

Charles FAHRÉ
Yves LE GRAND
Charles LAFICQUE

6

LA FORMATION
DES
IMAGES RÉTINIENNES

Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur - 162, rue de Sévres
PARIS (15^e)

1937

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Charles FABRY, professeur à la Sorbonne et à l'Ecole Polytechnique, directeur général de l'Institut d'Optique, membre de l'Académie des Sciences et du Bureau des Longitudes : <i>Les diverses imperfections des images optiques et en particulier des images rétiniennes</i>	3
Yves LE GRAND, sous-directeur de Laboratoire au Muséum National d'Histoire Naturelle : <i>Sur un mode de vision éliminant les défauts optiques de l'œil</i>	6
Charles LAPICQUE, assistant à la Faculté des Sciences de Paris : <i>Les images rétiniennes régulières, leurs déformations par les irrégularités optiques de l'œil</i>	12
I. <i>Images régulières</i>	12
II. <i>Déformations irrégulières</i>	22

LA FORMATION DES IMAGES RÉTINIENNES ⁽¹⁾

Les diverses imperfections des images optiques
et en particulier des images rétiniennes

par Charles FABRY

Professeur à la Sorbonne et à l'École Polytechnique

Directeur général de l'Institut d'optique

Membre de l'Académie des Sciences et du Bureau des Longitudes

La question dont nous allons nous occuper ce soir est une question d'optique visuelle, dans laquelle l'œil sera considéré comme un système optique donnant sur la rétine une image plus ou moins imparfaite des objets extérieurs. Notre étude s'arrêtera à la rétine, sans que l'on s'occupe de la perception des images, de même que l'on étudie un objectif photographique indépendamment des propriétés de la couche sensible. Il sera beaucoup question des imperfections des images produites sur la rétine ; aussi me paraît-il utile de rappeler, par une simple classification, les diverses imperfections qui peuvent affecter toutes les images optiques.

Diffraction. — Ce phénomène est toujours présent, et nous ne pouvons rien pour le faire disparaître ou le diminuer. Ses effets sont bien connus. Il empêche, quelle que soit la perfection du système optique, d'obtenir d'un *point* une image *ponctuelle*.

La diffraction ne joue qu'un faible rôle dans les images rétiniennes, excepté lorsque l'œil est, artificiellement, fortement diaphragmé.

Aberrations géométriques. — Elles sont des conséquences des lois de l'optique géométrique appliquées aux diverses surfaces de l'instrument ;

(1) Communications faites à la Réunion de l'Institut d'Optique tenue le mardi 3 mars 1936 à l'amphithéâtre de physique de la Sorbonne, sous la présidence de M. Charles Fabry, membre de l'Institut.

pour un point donné elles dépendent essentiellement de la forme de ces surfaces. Dans un œil normal ou correctement corrigé, elles ne jouent, elles aussi, qu'un faible rôle dans l'imperfection des images rétinienne.

Aberration chromatique. — Il faut mettre à part l'aberration chromatique, qui est au contraire importante dans l'œil. Un fait remarquable est que, pour la plupart des observateurs, ce chromatisme passe inaperçu, si bien que pendant longtemps on a cru que l'œil était achromatique ; cette croyance a contribué à faire admettre, contrairement à l'opinion de Newton, la possibilité de corriger l'aberration chromatique des objectifs.

Imperfections de matière. — Les inégalités d'indices de réfraction dans la masse produisent des aberrations qui, théoriquement, peuvent être compensées, pour un point donné, par des changements de forme des surfaces, si les défauts d'homogénéité sont progressifs avec une certaine régularité. Il en est autrement si les défauts sont irréguliers et rapidement variables sur de très petits volumes.

Lumière diffusée. — Enfin, un défaut qui existe plus ou moins dans tous les instruments d'optique et qui est important dans l'œil est la lumière diffuse, qui vient se superposer à l'image géométrique régulière.

Il est d'ailleurs impossible d'établir une limite parfaitement nette entre les deux phénomènes : aberrations géométriques et diffusion. Considérons, par exemple, un système optique de révolution, qui donne d'un point situé sur l'axe une image parfaitement stigmatique. Si l'on déforme légèrement une des surfaces, si par exemple cette surface cesse d'être de révolution, l'image cesse d'être stigmatique ; elle sera affectée d'astigmatisme dans le cas que nous considérons. Supposons maintenant que, sans changer la forme primitive générale de la même surface, on altère un peu son poli ; l'image restera stigmatique, mais elle sera accompagnée de lumière diffuse, dont l'intensité et la répartition dépendront de la manière dont le poli a été modifié. Une altération à l'échelle ultramicroscopique donnera de la lumière diffusée dans toutes les directions, sans accumulation autour de l'image ; une altération à plus grande échelle donnera une répartition moins uniforme, pouvant conduire à une auréole plus ou moins étendue autour de l'image. Toutes ces altérations du poli sont des *déformations* de la surface, qui se raccordent sans discontinuité avec les déformations qui donnent les aberrations classiques.

Des défauts d'homogénéité dans la matière donnent lieu à des phénomènes analogues. S'il y a, dans la matière d'une pièce d'optique travaillant par transmission, des inégalités d'indice de réfraction sans variation brusque, la matière examinée à l'œil paraît parfaitement claire, sans diffusion :

mais une pièce correctement taillée dans cette matière donne des images affectées d'aberrations de même aspect que celles dues à des déformations des surfaces. Si ces inégalités d'indice sont localisées dans des éléments de volume très petits, le milieu devient *trouble* et donne de la lumière diffusée. Ici encore, tous les cas intermédiaires sont possibles.

Enfin, il peut y avoir de la lumière diffusée par la surface même où l'image se produit, par la rétine dans le cas de l'œil, chaque élément de la surface de cet écran envoyant par diffusion de la lumière sur les éléments voisins.

Telles sont les diverses imperfections qui peuvent se présenter dans les images optiques. Comme on le verra, tous ces défauts existent dans l'œil, où les imperfections de matière sont peut-être les plus importantes.

Sur un mode de vision éliminant les défauts optiques de l'œil

par YVES LE GRAND

Sous-Directeur de Laboratoire au Muséum National d'Histoire Naturelle

Outre les défauts honnêtes que l'œil est en droit de comporter et sur lesquels M. Charles Lopicque a entrepris de si intéressantes recherches (aberrations chromatique et sphérique, effets de la diffraction), la plupart des yeux présentent des irrégularités dioptriques dues à la structure hétérogène des humeurs réfringentes : cornée, cristallin, corps vitré. Les images rétiniennes s'en trouvent fâcheusement brouillées et déformées.

Les déformations n'importent guère. Une droite peut se projeter sur la rétine suivant une courbe quelconque : pourvu que cette courbe soit permanente, nous verrons toujours une droite. Les écarts aux lois de la similitude géométrique (distorsion) ne gênent pas. Ces prérogatives de l'œil tiennent à une propriété parfois oubliée : l'œil est le seul instrument d'optique dont les images ne soient pas destinées à être regardées.

Par contre une image brouillée limite la finesse de la vision. Cet effet déplorable des irrégularités de l'œil nous échappe ordinairement, car nous y sommes habitués ; il faudrait, pour le mettre en évidence, éliminer momentanément ces défauts optiques et étudier la vision ainsi améliorée.

On pourrait songer à corriger les aberrations chromatique et sphérique par des combinaisons optiques judicieusement choisies et à supprimer l'effet des irrégularités cornéennes par immersion de l'œil dans l'eau. Mais cette méthode incommode laisserait subsister les hétérogénéités internes des milieux oculaires. Un procédé plus général permet d'éliminer d'un seul coup la plupart des défauts optiques de l'œil, en utilisant la vision en lumière dirigée ⁽¹⁾.

Principe de la méthode. — Lorsqu'on règle un spectrographe à réseau, il est commode de placer l'œil dans le plan où se forme le spectre, pour

(1) Y. Le Grand : Sur la vision en lumière dirigée. *C. R. de l'Acad. des Sc.*, t. 202, p. 592 (1936).

s'assurer que le réseau est bien couvert par le faisceau lumineux. Si la fente du spectrographe est éclairée par une lampe à vapeur de mercure et que l'image verte de la fente se forme sur l'œil de l'observateur, celui-ci voit le réseau brillamment éclairé en vert et perçoit avec une remarquable netteté les moindres stries et éraflures du réseau ; si, au contraire, la fente est éclairée par une lampe à incandescence, cette netteté anormale disparaît, quoique l'œil soit placé au même endroit et que la brillance apparente puisse être réglée à la même valeur. Toute la différence vient de ce que le faisceau couvre la pupille dans le deuxième cas, alors qu'il n'en utilisait qu'une très petite surface dans le premier.

On améliore donc la vision en obligeant le pinceau lumineux qui formera

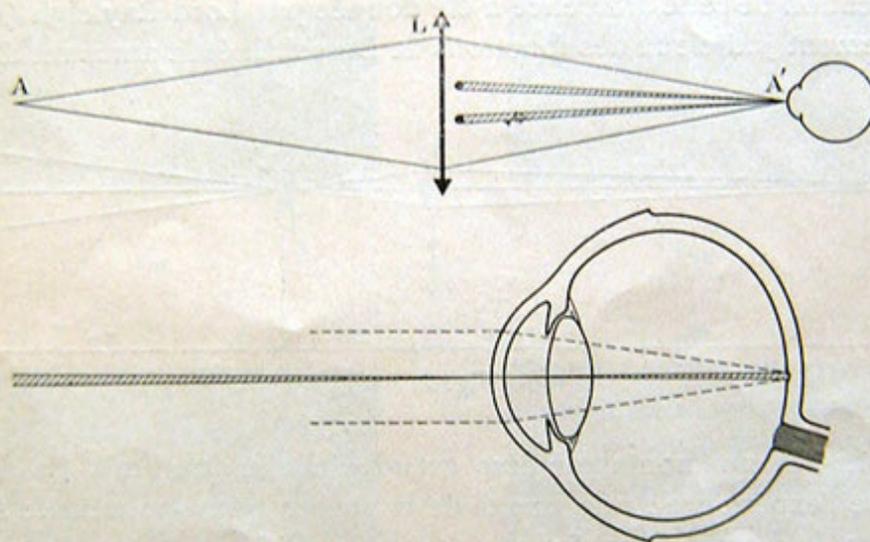


Fig. 1.

l'image rétinienne à s'étrangler en un foyer au niveau de la cornée ou de la pupille : tel est le principe de la « vision en lumière dirigée », par opposition à la « vision normale », dans laquelle toute l'ouverture de la pupille reçoit de la lumière.

La comparaison numérique de ces deux modes de vision peut se faire avec un test quelconque d'acuité visuelle ; le plus simple consiste à employer deux fils tendus parallèlement, dont on diminue l'écartement jusqu'à confusion apparente. En vision normale, on placera derrière les fils une surface diffusante éclairée ; en vision dirigée, on remplacera cette surface par une lentille L formant sur l'œil de l'observateur l'image A' de la source ponctuelle A (fig. 1). Sur le dessin, les cônes hachurés représentent l'ombre portée par les fils, qui sont supposés perpendiculaires au plan de la figure. Le pinceau très délié qu'utilise l'œil aura plus de chances

d'homogénéité que le cône de grande ouverture utilisé en vision normale (figuré en traits discontinus). D'où gain de netteté des images rétiniennes.

Paradoxe de Lord Rayleigh. — Supposons que l'image A' couvre sur la cornée une aire de 0,1 mm de diamètre ; il pourrait sembler équivalent de remplacer la vision en lumière dirigée par une vision en « sténopé » à travers un petit trou de 0,1 mm de diamètre percé dans un écran que l'on tiendrait juste devant l'œil. Les résultats différeraient complètement, car le pouvoir de résolution dû à la diffraction serait très mauvais pour le petit trou, alors qu'il correspond à toute l'ouverture de la pupille, non diaphragmée, dans le cas de la vision en lumière dirigée.

L'explication de cette différence a été donnée par Lord Rayleigh ⁽¹⁾ après un maniement judicieux des fonctions de Bessel. Il était amusant de véri-

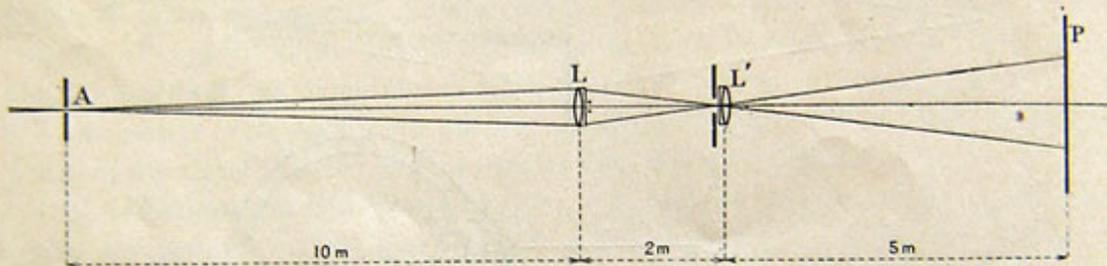


Fig. 2.

fier ces faits sur un montage à plus grande échelle que l'œil. La figure 2 schématise l'expérience : une image de la source quasi-ponctuelle A (trou de 0,27 mm de diamètre) est formée par l'objectif L (de 1,75 m de longueur focale et 10 cm d'ouverture) sur l'objectif L' (de 1,40 m de longueur focale et 10 cm d'ouverture) ; la plaque photographique P , jouant le rôle de rétine, est conjuguée par rapport à L' des deux fils tendus devant L .

La figure 3 représente un positif obtenu dans ces conditions d'après un cliché P agrandi 2 fois environ ; les fils apparaissent parfaitement nets, et bordés de fines franges de diffraction.

Si maintenant on place contre L' un diaphragme de 8 mm d'ouverture, la netteté s'altère et les franges s'élargissent (fig. 4). L'image devient franchement mauvaise avec un diaphragme de 3 mm d'ouverture (fig. 5). Et pourtant la quasi-totalité de l'énergie lumineuse traverse la lentille L' dans un cercle de diamètre inférieur à 0,1 mm : ce qui prouve bien que le pouvoir de résolution correspond à la surface découverte de L' et non à la portion minimale de cette surface où se concentre le flux lumineux.

(1) Lord Rayleigh : An optical Paradox (*Scientific Papers*, t. 5, p. 254 [1905]).

La figure 6 montre, à plus grande échelle, l'image des fils dans le cas où toute l'ouverture de L' est utilisée et où l'on a écarté légèrement la plaque P de sa position de mise au point exacte. Les fils prennent un curieux aspect fuselé, dû sans doute aux légères irrégularités optiques du dispositif (et notamment à celles d'un prisme à réflexion totale interposé entre L' et P pour réduire l'encombrement).

Résultats. — Nous voici en possession d'un mode de vision qui dote l'œil à la fois des avantages d'une grande ouverture pupillaire (excellent pouvoir théorique de résolution) et de ceux d'une pupille infiniment resserrée (suppression des aberrations). L'image sera donc parfaite si le cône délié



Fig. 3.

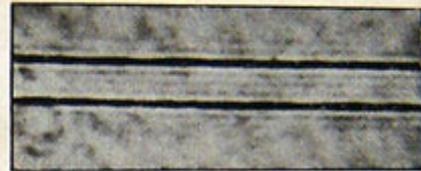


Fig. 4.

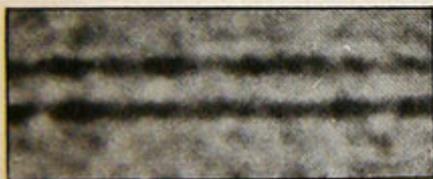


Fig. 5.

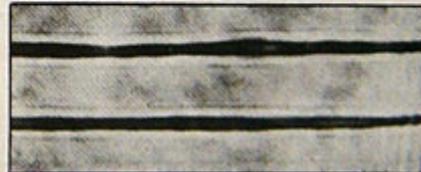


Fig. 6.

du trajet de la lumière dans l'œil est bien homogène. En fait, si l'on promène le point A' (fig. 1) sur la cornée, on constate que dans certaines positions la vision est excellente et dans d'autres mauvaises. L'œil comprend de bons trajets optiques et d'autres fort irréguliers.

Dans la « vision normale », tous ces trajets sont utilisés à la fois ; les bons assurent la netteté de la vision, les mauvais noient l'image sous leur lumière parasite ; cela ne gêne guère aux fortes brillances, car la rétine perçoit alors des contrastes même très faibles. Les deux modes de vision que nous avons définis doivent donner dans ce cas à peu près le même pouvoir séparateur. Au contraire, un pinceau de lumière dirigée utilisant un bon trajet de l'œil doit, aux faibles brillances, assurer à l'œil un pouvoir séparateur bien meilleur que la vision normale.

L'expérience confirme pleinement ces prévisions. La figure 7 résume les résultats moyens obtenus sur quatre yeux (dont deux emmétropes et deux myopes corrigés). En abscisses figurent les brillances ramenées à 5 mm d'ouverture pupillaire, c'est-à-dire que l'éclairement rétinien est le même que celui qu'on obtiendrait avec une source de cette brillance vue à travers une pupille de 5 mm de diamètre. On a porté en ordonnées l'écart angulaire entre les axes des fils lorsqu'on les perçoit juste séparés (diamètre apparent de chaque fil : $12''$). L'échelle des abscisses est logarithmique et celle des ordonnées linéaire en fonction de l'inverse de l'écart

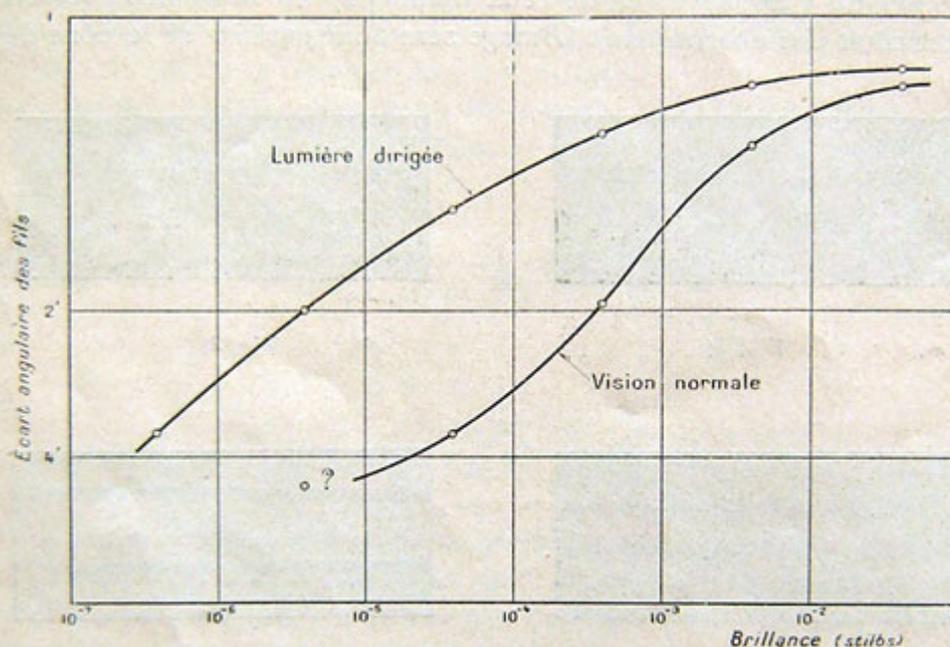


Fig. 7.

angulaire, de telle sorte que l'ordonnée soit d'autant plus grande que l'angle est plus petit, suivant l'usage des mesures d'acuité visuelle.

La comparaison des deux courbes de la figure 7 prouve qu'un œil optiquement parfait ne vaudrait guère mieux que l'œil moyen à la lumière du jour ; il deviendrait bien supérieur en vision crépusculaire et nocturne.

Aspects ondulés. — Les fils, vus en lumière dirigée, apparaissent presque toujours sous l'aspect de fuseaux analogues aux nœuds et ventres d'une corde vibrante. Purkinje, Bergmann et Helmholtz avaient observé des apparences analogues en vision normale (aspect sinueux des barreaux d'une grille, à la limite de visibilité). Helmholtz expliquait ce phénomène par la structure en mosaïque de la rétine. Cette hypothèse est en désaccord

avec le principe général que nous rappelions au début : une structure permanente de l'œil échappe à la perception normale. Il me semble moins invraisemblable d'invoquer encore les irrégularités dioptriques, qui expliquaient les apparences tout à fait analogues de la figure 6. Il ne peut être question de la cornée, comme Bourdon l'avait admis ⁽¹⁾, puisque notre méthode élimine justement les défauts cornéens. Il faudrait faire intervenir plutôt les régions du corps vitré les plus proches de la rétine, ou même les premiers éléments rétinien qu'atteint la lumière, notamment ces fibres nerveuses dont le dichroïsme supposé expliquerait les houppes de Haidinger. Cette structure permanente et régulière ne serait pas normalement perçue, il faudrait pour cela des conditions spéciales d'éclairage : ainsi s'explique le fait que ces apparences ondulées se manifestent si nettement en lumière dirigée.

(1) Bourdon, La perception visuelle de l'espace, p. 88 (Paris, 1902, Schleicher, édit.)

Les images rétiniennes régulières Leurs déformations par irrégularités optiques de l'œil

par Charles LAPICQUE

Assistant à la Faculté des Sciences de Paris

I

IMAGES RÉGULIÈRES

Introduction. — Nous étudierons l'image rétinienne d'un point lumineux, bien qu'un tel point ne soit pas le spectacle qui s'offre couramment à la vue; mais l'image d'un point, outre qu'elle présente un intérêt direct pour certains spécialistes comme les astronomes, est la donnée élémentaire à partir de laquelle on déduit sans difficultés nouvelles l'image d'une ligne ou d'un contour ⁽¹⁾.

Supposons que toutes les surfaces optiques de l'œil soient de révolution autour de l'axe visuel (c'est à peu près le cas pour les bons yeux). Supposons, en outre, que les matières transparentes qui séparent ces surfaces soient homogènes (ce qui n'est pas le cas, même pour les meilleurs yeux connus). L'œil ne serait entaché alors que de défauts qu'on peut appeler « réguliers » : ce seront, comme M. Fabry l'a rappelé, les aberrations dites géométriques et aussi la diffraction. Nous nous intéressons de façon toute particulière à la vision nette, qui est la vision fovéale. La fovea est extrêmement petite, le champ de l'instrument qui nous occupe est donc pratiquement nul. On sait que dans ces conditions, les aberrations géométriques possibles se réduisent à deux : le chromatisme et l'aberration sphérique.

Chromatisme et diffraction. — Soit sur l'axe optique de l'œil un point lumineux éloigné émettant de la lumière blanche ⁽²⁾. Le chromatisme agit de

(1) J'ai rappelé récemment comment, de l'image d'un point, on déduit celle d'un contour ou d'une ligne (le Rouge et le Bleu dans les Arts, 4^e Réunion de l'Institut Optique de l'année 1935).

(2) De façon précise la puissance de la radiation émise est supposée uniformément répartie dans le spectre en fonction de la longueur d'onde : la lumière du jour possède en gros cette répartition.

la façon suivante : si l'œil est « au point » pour une des radiations monochromatiques constituant cette lumière, il ne peut l'être pour les autres,

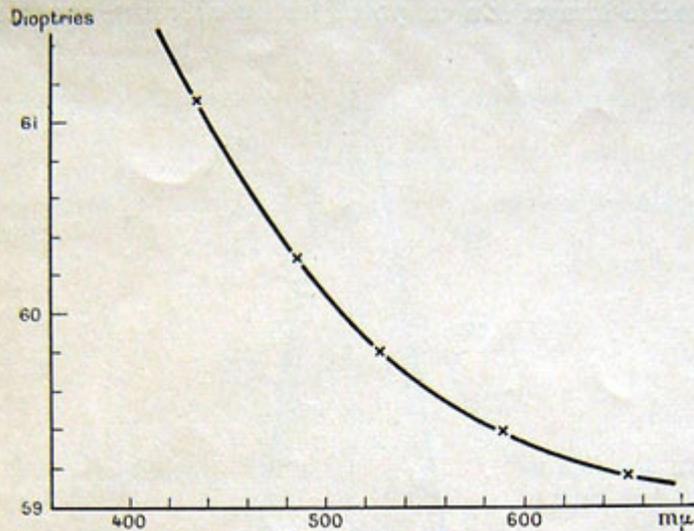


FIG. 1.

Abscisses : longueurs d'onde en millimicrons.
Ordonnées : convergence de l'œil en dioptries.

parce que sa convergence varie avec la longueur d'onde. La figure 1 montre cette variation de convergence, telle que mesurée par le docteur Polack.

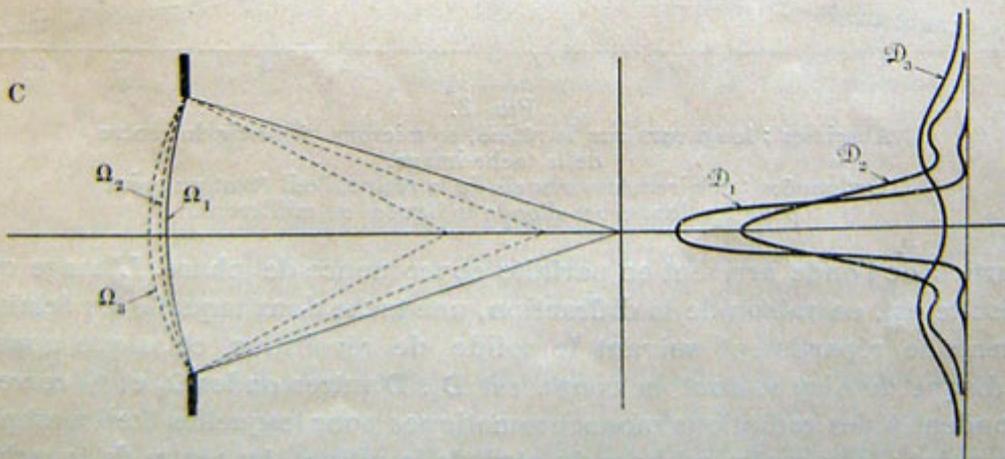


FIG. 2. (schématique). — Disque de diffraction classique et disques dégradés.

Analysons dans ces conditions la formation de l'image. Sur la figure 2 (schématique) nous sommes dans l'espace-image. Les ondes, limitées par

la pupille de sortie ⁽¹⁾, restent sphériques après avoir traversé l'instrument. L'une d'elles, Ω_1 , correspond à la radiation pour laquelle l'œil est bien au point : elle a son centre sur la rétine. Le centre de l'onde est donc aussi le centre de la tache-image. En ce point les lumières venant des différentes

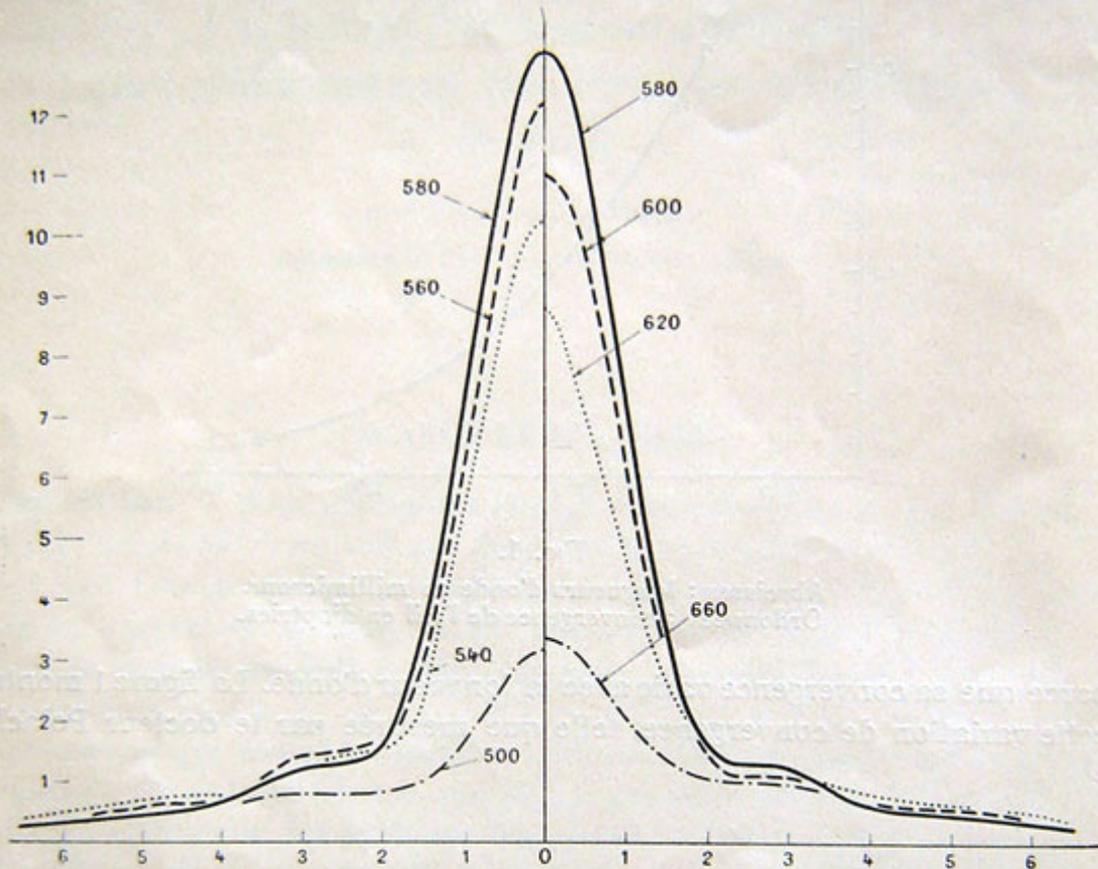


FIG. 3.

Abscisses : longueurs sur la rétine, en microns, à partir du centre de la tache-image.

Ordonnées : éclairements visuels de la rétine, l'œil étant au point pour les longueurs d'onde indiquées en millimètres.

parties de l'onde arrivent en parfaite concordance de phase. L'image qui résulte est, en raison de la diffraction, une tache dans laquelle les éclairements se répartissent suivant le solide de révolution classique appelé « disque de Airy », dont la coupe est D_1 . D'autres ondes Ω_2 et Ω_3 correspondent à des radiations monochromatiques pour lesquelles l'œil n'est pas au point : leur centre est hors du plan de la rétine. Au centre de la tache-image il y a donc variation de marche entre les lumières venant des diverses parties de l'onde. Les images que ces ondes fournissent sont alors des taches dans lesquelles l'éclairement se répartit suivant des disques de

(1) Image du trou de l'iris dans l'espace-image.

diffraction D_1 et D_2 , appelés disques dégradés de Airy, toujours plus aplatis que le disque classique. Le degré d'aplatissement dépend de la plus grande différence de marche, au centre de la tache-image, entre les lumières venant des différentes parties de l'onde ; il est d'autant plus grand que

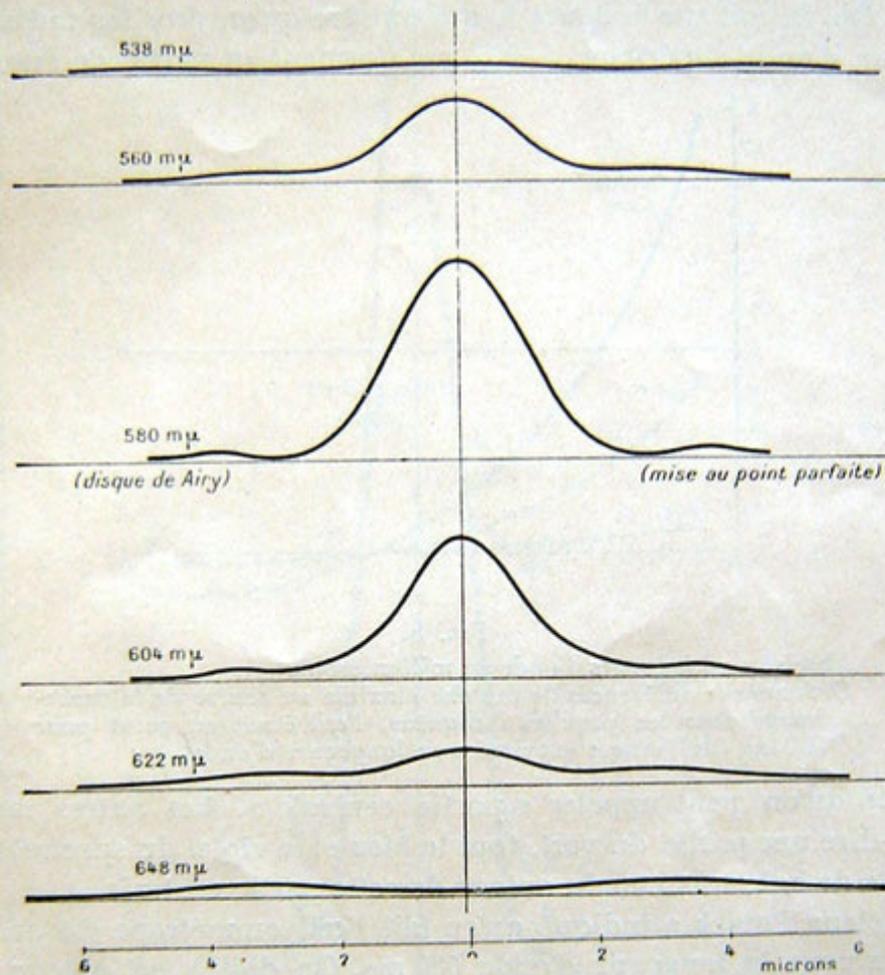


FIG. 4.

Abscisses : longueurs en microns sur la rétine à partir du centre de la tache-image.

Ordonnées : éclaircissements énergétiques de la rétine produits par des flux de même puissance, sous forme de radiations monochromatiques diverses, l'œil étant au point pour la longueur d'onde 580 mμ.

cette différence est plus grande, donc que le défaut de mise au point est plus grand.

La sommation en chaque point de la rétine des éclaircissements monochromatiques répartis comme il vient d'être dit donne, compte tenu des facteurs de visibilité, l'éclaircissement visuel total en ce point. Le résultat est donné par la figure 3 pour une pupille de 5 mm de diamètre dans l'espace extérieur (pupille d'entrée). Différentes hypothèses ont été faites sur la longueur d'onde pour laquelle l'œil est bien au point ; cette longueur

d'onde de mise au point est portée en millimicrons en regard de chaque courbe. On voit que la répartition est la meilleure quand l'œil est au point pour la longueur d'onde 580 m μ . Dans ce cas, comment se répartissent les diverses radiations monochromatiques formant la lumière blanche incidente ? On le voit sur la figure 4, qui montre qu'en gros les radiations de longueur d'onde supérieure à 550 m μ forment la partie de l'image bien

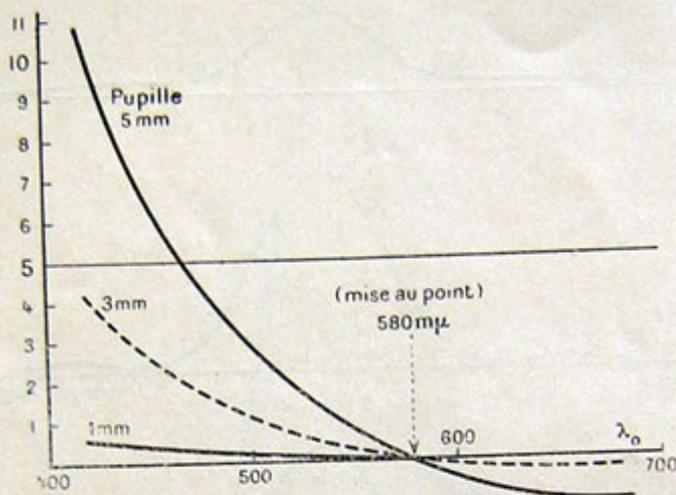


FIG. 5.

Abscisses : longueurs d'onde en millimicrons.
Ordonnées : différences de marche maximale au centre de la tache-image pour les pupilles indiquées, l'œil étant au point pour 580 m μ (différences exprimées en longueurs d'onde).

ramassée qu'on peut appeler « partie centrale ». Les autres radiations (c'est-à-dire une partie du vert, tout le bleu et le violet du spectre) forment une sorte de halo très étendu autour de cette partie centrale.

Le docteur Polack a indiqué qu'en fait l'œil emmétrope est au point à peu près pour la longueur d'onde 580 m μ . On doit à cet auteur le rejet d'une hypothèse émise au XVIII^e siècle par Dalember et uniformément adoptée depuis. D'après cet Encyclopédiste, l'œil devait être au point pour la région du spectre où sa convergence est moyenne, de façon à rassembler dans l'image la plus grande partie possible des radiations monochromatiques formant la lumière incidente (1). Or on voit, sur la figure 1, que la convergence moyenne est atteinte pour environ 500 m μ — et sur la figure 3, que si l'œil est au point pour cette longueur d'onde la répartition de la lumière est désastreuse. En cherchant à rassembler dans l'image toutes les radiations du spectre, on n'en rassemble efficacement aucune.

(1) On vérifiera aisément que si l'œil est au point de cette façon, les rayons correspondant aux deux extrémités du spectre se coupent dans le plan de la rétine, y formant grossièrement un cercle éclairé dit cercle de moindre diffusion, dans lequel se rassemblent en effet une grande partie des radiations ; seulement ce cercle a des dimensions énormes.

Il faut voir ce qui se passe pour d'autres grandeurs de la pupille. Plus celle-ci diminue, plus l'action du chromatisme s'affaiblit, plus celle de la

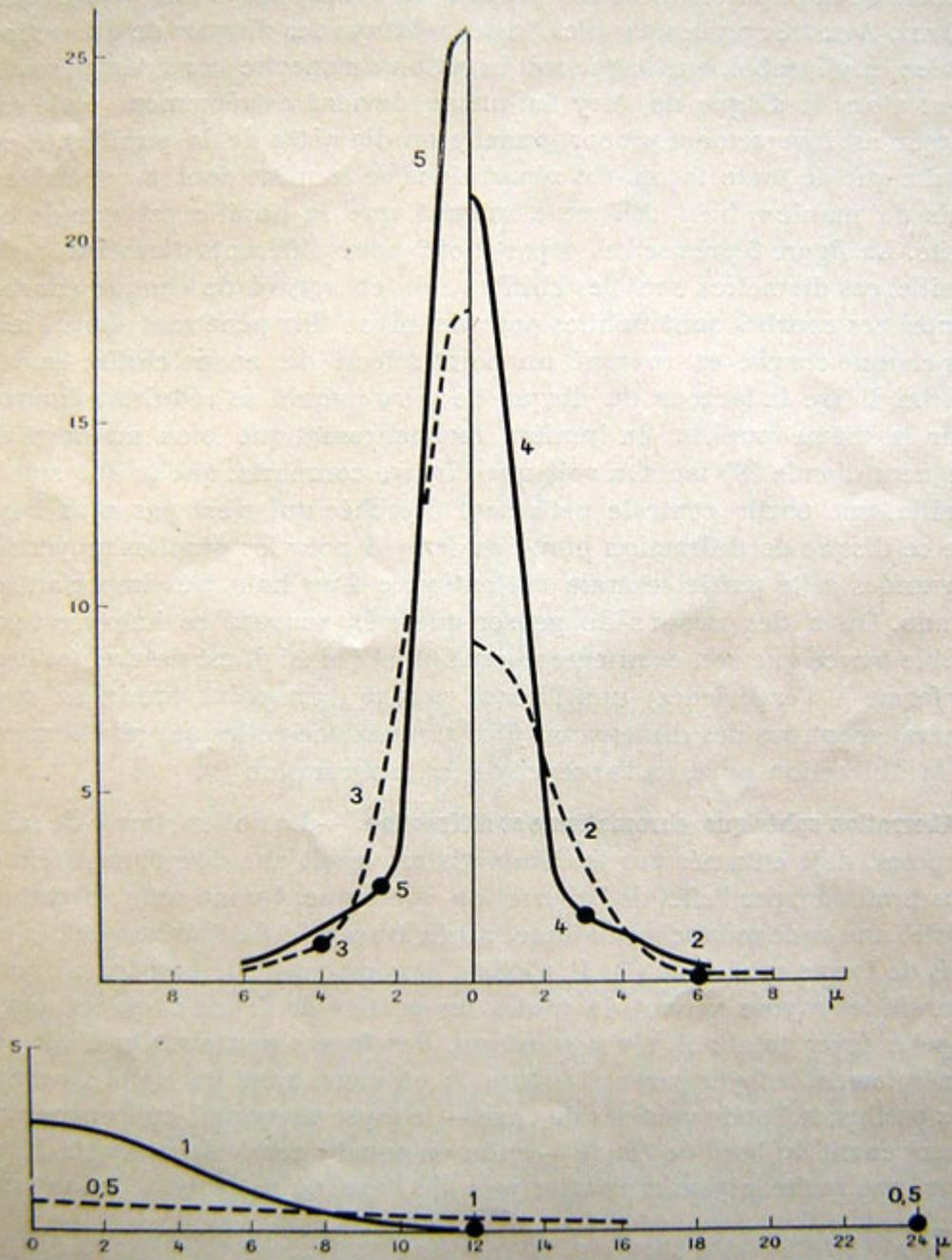


FIG. 6.

diffraction augmente. L'action du chromatisme dépend de la différence de marche maximum entre les lumières qui, des divers points d'une onde,

parviennent au centre de la tache-image. La figure 5 montre la variation dans le spectre de cette différence de marche maximum, pour quelques valeurs de la pupille, l'œil étant supposé au point pour la longueur d'onde 580 m μ . Aux très petites pupilles, la dégradation des disques de diffraction devient négligeable, quelle que soit la région du spectre considérée ; seulement alors le disque de Airy lui-même devient extrêmement étalé (sa largeur est inversement proportionnelle au diamètre de la pupille). Il en résulte que de toute façon, les répartitions de lumière sont assez étalées, mais de manière bien différente suivant que la pupille est grande ou petite. La figure 6 précise ces répartitions pour différents diamètres de la pupille, ces diamètres sont les chiffres mis en regard de chaque courbe. Toutes ces courbes sont établies pour un même flux pénétrant dans l'œil. Sur chaque courbe est marqué un point affecté du même chiffre que la courbe. Il fixe la largeur du disque de Airy auquel se réduirait l'image, pour la même pupille, en lumière monochromatique bien au point de longueur d'onde 580 m μ . On voit que l'image comporte, quelle que soit la pupille, une partie centrale nettement détachée qui n'est pas plus large que ce disque de diffraction pure ; seulement pour les pupilles moyennes et grandes cette partie centrale est entourée d'un halo très important et étendu. On a des raisons de penser que très souvent ce halo n'est pas visible (parce que son éclairement est faible) ; ainsi il est naturel (et bien conforme à l'expérience) que l'image perçue d'un point lumineux n'ait généralement pas des dimensions plus grandes que celles qui résulteraient de la diffraction pure, en l'absence de toute aberration (1).

Aberration sphérique, chromatisme et diffraction. — La notion simple de mise au point, déjà entamée par le chromatisme, reçoit une deuxième atteinte, plus profonde, par l'effet de l'aberration sphérique. Quand cette aberration existe, une onde monochromatique, après traversée de l'instrument, n'est plus de forme sphérique (2). Il n'existe plus un point de l'espace où concourent les rayons venant de toutes les parties de l'onde et qu'on puisse appeler foyer total : il n'y a plus que des foyers partiels. On distingue généralement le foyer paraxial (figure 7) où concourent les rayons venant des parties de l'onde voisines de l'axe — le foyer marginal, où concourent ceux venant du bord de l'onde — enfin on appelle cercle de moindre diffusion, une petite région circulaire près de l'axe, où se croisent les rayons

(1) Le calcul n'a pas été fait pour de très grandes pupilles, en raison de difficultés particulières qui sont en partie exposées plus loin ; d'autre part, les plus petites pupilles envisagées ici ne sont pas naturelles, mais peuvent se rencontrer en vision expérimentale, sous forme de la pupille de sortie de l'instrument.

(2) Elle reste de révolution si on admet, comme ici, que l'instrument lui-même est de révolution.

venant du bord et ceux venant de la région centrale de l'onde. On pense communément qu'à cet endroit de l'axe, le rassemblement de la lumière est le meilleur, parce que la section du cône de lumière y est minimum. Ce n'est pourtant là qu'une vue simpliste, strictement équivalente à celle de Dalembert concernant le chromatisme, et pas plus efficace. La prévision

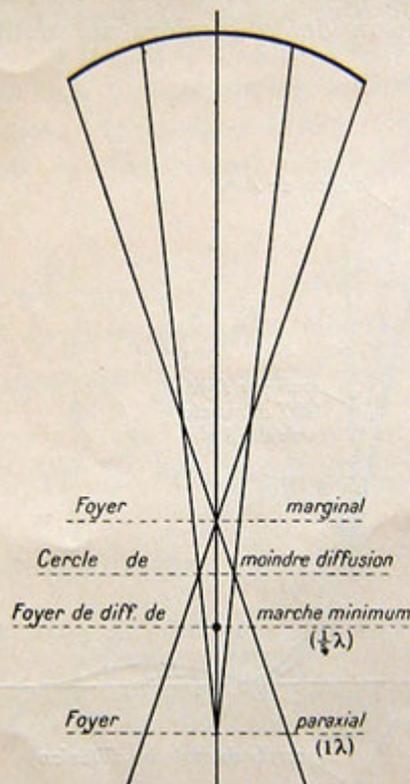


FIG. 7. — Différents foyers d'une onde non sphérique.

des phénomènes exige impérieusement l'introduction de la théorie de la diffraction.

Du point de vue de cette théorie, le meilleur foyer est le point de l'espace où, entre les lumières venant des diverses parties de l'onde, les différences de marche sont les plus faibles. Ce meilleur foyer n'est pas du tout à cet endroit appelé cercle de moindre diffusion. Ainsi, par exemple, dans le cas de l'aberration sphérique dite du 3^e ordre ⁽¹⁾, le meilleur foyer est à mi-chemin entre le foyer paraxial et le foyer marginal, tandis que le cercle de moindre diffusion est aux 3/4 de ce chemin. On caractérise généralement le défaut de sphéricité d'une onde par la différence de marche

(1) C'est celle dont l'expression mathématique est la plus simple.

que crée ce défaut au foyer paraxial. C'est une façon de se comprendre, mais il ne faut pas oublier qu'il existe un point où la différence de marche est très inférieure à celle ainsi choisie comme caractéristique. Par exemple, dans le cas de l'aberration sphérique du 3^e ordre, si la différence de marche caractéristique (au foyer paraxial) est de 1 longueur d'onde, celle au meilleur foyer n'est que de $1/4$ de longueur d'onde. La figure 8 représente dans ce cas la répartition de la lumière au meilleur foyer : elle diffère

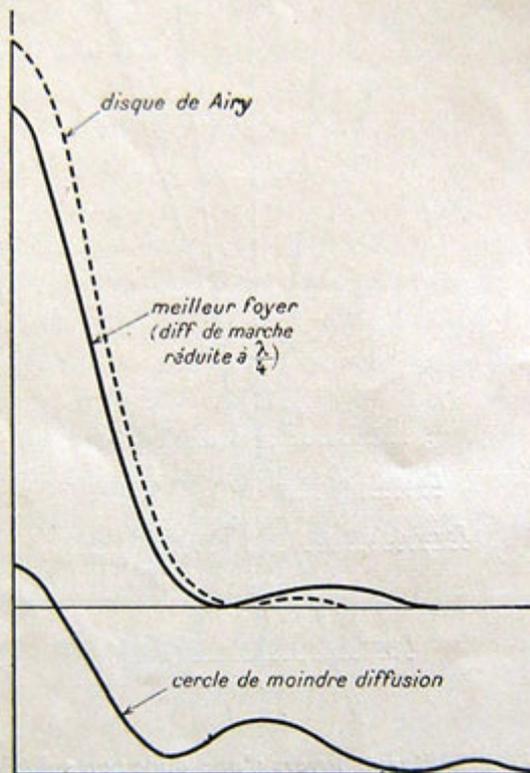


FIG. 8. — Répartition de la lumière à différents foyers d'une onde non sphérique (aberration sphérique du 3^e ordre, différence de marche au foyer paraxial : 1 longueur d'onde).

extrêmement peu du disque de Airy. La même figure montre qu'au cercle de moindre diffusion la répartition est, au contraire, franchement mauvaise.

Martin a indiqué que même dans les cas d'aberration sphérique très forte et mathématiquement compliquée, il existe, en un certain foyer, une concentration de lumière qui n'est pas plus large que le disque classique de Airy pour la même ouverture (souvent même un peu plus étroite, déclare cet auteur). Il y a donc une analogie assez remarquable entre l'action du chromatisme et celle de l'aberration sphérique. L'un et l'autre de ces défauts laissent subsister, en un foyer convenablement choisi, une

concentration de lumière pas plus large que celle qui, en l'absence de toute aberration géométrique, caractériserait l'ouverture. Le choix de ce foyer ne doit pas s'inspirer du désir de rassembler dans l'image toutes les radiations (celles de tout le spectre pour le chromatisme, celles de toutes les parties de l'onde pour l'aberration sphérique) ; ce foyer doit être choisi de façon que certaines radiations y soient très bien rassemblées, les autres étant dispersées en un halo étendu (halo coloré dans le cas du chromatisme, incolore dans le cas de l'aberration sphérique). En somme la conduite à tenir vis-à-vis de l'un et l'autre de ces deux défauts est une illustration du dicton bien connu : « Qui trop embrasse, mal étreint. »

Les meilleures mesures de l'aberration sphérique de l'œil humain sont

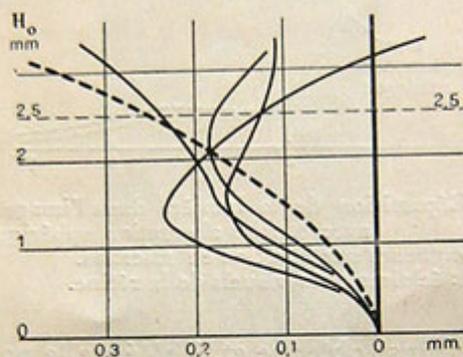


FIG. 9. — Aberration sphérique de l'œil humain (Ames et Chapman).

Ordonnées : demi-diamètre de la zone considérée.
Abscisses : distance du foyer de la zone au foyer paraxial.

celles de Ames et Chapman sur leurs propres yeux ⁽¹⁾. Quelques courbes les plus caractéristiques sont portées sur la figure 9. L'aberration sphérique se révèle très individuelle, surtout pour un demi-diamètre de la zone supérieur à 2 mm, soit pour une pupille supérieure à 4 mm ⁽²⁾. Nous avons cependant tenté de l'assimiler à une aberration du 3^e ordre, pour une pupille de 5 mm de diamètre. La courbe en traits interrompus (figure 9) représente l'aberration du 3^e ordre la plus approchante possible ; elle est au moins aussi défavorable que la plupart des courbes réelles ; elle correspond d'autre part à la même déformation de l'onde que celle qui a donné les répartitions de lumière de la figure 8 (différence de marche au foyer paraxial : 1 longueur d'onde ; au meilleur foyer : 1/4 longueur d'onde). La

(1) Ames est astigmat, de sorte qu'au total les mesures ont porté sur six méridiens pour les deux expérimentateurs.

(2) Cela est très conforme aux observations de Tscherning.

réine étant supposée au « meilleur foyer » pour l'onde monochromatique 580 m μ (1), on a calculé la répartition totale en lumière blanche (chacune des ondes monochromatiques est déformée de la même façon). La figure 10

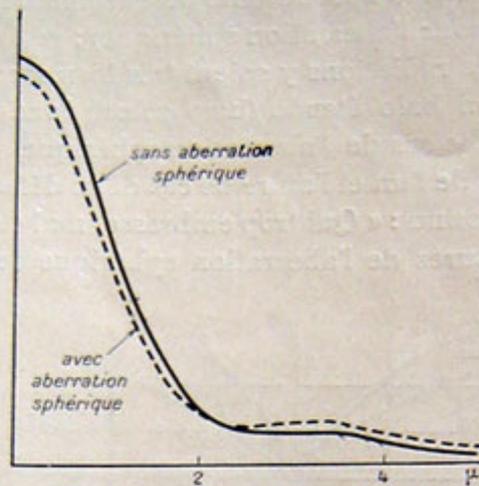


FIG. 10. — Répartition de la lumière dans l'image rétinienne, avec et sans aberration sphérique.
Abscisses : longueurs sur la rétine en microns.
Coordonnées : éclairissements visuels de la rétine.

montre la répartition ainsi obtenue et, à côté, celle pour la même pupille sans aberration sphérique. On voit que la différence est faible. On peut considérer comme certain que, jusqu'à des pupilles de 4 à 5 mm de diamètre, l'aberration sphérique ne trouble pratiquement pas la vision.

II

DÉFORMATIONS IRRÉGULIÈRES

Perception des déformations irrégulières. — En vertu de ce qui précède, l'observateur normal regardant une source ponctuelle monochromatique devrait éprouver des sensations correspondant à des répartitions de lumière régulièrement dégradées, telles que celles de la figure 4. Or ce qu'on perçoit indique nettement des répartitions très irrégulières, suivant

(1) S'il n'en est pas ainsi, l'œil devra être réputé amétrope et subir une correction de convergence. On voit apparaître ici cette difficulté que, compte tenu de l'aberration sphérique, l'amétropie est fonction de la grandeur de pupille. Certains yeux, normaux pour des pupilles petites ou moyennes, peuvent être nettement myopes lorsque la pupille devient très grande (faibles éclairissements).

des figures étoilées complexes souvent décrites. Par exemple on voit sur la figure 11 ce que perçoit mon œil gauche regardant une source ponctuelle de lumière monochromatique du sodium. Ces figures ont été dessinées d'après l'image perçue.

Irrégularités cornéennes. — De telles irrégularités peuvent venir, soit d'irrégularités des surfaces optiques, soit d'irrégularités des milieux interpo-

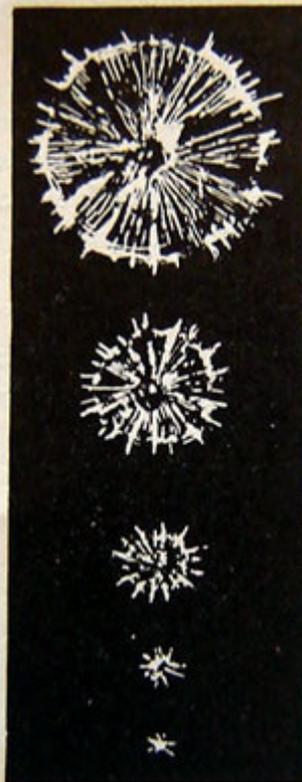


FIG. 11. — Figures étoilées perçues par un observateur regardant une source ponctuelle monochromatique, soit bien au point (en bas), soit avec des défauts de mise au point croissants (en montant) par excès de convergence.

sés entre ces surfaces. Pour ce qui est des surfaces, il faut avoir présent à l'esprit les indices de réfraction des divers milieux traversés.

Air	Cornée	Humeur aqueuse	Cristallin (moyen)	Corps vitré
1	1,374	1,336	1,42	1,33

On voit que la réfraction à l'entrée dans la cornée est de beaucoup la plus considérable, parce que la variation d'indice y est de beaucoup la plus

forte (sur une convergence de 59 dioptries pour le système complet de l'œil, la face d'entrée de la cornée contribue pour environ 47 dioptries). C'est donc cette face d'entrée de la cornée dont les déformations sont les plus sensibles ; elles créent ce qu'on appelle l'astigmatisme cornéen, qui est bien en effet le défaut important le plus fréquent. Ce défaut est irrégulier. Les examens précis (sources ponctuelles) montrent qu'il n'est généralement pas possible d'annuler ses effets par un verre cylindrique. Le Dr Rochon-Duvigneaud attribue l'astigmatisme cornéen à une ligne de moindre résistance de la cornée (1), ligne qui permet à la pression intra-oculaire de créer une sorte d'arête en relief. Or, tant qu'une membrane est de résistance uniforme, on conçoit qu'une pression également uniforme lui fasse prendre une forme voisine de celle de la sphère. Mais on ne saisit pas comment une arête due à une ligne de moindre résistance pourrait posséder une régularité optique quelconque.

On sait que l'effet général de l'astigmatisme cornéen est de créer une sorte d'étirement des images, soit parallèlement à la direction de l'arête, soit perpendiculairement, suivant la mise au point. Beaucoup d'yeux n'ont pas de déformation sensible de ce genre, c'est le cas pour mon œil gauche : on voit figure 11 qu'il n'y a pas d'étirement général des images qu'il fournit. Il faut donc attribuer les irrégularités étoilées normales à des défauts intérieurs.

Irrégularités intérieures. — Il est certain qu'une irrégularité qui trouble la transmission de la lumière dans l'œil, provoque aussi le renvoi vers l'extérieur d'une certaine quantité de cette lumière. D'où le procédé d'étude de l'œil connu sous le nom d'examen à la « lampe à fente ». Cet appareil crée un faisceau lumineux à peu près parallèle, très intense et de section rectangulaire allongée de haut en bas. La figure 12 montre schématiquement, vu en plan, le trajet de ce faisceau dans l'œil et la façon dont les divers milieux renvoient de la lumière vers l'observateur, dans la mesure, justement, où ils troublent la transmission de cette lumière.

L'examen se fait à l'œil nu ou au microscope et révèle l'existence d'irrégularités à toutes les échelles. La figure 13 montre le trajet du faisceau révélé par la lumière renvoyée vers l'observateur. On constate que ce qui brille le plus, c'est la cornée (mais elle est très mince) et surtout le cristallin. L'humeur aqueuse ne brille pas ; la chambre antérieure qui la contient est normalement, suivant l'expression consacrée, « optiquement vide ». La lumière renvoyée par le corps vitré ne s'observe que difficul-

(1) « Comment un appareil d'optique précis, l'œil, a pu être réalisé avec des tissus mous », *Société Française d'Ophthalmologie*, mai 1929.

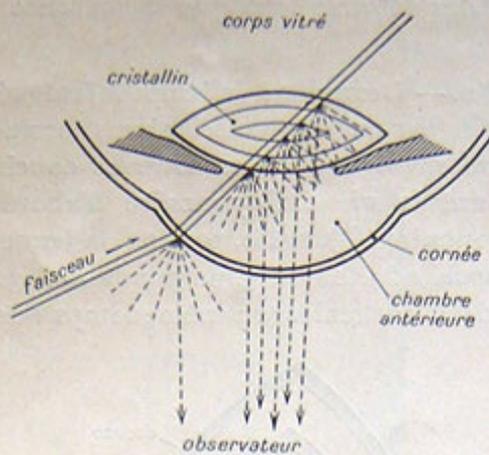


FIG. 12. — Vue en plan du trajet dans l'œil du faisceau de la lampe à fente.

teusement, parce qu'il est très profond. Cet organe apparaît nettement plus sombre que le cristallin, donc moins troublant pour le faisceau ; on observe facilement, d'autre manière (entoptiquement), sa structure et on peut penser qu'au total il altère peu les images. C'est le cristallin qui est la grosse masse réfléchissante, donc « troublante ». Nous allons essayer de

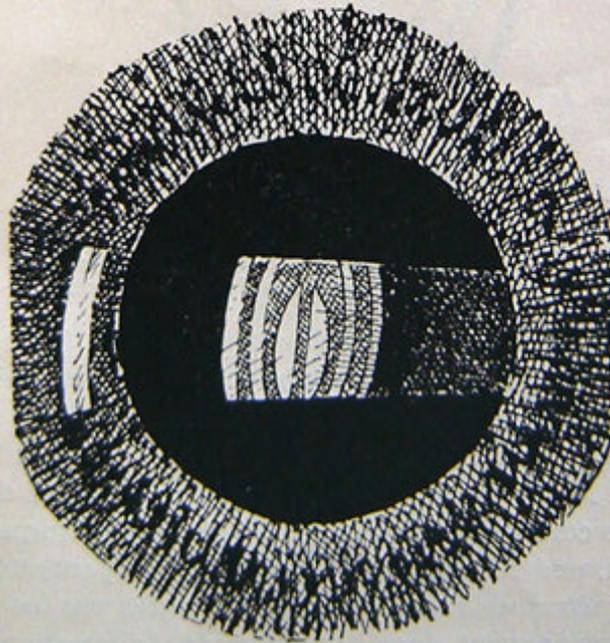


FIG. 13. — Trajet dans l'œil du faisceau de la lampe à fente (vue de face). D'après le docteur Mawas.

nous faire une idée des déformations que sa présence peut imprimer aux images rétiniennes.

Structure du cristallin. — L'examen à la lampe à fente révèle nettement une structure du cristallin par couches successives, connue depuis longtemps et appelée « structure en oignon ». Les diverses couches se forment progressivement, pendant la vie embryonnaire d'abord jusqu'au volume appelé noyau embryonnaire (figure 14), pendant la jeunesse et l'adolescence jusqu'au volume appelé adulte, et même pendant l'âge adulte se forment encore des couches dites corticales (en même temps que cette croissance se

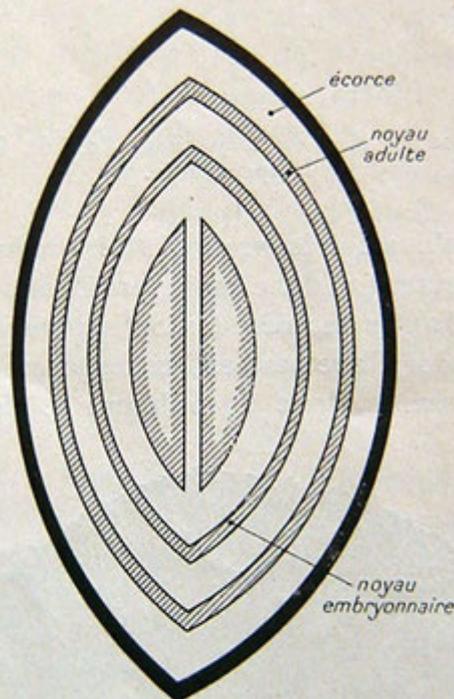


Fig. 14. — Structure en oignon du cristallin (schéma de Vogt. coupe suivant l'axe optique, d'avant en arrière).

poursuit à la périphérie, le centre se durcit peu à peu). Ces couches successives ne sont pas de même indice de réfraction, l'indice diminue un peu du centre vers la périphérie. Dans la classification donnée à l'ouverture de cette séance, cette variation correspondrait aux défauts d'homogénéité progressifs dont M. Fabry a fait remarquer qu'ils créent des aberrations qui peuvent être compensées par des changements de forme des surfaces. Réciproquement, une telle variation lente d'indice peut atténuer certaines aberrations géométriques insuffisamment corrigées par les surfaces. C'est le cas ici. Le plus souvent, dans l'œil humain, l'aberration sphérique est sous-correctée : la diminution d'indice du cristallin vers la périphérie apporte une légère correction, généralement favorable.

Les couches successives du cristallin ne sont pas elles-mêmes homogènes. Chacune est formée d'un très grand nombre de fibres cylindriques allongées, pressées les unes contre les autres, séparées entre elles par une sorte de ciment, dont on doit admettre qu'il a un indice un peu différent de celui des fibres. La figure 15 représente une coupe dans une petite région,

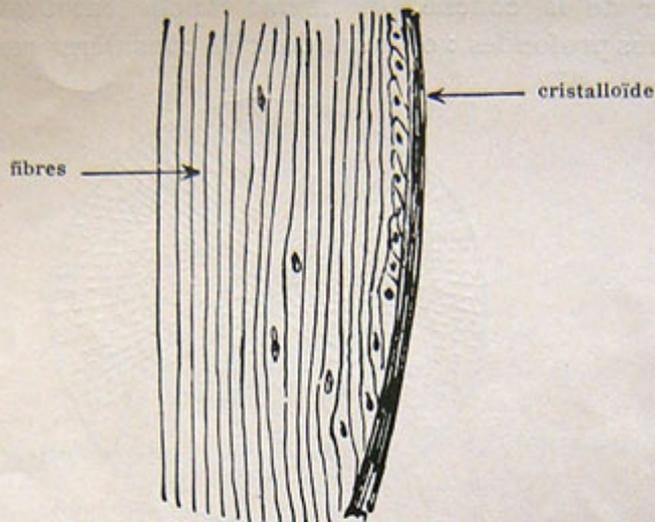


FIG. 15. — Coupe parallèlement aux fibres du cristallin (d'après Druault).

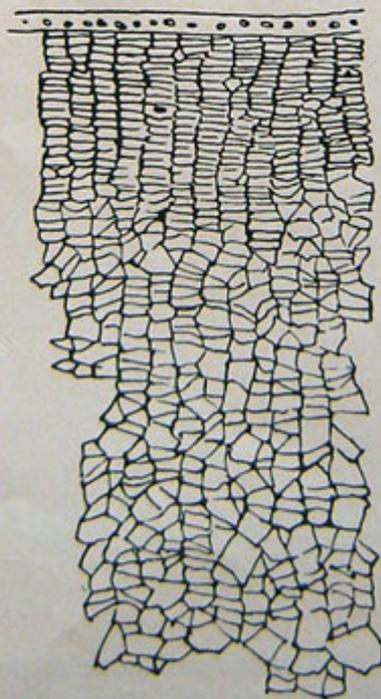


FIG. 16. — Coupe perpendiculairement aux fibres du cristallin (d'après Druault).

parallèlement aux fibres, la figure 16, une coupe perpendiculairement aux fibres. Ces fibres s'observent particulièrement bien au microscope, sur l'œil mort : leur diamètre est de quelques microns. Thomas Young en a déjà donné une description assez minutieuse. La disposition générale dans une même couche est d'allure radiale, cependant il y a des variantes suivant la profondeur de la couche. Une même couche entoure complètement les couches plus profondes : on peut donc la considérer comme formée d'une

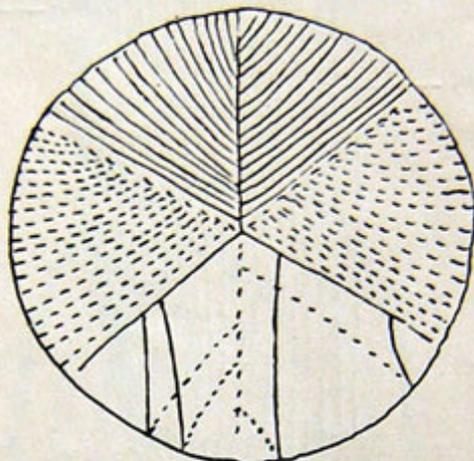


FIG. 17. — Vue de face d'une couche du noyau montrant le passage d'une même fibre de la face avant à la face arrière (Druault).

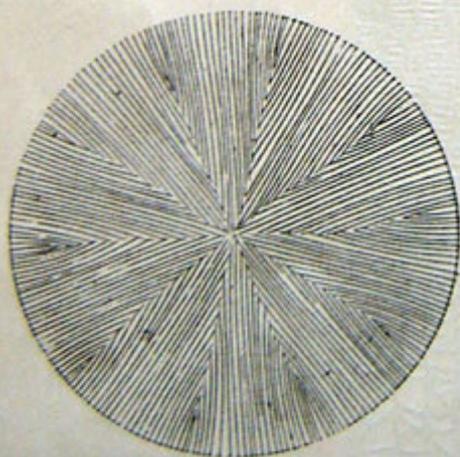


FIG. 18. — Disposition des fibres du cristallin (dessin de Th. Young).

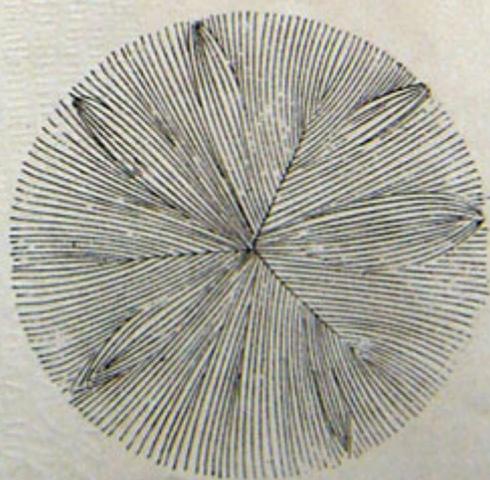


FIG. 19. — Ramifications des fibres du cristallin (dessin de Th. Young).

demi-couche antérieure et d'une demi-couche postérieure (voir fig. 14). La figure 17 montre la disposition des fibres dans une couche profonde (noyau) et comment une même fibre passe de la demi-couche antérieure



FIG. 20. — Dissociation [en lamelles des couches du cristallin (Druault).

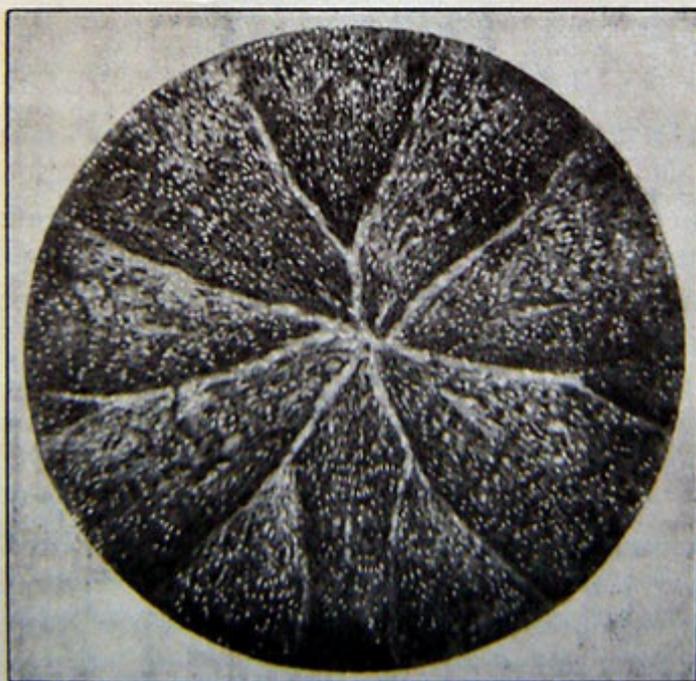


FIG. 21. — Relief des sutures, noyau adulte (Duverger et Velter).

(traits pleins) à la demi-couche postérieure (traits pointillés). Les fibres se rejoignent suivant des lignes appelées « sutures ». Dans les couches du noyau les sutures affectent la forme en Y, droit ou renversé (fig. 17). Dans les couches plus périphériques les lignes de suture se ramifient et la disposition des fibres, tout en gardant une allure générale radiale, devient plus complexe. Les figures 18 et 19 reproduisent par photographie les dessins publiés par Thomas Young en 1800.

Un point mérite une attention particulière : les différentes directions radiales du cristallin, vu de face, ne semblent pas avoir toutes la même résistance mécanique. Quand le cristallin de l'œil mort est plongé dans l'eau bouillante ou certains réactifs, les couches se dissocient en lamelles, qui se découpent suivant les lignes de suture (fig. 20). Sur le vivant même, dans certains états anormaux, la présence de ces sutures se révèle

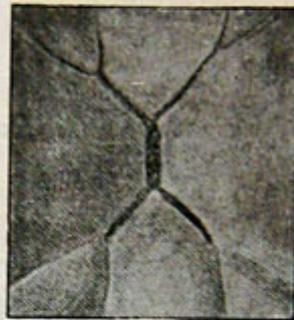


FIG. 22. — Déhiscence des sutures (Duverger et Velter).

par l'apparition de reliefs (fig. 21) ou par des déchirements — déhiscence des sutures (fig. 22). Dans certaines conditions ce sont les rayons bissecteurs des lignes de suture qui manifestent une résistance mécanique moindre que ce qui les entoure ⁽¹⁾. Or, le cristallin étant vu de face, les lignes de suture et leurs bissectrices se projettent toutes suivant la figure résultant de la superposition d'un Y droit et d'un Y renversé (couches du noyau, fig. 17) avec quelques subdivisions et ramifications (couches extérieures, fig. 18 et 19). Au total, et malgré quelques irrégularités, suivant certaines directions radiales ou ramifications de ces directions, la résistance mécanique du cristallin est moindre dans toute son épaisseur ou dans une fraction importante de celle-ci. Il est naturel de penser que suivant ces directions la lumière se propage d'une façon particulière, par exemple plus facilement que suivant les directions voisines. On ne peut

(1) Voir A. Rochon-Duvigneaud : « Structure et forme du cristallin », *Annales d'Oculistique*, t. 172 (juillet 1935).

guère expliquer que de cette façon les grosses lignes brillantes radiales, parfois ramifiées, qu'on observe dans l'image d'un point lumineux monochromatique, lorsque le défaut de mise au point est grand (fig. 11).

Action déformante des éléments du cristallin. — Nous allons étudier les déformations des images qui peuvent être obtenues par des éléments optiquement équivalents à ceux trouvés dans le cristallin. Le dispositif expérimental, très simple, est représenté figure 23. Une lentille achromatique

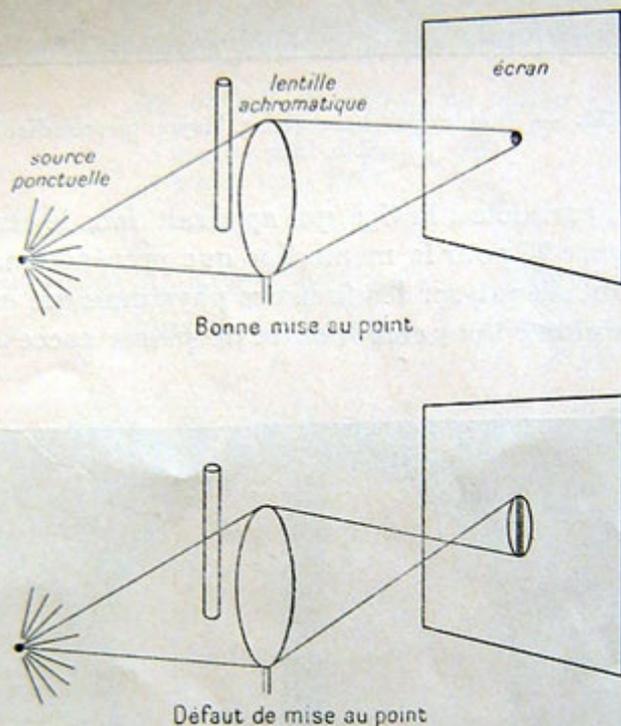


FIG. 23. — Déformation d'une image. Schéma de l'expérience.

forme sur un écran l'image d'une source ponctuelle intense. Différents objets déformants sont placés contre la lentille et on observe les déformations qu'ils créent, soit lorsque la mise au point est parfaite, soit lorsqu'il y a défaut de mise au point. La source est de lumière blanche, mais l'emploi d'une lentille achromatique nous place dans les mêmes conditions que lorsque l'œil formait l'image d'une source monochromatique.

Dans le cristallin, l'élément essentiel du trouble est une fibre, c'est-à-dire un cylindre allongé transparent entouré de tous côtés de cylindres pareils, mais séparé d'eux par une matière d'indice de réfraction légèrement différent. Passons donc devant la lentille une tige de verre allongée. Le trouble apporté est le suivant :

1° Pour une bonne mise au point, l'image ronde de la source est accom-

pagnee d'un rayon perpendiculaire au plan déterminé par la tige et l'axe de l'instrument. La figure 24 est la photographie de l'effet obtenu sur l'écran pour une tige de verre placée verticalement.

2^o Quand il y a défaut de mise au point, le trouble consiste en une



FIG. 24. — Bonne mise au point. Rayon perpendiculaire à la fibre.

ombre très noire, parallèle à la tige, qui apparaît dans le cercle de diffusion (photographie figure 25 pour la même tige que précédemment).

Il est intéressant d'analyser les facteurs physiques qui causent ces deux effets (rayon et ombre). Pour cela il suffit de placer successivement contre

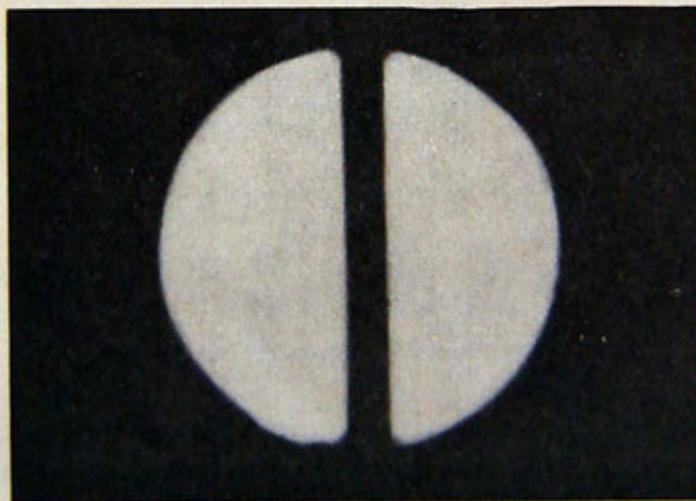


FIG. 25. — Défaut de mise au point. Ombre portée parallèle à la fibre.

la lentille une série d'objets choisis de façon à isoler certains de ces facteurs. Les observations sont consignées dans le tableau de la page 33, qui mène à la conclusion suivante : tous les facteurs physiques concourent à la production des mêmes effets, à savoir : un rayon pour une bonne mise au point, une ombre si la mise au point est défectueuse.

Un volume élémentaire du cristallin, assez petit pour que les fibres y

Nature de l'objet (placé verticalement contre la lentille)	Aspect de la déformation A) pour une bonne mise au point B) avec défaut de mise au point	Facteur physique produisant la déformation
Grosse tige opaque noir- cie (charbon d'arc)	A) rien B) ombre verticale	Interception de la lumière par opacité de la tige
Plusieurs fines tiges opa- ques noircies	A) Rayon horizontal B) Autant d'ombres ver- ticales que de tiges, à moins que celles-ci ne soient trop fines	Diffraction Interception de la lumière par opacité des tiges
Grosse tige opaque bril- lante (tige métallique nickelée)	A) Rayon horizontal B) Ombre verticale	Réflexion extérieure sur la tige Interception de la lumière par opacité de la tige
Grosse tige de verre	A) Rayon horizontal B) Ombre verticale	Réflexion extérieure, ré- fraction et réflexions in- térieures Répartition horizontale- ment dans tout l'espace, par réflexions et réfrac- tion, de la lumière qui at- teint la tige, ce qui équi- vaut à une opacité
Plusieurs fines tiges de verre	A) Rayon horizontal B) Autant d'ombres verti- cales que de tiges, ou bien une ombre géné- rale fondue, suivant gros- seur et disposition des tiges	Réflexion extérieure, ré- fraction et réflexions in- térieures, diffraction Répartition horizontale- ment dans tout l'espace par réflexion, réfraction et diffraction, de la lu- mière qui atteint les ti- ges, ce qui équivaut à une opacité

REMARQUE 1. — Pour une lentille de 6 à 10 cm de diamètre, de 20 à 50 cm de distance focale, une distance de projection de 3 à 10 m, on considérera comme grosse une tige de 0,5 à 1 cm de diamètre, comme fine une tige de moins de 0,1 cm de diamètre.

REMARQUE 2. — Si on opère avec une lentille possédant une très forte aberration sphérique, et si on cherche la mise au point pour laquelle il existe une concentration nette de la lumière au milieu d'un halo visible, on constatera la présence simultanée du rayon et de l'ombre (cette dernière dans le halo) ; cela s'explique grossièrement en disant que dans ce cas il y a simultanément bonne mise au point et défaut de mise au point.

soient toutes à peu près parallèles, produira la déformation simple suivante :

1° Si la radiation est bien au point, un rayon perpendiculaire aux fibres ;

2° S'il y a défaut de mise au point, une ombre générale, car les fibres sont très fines. Cependant cette ombre pourra être modelée, à cause d'une certaine irrégularité qui existe toujours dans la disposition des fibres et qui doit donner une sorte d'effet de moiré.

Nous avons trouvé qu'une simple feuille de cellophane placée devant la lentille donne une déformation tout à fait semblable à celle ci-dessus décrite ; cela résulte d'un très grand nombre de stries parallèles venant de

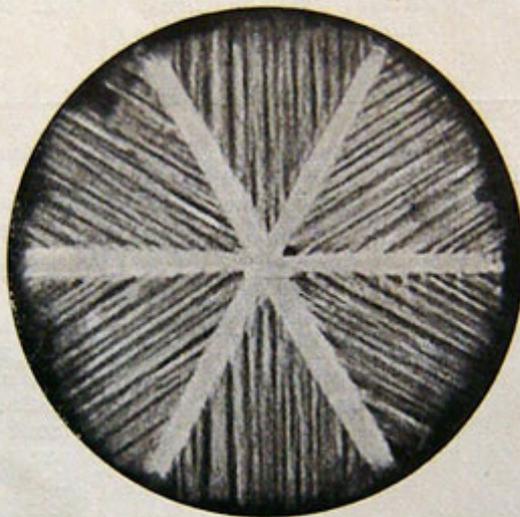


FIG. 26. — Système déformant équivalent à l'ensemble du cristallin.

la fabrication de ce matériau. Utilisant cette propriété, nous avons tenté de réaliser un modèle optique donnant grossièrement les mêmes déformations que l'ensemble du cristallin.

Action déformante de la totalité du cristallin. — Le système réalisé, si on l'interpose entre une source ponctuelle et un écran, porte l'ombre dont la photographie est donnée figure 26, sorte d'examen qui non seulement montre l'objet, mais en révèle les défauts optiques. Le système est un disque plat composé de six secteurs de cercle, chacun lui-même formé de cinq feuilles de cellophane superposées de façon que les stries soient parallèles dans un même secteur, dirigées en gros radialement. On voit dans chaque secteur les ombres portées par les stries, qui se groupent en une espèce de moiré irrégulier. Les secteurs sont nettement séparés les uns des

autres, laissant des bandes où la lumière se propage librement; ces bandes sont l'équivalent des sutures du cristallin, mais l'effet de passage plus libre de la lumière est très exagéré. Voici quelles déformations donne ce système quand on le place contre la lentille dans l'expérience schématisée figure 23.



FIG. 27. — Déformation obtenue quand la mise au point est bonne.

Quand la mise au point est bonne, l'image est déformée comme le montre la figure 27 (photographie de l'image obtenue sur l'écran). On voit les trois rayons qui correspondent (en leur étant perpendiculaires) aux trois directions de fibres de la photographie 26.

Avec défaut de mise au point, la déformation est celle montrée par la

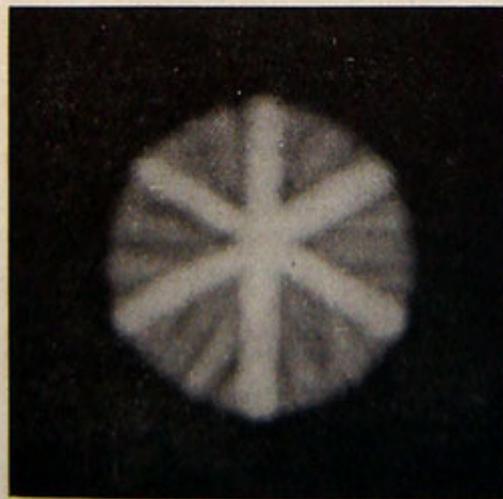


FIG. 28. — Déformation obtenue quand il y a défaut de mise au point.

photographie 28. Il y a trois lignes brillantes résultant des séparations entre les segments ; entre ces lignes, on voit une sorte d'ombre générale, modulée de façon estompée par les effets de moiré irrégulier indiqués ci-dessus.

Les photographies 27 et 28 reproduisent assez bien les éléments de déformation qu'on observe dans les images rétiniennes, toutefois une grande différence subsiste avec les dessins de la figure 11 : les dessins sont beaucoup plus nets. Cela peut s'expliquer assez bien. Les dessins sont une reproduction à grande échelle de la sensation provoquée par la petite image rétinienne de la source. Or, à l'échelle de ces petites images (leur grandeur va de quelques microns à quelques dizaines de microns), la sensation de flou n'existe pas. Une très petite tache de lumière ou d'ombre paraît nette ou ne paraît pas. C'est pourquoi les systèmes de rayons et d'ombres des images rétiniennes paraissent nets bien qu'ils soient certaine-

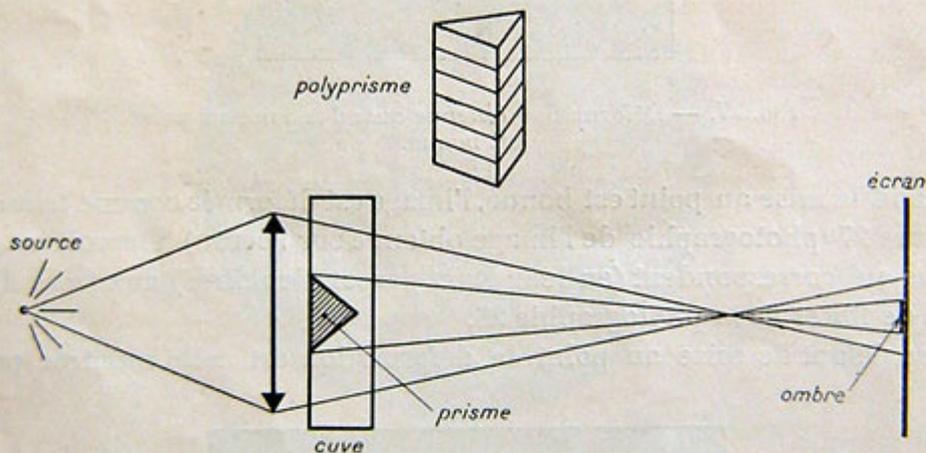


FIG. 29. — Action d'une très faible différence d'indice de réfraction (Schéma de l'expérience, vue en plan).

ment estompés. Par le dessin (fig. 11) on les agrandit tels qu'on les perçoit, donc avec une netteté parfaite. La photographie au contraire (fig. 27 et 28) nous met directement sous les yeux les dégradés de l'image déformée, à une échelle assez grande pour que la sensation de flou se produise.

Action des différences d'indice de réfraction. — Les différences d'indice de réfraction entre les diverses parties constituant un des milieux optiques de l'œil, sont certainement très faibles. On pourrait penser que les déformations créées sont forcément aussi très faibles. Il n'en est rien, des effets déformants très marqués peuvent être provoqués par des différences d'indice très petites. On peut toucher cette vérité au moyen de l'expérience simple schématisée figure 29. L'image d'une source ponctuelle est formée

sur un écran par une lentille achromatique. Il y a défaut de mise au point, donc normalement l'image consiste en un cercle (dit cercle de diffusion), dans lequel la répartition de la lumière est à peu près uniforme. Contre la lentille nous disposons une cuve contenant un liquide d'indice réglable ⁽¹⁾, dans lequel nous noyons un polyprisme d'angle 60° (série de prismes de verres différents collés les uns sur les autres). Le liquide est réglé de telle sorte que son indice soit très voisin de celui d'un des éléments du polyprisme ; pour les autres éléments la différence d'indice avec le liquide est notable. Chacun de ces éléments prismatiques superposés provoque une

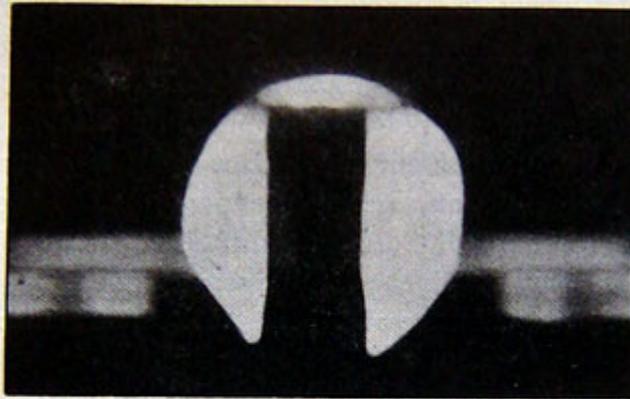


FIG. 30. — Action d'une très faible différence d'indice de réfraction (Photographie de l'image déformée).

déviations et une dispersion du faisceau ; chacun donne, étant donnée la disposition, deux spectres plus ou moins écartés du centre de l'image suivant que la différence d'indice de l'élément avec le liquide est plus ou moins grande. La figure 30 est la photographie de l'image qui résulte ; on voit les spectres correspondant aux deux éléments d'indice le plus voisin de celui du liquide, les autres spectres sont sortis du champ. Au centre, il y a une ombre générale qui représente l'image grossière de la totalité du prisme ; on est tout de suite frappé par ceci : l'ombre est également noire partout, aussi bien pour les éléments dont l'indice est très voisin de celui du liquide, que pour ceux dont l'indice est très différent.

Le polyprisme est en somme une fibre qui déforme l'image, mais qui ne fonctionne pas tout à fait comme les fibres pouvant exister dans l'œil. En effet, quand un morceau de verre (le prisme) et un liquide possèdent des indices voisins, leurs dispersions sont très différentes (celle du liquide est

(1) En fait, un mélange de sulfure et de tétrachlorure de carbone.

beaucoup plus forte) ; c'est ce qui cause les spectres très étalés qu'on aperçoit sur la photographie. Au contraire, quand deux liquides formés en gros des mêmes substances parviennent au voisinage de l'égalité d'indice, leurs dispersions sont pratiquement les mêmes, c'est ce qui se produit dans les milieux optiques de l'œil. Pour rendre notre expérience bien équivalente à ce qui se passe dans l'œil, il faut conserver la déviation et annuler la dispersion : il suffit d'interposer devant la source un écran ne laissant passer que le rouge. Les spectres se réduisent alors à de minces bandes rouges ; quant à l'ombre du prisme, elle reste tout aussi noire et aussi uniforme.

Pour l'élément d'indice le plus voisin de celui du liquide, la différence relative d'indice avec le liquide était, dans l'expérience effectuée au cours de la séance, de $4/1000$ ⁽¹⁾ ; or, l'ombre portée était tout à fait noire. Dans cette expérience très simple l'explication est immédiate : la lumière qui traverse le prisme est entièrement déviée, la tache qu'elle produit sur l'écran la reçoit toute, il ne peut donc pas y en avoir dans cette sorte d'image du prisme qui se forme dans le cercle de diffusion. Néanmoins, il est assez impressionnant de voir un objet parfaitement transparent, plongé dans un milieu d'indice extrêmement voisin, se comporter comme absolument opaque.

Ce qui est vrai de l'ombre portée l'est aussi du rayon. Un rayon très intense peut être produit par une fibre dont l'indice est très voisin de celui du liquide ; il est seulement plus court que celui que provoquerait une grande différence d'indice.

Ainsi, malgré la faiblesse certaine des différences d'indice au sein des milieux optiques de l'œil, le jeu des rayons et des ombres que nous avons étudié ci-dessus pourra très bien se produire et expliquer, moyennant une analyse ultérieure plus complète, les figures que l'on perçoit quand on regarde une source ponctuelle.

(Laboratoire de Physique du P. C. B. et Institut d'Optique).

— Pour la bibliographie, nous renvoyons le lecteur à l'article publié dans la *Revue d'optique*, tome 15 (1936), pages 121 à 145.

— Complément :

Druault « *Appareil de la Vision* », dans l'Anatomie Humaine de Poirier et Charpy.

(1) On la mesure aisément par la déviation de la tache rouge.