

AU SUJET DES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DU CRISTALLIN ⁽¹⁾

Par ALEXANDRE IVANOFF.

Professeur à l'École supérieure de Physique et de Chimie industrielles.

Sommaire. — L'étude expérimentale de l'aberration sphérique de l'œil montre que l'on peut distinguer dans la partie du cristallin non recouverte par l'iris deux régions assez distinctes. Pour une distance à l'axe supérieure à 0,5 mm le cristallin est une lentille presque parfaitement stigmatique, dont l'indice moyen décroît de l'axe vers la périphérie suivant la loi $n = n_0 - 0,002 h^2$. La majeure partie de la convergence de cette lentille est due à son hétérogénéité et non à sa courbure. Pour une distance à l'axe inférieure à 0,5 mm le cristallin est entaché d'une forte aberration sphérique, très variable avec l'état d'accommodation. Cette région centrale du cristallin n'intervient que pour de faibles diamètres pupillaires.

Lorsqu'on traite la dioptrique de l'œil dans les conditions d'approximation de Gauss, on remplace le cristallin réel par un cristallin fictif supposé homogène, de mêmes rayons de courbure et de même épaisseur, et dont l'indice, appelé « indice total du cristallin », est pratiquement choisi en sorte que le foyer image F' de l'œil normal moyen désaccommodé tombe sur la rétine (*fig. 1*), ou très légèrement au

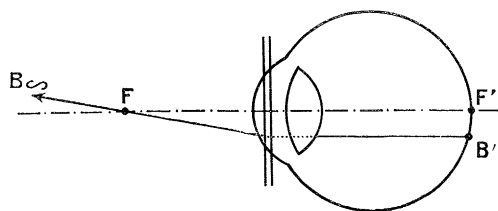


Fig. 1.

delà (autrement dit en sorte que l'œil normal moyen soit emmétrope, ou très légèrement hypermétrope). Lorsque l'œil regarde un objet situé à distance finie, son cristallin se bombe, et l'on peut mesurer

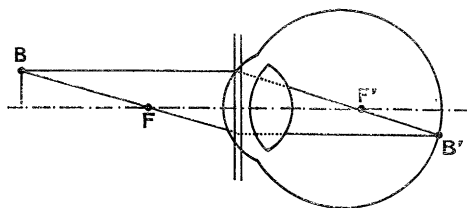


Fig. 2.

ses nouveaux rayons de courbure et sa nouvelle épaisseur (le rayon de courbure de la face arrière est d'ailleurs sensiblement constant). Si l'on écrit alors que l'image de l'objet regardé se forme sur

la rétine (*fig. 2*), on trouve que l'indice total du cristallin a augmenté notablement durant l'accommodation (de 0,01 environ pour 7 dioptries d'accommodation). C'est ce que Gullstrand a appelé « mécanisme intracapsulaire de l'accommodation ».

Le fait que l'indice total varie durant l'accommodation n'est guère étonnant. On sait que le cristallin réel est hétérogène, et que son indice varie du centre à la périphérie. L'indice total n'est donc qu'une fiction commode rendant compte de l'effet global du cristallin réel, et fonction de la distribution des indices à l'intérieur du cristallin. Lorsque le cristallin se déforme, cette distribution varie probablement, ce qui entraîne une modification de l'indice total. Essayons donc d'étudier les phénomènes de plus près, et de préciser à quelles réalités physiques correspond la notion d'indice total. Pour cela nous allons considérer l'aberration sphérique de l'œil.

Ainsi qu'il ressort des observations faites par divers auteurs et par diverses méthodes, l'œil désaccommodé est sous-corrigé, autrement dit sa convergence augmente avec la distance à l'axe (*fig. 3*). Il

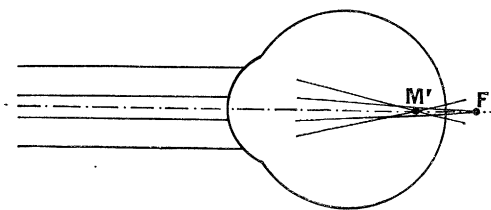


Fig. 3.

s'ensuit que la meilleure image, celle que l'œil a intérêt à amener sur la rétine, se trouve non pas au foyer de Gauss F' , mais en deçà, quelque part entre F' et le foyer M' des rayons marginaux, en un point dont l'abscisse est fonction de l'aberration sphérique et du diamètre de la pupille. Les observations faites par Tscherning et les mesures que j'ai

⁽¹⁾ Conférence faite le 10 juin 1949 devant la Section d'Optique de la Société française de Physique.

effectuées moi-même ⁽²⁾ montrent que l'aberration sphérique de l'œil varie avec l'état d'accommodation, et qu'un œil accommodé de plus de 1 dioptrie devient sur-correcté : sa convergence diminue avec la distance à l'axe (*fig. 4*), et la meilleure image passe

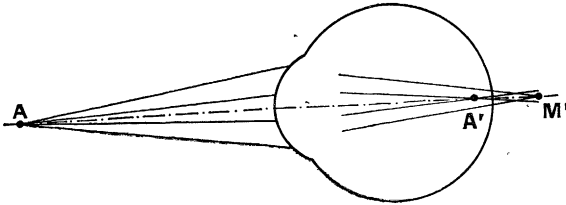


Fig. 4.

au delà de l'image paraxiale A'. On pourrait croire au premier abord que ce déplacement de la meilleure image par rapport à l'image paraxiale, se produisant pendant l'accommodation, constitue un phénomène par lequel il convient de compléter la dioptrie de l'œil faite dans les conditions d'approximation de Gauss, car ce qui importe, c'est l'abscisse de la meilleure image, et non celle de l'image paraxiale.

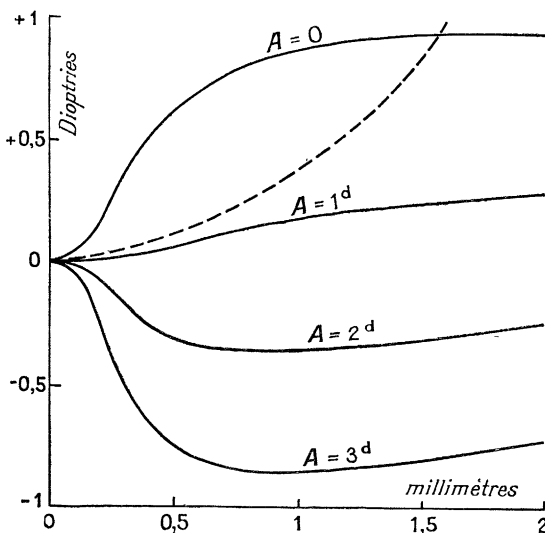


Fig. 5. — Aberration sphérique de l'œil pour 0, 1, 2 et 3 dioptries d'accommodation (résultats moyens pour 10 yeux). En abscisse la distance à l'axe, en ordonnée l'aberration (comptée positivement lorsque la convergence est plus grande que sur l'axe). En trait discontinu l'aberration « théorique ».

En fait, ce déplacement est inclus dans la notion d'indice total du cristallin, car cet indice total correspond à la meilleure image : lorsque l'on mesure les constantes optiques de l'œil pour un état d'accommodation donné, c'est la meilleure image, et non

l'image paraxiale, qui se trouve sur la rétine. Au fond l'indice total est une fiction qui non seulement simplifie les calculs dans le domaine paraxial, mais qui de plus englobe l'aberration sphérique de l'œil dans ce que l'on appelle « dioptrie de l'œil dans les conditions d'approximation de Gauss ».

Ce premier point étant établi, considérons les valeurs numériques moyennes de l'aberration sphérique de l'œil, que j'ai mesurées en 1947 sur 10 yeux, pour divers états d'accommodation ⁽³⁾. On voit figure 5 que pour l'œil désaccommodé comme pour l'œil accommodé l'aberration reste sensiblement constante pour une distance à l'axe supérieure à 0,5 mm. Autrement dit, pour un état d'accommodation donné, tous les rayons pénétrant dans la pupille concourent sensiblement en un même point, sauf ceux qui pénètrent par une petite région centrale de 1 mm environ de diamètre. Ceci montre, d'une part, que la meilleure image coïncide très sensiblement avec l'image marginale (*fig. 6*), et,

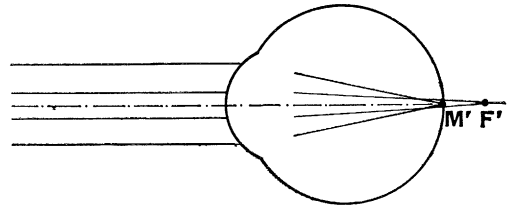


Fig. 6.

d'autre part, que cette meilleure image est presque aussi bonne que s'il y avait stigmatisme rigoureux ⁽³⁾. En somme, les qualités optiques de l'œil peuvent sembler très mauvaises si l'on prend pour point de référence le centre de la pupille, mais en fait elles sont excellentes si l'on élimine au contraire une petite région centrale de la pupille, qui n'intervient que faiblement dans la constitution de la meilleure image (tout au moins pour des diamètres pupillaires égaux ou supérieurs à 4 mm).

Les valeurs expérimentales trouvées pour l'aberration sphérique de l'œil montrent bien que le cristallin est hétérogène, et que la distribution des indices à son intérieur se modifie durant l'accommodation. En effet, Y. Le Grand a déterminé par voie trigonométrique l'aberration sphérique de l'œil théorique, à cristallin fictif homogène ⁽⁴⁾ : cette aberration « théorique », représentée figure 5 en trait discontinu, est très sensiblement du troisième ordre, et de plus est indépendante de l'état d'accommodation (la part due à la face avant du cristallin étant très faible). Les valeurs expérimentales de

⁽³⁾ Le calcul rigoureux, fait par Y. Le Grand, montre que la meilleure image coïncide avec l'image marginale à quelques centièmes de dioptrie près, et que l'éclairement au centre de cette meilleure image est égal aux 39/40^e de celui que l'on obtiendrait en absence d'aberration.

⁽⁴⁾ Y. LE GRAND, *Cours d'Optique physiologique* à l'Institut d'Optique de Paris.

⁽²⁾ A. IVANOFF, *Revue d'Optique*, 1947, 26, p. 145.

l'aberration sphérique de l'œil ne peuvent donc être expliquées que par une variation de l'indice du cristallin à partir de l'axe, suivant une loi variable avec l'état d'accommodation. Il s'agit d'ailleurs d'un « indice moyen durant la traversée du cristallin », traduisant l'effet global du cristallin à une certaine distance de l'axe.

Des lois de variation de l'aberration sphérique, représentées figure 5, on peut déduire par voie trigonométrique les lois de variation de l'indice moyen durant la traversée du cristallin, tout au moins en admettant que les rayons lumineux sont rectilignes à l'intérieur du cristallin, et sensiblement parallèles à l'axe. Les résultats ainsi obtenus sont représentés figure 7. On trouve que pour une distance

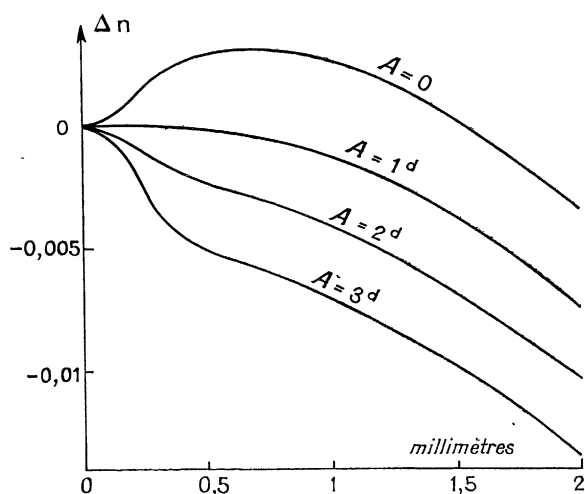


Fig. 7. — Variations de l'indice moyen du cristallin avec la distance à l'axe, pour 0, 1, 2 et 3 dioptries d'accommodation (résultats moyens pour 10 yeux).

à l'axe supérieure à 0,5 mm la loi de variation est très sensiblement parabolique, de la forme $n = n_0 - kh^2$ (ainsi que l'avait supposé dès 1883 Matthiessen). Pour h compté en millimètres, le coefficient k est de l'ordre de 0,002, quel que soit l'état d'accommodation. Par conséquent, si l'on exclut une petite région centrale de 1 mm environ de diamètre (intervenant peu ainsi que nous l'avons vu dans la constitution de la meilleure image), le cristallin est une lentille bi-convexe dont l'indice moyen varie de l'axe vers la périphérie suivant la loi $n = n_0 - 0,002 h^2$. Une telle lentille hétérogène est stigmatique avec le même degré d'approximation qu'une lentille homogène, et l'on peut calculer facilement l'indice de la lentille homogène de même forme géométrique et de même convergence (voir par exemple l'*Optique géométrique supérieure* de H. Bouasse). Cet indice ne sera autre que ce que l'on appelle indice total du cristallin, tout au moins autant que l'image marginale (qui correspond au cristallin privé de sa

partie centrale) coïncide avec la meilleure image (qui correspond à l'indice total). De la valeur de l'indice total correspondant à chaque état d'accommodation, on peut déduire réciproquement la valeur de n_0 pour chaque état d'accommodation. On pourrait en somme remplacer le cristallin fictif homogène par le cristallin hétérogène que nous venons de définir, et se rapprocher ainsi beaucoup plus de la vérité. Mais l'on compliquerait assez inutilement l'étude de la dioptrique de l'œil. Néanmoins il est bon de savoir que la majeure partie de la convergence du cristallin est due non pas à sa courbure mais à son hétérogénéité : une lentille à faces planes de 4 mm d'épaisseur et d'indice variable à partir de l'axe suivant la loi $n = n_0 - 0,002 h^2$ aurait une convergence de 16 dioptries (alors que la convergence du cristallin est d'environ 22 dioptries). D'ailleurs si l'on enserre un cristallin de lapin entre deux lames de verre parallèles distantes de 4 mm (fig. 8), la lentille hétérogène à faces

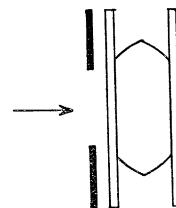


Fig. 8.

parallèles ainsi constituée a 25 dioptries de convergence (ce qui conduit pour le cristallin de lapin à la loi $n = n_0 - 0,003 h^2$). Les considérations qui précèdent correspondent donc bien à une réalité physique, et ne consistent pas simplement à remplacer un cristallin fictif homogène par un cristallin fictif plus compliqué, ainsi qu'on le fait parfois.

Pour une distance à l'axe inférieure à 0,5 mm la loi de variation de l'indice varie avec l'état d'accommodation, ce qui correspond à la variation de l'aberration sphérique avec l'état d'accommodation. Cette partie centrale du cristallin n'intervient toutefois que lorsque la pupille est fortement contractée, ce qui a lieu, d'une part, pour de fortes brillances, et, d'autre part, pour de fortes accommodations. La contraction pupillaire provoquée par un éclaircissement intense diminue la convergence d'un œil désaccommodé, en rapprochant la meilleure image de l'image paraxiale (l'œil désaccommodé étant sous-correcté) : effectivement l'expérience montre que les éclaircissements intenses provoquent une hypermétropie de l'ordre de 0,4 dioptrie⁽⁵⁾. La contraction pupillaire accompa-

(5) De même la contraction pupillaire sénile doit provoquer une hypermétropie du même ordre, ce qui expliquerait, tout au moins en partie, l'existence de l'« hypermétropie sénile ».

gnant l'accommodation augmente au contraire la convergence de l'œil, en rapprochant la meilleure image de l'image paraxiale (l'œil accommodé étant sur-corrigé) : elle augmente par conséquent l'amplitude d'accommodation. Le cristallin est en somme une lentille bi-focale dont la plage centrale, n'intervenant que lorsque la pupille est fortement contractée, est moins convergente ou plus convergente que la partie périphérique, suivant que l'œil est désaccommodé ou accommodé. On peut remarquer

que les effets dus à la contraction pupillaire peuvent d'ailleurs être englobés dans la notion d'indice total, mais il faudrait alors admettre que cet indice total diminue ou augmente par contraction pupillaire, suivant que l'œil est désaccommodé ou accommodé. Il n'est donc pas inutile de préciser cette notion d'indice total.

Manuscrit reçu le 9 juin 1949.