



# YEUX SCHÉMATIQUES

## AUTEUR

**Prof. Earl L. Smith III:** Université de Houston

## RÉVISION PAR LES PAIRS

**Prof. Emeritus Barry L. Cole:** Université de Melbourne

## INTRODUCTION ET SURVOL

Ce chapitre inclura:

- Les paramètres oculaires fréquemment utilisés dans les yeux schématiques
- L'oeil schématique exact de Gullstrand
- Les effets d'une constante optique qui varie

## PARAMÈTRES OCULAIRES FRÉQUEMMENT UTILISÉS DANS LES YEUX SCHÉMATIQUES

### PROFONDEUR DE LA CHAMBRE ANTÉRIEURE

La profondeur de la chambre antérieure (PCA) correspond à la distance entre la surface postérieure de la cornée et l'apex de la surface antérieure du cristallin. La PCA varie entre 2.7 et 4.5 mm avec une moyenne d'environ 3.45 mm.

### L'INDICE DE RÉFRACTION DU CRISTALLIN

Les paramètres d'un cristallin typique sont illustrés dans la Figure 3.1. Le rayon de la surface antérieure du cristallin est d'environ 6mm et le rayon postérieur est d'environ 10mm.

La mesure de l'indice de réfraction de la cornée (1.376), de l'humeur aqueuse (1.336) et du vitré (1.336) est simple car ces milieux sont uniformes. Par contre, le cristallin n'est pas homogène. Il contient une série de lames dans lesquelles l'indice de réfraction croît graduellement de la surface vers le centre. Chez les jeunes adolescents, le changement d'indice est continu dans tout le cristallin. Avec l'âge, des portions du cristallin deviennent séparées du reste du cristallin et forment des surfaces, observables au biomicroscope, ayant différents indices de réfraction. En particulier, le **noyau** central du cristallin se démarque du **cortex** qui l'entoure. La variation de l'indice de réfraction entre le noyau et le cortex est suffisante pour former des images, comme celles formées à partir de miroirs, à la jonction du noyau et du cortex.

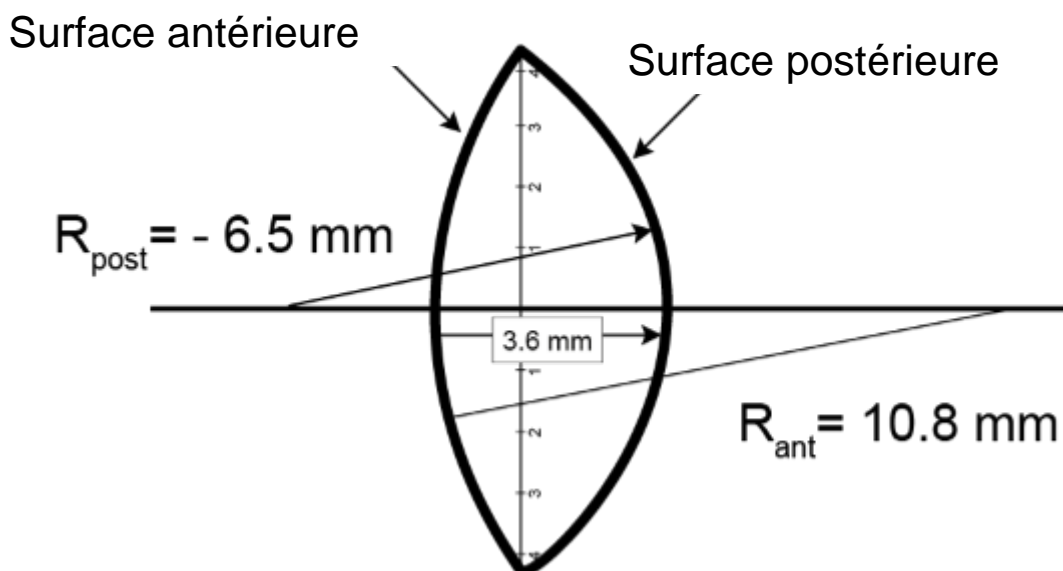


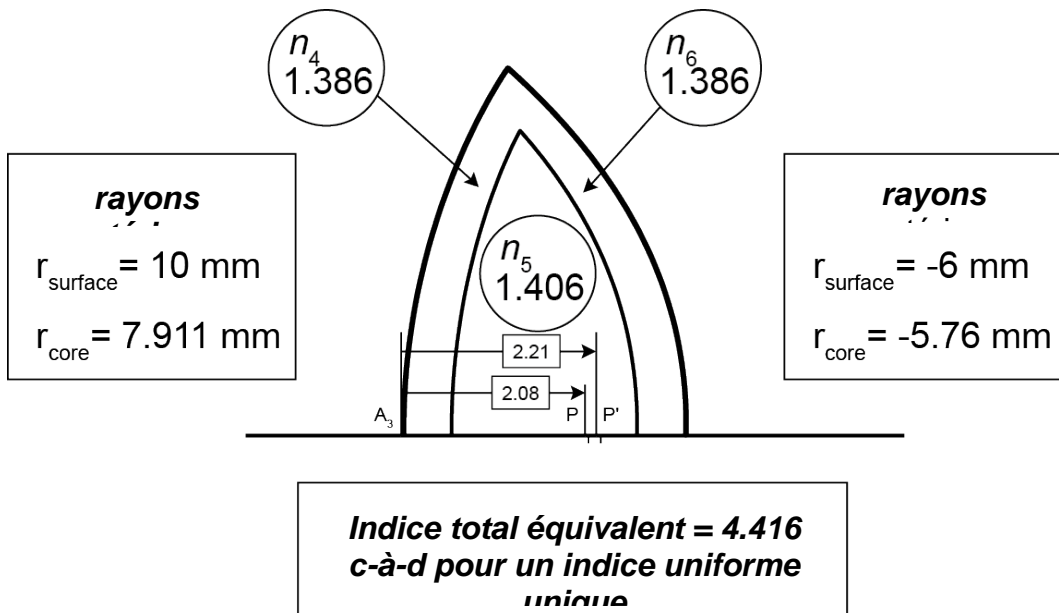
Figure 3.1: Paramètres oculaires d'un cristallin typique

Les indices de réfraction d'un milieu optique ne peuvent pas être mesurés précisément dans l'oeil vivant. Les valeurs mesurées pour développer l'oeil schématisé ont été mesurées dans des études post-mortem. L'instrument utilisé pour mesurer ces indices de réfraction est le **Réfractomètre Abbe**. Cet instrument contient un télescope d'observation ainsi qu'un prisme, d'indice de réfraction connu. Le télescope est utilisé afin de trouver l'angle d'incidence critique à la jonction du prisme et de la substance en question. Quand une raie de lumière rejoint la jonction selon l'angle critique, l'angle de réfraction sera de 90°, c'est-à-dire que le rayon réfracté coïncidera avec la surface de la jonction. Le sinus de l'angle critique pour un milieu donné varie avec le rapport entre l'indice de réfraction de la substance en question ( $n_{\text{inconnu}}$ ), et avec l'indice de réfraction du prisme ( $n_{\text{prisme}}$ ) ;  $\left( \frac{n_{\text{inconnu}}}{n_{\text{prisme}}} \right)$ .

Le cristallin n'a pas un indice de réfraction unique. Même dans un oeil normal, il existe des zones de discontinuité, associées avec les périodes de croissance. Ces zones sont particulièrement apparentes lorsqu'il y a présence d'une opacité dans une des couches du cristallin.

Du point de vue optique, le cristallin est compliqué, mais la variation d'indice qui croît de la périphérie vers le centre (noyau) présente deux avantages. Premièrement, la puissance de réfraction est plus grande. Même si le cristallin était homogène avec un indice de réfraction qui ne variait pas, un cristallin équivalent avec un indice de réfraction qui croît aurait une puissance plus élevée. Deuxièmement, l'anatomie du noyau réduit la quantité d'aberration sphérique positive dans l'oeil.

Étant donné que c'est très compliqué de gérer des structures qui ont un indice de réfraction qui varie continuellement, le cristallin est généralement considéré comme ayant deux parties, le **noyau** biconvexe, entourée d'un **cortex** plus grand, également biconvexe. L'indice de réfraction du cortex et du noyau sont respectivement 1.386 et 1.406. Les modèles de cristallins schématisés ayant deux parties l'une à l'intérieur de l'autre, avec des indices de réfraction uniformes mais différents, sont appelés **lentilles équivalentes** (voir Figure 3.3).



**Figure 3.3:** Schéma démontrant l'indice de réfraction uniforme nécessaire afin de représenter une lentille équivalente pour l'oeil

## PUISSANCE DU CRISTALLIN

Sans accommodation, le cristallin moyen a généralement une puissance d'environ +20.8 D. Par contre, les données disponibles varient et sont estimées indirectement.

## LONGUEUR AXIALE

La distribution de fréquences pour les composantes individuelles de l'oeil, à l'exception de la longueur axiale, suivent une distribution normale de Gauss. Sorsby (1981) a déduit que la longueur axiale étant distribuée de façon aléatoire dans la population générale. Bien que sélectionnée de façon aléatoire, la population était petite. Stenstrom (1948) a déduit que la distribution était asymétrique et avait un pic plus pointu que 'normal' (leptokurtique), grâce à une population plus grande (voir Figure 3.8). Étant donné que la distribution d'indice de réfraction est leptokurtique, on ne peut pas déduire un lien entre les composantes individuelles. La corrélation la plus significative est généralement trouvée entre l'erreur de réfraction et la longueur axiale.

## L'OEIL SCHÉMATIQUE EXACT DE GULLSTRAND

Les yeux schématiques sont des modèles du système optique de l'oeil. Il y a plusieurs schémas différents, car il y a plusieurs chercheurs qui s'y intéressent. Par contre, il y a trois schémas qui diffèrent principalement selon leur complexité. Un des schémas les plus détaillés du système optique de l'oeil est **L'oeil schématique exact de Gullstrand** (on le dénomme aussi Gullstrand's # 1 eye; voir Figure 3.4 et le Tableau 3.1). L'oeil schématique exact de Gullstrand est un oeil hypermétrope (environ +1.00 D) et contient 6 surfaces de réfraction, dont 4 qui sont associées à une lentille équivalente. L'avantage premier de l'oeil exact de Gullstrand réside dans le fait que toutes les constantes de l'oeil donnent une très bonne approximation des dimensions de 'l'oeil moyen'. Des comparaisons entre les caractéristiques des yeux de différents patients et de l'oeil exact de Gullstrand peuvent servir à indiquer l'origine de l'erreur de réfraction d'un patient (par exemple: est-ce que l'amétropie du patient est **axiale** ou **réfractive**?).

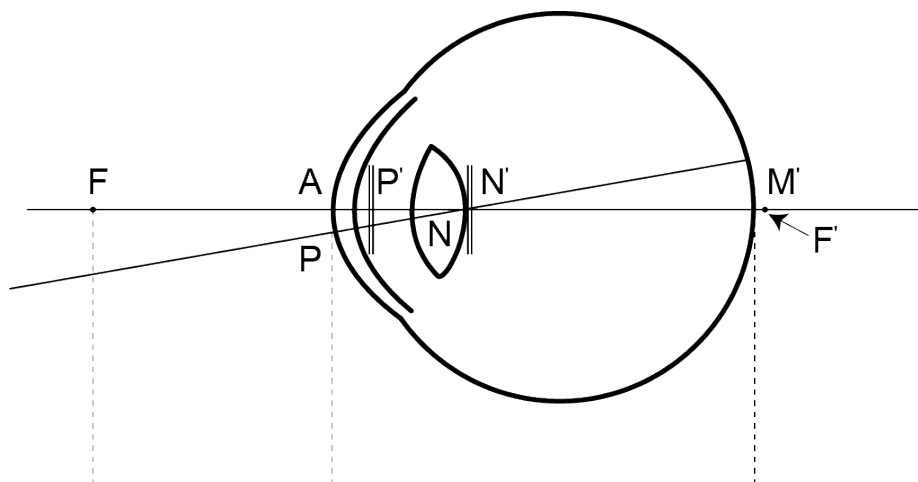


Figure 3.4: L'oeil Schématique Exact de Gullstrand #1 (Emsley 1955)

F: point éloigné; F': point focal de l'oeil; A: l'apex de la cornée; P et P': points principaux primaire et secondaire, N et N': points nodaux primaire et secondaire; M: centre de la fovéa (l'aire maculaire).

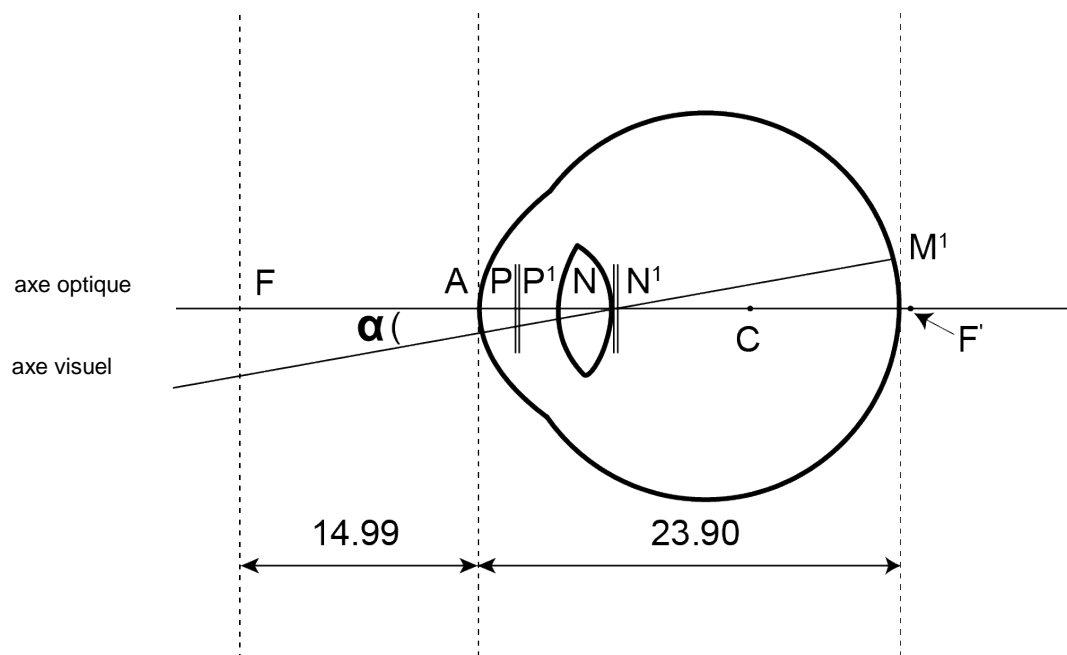
Tableau 3.1 Caractéristiques de l'oeil schématique exact de Gullstrand #1

Caractéristiques clés
Six surfaces réfractives
Noyau équivalent de lentille
Hypermétrope (+1.00 D)
Versions accommodatives et non-accommodatives
Bonne approximation des dimensions moyennes de l'oeil

**Note:** Il n'est pas nécessaire de mémoriser les constantes de l'oeil schématisé de Gullstrand #1. Par contre, tu dois le connaître assez en détail afin de déterminer si l'oeil d'un patient est anormal (ex: longueur axiale anormalement courte ou longue, courbure cornéenne ou PCA hors norme). De plus, tu devrais avoir une idée générale de l'organisation optique de l'oeil, c'est-à-dire savoir que les points nodaux sont tous les deux près de la surface postérieure du cristallin; que les plans principaux sont très près l'un de l'autre et sont situés dans la chambre antérieure.

## YEUX SCHÉMATIQUES SIMPLIFIÉS

Même si l'oeil schématisé exact de Gullstrand est utile afin de comprendre comment fonctionne un oeil du point de vue optique, en général, un oeil simplifié est suffisant. Plusieurs schémas ont été développés et contiennent seulement trois surfaces réfractives. **L'oeil schématisé simplifié de Gullstrand** (l'oeil schématisé de Gullstrand # 2; voir Fig. 3.5 et le Tableau 3.2) est un bon exemple d'un oeil schématisé à trois surfaces. Dans les yeux schématisés simplifiés, la cornée est considérée comme infiniment mince et est représentée comme une surface de réfraction sphérique simple séparant l'air de l'humeur aqueuse. On suppose que le cristallin a un indice de réfraction homogène. Dans l'oeil de Gullstrand # 2 (version sans accommodation), les courbures antérieure et postérieure du cristallin sont les mêmes que celles utilisées dans l'oeil schématisé. Afin de compenser la perte de puissance réfractive associée à l'élimination de la lentille équivalente, on présume que le cristallin simplifié de l'oeil a un indice de réfraction plus élevé que celui du noyau de la lentille équivalente (1.413 ou 1.416 vs. 1.406). L'oeil schématisé simplifié est emmétrope, tandis que l'oeil exact est hypermétrope.



**F** = point éloigné  
**F'** = point focal de l'oeil  
**A** = apex de la cornée  
**P & P'** = premier et second points principaux  
**N & N'** = premier et second points nodaux  
**M** = centre fovéal (aire maculaire)  
 $\alpha$  = angle entre les axes optique et visuel

Figure 3.5: L'oeil simplifié de Gullstrand #2 (Emsley 1955)

**Tableau 3.2 Caractéristiques de l'oeil schématique simplifié de Gullstrand #2**

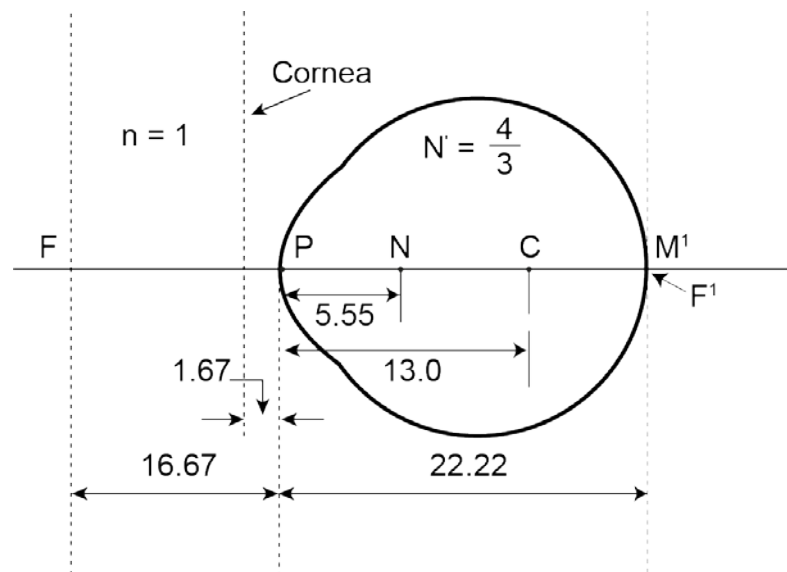
Caractéristiques principales
trois surfaces réfractives
Indice de réfraction du cristallin augmentée à 1.416 pour compenser la perte du gradient d'indice
emmétrope

## YEUX SCHÉMATIQUES RÉDUITS

Même les schémas simplifiés sont trop compliqués pour la majorité des cas cliniques. Listing, suivi d'un grand nombre de chercheurs, ont réduit l'oeil à une seule surface sphérique de réfraction. La justification de Listing d'attribuer toute la puissance réfractive de l'oeil à une seule surface provient du fait que les deux premiers plans principaux (et donc aussi les points nodaux) sont séparés d'une très petite distance – seulement d'environ 0.25 mm. Étant donné qu'une surface sphérique réfractive a seulement un plan principal (qui correspond au vertex de la surface c'est-à-dire le point d'intersection des axes optiques) et un seul point nodal (qui correspond au centre de courbure de la surface de réfraction), Listing a combiné les deux plans principaux et les deux points nodaux de l'oeil en des points simples, représentant respectivement le vertex et le centre de courbure d'une surface de réfraction sphérique équivalente. La position de la surface réduite de Listing était donc environ 1.5 mm derrière la cornée, séparant l'espace objet (l'air) de l'espace image (le vitré).

**Note:** Pour tout système optique, quand les indices de réfraction d'un des côtés du système optique diffèrent, le système optique peut être remplacé par une seule surface réfractive – habituellement appelée surface équivalente – où le vertex repose au deuxième point principal et la courbure correspond au deuxième point nodal.

Le modèle de l'oeil réduit qui sera utilisé dans ce cours a été créé par Emsley et est illustré dans la Figure 3.6 et le Tableau 3.3. L'oeil réduit d'Emsley est un oeil emmétrope avec une longueur axiale de 23.9 mm. La surface de réfraction simple, localisée 1.67 mm derrière la cornée (22.22 mm devant la rétine) a un rayon de courbure de 5.55 mm. L'indice de réfraction de l'espace image est de 4/3. Donc la surface réfractive a une puissance de +60.00 D.



**F = point éloigné**  
**F' = deuxième focal principal de l'oeil**  
**P = point principal de l'oeil**  
**N = point nodal de l'oeil**  
**M = centre de la fovéa (l'aire**  
**F' & M' coïncident**

Figure 3.6: Oeil réduit de Emsley (Emsley 1955)

Table 3.3 Caractéristiques de l'oeil réduit d'Emsley

Caractéristiques clés
1 surface réfractive positionnée 1.67mm derrière la cornée
Emmétrope
Puissance totale de +60 D

## LES EFFETS DE CONSTANTES OPTIQUES QUI VARIENT

La puissance réfractive d'un oeil dépend de l'équilibre entre les caractéristiques de ses composantes réfractives et sa longueur axiale. Les effets d'une longueur axiale qui varie sont évidents. En présumant que les composantes optiques sont inchangées, si on augmente la longueur axiale de l'oeil, il deviendra plus myope et moins hypermétrope. Par contre, si on veut prédire les effets dus à un changement des caractéristiques d'une surface réfractive **prise isolement**, ce n'est pas aussi évident. Étant donné que certaines conditions (ex: diabète) et certaines stratégies de traitements (ex: port de lentilles cornéennes) peuvent causer de tels changements, il est important de comprendre comment la réfraction d'un patient peut être changée par une modification des constantes optiques de l'oeil. Une connaissance des constantes des différents yeux schématiques aidera à prédire comment la réfraction d'un oeil dépendra de ses composantes optiques. Il y a trois types de changements qui peuvent changer l'état réfractif de l'oeil de façon significative.

### 1. Courbures des surfaces de réfraction

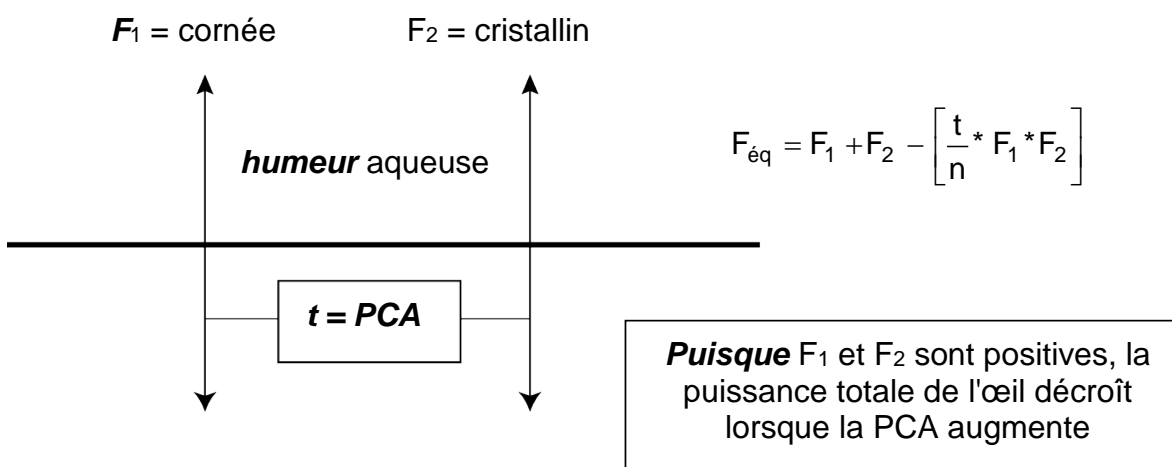
Si on change la courbure des surfaces de réfraction de l'oeil, les effets sont prévisibles. Avec une exception, une augmentation de la courbure de la surface (c'est-à-dire une diminution du rayon de courbure) augmentera la puissance réfractive de l'oeil (l'oeil deviendra plus myope/moins hypermétrope). L'exception demeure la surface postérieure de la cornée. Puisque la surface postérieure de la cornée a un effet de réfraction négatif dans l'oeil, une augmentation de sa courbure entraînera une diminution de la puissance réfractive totale.

### 2. Position des composantes de réfraction

Les effets d'un changement de position d'une structure de réfraction peuvent être prédits si on connaît l'effet réfractif de la dite structure (ex: positif ou négatif) ainsi que la formule pour une puissance équivalente d'une lentille épaisse.

$$F_{eq} = F_1 + F_2 - \left[ \frac{t}{n} * F_1 * F_2 \right]$$

Par exemple, si le cristallin est déplacé vers l'avant, donc vers la cornée, il y a une augmentation dans la puissance de réfraction totale. Dans ce cas, la cornée et le cristallin ont tous les deux des effets de réfraction dans l'oeil, d'où vient le facteur 'distance'  $[-t/n(F_1 F_2)]$  dans la formule de la puissance équivalente. Ce facteur deviendra plus petit (car 't' diminue) et donnera une puissance réfractive totale plus grande.

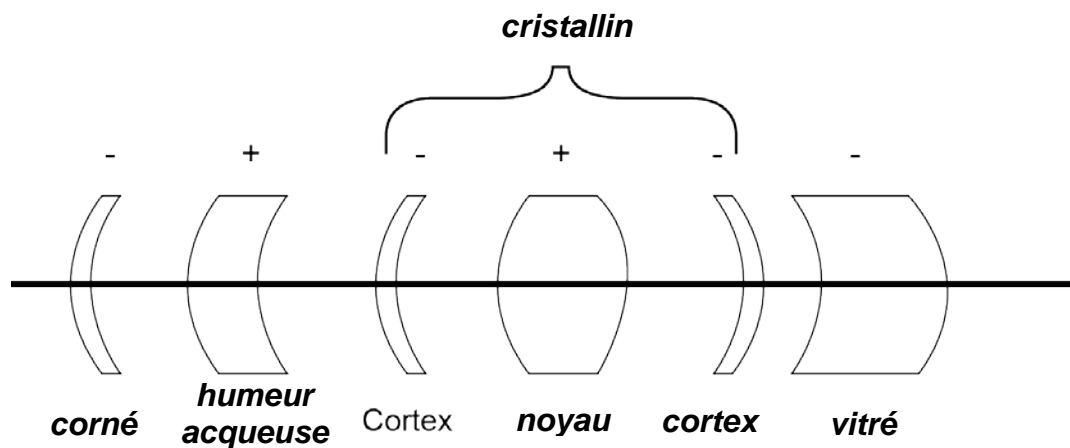


**Figure 3.7:** Les effets optiques et changements dans la PCA sont petits. Par exemple, un déplacement du cristallin de 1mm vers l'avant augmente la puissance totale de l'oeil d'environ 1.4 D



### 3. Indice de réfraction

Les effets du changement de l'indice de réfraction peuvent être prédits si on imagine l'introduction d'une mince couche d'air entre les milieux optiques. L'introduction d'air n'affectera pas la direction de la réfraction des raies. Quand les milieux sont séparés par l'air, chacun des éléments optiques formera une lentille positive ou négative sauf le vitré, qui est considéré comme une surface sphérique simple de réfraction (voir Fig. 3.8). Une augmentation de l'indice de réfraction augmentera ou diminuera la puissance réfractive totale de l'oeil selon que l'effet de réfraction de l'élément dans l'air est positif ou négatif. Par exemple, l'humeur aqueuse et le noyau du cristallin forment des lentilles positives dans l'air et une augmentation de leur indice de réfraction crée une augmentation de la puissance réfractive totale de l'oeil (ex: une augmentation de myopie/diminution d'hypermétropie). En comparaison, les éléments restants forment des lentilles négatives, ce qui augmentera leurs indices de réfraction et causera une augmentation vers l'hypermétropie.



**Figure 3.8:** Une augmentation de l'indice de réfraction augmentera ou diminuera la puissance de réfraction totale de l'oeil, selon que l'effet de réfraction dans l'air est positif ou négatif (Fry)

Les calculs suivants de la puissance des surfaces antérieures et postérieures de la cornée démontrent qu'une augmentation de l'indice de réfraction de la cornée diminuera la puissance réfractive positive totale de la cornée.

On suppose que la cornée a les propriétés suivantes:

Rayon antérieur = 7.8 mm

Rayon postérieur = 6.8 mm

Indice de réfraction (cornée) = 1.376

Indice de réfraction (humeur aqueuse) = 1.336

La puissance réfractive de la surface antérieure serait:

$$F = \frac{1.376 - 1.0}{0.0078\text{m}} = +48.2 \text{ D}$$

La puissance réfractive de la surface postérieure serait:

$$F = \frac{1.336 - 1.376}{0.0068\text{m}} = -5.88 \text{ D}$$

Maintenant, assumons que l'indice de réfraction de la cornée augmenterait à 1.386.

La nouvelle puissance de réfraction de la surface antérieure serait:

$$F = \frac{1.386 - 1.0}{0.0078 \text{ m}} = +49.5 \text{ D}$$

c'est-à-dire qu'une augmentation de l'indice de réfraction de la cornée de 0.010 a causé une augmentation de la puissance réfractive de la surface antérieure de +1.3 D.

La nouvelle puissance réfractive de la surface postérieure serait:

$$F = \frac{1.336 - 1.386}{0.0068 \text{ m}} = -7.35 \text{ D}$$

c'est-à-dire que l'augmentation de l'indice de réfraction a créé un surplus de -1.47 D de puissance négative à la surface postérieure de la cornée. Ensemble, le changement net de puissance réfractive pour la cornée entière produit par l'augmentation de l'indice de réfraction de 0.01 serait d'environ -0.2 D. Cette diminution de puissance positive totale amènerait l'oeil à devenir plus hypermétrope ou moins myope. Le changement d'indice a donc créé un effet de réfraction négatif car l'impact sur l'interface cornée postérieure / humeur aqueuse (c'est-à-dire à la jonction avec un effet de réfraction négatif) était plus significatif que l'impact sur l'interface air / surface antérieure de la cornée.

## BIBLIOGRAPHIE

- Stenstrom S. Acta Ophthalmologica December 1948. 26 (4):582.
- H. H. Emsley Visual Optics, Vol. 1 (Hatton, London, 1955).