé avant la rétine. Si au lieu d'une surface aussi éclairée que la flamme d'une bougie, observée sur un fond obscur, l'on voulait répéter cette même expérience avec une surface moins éclairée l'on finirait par ne plus distinguer les images latérales dans les mêmes circonstances où la flamme d'une bougie les présenterait avec beaucoup de netteté. L'on dirait que l'on voit nettement, alors que l'adaptation laisserait encore à désirer. Ce fait explique pourquoi dans un paysage les bords obscurs des objets se détachent avec tant de netteté sur le fond éclairé de l'horizon. Du reste le travail d'adaptation du cristallin à une distance donnée est bien plus facile dans le cas des points lumineux éloignés, que dans celui des points trop rapprochés. Le calcul des cercles de diffusion rend facilement compte des ces différences.

Vision des points inégalement distants.

Il est inexact de dire ¹⁾, que le foyer d'un point lumineux se fait rigoureusement sur la rétine pour tous les points au-delà d'une certaine distance limite. L'on ne peut voir simultanément avec une netteté rigoureuse deux points situés à des distances inégales. M. Helmholtz l'a déjà prouvé par plusieurs expériences²⁾. Il est aussi facile de le constater, avec l'appareil déjà décrit, en tendant

1) Scheffler P, O. I, 426.

1) Jamin Physique III. p. 793.

2) P. O. H. p. 121.

deux fils fins verticaux sur deux cadres différemment éloignés de l'écran oculaire : on les voit toujours dédoublés ou l'un ou l'autre ou tous les deux, suivant l'accommodation, pourvu que le fil soit assez fin et l'oculaire à deux trous assez fort. Ces différences sont naturellement (comme on l'a déjà remarqué) beaucoup plus grandes pour les distances trop rapprochées, que pour les distances trop éloignées.

S'il paraît en être autrement dans l'expérience classique de l'optomètre à deux fentes¹⁾ et d'une raie perpendiculaire vue simple, (pour les bonnes vues) à toute distance au-delà d'un punctum proximum — c'est le résultat d'une illusion. Au-delà de ce punctum proximum, l'adaptation est très facile et comme on ne peut fixer simultanément que des points peu distants sur la raie, que celle-ci est assez épaisse et de plus placée sur un fond trop éclairé — l'on croit ne voir qu'une raie simple à toute distance. Avec des fils verticaux diversement distants, la perception est simultanée, plus sensible et une interprétation vicieuse de cette expérience n'est pas possible.

Variations réfringentes du cristallin.

Il est très intéressant de suivre, avec l'appareil déjà décrit, les variations de la réfringence du cristallin. En fixant un fil fin objectif à travers un faible écart oculaire, l'on voit, presque à tout moment, les deux images s'écarter ou se rapprocher — preuve évidente du travail intérieur du cristallin. Avec quelque habitude, l'on peut régler les oscillations du cristallin dans des limites très étendues. Ainsi, avec quelques précautions faciles et de petits écarts oculaires de 1 à 2^{mm}, j'ai pu pousser l'élasticité de mon œil à ne pas dédoubler un trait ou un fil placé à moins de 0^{mètre},1 et plus de 0^m,50 de distance. Pour arriver à des adaptations aussi

extrêmes, l'on prendra la précaution de ne jamais brusquer les déplacements du trait observé. On vérifiera d'abord par l'épreuve connue si le trait est dédoublé par défaut ou par excès de distance. Pour cela l'on bouchera l'un des trous oculaires, celui de droite par exemple. Comme on l'a dit, ce sera toujours le cercle-limite vu à droite qui disparaîtra, mais en même temps l'image du fil vue à gauche si le fil ou le point observé forme son image au-delà de la rétine et au contraire l'image vue à droite si l'on observe un point tel que Q dont l'image q est en avant de la rétine IV (fig. 9) pl. II. Si un point U , compris dans les deux champs, est vu non dédoublé, c'est que son image se forme juste sur la rétine. Il suffit de considérer la fig. 9 pour trouver la raison de cette règle. Les points Q , U , P y forment leurs images en q , u , p si la rétine est en IV, le point U sera vu simple et UC sera la distance de la vision distincte au moment considéré. Le point Q donne deux images q_1 et q_2 sur la rétine. Il en est de même de P , de son image en p au-delà de la rétine IV et des deux images en p_1 et p_2 . Si le point est dédoublé, par défaut de distance, comme le point P (fig. 9), l'on guidera l'œil par un objet interposé dans le champ et encore plus rapproché que le trait objectif : la réfringence augmentera et les deux images du trait se rapprocheront successivement jusqu'à la coïncidence. C'est l'inverse dans le cas inverse. Quand le cristallin devient moins réfringent, l'écart des deux images d'un trait observé croît si celui-ci est dédoublé par défaut, et diminue s'il est dédoublé par excès de distance ; c'est l'inverse quand la réfringence du cristallin augmente.

Conditions optiques de l'appareil.

Pour compléter l'étude de l'appareil optique déjà décrit, j'étudierai encore les apparences présentées par les déplacements horizontaux et latéraux 1) du micromètre 2) du fil objectif 3) de l'écran oculaire.

1) Physique. Daguin IV. p 318.

1) Un déplacement latéral du micromètre, fixé à la distance de la vision distincte, produira évidemment l'apparence d'un déplacement dans le même sens des traits micrométriques. La rétine étant sensiblement plane pour de petits angles visuels, les traits équidistants sur le plan du micromètre, le seront approximativement sur la rétine,

2) un déplacement latéral du fil objectif, vu à travers un écran à deux trous, produira l'apparence d'un double fil se mouvant dans le sens même du déplacement: ceci est indépendant de l'adaptation de l'œil audessous ou audelà de la vision distincte comme la fig. 9 le fait voir aisément.

3) Le déplacement latéral de l'écran seul, le fil et l'œil restant immobiles, produira les changements d'écart entre les deux images du fil, qui ont déjà été étudiés. L'on voit immédiatement sur la figure pourquoi un déplacement latéral de l'écran produit la sensation d'un déplacement inverse des deux images du fil si l'adaptation est insuffisante, et l'apparence d'un déplacement dans le même sens si elle est exagérée. Pour étudier l'aberration dans ce second cas, l'on a déjà employé des écrans à trous multiples et une lumière placée à plusieurs mètres de distance. L'appareil optique permet de réaliser très facilement ces dispositions: elles ne sont pas, il est vrai, à l'abri de tout reproche, puisqu'il faut y faire intervenir une lentille, dont l'aberration de sphéricité s'ajoute aux aberrations de l'œil. L'influence de cette aberration additionnelle est sans doute très faible pour de grandes lentilles à long foyer et pour des faisceaux écartés de quelques millimètres de l'axe.

Une bonne vue compense, avec une trop grande facilité, les différences résultant de la convergence des faisceaux en avant de la rétine: les raisons en sont déjà connues. Donc en éloignant un fil à l'extrémité de l'appareil, l'on n'obtiendrait que des images confuses et peu écartées. L'on évite ces inconvénients en employant une lentille bi-convexe, placée très pres et en arrière de l'écran ocu-

laire (fig. 6) pl. II. Les traits micrométriques sur verre ¹⁾ seront placés entre la lentille et le fil objectif, à une distance telle de la lentille que les traits soient vus bien nets agrandis et non dédoublés. Cette distance n dépend du foyer f de la lentille, de la distance d de la vision distincte et de la distance δ entre la lentille et l'œil. L'on a approximativement ²⁾.

$$n = \frac{(d - \delta) f}{(d - \delta + f)}$$

Connaissant, n , δ et f , l'on pourra calculer et en conclure dans un cas déterminé, la distance d de la vision distincte. — Le fil objectif, placé audelà du foyer, forme un faisceau convergent rendu encore plus convergent par la cornée et le cristallin: l'image du fil se forme en avant de la rétine. En employant les écrans multiples à trous oculaires équidistants, l'on constate que l'expérience donne (fig. 4) pl. I. l'intervalle (3—4) plus grand que (2—3), lui-même plus grand que (1—2). Nous en concluons (la rétine étant en R') que les faisceaux marginaux convergent avant les faisceaux centraux. L'éclaircissement (en plein jour) du fil objectif se faisait latéralement comme dans les observations audessous de la vision distincte. Le miroir était recouvert d'un papier noir: les images du fil et des traits apparaissaient blancs sur ce fond noir. La lentille employée avait sensiblement sept centimètres de foyer, et était placée à 20^{mm} de l'oculaire. Je cite un exemple à titre de renseignement: l'on peut avec un oculaire multiple de sept trous écartés de millimètre en millimètre, distinguer encore les images extrêmes. Les intervalles des images (dans l'azimut horizontal) vont en croissant du milieu aux extrémités (fig. 10) pl. I. Distance du micromètre à l'oculaire = 74^{mm}. Distance du fil objectif à l'ocu-

1) L'on n'a pu employer ce micromètre sur verre, dans les expériences audessous de la vision distincte, parceque ses traits ne peuvent alors s'illuminer suffisamment par une lumière latérale.

2) Desains, Physique II, p. 276.

laire = 121^{mm}. Les intervalles (3—4) et (4—5) valent la moitié d'une division. Ceux de (2—3) et de (5—6) chacun 0,6 div. Enfin, les intervalles extrêmes (1—2) et (6—7) — chacun 0,7 div. Chaque division micrométrique valait 1 millimètre et était placée à une distance de 74 millimètres.

Je termine ici cette première partie des études pour passer à quelques indications sur le chromatisme de l'œil.

II.

Chromatisme de l'œil.

Plusieurs expériences ont déjà démontré, que l'œil n'est pas achromatique en ce sens, qu'il exige une accommodation différente pour différentes couleurs. L'on ne peut voir simultanément toute l'étendue du spectre avec la même netteté: l'une des couleurs paraît toujours dilatée pas un défaut de l'accommodation. Fraunhofer a fixé l'étendue de ces différences pour les couleurs de diverse réfrangibilité en cherchant la distance de leur vision distincte. Matthiessen évalue la distance du foyer rouge au foyer violet, dans l'œil humain, à une longueur de 0^{mm},58 à 0^{mm},62. Elle serait ainsi plus forte, que dans un œil d'eau distillée (0^{mm},434)¹⁾. Les verres bleus de cobalt, qui ne laissent passer sensiblement que les rayons rouges et violets, permettent de constater le chromatisme de l'œil par des expériences très nombreuses. Ainsi, un point lumineux, recouvert de ce verre, présente l'aspect d'un point rouge entouré d'une auréole violette ou d'un point violet entouré d'une auréole rouge — suivant que l'œil est accommodé pour les rayons rouges ou violets. M. Le Roux regarde le soleil à travers un petit trou en interposant un verre bleu: l'on ne voit qu'une image si le rayon pénètre par le centre de la pupille, et deux images s'il est

1) P. O. Helmholtz, p. 174.

excentrique. Avec la lumière blanche, ces phénomènes de dispersion sont beaucoup moins sensibles. M. Muller regarde un champ blanc sur un fond noir en fixant son regard nettement au-delà du plan de ce champ: il le voit bordé de couleurs bleu et jaune principalement — le bleu en dedans. Le bleu est au contraire en dehors, quand on s'arrange de manière à voir nettement les objets plus rapprochés que le champ; je ne puis réussir l'expérience dans ce second cas sans faire intervenir une lentille biconvexe auxiliaire, qui produit le même effet que si l'œil s'était adapté au-delà du champ. Mais les lisérés, ainsi observés, sont toujours sales et peu nets; — la difficulté de leur observation, pour les objets éclairés en blanc, a ouvert jusqu'à ces derniers temps une large carrière aux théories les plus diverses. En effet, comment concilier le chromatisme de l'œil, évident dans certaines expériences, avec son achromatisme à peu près complet pour la lumière blanche. M. Jamin dit ¹⁾ que, sous ce rapport, nous manquons encore de renseignements. M. Scheffler suppose ²⁾ que le cristallin et l'humeur vitrée sont comparables au crown et au flint de nos systèmes achromatiques, et il trouve que la condition de l'achromatisme, pour l'œil simplifié, est exprimée par:

$$\frac{\delta_1}{n_1} = 1,64. \frac{\delta}{n}$$

ou n et n_1 sont les indices de l'humeur vitrée et du cristallin pour la lumière rouge, et $(n + \delta)$, $(n_1 + \delta_1)$ les indices correspondants pour la lumière violette. M. Scheffler admet de plus: que l'œil n'est achromatique, que pour une certaine distance moyenne de la vision distincte; que la dispersion des milieux de l'œil varie avec l'accommodation — de telle sorte que les rayons rouges convergent tantôt avant tantôt après les violets ³⁾; que, dans l'accommodation pour

1) Jamin Physique III., p. 791.

2) Scheffler P. O. I., p. 115.

3) S. P. O. I. p. 95, p. 155, et 394.

les objets très rapprochés, il se produit un allongement (?) de l'axe oculaire, donc une augmentation de volume de l'espace occupé par l'humeur vitrée: cette diminution de sa densité correspondrait à un accroissement de son pouvoir dispersif. Cette théorie bizarre manque de tout appui expérimental, et me paraît en somme plus que contestable.

M. Helmholtz calcule, d'après les données de Listing et pour un œil d'eau distillée, les cercles de diffusion résultant de l'inégalité de convergence des rayons rouges et violets. 1) „Le diamètre des cercles de diffusion produits par la dispersion serait aussi grand que celui que donne dans un œil accommodé pour une distance infinie un point lumineux placé à 1^m5 de distance. Une telle aberration de l'accommodation suffit lorsqu'on regarde des objets délicats pour causer une confusion très sensible de l'image. Pour expliquer, comment, à grandeur égale des cercles de diffusion, la dispersion de la lumière blanche dans l'œil ne produit pas une confusion sensible de l'image, il faut tenir compte de la distribution de la lumière à la surface des cercles de diffusion.“ M. Helmholtz calcule l'intensité de l'éclairement pour différents points d'une surface blanche éclairée. Une accommodation inexacte produit, sur les bords d'une surface monochromatique, un décroissement sensiblement uniforme de l'intensité lumineuse. Les cercles de diffusion, provenant de la dispersion, accusent au contraire un décroissement brusque de l'éclairement sur les bords d'une surface blanche. Dans ce dernier cas, l'aberration chromatique de l'œil porte peu de préjudice à la netteté de la vision. Je tiens pourtant à démontrer, qu'avec certaines dispositions expérimentales, cette aberration produit, pour les objets blancs, des images colorées autrement brillantes que l'expérience de M. Müller. Avant de passer à la description de ces effets, je veux rappeler encore quelques faits connus. L'on sait, que quand observe (fig 11) pl I à travers un prisme une surface blanche éclairée l'on voit un

1) P. O. Helmholtz p. 179.

spectre dévié ($v-r$) dont le violet se trouve du côté du sommet du prisme et le rouge du côté de la base. L'on doit considérer tous les éléments lineaires de la bande comme formant autant de spectres. Ces spectres se superposent, à une certaine distance des bords, et il y a en chaque point toutes les couleurs superposées — ce qui produit du blanc. Mais près du bord qui se trouve du côté du sommet, le premier spectre n'est recouvert qu'en partie par les suivants. De sorte que l'on a d'abord du violet pur, puis le violet du spectre suivant mêlé avec l'indigo du premier etc. jusqu' au point où commence le blanc. Au bord opposé l'on a du rouge, puis du rouge mêlé à l'orangé etc. Si la bande n'est pas suffisamment large, la partie blanche pourra ne pas exister et la bande sera colorée dans toute son étendue. Si la bande est noire sur un fond blanc, c'est le fond qui donne les couleurs, et elles sont évidemment en ordre inverse. Isolons maintenant par la pensée deux points O et O' du cristallin (fig. 12) pl. I ils agiront comme deux prismes dont les bases se toucheraient en C . Admettons que l'image d'une fente blanche éclairée aille se former dans le plan MM' pour la couleur moyenne. Les rayons violets iront converger en b plus près du cristallin que les rayons rouges 1). Si la fente objective (1—2) est audessous de la distance de la vision distincte, la rétine coupera les faisceaux en R ou R_1 avant le plan MM' d'intersection et l'on verra (comme dans l'expérience de Müller) l'image bordée de jaune en dehors. Les autres couleurs se superposent comme dans l'expérience déjà analysée du prisme. L'image de la fente éclairée serait bordée de bleu si elle était placée audelà de la vision distincte.

Une des principales conditions de l'achromatisme de l'œil, intervenant par toute sa surface, est précisément cette compensation achromatique des lisérés inversement disposés pour deux

1) Une ancienne expérience de Charles le démontre pour les lentilles non achromatiques.

points symétriques du cristallin. Il est probable, que le cristallin est dans un état perpétuel d'oscillations de courbure et de densité; ces oscillations, se produisant en sens inverse autour d'un état moyen ¹⁾, font que l'image d'un point éclairé, sans cesser d'être sensiblement nette (à cause de la petitesse de l'amplitude), se forme généralement tantôt un peu en avant, tantôt un peu en arrière de la rétine: l'interversion de ces lisérés coïncidant avec ces oscillations produit le blanc. Celles-ci ne peuvent se produire quand l'on fixe une couleur particulière, ou bien un point à une distance donnée: alors apparaissent les couleurs étudiées par M. M. Müller, Weathstone etc. Dès que l'image est trop au-delà ou trop en avant de la rétine, il n'y a plus de compensation des lisérés possible, et les images paraissent colorées. Une très ancienne expérience donne la preuve de cette compensation achromatique des points situés symétriquement de part et d'autre de l'axe optique. Que l'on fixe, à une distance quelconque, la flamme d'une bougie (par ex.) en couvrant une moitié du cristallin, et immédiatement (avant que l'œil ait eu le temps de subir une modification quelconque) apparaissent des lisérés très vifs; quelle que soit l'adaptation de l'œil, c'est toujours le bleu à droite et le rouge à gauche que l'on aperçoit, en couvrant la moitié gauche du cristallin — et inversement. Ces apparences sont encore renversées dans les deux cas si, au lieu d'une fente éclairée, l'on observe une bande sombre sur un fond clair. En changeant à plusieurs reprises les conditions de la vue, tantôt simple tantôt couverte d'un écran, l'on acquiert la certitude qu'au moment de la vision nue et achromatique ces mêmes lisérés existaient sur la rétine mais y étaient compensés par les lisérés de l'autre moitié symétrique du cristallin: ils apparaissent dès que l'on masque celle-ci. Quand on déplace un petit trou unique en avant de la pupille, l'on obtient absolument les mêmes

1) L'on se représentera ces oscillations en donnant au plan MM' de la rétine un mouvement de va et vient par rapport aux faisceaux.

effets, que pendant le déplacement de l'écran. La position des lisérés ne varie pas, que l'œil soit accommodé au-dessous ou au-delà de la vision distincte; avec deux trous oculaires O et O' (fig. 12) pl. I. les lisérés sont au contraire toujours intervertis avec le sens de l'accommodation. D'où vient cette différence dans la vision à travers un trou O , et à travers deux trous O et O' ?

La réponse à cette question est donnée par la fig. 12. Avec deux trous oculaires, l'on voit le second point O' symétrique de O intervenir et produire dans la position R' de la rétine des lisérés colorés inverses de ceux de la rétine en R . En supprimant au contraire un des trous O' par exemple (expérience de l'écran ou celle d'un trou unique) et le faisceau correspondant, les lisérés colorés sont toujours identiques sur la rétine en R ou en R' — c'est à dire malgré le changement de l'accommodation. M. Scheffler explique ¹⁾ les lisérés, apparaissant pendant le déplacement de l'écran, par une prétendue asymétrie du cristallin (dans un même plan méridien) produite pendant l'accommodation: la rapidité avec laquelle l'on aperçoit ces lisérés, sans aucun effort du cristallin, et leur explication naturelle, par les principes déjà prouvés sur nos lentilles ordinaires, rendent cette hypothèse d'asymétrie complètement improbable. Il en est de même d'une autre explication de M. Scheffler ²⁾ relative au déplacement apparent des objets pendant le mouvement de l'écran. Ce déplacement ne se produit pas toujours dans le sens même du mouvement, comme l'affirme M. Scheffler, et la figure 12 explique pourquoi l'on voit ce déplacement se faire en sens inverse quand l'image de l'objet est derrière la rétine ³⁾. L'observation des fentes, bandes noires, dessins à jour etc. à travers des oculaires à un ou à deux trous présente beaucoup d'intérêt, et des couleurs autrement riches, que le déplacement de l'écran ou l'expé-

1) P. O. S. II, p. 73—74.

2) P. O. S. I, p. 433.

3) H. P. O., p. 126.

rience de M. Müller. C'est le résultat de cette méthode expérimentale, que j'exposerai dans la suite de ces études. Je crois en effet qu'il est important de démontrer, que toutes les conséquences de l'aberration chromatique se vérifient sur l'œil humain même pour la lumière blanche, et que ces effets peuvent donner lieu à des colorations d'une grande netteté: le chromatisme de l'œil ne pourra plus être contesté, et l'assimilation du cristallin à une lentille non achromatique sera ainsi complet.

J'emploie l'appareil optique (fig. 6) pl. II déjà précédemment décrit: l'on fixera sur le cadre objectif les divers dessins, que l'on veut examiner. Le cadre micrométrique est supprimé; le champ est éclairé par la lumière blanche des nuées, qui se réfléchit sur le miroir; l'écran oculaire avec sa série de trous est conservé comme dans les expériences sur les aberrations. L'on adaptera l'œil au-delà ou, au-dessous de la distance du cadre objectif, en rapprochant suffisamment ce cadre dans le premier cas, et en interposant une lentille bi-convexe dans le second. Pour abrégér la description de ces phénomènes chromatiques, j'appelle r la distance du cadre objectif et d la distance de la vision distincte, „première limite“ la position extrême (fig. 13) pl. I du déplacement de l'œil vers la gauche de l'oculaire, et deuxième limite (fig. 14) pl. I la position inverse. Quand on transporte le centre optique de l'œil latéralement, par rapport à l'écran oculaire fixe, l'on voit le cercle-limite¹⁾ se transporter en sens inverse. Cela devait être puisqu'alors le cône du champ se transporte également en sens inverse du mouvement de l'œil, en embrassant ainsi un nouvel espace angulaire. Donc si nous observons par exemple une bande AB (fig. 15) p. I. à travers un point unique et si nous transportons l'œil latéralement, l'image AB coupera successivement le cercle en $A'B'$ ou en $A''B''$. Donc en déplaçant l'œil de droite à gauche, le

cercle du champ se mouvra de gauche à droite, et l'image de la bande finira par disparaître, en présentant au-delà de la première limite l'apparence d'un secteur $A''CB''$ — son bord droit reste rectiligne, tandis que son bord gauche est limité par le cercle du champ. Au-delà de la „deuxième limite“, la bande se présentera coupée à droite par le cercle du champ. Cela se produira indépendamment de l'état de l'adaptation de l'œil, et quelle que soit r .

Oculaire à un seul trou.

Que l'on examine d'abord, à travers un oculaire à un seul trou, une fente éclairée fig. (16) pl. I, une bande opaque déliée fig. (17), un écran indéfini (fig. 18), un autre écran indéfini (fig. 19) différemment orienté, enfin fig. (20) les combinaisons analogues des fentes éclairées avec les bandes opaques. L'on constate d'abord, que lorsque le centre de la pupille coïncide avec le trou oculaire, la fente, la bande et les écrans indéfinis se peindront sur le cercle du champ sensiblement sans colorations ni lisérés. Les lisérés de l'expérience de M. Müller ne sont pas sensibles car les cercles de diffusion sont limités par la fine ouverture. A la première limite: le bord droit de la fente sera bleu, de la bande opaque — jaune¹⁾, le bord de l'écran fig. (18) — jaune, de l'écran fig. (19) — bleu. Les lisérés de l'écran fig. (20), ou d'autres dessins que l'on peut imaginer, résulteront de la combinaison de ces cas simples et se laisseront toujours prévoir. A la deuxième limite toutes les couleurs seront renversées; c'est à dire, que l'on appercevra du bleu là où l'on voyait du jaune à la première limite — et inversement. L'on aura les mêmes apparences au-dessous et au-dessus de la vision distincte, et l'intervention de la lentille ne produira aucun changement. La flamme d'une bougie donnera les apparences d'une

1) C'est l'image de diffusion du trou oculaire — voir la première partie du mémoire.

1) Dans toutes ces expériences le jaune (maximum lumineux du spectre) sera généralement plus apparent que le rouge, qu'il remplace.

fente éclairée, que l'on la regarde à travers un trou, ou que l'on avance un écran en avant de la pupille. L'on vient de constater, que la coloration des objets symétriquement placés est minima quand le trou oculaire coïncide avec le centre de la pupille; il y a alors, en effet, compensation des lisérés de part et d'autre, de plus fig. (12) la déviation des rayons rouges et violets est minima car les intervalles tels que $1'_j$, 1_b , $2'_j$, $2'_b$ etc. augmentent avec l'excentricité $O'C$ du trou, et sont nuls au centre — quelle que soit la position de la rétine R . Au centre l'éclat de l'image est maximum et les faisceaux sont le moins affaiblis: les faibles couleurs pouvant résulter de la dispersion seront donc encore noyés par cette lumière trop forte.

Oculaire à deux trous.

En opérant avec deux trous oculaires, l'on aura séparément pour chacune des images correspondantes une succession d'apparences analogues, mais rehaussées par le contraste des couleurs. L'image vue à gauche est formée par le trou de droite quand r est plus petit que d , et par le trou de gauche dans le cas contraire. L'image vue à droite répond au trou oculaire de gauche dans le premier cas, au trou de droite dans le second. Suivant la distance des trous oculaires, les images de droite et de gauche coïncideront à différents moments de leur phase. — Dans la position moyenne de l'œil les deux trous O et O' fig. (12) pl. I sont symétriquement placés: leurs excentricités sont égales; donc, les deux images ont une intensité lumineuse égale et des colorations identiques: aucune d'elles ne prédomine et les couleurs ne s'avivent pas par l'effet du contraste. Aussi le fond des deux images paraît alors généralement terne et sans teinte bien tranchée. Pendant le déplacement de l'œil l'un des trous devient plus excéntrique: la déviation des rayons extrêmes augmente, l'éclat de l'image s'affaiblit et son fond prend une teinte de plus en plus apparente. Par contre, l'autre trou oculaire s'approche alors du centre: les li-

serés de l'image correspondante s'affaiblissent; son éclat augmente et le contraste des couleurs des deux images produit des teintes plates d'une grande beauté. Dans le cas où les deux images ¹⁾ empiètent partiellement l'une sur l'autre, l'espace de leur intersection commune est blanc et plus éclairé dans le cas d'une fente lumineuse objective, et complètement noir dans le cas d'une bande opaque et étroite: la lumière y arrive par les deux trous dans le premier cas — elle n'y arrive par aucun dans le second. — Pour simplifier la description de ces observations chromatiques, je me place dans le cas de la séparation complète des deux images ²⁾ et je commence par une fente éclairée verticale. Dans le déplacement successif et horizontal de l'œil, l'on partira toujours de la position extrême du déplacement de l'œil à gauche (fig. 13) pl. I pour avancer de la première limite vers la deuxième. La vision commencera donc par un seul trou oculaire, celui de gauche O fig. (12) pl. I. Le tableau suivant donne le parallèle des deux images de gauche et de droite, dans la succession de leurs phases pendant le déplacement.

1) La rétine est alors en R_1 ou en R' .

2) L'on y arrive toujours par trois moyens 1) en diminuant r quand $r < d$ et en l'augmentant quand $r > d$. 2) en employant des trous oculaires plus écartés 3) en diminuant la largeur de la bande ou de la fente objectives.

Fente éclairée.

$$r < d$$

Image vue à gauche correspondante au trou de droite.	Image vue à droite correspondante au trou de gauche.
<p>1) Cette image n'existe pas à la première limite.</p> <p>2) L'image apparaît dès que le trou de droite O' rase le bord droit de la pupille — les lisérés doivent être: bleu à droite et jaune à gauche. Au milieu le vert domine, et il n'y a pas de blanc, si la fente est assez étroite. — Au moment de son apparition et de son entrée dans le champ, l'image est coupée à sa gauche par le cercle-limite de droite (L'étude déjà faite me dispense de revenir sur les explications). L'image commence par paraître vert-sombre et projette par contraste une teinte rose sur l'image de droite; il en devait être ainsi, car à ce moment elle est formée par le faible faisceau marginal qui traverse le trou O' et qui se projette sur un fond noir complètement privé de la lumière de l'oculaire O.</p> <p>3) Le trou de droite s'approche du centre — donc</p>	<p>1) Elle apparaît d'abord coupée à sa gauche par le cercle-limite de gauche — le rouge-jaunâtre est à la gauche et le bleu vif à la droite.</p> <p>2) Le trou de gauche s'approche de plus en plus du centre de la pupille: affaiblissement successif des lisérés colorés. Au centre de la pupille l'image paraît sensiblement incolore, quand on supprime l'image vue à gauche en bouchant le trou correspondant. Sans cette précaution, l'image vert-sombre de celle-ci projette aussi sur celle-là une teinte rose très apparente.</p> <p>3) L'oculaire O s'écarte du centre de la pupille après l'avoir dépassé — le jaune est à droite, le bleu à gauche, et ces lisérés s'accusent surtout à la limite de la disparition de l'image, qui sort du champ coupée à sa droite par le cercle-limite de droite. L'image devient de plus en plus sombre pendant cette phase.</p> <p>4) L'image disparaît.</p>

l'éclairement de l'image (1'—2') fig. (12) augmente. En même temps les lisérés s'affaiblissent pour disparaître sensiblement au centre de la pupille. Alors la teinte isolée de l'image est blanche et vue simultanément avec l'image de droite, elle en acquiert une teinte complémentaire.

4) Le trou de droite a dépassé le centre de la pupille — les lisérés inverses s'accusent de plus en plus jusqu'à la deuxième limite.

Audela de ce déplacement, l'image disparaît coupée, à sa droite, par le cercle - limite de droite.

Deuxième cas fente éclairée $r > d$.

Quand on fait intervenir la lentille, c'est absolument comme si l'écran objectif était placé audela de la distance de la vision distincte. L'on n'a maintenant qu'à attribuer à l'image de droite la suite des apparences qui vient de l'être à l'image de gauche, et à l'image de gauche la succession correspondante à l'image de droite, quand r était plus petit que d . Cette interversion des effets arrivera pour tous les dessins observés audessous et audela de la vision distincte.

Bande opaque étroite sur fond éclairé.

Une bande opaque étroite peut donner deux images complètement séparées entre elles par un intervalle éclairé blanc; quand ces images se superposent partiellement, leur superposition donne

du noir d'intensité sensiblement invariable pendant le déplacement de l'œil — sauf quand une image est près de disparaître. Les images ne sont pas absolument obscures attendu que chacune d'elles reçoit de la lumière venant de l'autre oculaire. Le tableau suivant comprend les deux cas de r plus petit et de r plus grand que d .

Oculaire de gauche formant l'image vue à droite si $r < d$ et l'image vue à gauche si $r > d$.	Oculaire de droite formant l'image vue à gauche si $r < d$ et l'image vue à droite si $r > d$.
<p>1) L'image apparaît coupée à sa gauche par le cercle-limite de gauche. Elle est sombre et bordée de jaune à droite, de bleu à gauche.</p> <p>2) Le trou de gauche approche du centre de la pupille — augmentation d'éclat et affaiblissement des lisérés. L'image ordinairement vert-sombre pâlit dès que le trou de droite commence à raser le bord de la pupille.</p> <p>C'est qu'il arrive alors, par le trou de droite, de la lumière qui se superpose à l'image de la bande opaque.</p> <p>3) Le trou de gauche s'écarte du centre, après l'avoir dépassé — les lisérés sont intervertis et s'accusent de plus en plus: le bleu à droite, le jaune à gauche.</p>	<p>1) L'image n'existe pas.</p> <p>2) Elle apparaît dès que le trou de droite rase le bord droit de la pupille: elle est très pâle parceque le faisceau lumineux envoyé par l'oculaire de gauche prédomine à ce moment. Pour cette même raison, les lisérés sont insensibles et l'ensemble de l'image paraît ordinairement rose pâle par contraste avec la couleur vert-sombre de l'autre image.</p> <p>A mesure que l'autre image pâlit, celle-ci devient plus noire.</p> <p>3) Quand l'oculaire droit passe par le centre de la pupille, les lisérés son insensibles. Quand le trou de gauche s'approche du bord gauche de la pupille, il y a moins de lumière envoyée et l'image devient plus noire.</p>

Le fond noir de la bande opaque pâlit et s'éclaire de plus en plus à mesure que le trou de droite envoie plus de lumière. L'image finit par disparaître tellement noyée dans cette lumière, que l'on ne distingue plus les lisérés qui doivent pourtant être plus vifs à ce moment: avant de disparaître, elle est coupée, de son côté gauche, par le cercle-limite de gauche.

4) L'oculaire droit a dépassé le centre de la pupille. — Les lisérés bleu à droite et jaune à gauche s'accusent de plus en plus, et deviennent très vifs à la deuxième limite. L'image disparaît enfin, coupée, à sa droite, par le cercle-limite de droite.

L'on remarque que toutes les colorations et tous les lisérés sont renversés dans les positions correspondantes pour une bande opaque et une fente éclairée. Le raisonnement et la fig. (12) pouvaient le faire prévoir.

Resterait encore l'examen des écrans indéfinis fig. (18) et fig. (19) pl. I, mais je ne décrirai pas les phénomènes chromatiques qu'ils présentent: les mêmes principes permettent d'en prévoir les résultats, qu'il serait très fastidieux de présenter en détail.

L'on remarquera seulement que les écrans indéfinis peuvent être assimilés, par le raisonnement à des fentes éclairées dont l'un des bords s'écarte à l'infini.

Il faudra donc revenir à la figure théorique (12) et imaginer, que l'un des bords 1 ou 2 s'écarte à l'infini. Dans la position moyenne de l'œil il y aura donc toujours superposition partielle des deux images, qui ne seront limitées que d'un seul côté, et ne seront visibles que par un seul bord.

L'on se laissera guider par les mêmes principes pour l'explication des couleurs, que présenteront divers dessins à jour souvent avec de très beaux effets.

Il est évident, que cette méthode d'observation du chromatisme de l'œil n'a fait qu'isoler certains points du cristallin, qui dans la vision à l'œil nu produisent isolément des phénomènes identiques. L'achromatisme à peu près parfait de l'œil nu, pour la lumière blanche, tient donc aux conditions de l'éclairement et de la compensation qui sont alors différentes. Les objets généralement vus ne sont presque jamais dans les conditions de la bande obscure sur un fond complètement éclairé, ni de la fente éclairée sur un fond tout-à-fait noir; il faudra donc généralement superposer ces deux effets chromatiques pour les objets plus ou moins éclairés par rapport au champ, et cette superposition est favorable à l'achromatisme puisque les lisérés sont toujours inversement disposés pour la bande opaque et la fente éclairée. Les oscillations réfringentes du cristallin autour d'un état moyen et l'inversion des lisérés qui les accompagnent, l'affaiblissement successif des faisceaux excentriques qui sont les plus dispersifs, enfin les conditions de l'éclairement des cercles de diffusion chromatique, étudiées par M. Helmholtz, expliquent pourquoi la vue est si peu troublée par l'aberration chromatique. Par contre, les expériences précédentes démontrent, que le sens de cette aberration est le même pour le cristallin et nos lentilles, et que, sous ce rapport, toutes les prévisions de la théorie sont justifiées.

T h e s e n .

1. Licht und strahlende Wärme sind identische Erscheinungen.
 2. Die Hypothese von Helmholtz über die Corti'schen Fasern, als Grundlage der Klangfarbe, ist unwahrscheinlich.
 3. Die Wissenschaften antworten auf die Frage: „Wie?“, nicht aber auf die Frage: „Warum?“
 4. Die Hypothese über „Generatio spontanea“ hat keine Grundlage in den bis jetzt gemachten micrographischen Untersuchungen.
 5. Die alchemistische Idee ist weder bewiesen noch widerlegt.
 6. Es sind Methoden vorhanden in der Chemie und der Physik zur Entscheidung der Frage „wie und in welcher Proportion sich die Basen und die Säuren in einer Mischung von zwei Salzen gruppirt haben im Falle, wo sich nichts Unlösliches ausscheidet.“
 7. Die Einheit aller Kräfte der Natur ist noch keine wissenschaftliche Behauptung.
-

Fig. 1.

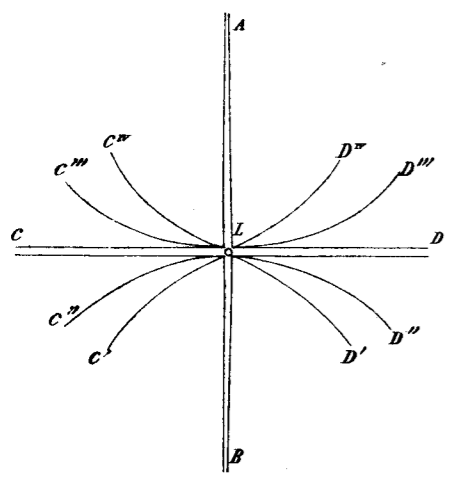


Fig. 2.

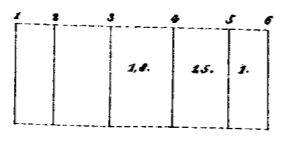


Fig. 3.

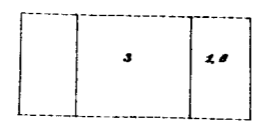


Fig. 4.

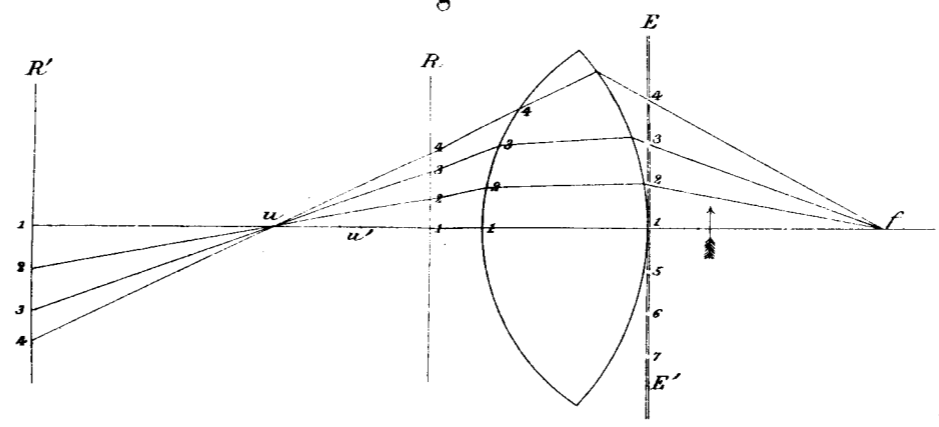


Fig. 10.

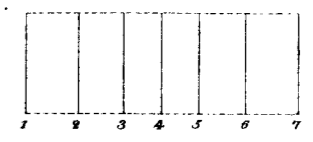


Fig. 5.

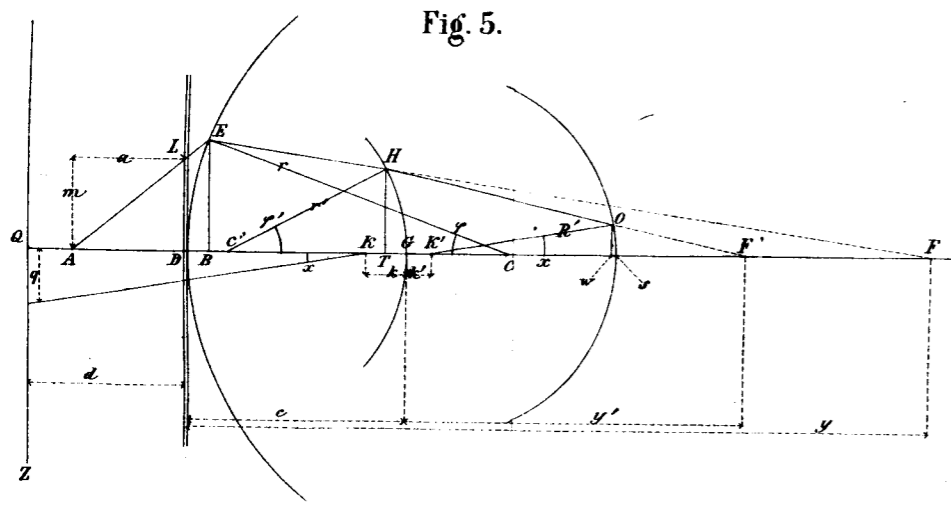


Fig. 12.

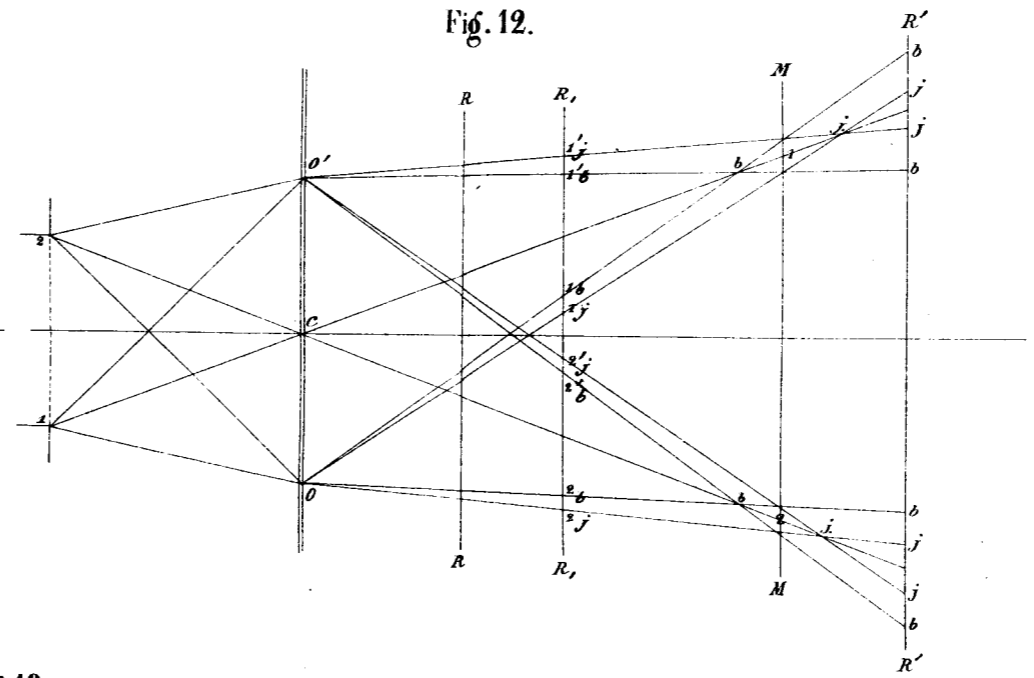


Fig. 11.

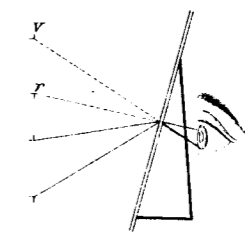


Fig. 13.

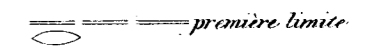


Fig. 14.

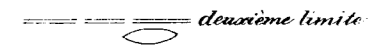


Fig. 16.

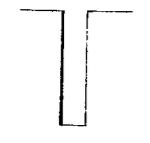


Fig. 17.

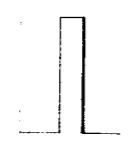


Fig. 18.

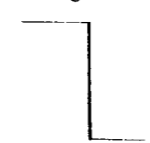


Fig. 19.

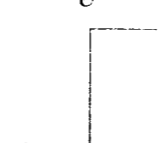


Fig. 20.

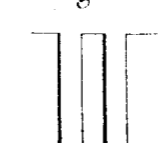


Fig. 15.

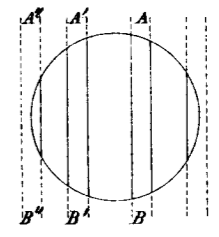


Fig. 6. $\frac{1}{5}$

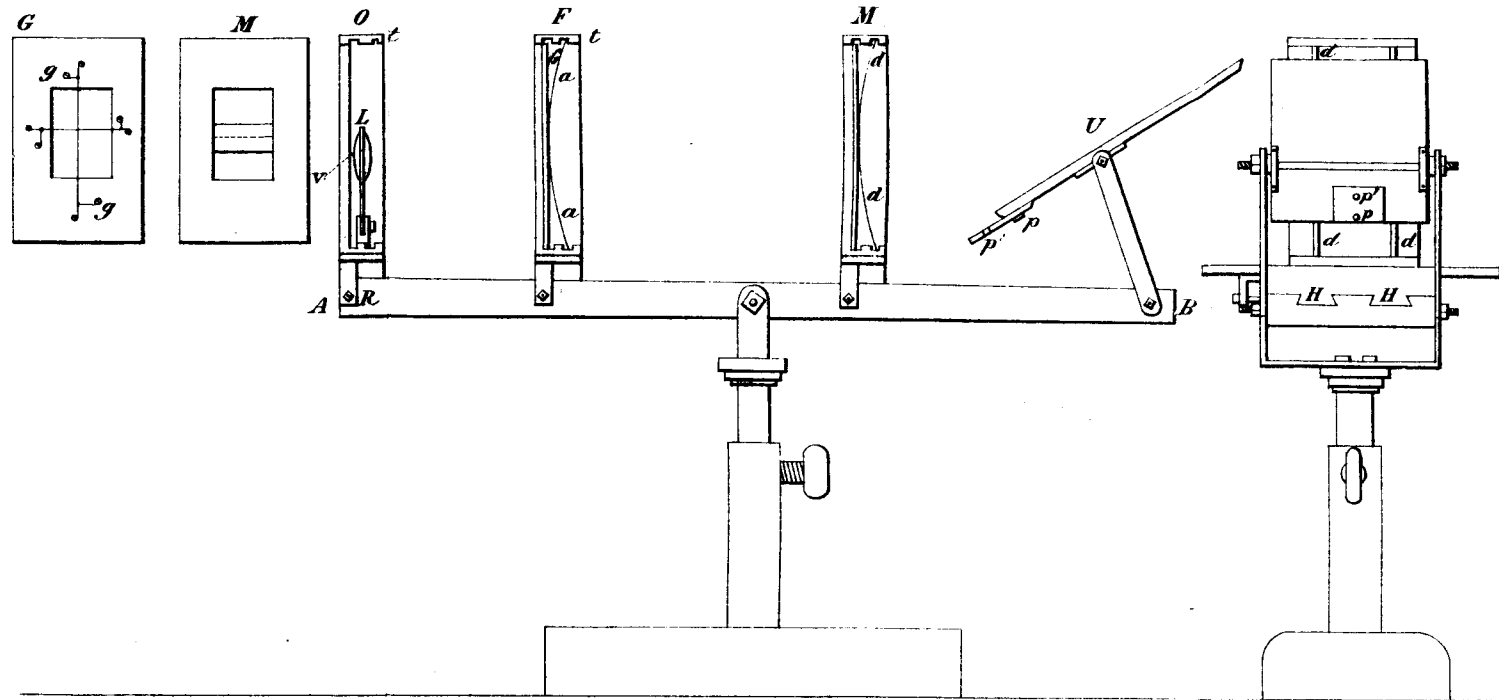


Fig. 7. $\frac{1}{2}$

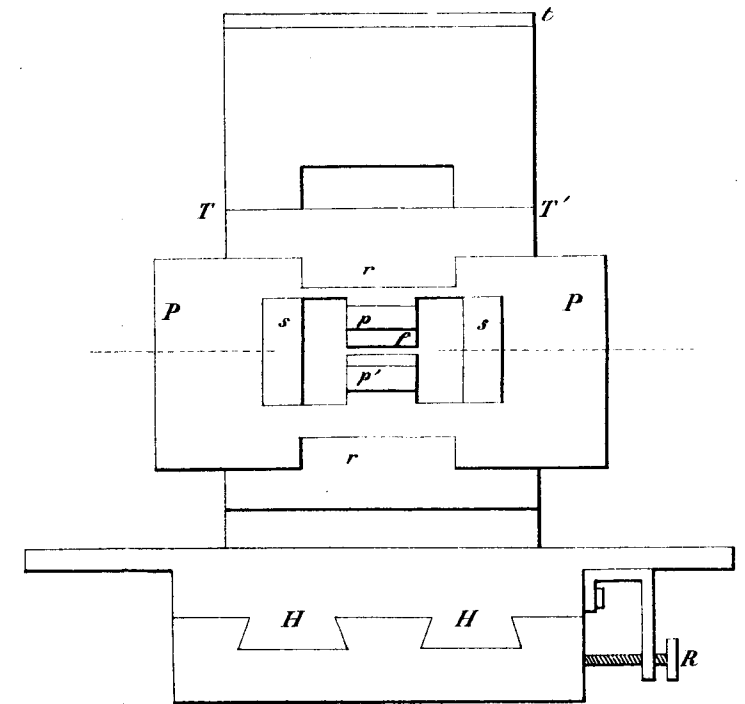


Fig. 7. bis

Fig. 9.

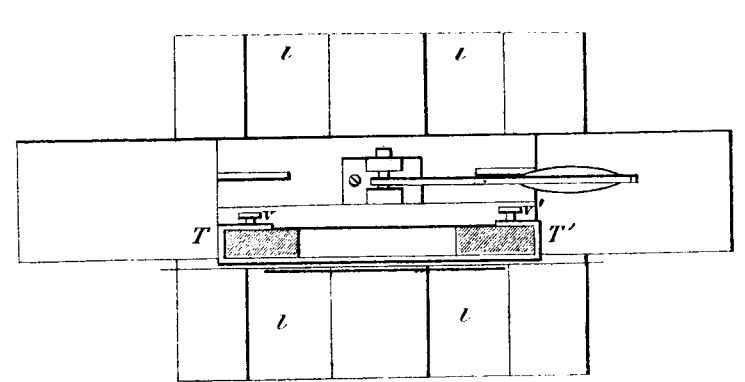
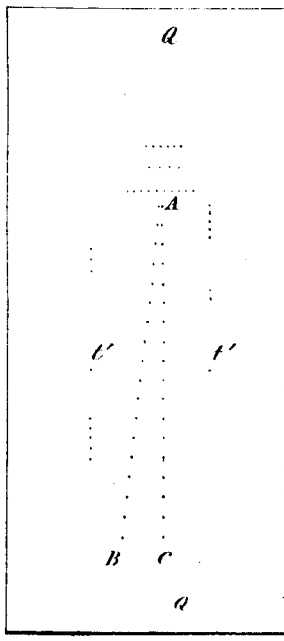
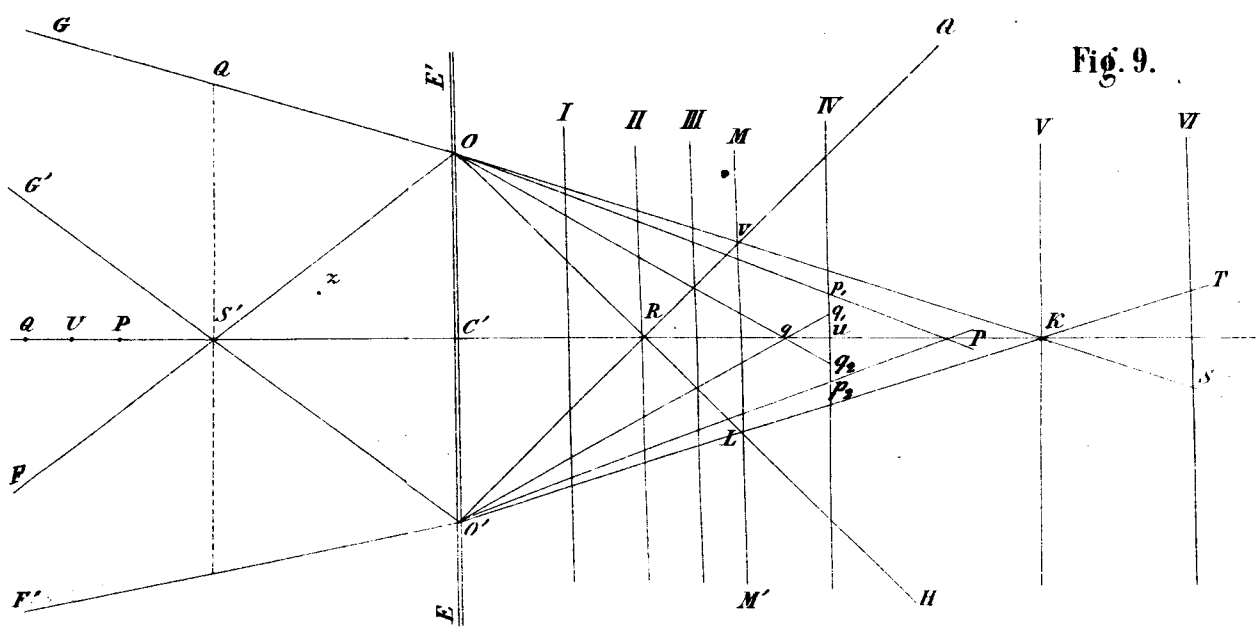


Fig. 8.

