



L'ACCOMMODATION

AUTEUR

Prof. Earl L. Smith III: University of Houston

RÉVISION PAR LES PAIRS

Prof. Emeritus Barry L. Cole: University of Melbourne

INTRODUCTION ET SURVOL

Ce chapitre inclura:

- Le mécanisme de l'accommodation
- Les changements du cristallin et les changements optiques lors de l'accommodation
- L'accommodation en lunettes versus l'accommodation oculaire
- Les effets de l'accommodation sur la taille de l'image rétinienne

L'accommodation est le processus par lequel la puissance dioptrique de l'oeil est altérée afin de permettre la mise au point d'objets situés à différentes distances. L'augmentation de la puissance de réfraction totale associée au changement de mise au point d'un objet pour passer de la vision de loin (ex: au PR de l'oeil) à la vision de près est appelée **l'accommodation positive**. Inversement, la diminution de la puissance totale associée au changement de mise au point d'un objet pour passer de la vision de près à la vision de loin est **l'accommodation négative**.

LE MÉCANISME DE L'ACCOMMODATION

Le cristallin chez les jeunes est composé d'un matériau cellulaire mou et malléable entouré d'une capsule élastique. La forme du cristallin est surtout déterminée par les forces de contraction de la capsule élastique qui habituellement, tendent à mouler le cristallin selon une forme sphérique. Dans l'œil, les forces élastiques de la capsule sont contrées par les forces de traction des fibres zonulaires (soit les zonules de Zinn). Le degré de tension exercé sur le cristallin est déterminé par l'état de contraction du muscle ciliaire.

Quand l'œil est dans son état non accommodé (donc quand le PR est conjugué avec la rétine), le muscle ciliaire est dans son état de repos, non contracté et repose à plat contre la surface interne de la sclère. Dans cet état non contracté, les fibres zonulaires exercent une force qui tire surtout sur la portion équatoriale de la capsule du cristallin. Ces forces qui tirent sont contrées par les forces de contraction de la capsule du cristallin, ce qui maintient le cristallin dans une forme relativement plate. Durant l'accommodation positive, le muscle ciliaire se contracte. L'action du muscle ciliaire cause un léger déplacement du corps ciliaire vers l'avant et vers l'intérieur du cristallin (voir Figure 6.1). Ces deux mouvements déplacent les fibres zonulaires en direction du cristallin et par conséquent, réduisent la tension qu'exercent les zonules sur la capsule du cristallin. La capsule élastique du cristallin peut alors se contracter, ce qui augmente la convexité du cristallin. La réduction du rayon de courbure de la surface du cristallin amène une augmentation de la puissance de réfraction positive.

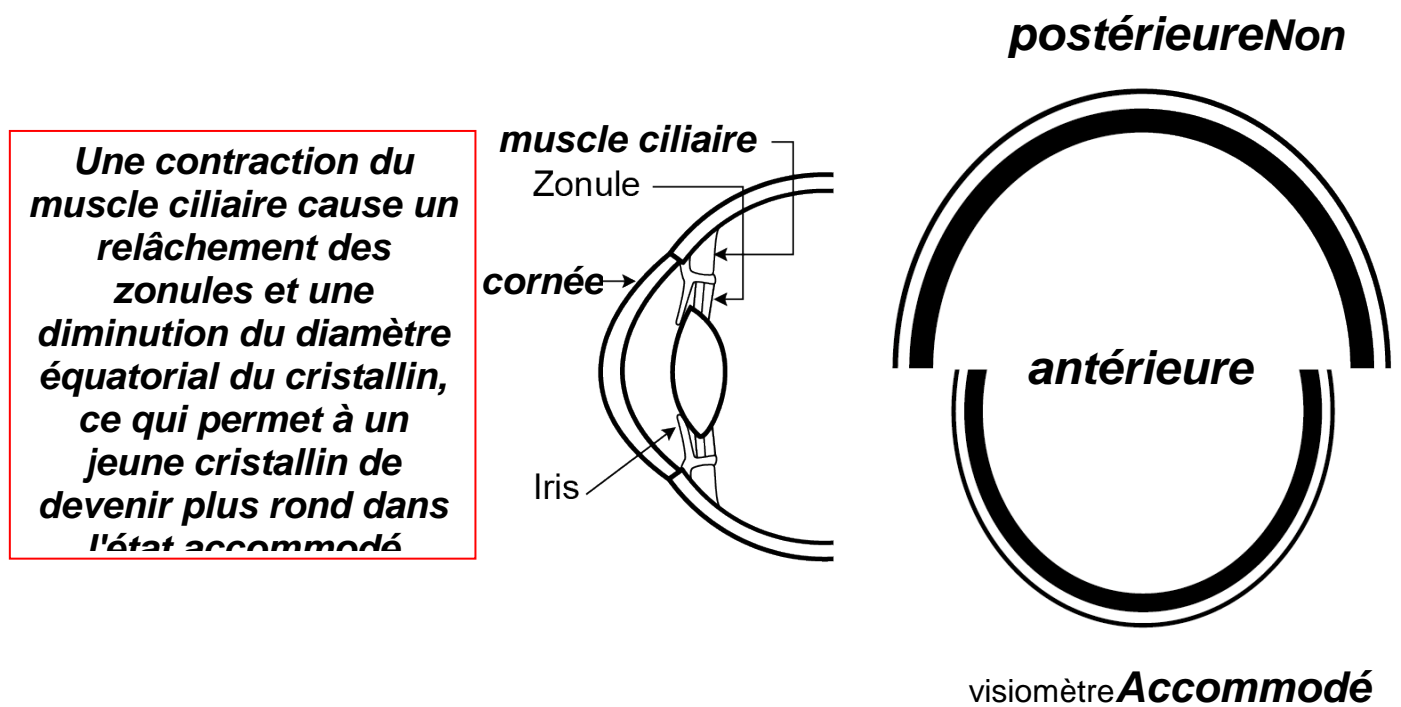


Figure 6.1: Le mécanisme de l'accommodation : Une contraction du muscle ciliaire cause un relâchement de tension zonulaire et une diminution du diamètre équatorial de la lentille, permettant au jeune cristallin de devenir rond (forme accommodée).

LES CHANGEMENTS DU CRISTALLIN ET LES CHANGEMENTS OPTIQUES LORS DE L'ACCOMMODATION

Quand l'oeil accommode d'une distance éloignée à une distance plus rapprochée, les changements suivants peuvent être observés dans le cristallin:

1. Le rayon de courbure des surfaces antérieure et postérieure du cristallin diminuent. Par contre, les changements de courbure de la surface antérieure sont beaucoup plus importants que ceux qui ont lieu au niveau de la surface postérieure du cristallin (rappelons que durant l'accommodation, la taille de la troisième image de Purkinje change beaucoup plus que celle de la quatrième image de Purkinje). De plus, ces changements de courbure qui ont lieu, particulièrement au niveau de la surface antérieure, ne sont pas uniformes, donc pas sphériques. Comme illustré à la Figure 6.2, la portion centrale de la surface antérieure du cristallin subit une augmentation de courbure beaucoup plus importante que les portions plus périphériques du cristallin (il y a une augmentation de la puissance de réfraction positive dans la zone centrale, pupillaire, du cristallin). Ce renflement conique de la partie centrale du cristallin est parfois appelé **lenticône physiologique antérieur**. On croit que les changements asymétriques au niveau de la surface du cristallin sont surtout causés par les variations dans l'épaisseur de la capsule du cristallin. La périphérie de la capsule est plus épaisse que la partie centrale (voir Fig 6.3). On croit que, lors de l'accommodation, la partie épaisse de la capsule, qui entoure la partie centrale plus mince, exerce une force de contraction sur le cristallin vers l'intérieur. En conséquence, la partie centrale plus molle, permet au cristallin de bomber vers l'avant de façon prononcée au niveau du pôle antérieur.
2. Le cristallin s'épaissit dans le sens antérieur-postérieur mais son diamètre équatorial décroît. Étant donné que sa surface postérieure ne bouge pas, l'augmentation de l'épaisseur cause son déplacement vers l'avant, en direction de la cornée (donc il y a une diminution de la profondeur de la chambre antérieure).
(**Note:** En déplaçant deux lentilles positives l'une vers l'autre, on augmente leur puissance équivalente totale. Donc ce déplacement effectif vers l'avant cause une légère augmentation de la puissance réfractive de l'oeil).
3. Si l'accommodation est assez élevée (donc s'il y a une diminution suffisante de la tension exercée par les zonules), le cristallin descendra avec la gravité.
4. Les rayons de courbure effectifs du noyau du cristallin diminueront eux aussi. Lors de l'accommodation, les changements au niveau de la courbure des surfaces externes seules ne sont pas suffisantes pour expliquer l'augmentation totale de la puissance effective du cristallin dans son ensemble. Une augmentation additionnelle de la puissance est produite par le changement dans la courbure des zones internes du cristallin qui ont des indices de réfraction plus élevés que celle du cortex du cristallin.
5. L'augmentation de la puissance du cristallin produite par l'accommodation est démontrée par une diminution des longueurs focales des yeux, un déplacement vers l'arrière des plans principaux des yeux et un déplacement vers l'avant des points nodaux.

Sommaire des Changements du cristallin

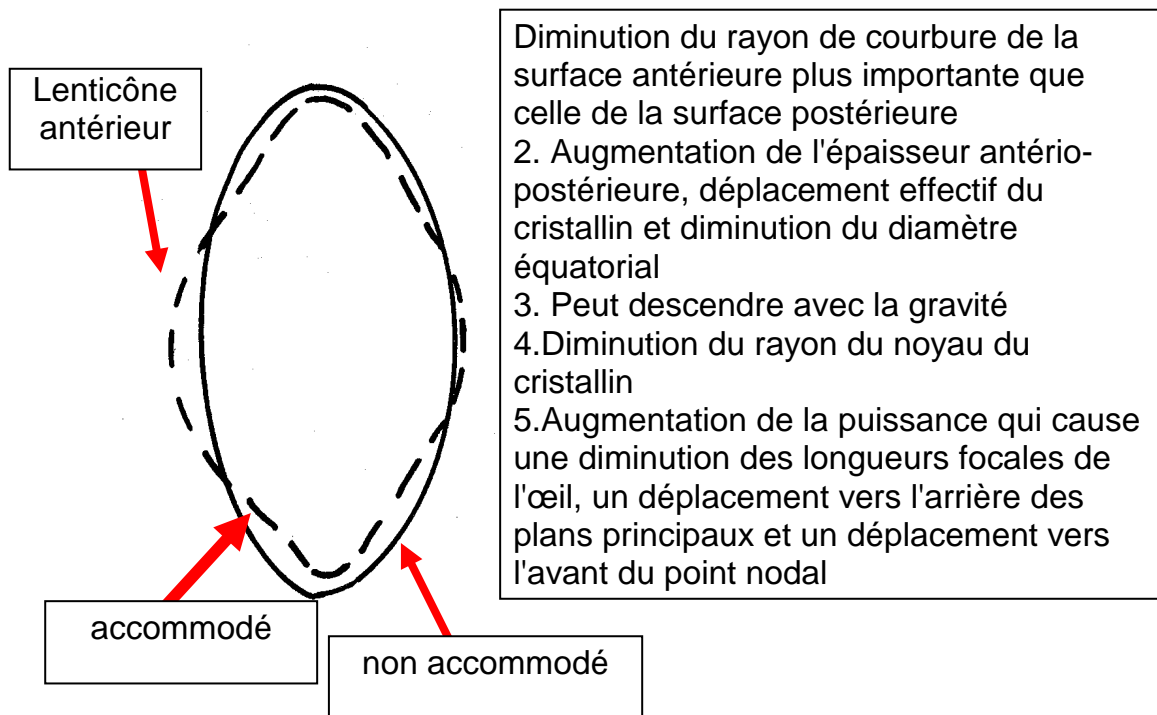


Figure 6.2: Sommaire des changements du cristallin lors de l'accommodation

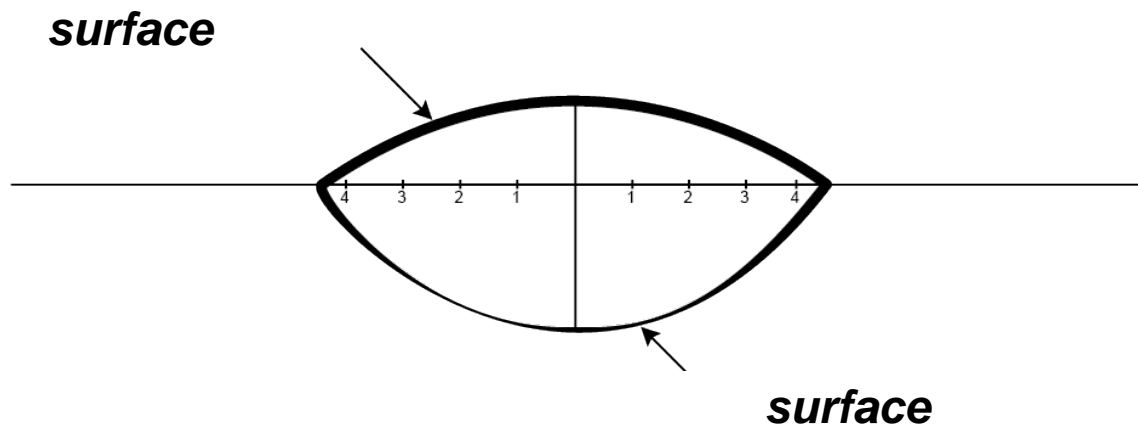


Figure 6.3: Variations de l'épaisseur de la capsule

L'ACCOMMODATION EN LUNETTES VS L'ACCOMMODATION OCULAIRE

L'amplitude d'accommodation d'un patient ou la quantité d'accommodation qu'un individu doit exercer afin de permettre la mise au point sur un plan particulier de l'espace (donc la demande accommodative) est habituellement spécifiée d'une des deux façons suivantes :

1. **L'accommodation oculaire:** les changements dans la puissance dioptrique de l'oeil mesurés ou spécifiés par rapport au plan principal (parfois, l'accommodation oculaire est appelé l'accommodation au niveau du plan principal). L'accommodation oculaire reflète l'effort d'accommodation (soit le changement de puissance) qu'un oeil doit subir pour permettre la mise au point sur un objet en vision rapprochée.
2. **Accommodation en lunettes:** la demande accommodative ou les changements requis dans la puissance de l'oeil mesurés par rapport au plan des lunettes. En conditions cliniques, l'amplitude d'accommodation et la demande accommodative du patient pour des tâches au près sont spécifiées par rapport au plan des lunettes (ou plus souvent, par rapport au plan du visiomètre). Bien qu'il puisse sembler trompeur de spécifier les demandes accommodatives et l'amplitude d'accommodation par rapport au plan des lunettes, il y a plusieurs avantages pratiques à procéder ainsi plutôt que d'employer l'accommodation oculaire.

LES EMMÉTROPE

Les Figure 6.4a et 6.4b illustrent la relation entre l'accommodation en lunettes et l'accommodation oculaire. Supposons que le patient soit emmétrope et le visiomètre est à 15 mm devant le plan principal de l'oeil. De plus, supposons qu'avec une technique 'push-up', le point rapproché du patient (punctum proximum, le point conjugué de la rétine lorsque l'oeil est complètement accommodé) soit à 10 cm devant le plan des lunettes (le visiomètre). Quelles sont les accommodations oculaire et en lunettes de ce patient?

L'accommodation en lunettes est simplement la demande accommodative associée au point rapproché mesurée rapport au visiomètre (donc la vergence de la lumière associée avec le point rapprochée mesurée au visiomètre. Plus précisément, la différence entre la vergence de la lumière à l'infini optique et au point rapproché mesuré par rapport au plan des lunettes).

$$\text{Amplitude en lunettes} = \frac{1}{\infty} - \left(-\frac{1}{0.01 \text{ m}} \right) = 10.0 \text{ D}$$

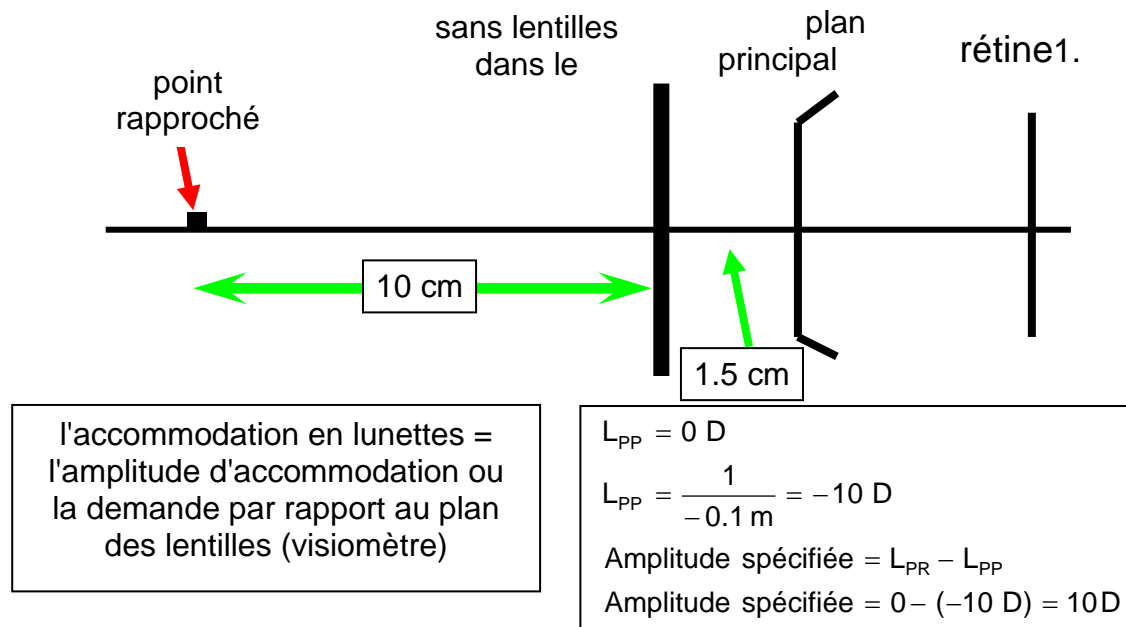


Figure 6.4a: Accommodation en lunettes d'un emmétrope

Par contre, le patient n'est pas obligé d'augmenter la puissance de son oeil de 10.00 D afin de permettre la mise au point entre l'infini et le point rapproché mesuré. Afin de déterminer l'augmentation nécessaire de la puissance dioptrique de l'oeil, il est nécessaire de déterminer l'amplitude d'accommodation du patient (donc la vergence de la lumière associée avec le point rapproché, mesuré au plan principal de l'oeil. Ou encore, plus précisément, la différence entre la vergence de la lumière provenant de l'infini, le PR de l'oeil et le PP, par rapport au plan principal de l'oeil).

$$\text{Amplitude Oculaire} = \frac{1}{(0.1 \text{ m} + 0.015 \text{ m})} = 8.7 \text{ D}$$

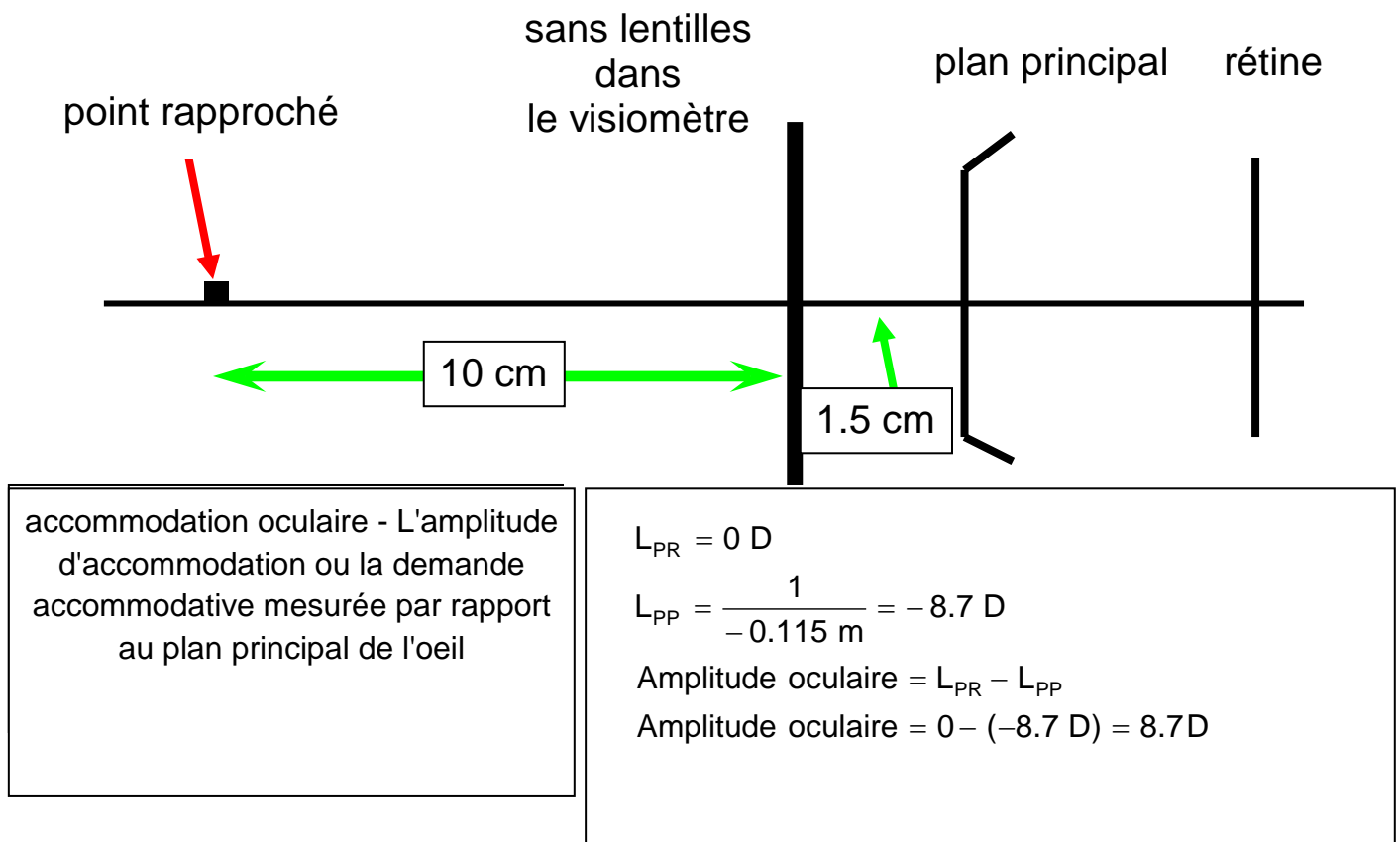


Figure 6.4b: Accommodation oculaire chez un emmétrope

Bien qu'en situation clinique, l'amplitude d'accommodation de ce patient serait spécifié à 10 D, il aurait seulement la capacité d'augmenter la puissance de son oeil de 8.7 D. Pour les emmétropes ou les amétropes non corrigés, l'amplitude d'accommodation en lunettes sera toujours supérieure à l'amplitude d'accommodation oculaire. L'importance de cette différence dépendra de deux facteurs, la distance vertex (la position du visiomètre par rapport au plan principal de l'oeil) et l'amplitude d'accommodation oculaire du patient. Plus grande est la distance vertex, plus grande sera la différence entre l'accommodation oculaire et l'accommodation en lunettes. La vergence dioptrique est déterminée par l'inverse de la distance en question, plus le point rapproché est loin (donc moins élevé est l'amplitude d'accommodation oculaire), plus petite sera la différence entre l'amplitude d'accommodation oculaire et l'amplitude d'accommodation en lunettes.

LES INDIVIDUS AMÉTROPES CORRIGÉS PAR DES LUNETTES

La quantité d'accommodation oculaire qu'un oeil amétrope doit exercer afin de permettre la mise au point d'un objet proche est significativement affectée par les lentilles de correction positionnées au plan des lunettes. Les exemples suivants illustrent l'influence de la puissance de la lentille de correction sur la relation entre les accommodations en lunettes et oculaire.

Les myopes

Un patient myope a une erreur de réfraction selon le plan des lunettes de 5.00 D.

(Note: La nature de l'erreur de réfraction, axiale ou réfractive, n'a pas d'importance).

Avec la lentille de 5.00 D dans le visiomètre (15 mm devant le plan principal de l'oeil) on mesure le point rapproché du patient à 10 cm devant le plan des lunettes (Figure 6.5). Quelles sont les accommodations en lunettes et oculaire de ce patient?

$$\text{amplitude en lunettes} = 1 / 0.01\text{m} = 10.0 \text{ D}$$

L'amplitude d'accommodation en lunettes est simplement la distance dioptrique entre le point rapproché mesuré et le plan des lunettes.

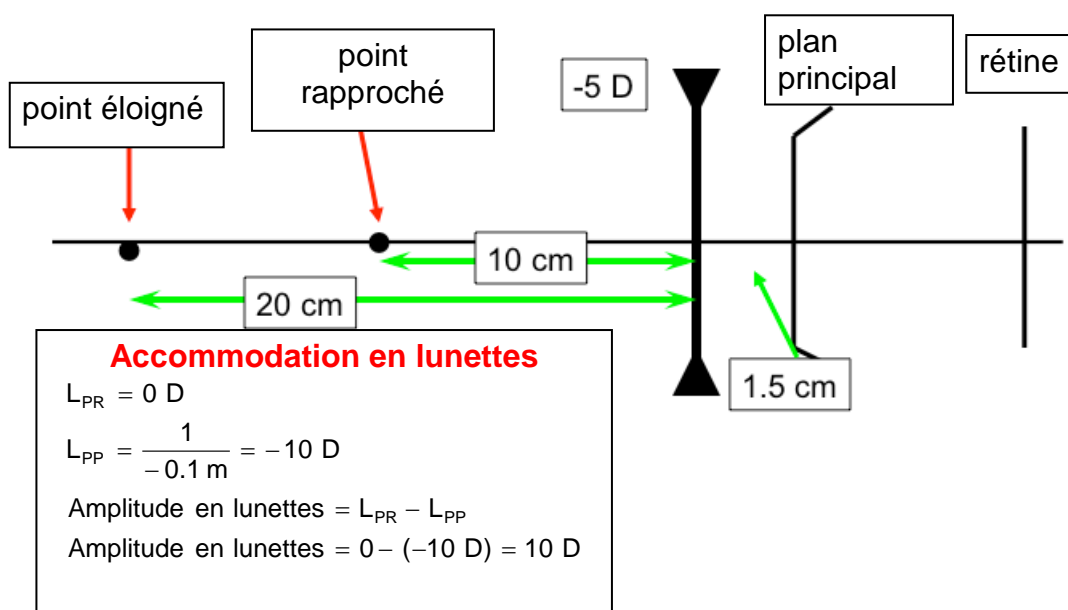


Figure 6.5: L'accommodation en lunettes chez un myope corrigé

Cependant, dans ce cas, l'amplitude d'accommodation oculaire n'est pas simplement la réciproque de la distance entre le point rapproché et le plan principal de l'oeil. Pour déterminer l'amplitude d'accommodation oculaire du patient, l'influence de la lentille de correction doit être considérée. L'amplitude d'accommodation oculaire peut être calculée en déterminant l'intervalle dioptrique entre le **vrai** PR de l'oeil et le **vrai** PP (donc la différence entre la vergence de la lumière provenant du vrai PR et du vrai PP, mesurée au plan principal de l'oeil).

Note: Le vrai PR de l'oeil est le point dans l'espace conjugué avec la rétine lorsque l'oeil est dans l'état non accommodé et **non corrigé**. Le vrai PP de l'oeil est le point conjugué avec la rétine lorsque l'oeil est complètement accommodé, mais **non corrigé**.

Avec la lentille de correction en place, l'intervalle dioptrique peut être calculé en déterminant la vergence de la lumière au plan principal de l'oeil pour un objet à l'infini et pour un objet situé au PP **mesuré** du patient. Après réfraction par les lentilles, les images de ces objets seraient formées au vrai PR de l'oeil et au vrai PP.

Afin de déterminer la vergence de la lumière au plan principal de l'oeil pour un objet à l'infini, calculons d'abord la position de l'image formée par réfraction de la lentille des lunettes.

$$\begin{aligned}L_{(\text{dist})} &= 0 \\F_{(\text{lentille})} &= -5.0 \text{ D} \\L' &= F_{(\text{lentille})} + L_{(\text{dist})} = -5.0 \text{ D}\end{aligned}$$

Donc,

$$l' = \frac{n'}{L'} = \frac{1}{-5 \text{ D}} = -0.20 \text{ m}$$

Alors l'image est formée au vrai PR de l'oeil à 20 cm devant le plan des lunettes ou à 21.5 cm devant le plan principal de l'oeil. La vergence de la lumière au plan principal de l'oeil pour un objet à l'infini serait:

$$L_{\text{PR}} = \frac{1}{-0.215 \text{ m}} = -4.65 \text{ D}$$

L_{PR} est l'intervalle dioptrique entre le vrai PR de l'oeil et le plan principal.

Afin de déterminer la vergence de la lumière au plan principal de l'oeil pour un objet au PP mesuré de l'oeil, déterminons la position de l'image formée par réfraction par les lentilles des lunettes (voir Figure 6.6).

$$L_{\text{près}} = \frac{1}{-0.1 \text{ m}} = -10 \text{ D}$$

Alors,

$$l_{\text{près}} = \frac{1}{-15.0 \text{ D}} = -0.0667 \text{ m}$$

Alors l'image est formée au vrai PP de l'oeil à 6.67 cm devant la lentille de correction et à 8.17 cm devant le plan principal de l'oeil. La vergence de la lumière au plan principal de l'oeil pour un objet au PP mesuré, mais observé à travers la lentille de correction serait:

$$L_{PR} = \frac{1}{-0.0817 \text{ m}} = -12.24 \text{ D}$$

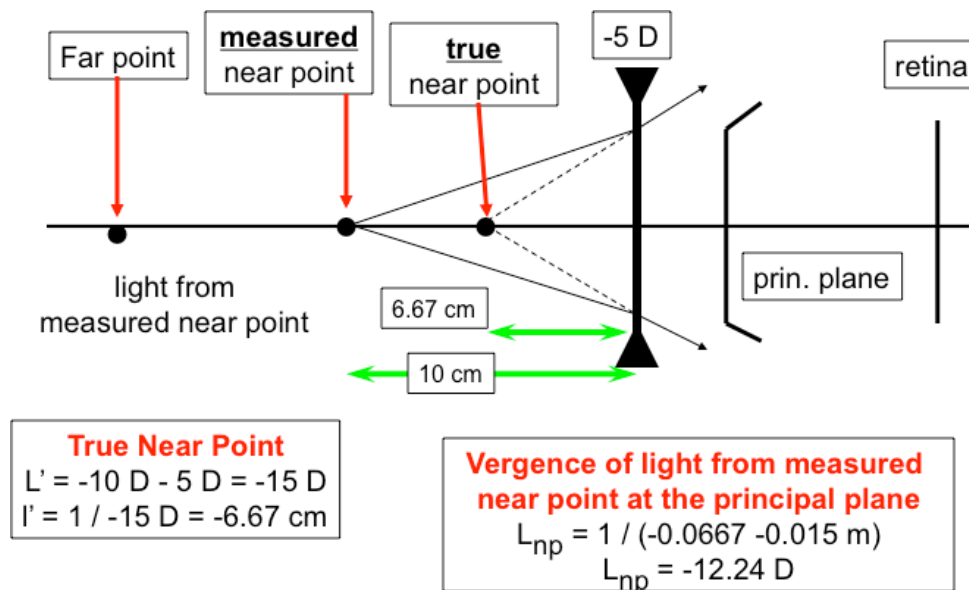


Figure 6.6: Vergence de la lumière au PP, mesuré au niveau du plan principal

L'effort accommodatif total, l'accommodation oculaire totale, requis par cet œil myope afin de permettre la mise au point à partir d'un point distance au PP mesuré serait:

$$L_{(fp)} - L_{(np)} = -4.65 \text{ D} - (-12.24 \text{ D})$$

Amplitude Oculaire = 7.59 D

Patients hypermétropes

Un patient hypermétrope a une erreur de réfraction selon le plan des lunettes de +5.00 D (15 mm devant le plan principal de l'œil). Avec la lentille du visiomètre de + 5.00 D, le PP mesuré est encore situé à 10 cm en avant du visiomètre (Figure 6.7). Quelles sont les amplitudes d'accommodation en lunettes et oculaire?

$$\text{Amplitude en lunettes} = 1 / 0.01 \text{ m} = 10.0 \text{ D}$$

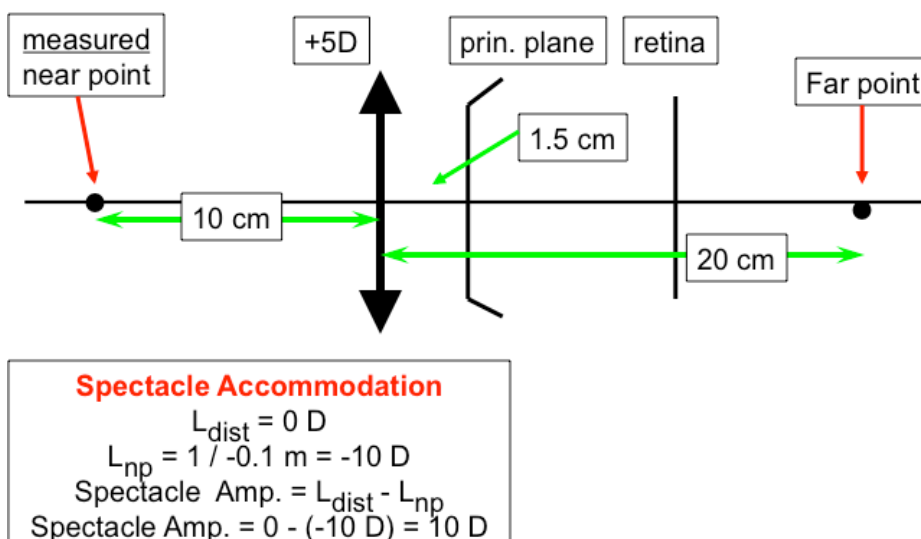


Figure 6.7: L'accommodation en lunettes chez l'hypermétrope corrigé

Afin de calculer l'amplitude d'accommodation oculaire, premièrement, déterminons la vergence de la lumière au plan principal de l'oeil pour un objet à l'infini (donc déterminons la distance dioptrique pour le vrai PR de l'oeil).

$$\begin{aligned} L_{(\text{dist})} &= 0.0 \text{ D} \\ F_{(\text{lentille})} &= +5.0 \text{ D} \\ L' &= +5.0 \text{ D} \end{aligned}$$

Alors,

$$l' = 1 / +5.0 \text{ D} = 0.20 \text{ m}$$

donc le vrai PR de cet œil hypermétrope est à 20 cm au-delà de la lentille ou à 18.5 cm derrière le plan principal de l'oeil. Alors, la vergence de la lumière au plan principal de l'œil pour un objet à l'infini serait:

$$L_{(\text{fp})} = 1 / 0.185 \text{ m} = +5.41 \text{ D}$$

La position du vrai PP de l'œil peut être calculée à partir de la position du PP (mesuré ou artificiel).

$$\begin{aligned} L_{(\text{près})} &= 1 / -0.1 \text{ m} = -10.0 \text{ D} \\ F_{(\text{lentille})} &= +5.0 \text{ D} \\ L' &= -5.0 \text{ D} \end{aligned}$$

Alors,

$$l' = 1 / -5.0 \text{ D} = -0.2 \text{ m}$$

donc le vrai PP est à 20 cm en avant du plan des lunettes et à 21.5 cm devant le plan principal des yeux (voir Figure 6.8). Alors, la vergence de la lumière au plan principal de l'oeil pour un objet au PP mesuré, mais observé à travers la lentille, serait:

$$L_{(\text{np})} = 1 / -0.215 \text{ m} = -4.65 \text{ D}$$

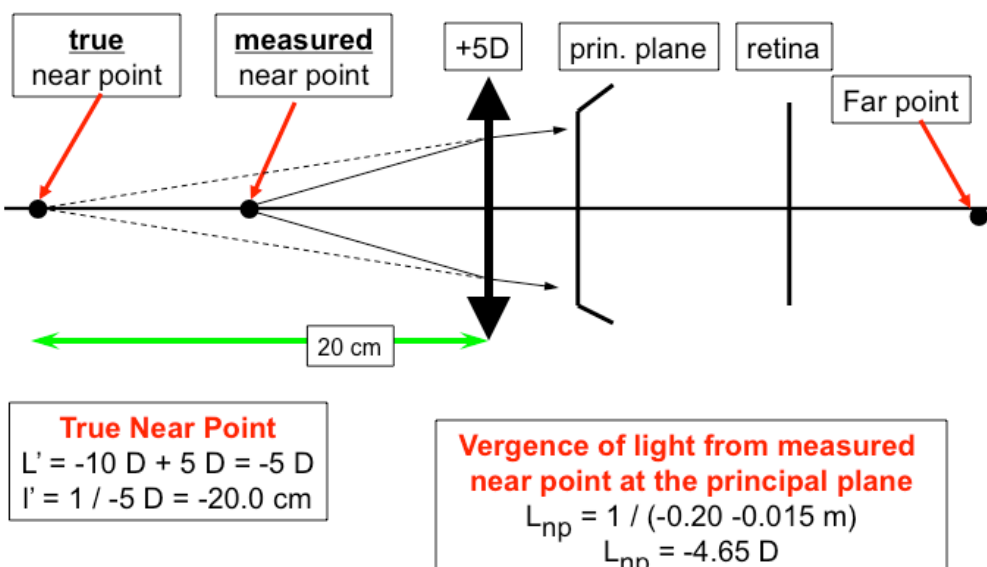


Figure 6.8: Accommodation en lunettes chez un hypermétrope corrigé

L'accommodation oculaire requise par l'oeil hypermétrope afin de permettre la mise au point à partir de l'infini au PP mesuré (donc l'amplitude d'accommodation oculaire) serait:

$$\text{Amplitude Oculaire:} = 5.41 \text{ D} - (-4.65 \text{ D}) = 10.06 \text{ D}$$

Les exemples ci-haut illustrent plusieurs points importants concernant l'accommodation en lunettes et oculaire.

1. L'importance de l'accommodation en lunettes est indépendante de la puissance de la lentille de correction et indépendante du type de l'erreur de réfraction.

Note: Bien que l'accommodation en lunettes ne démontre pas les vrais efforts de focalisation, il est raisonnable de l'utiliser comme mesure de l'amplitude d'accommodation en conditions cliniques. Premièrement, il est facile de le mesurer car le plan des lunettes peut être identifié. Il n'est pas influencé par la distance de correction du patient. Ceci donnera une mesure de la vision nette dans l'espace. De plus, chez les patients avec des amplitudes d'accommodation faibles, (donc quand les problèmes d'accommodation sont assez importants), l'amplitude des lunettes sera près de l'amplitude d'accommodation réelle.

2. Les hypermétropes corrigés avec des lunettes devront faire un plus grand effort d'accommodation oculaire (augmenter la puissance de leur cristallin) que les emmétropes corrigés ou que les myopes corrigés afin de permettre la mise au point sur un objet donné en VP.
3. Lorsque corrigés avec des lunettes, les myopes devront faire moins d'effort d'accommodation oculaire afin de permettre la mise au point sur un objet au près que les emmétropes ou les hypermétropes corrigés.

Lorsque les amétropes sont corrigés en lentilles cornéennes, les lentilles de correction rendent l'oeil emmétrope et n'ont pas d'effet sur l'accommodation oculaire (considérant que la lentille cornéenne coïncide avec le plan principal de l'oeil). Pour un objet donné, la demande d'accommodation oculaire dans un oeil amétrope corrigé avec une lentille cornéenne sera identique à celle d'un oeil emmétrope. Conséquemment, on doit faire attention lorsqu'on change la lentille d'accommodation d'un patient ayant une amplitude d'accommodation relativement faible (donc un presbyte ou un pré-presbyte). Qu'arriverait-il à un myope presbyte mesuré au PP si on changeait les lunettes du patient pour des lentille cornéennes? Dans les faits, la lentille cornéenne amènerait une réduction de l'amplitude d'accommodation et rendrait le patient plus presbyte.

LES EFFETS DE L'ACCOMMODATION SUR LA TAILLE DE L'IMAGE RÉTINIENNE

LES YEUX NON CORRIGÉS

Considérons un oeil emmétrope non accommodé qui observe un objet avec une taille de 1 cm et positionné à 10 cm devant le plan principal de l'oeil. Qu'arrivera-il à la taille de l'image rétinienne lorsque l'oeil accommodera au point rapproché?

Premièrement, calculons la taille de l'image dans l'état non accommodé.

L'angle visuel associé à l'objet est de:

$$1\text{cm} / 10\text{cm} = 0.1 \text{ radians}$$

Alors, l'angle sous-tendu par l'image au plan principal de l'oeil est de:

$$0.1 \text{ rad} / 1.333 = 0.075 \text{ rad}$$

Étant donné que la distance entre le plan principal de l'oeil emmétrope et la rétine est de 22.22 mm, la taille de l'image brouillée sera

$$\text{Taille de l'image} = (0.075 \text{ rad}) (22.22 \text{ mm}) = 1.67 \text{ mm}$$

Afin de calculer la taille de l'image dans l'état accommodé, on doit considérer ce qui arrive à la position du plan principal par rapport à la rétine. Lorsque l'oeil accommode au près, le plan principal se rapproche de la rétine. En conséquence, il n'est pas possible de présenter l'augmentation de l'accommodation positive comme une augmentation de la puissance équivalente de la surface de réfraction (donc, d'une certaine façon, il y a une petite composante axiale). Considérons que durant l'accommodation, le plan principal de l'oeil réduit recule de 0.44 mm (le déplacement moyen vers l'arrière des plans principaux pour la version accommodative (environ 10 D) de l'oeil exact de Gullstrand #1). Le déplacement vers l'arrière changera la taille de l'image de deux façons. Premièrement, l'angle d'incidence des rayons principaux serait grandement réduit. Deuxièmement, la distance entre la surface équivalente de réfraction et la rétine serait réduite:

Le nouvel angle d'indice au plan principal de l'oeil serait:

$$i = 1 \text{ cm} / 10.044 \text{ cm} = 0.0996 \text{ radians}$$

Alors, l'angle sous-tendu par l'image après la réfraction serait de:

$$i' = 0.0996 \text{ rad} / 1.3333 = 0.07467 \text{ radians}$$

$$\text{Taille de l'image} = (0.07467) (21.78 \text{ mm}) = 1.63 \text{ mm}$$

Ces calculs, basés sur la puissance de réfraction uniquement, montrent que la taille de l'image diminue de 0.04 mm durant l'accommodation d'un objet qui passe de l'infini jusqu'à un 10 cm. Par contre, d'un point de vue pratique, il n'y a pas de changements significatifs dans la taille de l'image. Étant donné que la position de la pupille d'entrée est essentiellement non affectée par l'accommodation, la taille définie de l'image ne changera pas de façon significative entre les états accommodatifs et non accommodatifs.

LES YEUX AMÉTROPES CORRIGÉS EN LUNETTES

Considérons un oeil myope (axial) avec un erreur de réfraction au niveau du plan principal de -5.0 D qui est accommodé pour fixer un objet de 1 cm situé à 10 cm devant le plan des lunettes. La lentille de correction est à 15 mm devant le plan principal de l'oeil, alors, la puissance de la lentille de correction est de -5.41 D. Quelle est la taille de l'image rétinienne?

La taille de l'objet est connue, alors la taille de l'image rétinienne peut être calculée en déterminant le grossissement linéaire de la lentille de correction et de l'oeil.

Note: Les équations du GL et du GRL ne peuvent pas être utilisées pour déterminer la taille de l'image dans les yeux non accommodés car les relations pour ces facteurs de grossissement s'appliquent seulement pour les objets situés à l'infini optique.

Le grossissement linéaire,

$$G = \frac{h'}{h} = \frac{L}{L'}$$

Le grossissement pour la lentille est de:

$$G_{\text{lentille}} = \frac{-10.0 \text{ D}}{-15.41 \text{ D}} = 0.649$$

Afin de calculer le grossissement linéaire pour l'oeil, la position de l'objet en VP formé par la lentille de correction, et, subséquemment, la vergence de la lumière empiétant sur le plan principal de l'oeil, doit être déterminée.

$$L'_{\text{(vergence après réfraction par la lentille)}} = -10 \text{ D} - 5.41 \text{ D} = -15.41 \text{ D}$$

donc, la position de l'image de l'objet après réfraction par la lentille est:

$$l' = \frac{1}{-15.41 \text{ D}} = -6.5 \text{ cm devant la lentille de correction}$$

La vergence de la lumière au plan principal de l'oeil:

$$L = \frac{1}{(-0.065 \text{ m} - 0.015 \text{ m})} = -12.5 \text{ D}$$

Étant donné que l'oeil accommode pour un objet en VP, on sait que l'image est mise au point sur la rétine. Alors, la vergence de la lumière après la réfraction au plan principal de l'oeil doit être appropriée pour la distance entre le plan principal de l'oeil et sa rétine (pour une myopie axiale de 5 D, 24.24 mm).

Alors, la vergence de la lumière dans l'oeil est de:

$$L' = \frac{1.3333}{0.02424} = +55.0 \text{ D}$$

Alors, le grossissement linéaire pour l'oeil est:

$$GL_{\text{oeil}} = \frac{-12.5 \text{ D}}{55.0 \text{ D}} = -0.2273$$

(Note: Le signe négatif indique que l'image est inversée.)

Le grossissement total pour la combinaison oeil-lentille est égal à:

$$G_{\text{(oeil)}} \times G_{\text{(lentille)}} = (-0.2273) (0.649) = -0.014752$$

Ainsi, la taille rétinienne finale est de:

$$h' = (\text{taille de l'objet}) (\text{magnification totale})$$



$$h' = 1.0 \text{ cm} (-0.014752) = -1.475 \text{ mm}$$