



# LA GRANDEUR D'UNE IMAGE RÉTINIENNE

## AUTEUR

**Prof. Earl L. Smith III:** University of Houston

## RÉVISION

**Prof. Emeritus Barry L. Cole:** University of Melbourne

## INTRODUCTION ET SURVOL

Ce chapitre inclura:

- Taille de l'image formée par le système optique de l'oeil
- Taille de l'image rétinienne (image rétinienne nette)
- Taille de l'image - amétropie axiale non-corrigée
- Taille de l'image - amétropie réfractive non-corrigée
- Taille de l'image - amétropies corrigées
- ML et MRL dans les yeux amétropiques corrigés
- Amétropies axiaux corrigés avec lunettes
- Amétropies axiaux corrigés à l'aide de lentilles cornéennes
- Amétropies réfractives corrigées à l'aide de lunettes
- Amétropies réfractives corrigées à l'aide de lentilles cornéennes
- Taille de l'image rétinienne dans des conditions variées
- Calculs de la taille de l'image

En plus de fournir une image rétinienne claire, les lentilles de correction altèrent presque toujours la taille de l'image rétinienne produite par un objet donné. Les changements de magnification des images rétiniennes causés par des lentilles de correction peuvent parfois améliorer la performance visuelle, mais les lentilles qui ont un effet de minimisation ou qui produisent un déséquilibre dans la taille de l'image rétinienne des deux yeux peut affecter la performance visuelle. Conséquemment, c'est important que les optométristes aient les connaissances des effets des lentilles de correction sur la taille de l'image rétinienne.

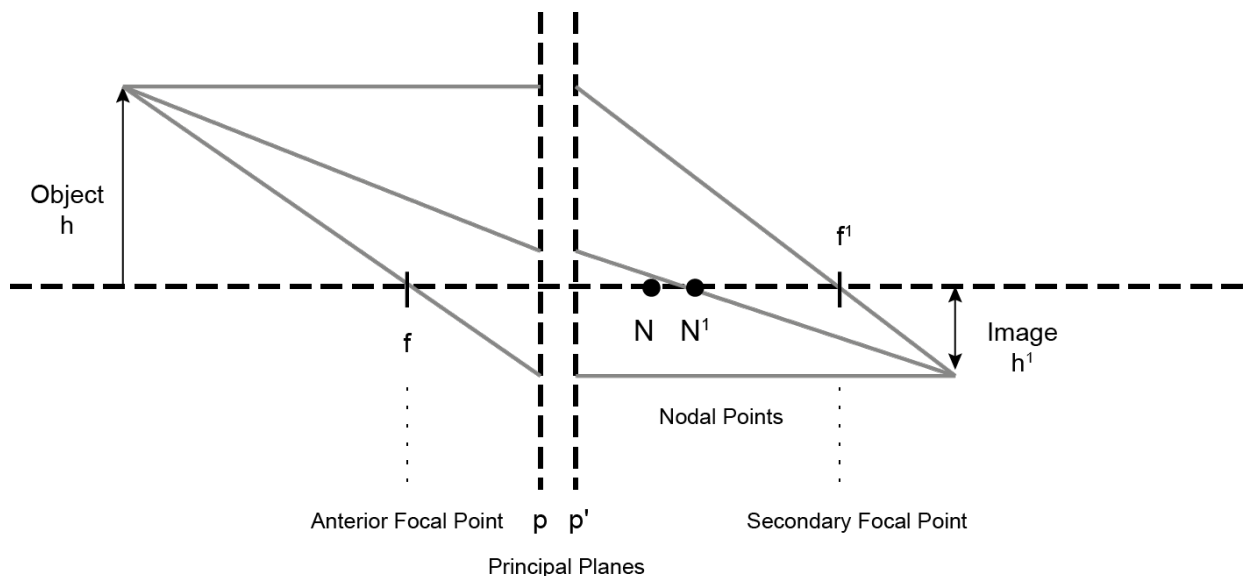
Il existe une variété de façons afin de déterminer la taille de l'image formée par le système optique de l'oeil et la taille de l'image rétinienne. Les yeux schématiques décrites dans VSII-5, particulièrement l'oeil réduit d'Emsley, sont utiles dans le calcul de la taille d'une image. L'oeil sélectionné et l'approche utilisée pour calculer la taille de l'image rétinienne dépend de la situation spécifique étudiée (ex: Est-ce que l'image rétinienne est mise au point ou non? Voulez-vous savoir la taille de l'image rétinienne ou simplifier la taille de l'image produite si la rétine n'était pas présente?). Les prochains exemples expliqueront comment calculer la taille de l'image sous différentes conditions.



## TAILLE DE L'IMAGE FORMÉE PAR LE SYSTÈME OPTIQUE DE L'OEIL

La taille et la position de l'image formée par le système optique de l'oeil (considérant que la rétine n'interfère pas avec la formation de l'image) est facilement déterminée en utilisant l'oeil exact de Gullstrand

(ou encore les yeux schématiques simplifiés) ainsi qu'une approche optique-géométrique. Par exemple, un objet de 10cm est positionné 1.0m devant le plan principal de l'oeil simplifié de Gullstrand (la version sans accommodation). Étant donné que l'oeil est emmétrope, le plan de l'image sera derrière la rétine. Quelle serait la taille de l'image (c'est-à-dire celle formée derrière l'oeil si la rétine n'interférait pas avec la formation de l'image) et où l'image serait-elle formée? À la Figure 4.1, la position, la taille, de même que si l'image est à l'endroit ou à l'envers sont déterminées par construction. Un rayon du haut de l'objet est dirigé en direction du point focal antérieur ( $f$ ) de l'oeil. Ce rayon croise le premier plan principal ( $p$ ) et émerge du deuxième plan principal ( $p'$ ) parallèle à l'axe optique. Un deuxième rayon dirigé en direction du premier point nodal ( $N$ ) subit une réfraction au premier plan principal. Il émerge du deuxième plan principal et passe à travers le deuxième point nodal ( $N'$ ) voyageant dans la même direction que le rayon dirigé en direction de  $N$  dans l'espace objet. Un troisième rayon, parallèle à l'axe optique, part du deuxième plan principal et passe à travers le deuxième point focal de l'oeil ( $f'$ ).



**Figure 4.1:** La position et la taille de l'image rétinienne, de même que sa position à l'endroit ou à l'envers

*Anterior Focal Point: point focal antérieur*

*Principal planes: Plans principaux*

*Secondary Focal Point: point focal secondaire*

Note: Étant donné que l'oeil est emmétrope, le deuxième point focal correspond au croisement de la rétine et de l'axe optique. L'intersection de ces trois rayons dans l'espace image indique le plan dans lequel l'image sera formée (si on considère que la rétine ne bloque pas la lumière).

Afin de déterminer la position de l'image par rapport à la rétine, on doit connaître les caractéristiques de l'oeil schématique et résoudre un problème de vergence. L'information suivante concernant l'oeil schématique est requise:

Puissance équivalente de l'oeil:

$$F = +59.6 \text{ D}$$

Position du plan principal secondaire:

$$p' = 1.75 \text{ mm}$$

Indice de réfraction de l'espace image:

$$n' = 1.336$$

Longueur axiale:

$$\text{fovée} = 24.17 \text{ mm}$$

La première étape dans la résolution de ce problème est de déterminer la vergence de la lumière dans l'espace objet (L).

$$L = n/l$$

n = indice de réfraction de l'espace objet (1.0 pour l'air)

l = distance entre p et l'objet; par convention de signes, -1.0 m

$$L = 1.0/-1.0 \text{ m} = -1.0 \text{ D}$$

En déterminant la vergence de la lumière dans l'espace image (L'), ce sera possible de calculer la distance entre l'image et p' (c'est-à-dire l').

$$L' = L + F$$

$$L' = -1.0 \text{ D} + 59.6 \text{ D} = +58.6 \text{ D}$$

La distance de l'image l' = n'/L'.

$$l' = 1.336/+58.6 \text{ D} = 0.0228 \text{ m}$$

L'image est formée à 22.8mm de p', le plan principal secondaire. Étant donné que p' est à 1.75 mm de la cornée, l'image est formée à 24.55 mm (1.75 mm + 22.8 mm) de l'apex de la cornée. La longueur axiale de l'oeil est de 24.17 mm. Donc, l'espace image sera située à 0.38 mm derrière la rétine.

La taille de l'image peut être déterminée en utilisant l'équation de magnification linéaire.

$$M = L/L' = h'(\text{image})/h(\text{objet})$$

$$M = -1.0 \text{ D}/+58.6 \text{ D}$$

$$M = -0.01706$$

Note: Le signe moins signifie que l'image est à l'envers.

Par conséquent,

$$h' = h(M)$$

$$h' = 10 \text{ cm} (-0.01706) = -0.1706 \text{ cm}$$

Donc la taille de l'image est de 1.706 mm.

Il est important de réaliser que cette procédure ne détermine pas la grandeur de l'image floue qui pourrait, dans cet exemple, être formée sur la rétine. Malgré que la grandeur de l'image formée par le système optique de l'oeil (pas nécessairement les images rétinienne) est d'intérêt dans certaines situations, ce n'est habituellement pas pertinent dans les cas cliniques.

## TAILLE DE L'IMAGE RÉTINIENNE (IMAGE RÉTINIENNE NETTE)

Quand l'image formée sur la rétine est mise au point (c'est-à-dire quand l'objet est conjugué avec la rétine) la taille de l'image rétinienne peut facilement être trouvée en utilisant l'œil schématisé réduit ainsi que les rayons des extrémités de l'objet qui passent à travers le point nodal de l'œil (parfois, ces rayons sont appelés rayons principaux). Vous savez que l'image est créée sur la rétine, vous n'avez donc qu'à déterminer l'intersection avec la rétine d'un rayon parmi plusieurs. Les rayons qui passent par le point nodal ne subissent pas de réfraction. L'angle que sous-tend l'objet au point nodal sera équivalent à celui que sous-tend la rétine au point nodal.

**Note:** Une surface sphérique simple de réfraction a un point principal qui correspond au vertex de la surface réfractive et un point nodal correspondant au centre de courbure de la surface réfractive.

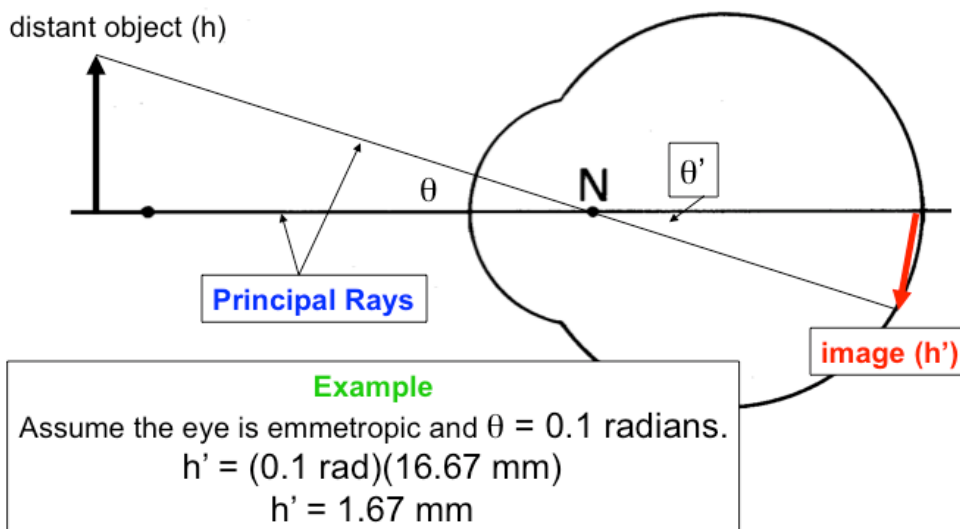
La Figure 4.2 illustre comment la taille de l'image rétinienne peut être calculée en utilisant les rayons passant par le point nodal de l'œil schématisé réduit. L'œil réduit emmétrope dans notre cas est celui de Emsley. Prenons pour acquis qu'un objet situé à l'infini sous-tend un angle visuel de 0.1 radians (rad).

**Note:** L'angle visuel que sous-tend un objet est défini par l'angle formé par les extrémités de l'objet au point nodal. Parfois, l'angle visuel que sous-tend un objet est considéré comme sa taille apparente. Par contre, lorsque l'image rétinienne n'est pas à focus, la taille est déterminée par le rayon passant par le centre de la pupille d'entrée de l'œil, donc l'angle visuel est parfois mesuré au centre de la pupille d'entrée.

**Note:** En général, c'est beaucoup plus simple de spécifier les angles visuels en radians, plutôt qu'en degrés. Étant donné que les calculs de la taille des images implique fréquemment les rayons paraxiaux, peu d'erreurs sont impliquées.

Étant donné que l'objet sous-tend un angle de 0.1 rad au point nodal, l'image doit aussi sous-tendre 0.1 rad au point nodal (donc  $\theta = \theta'$ ). Par conséquent, pour calculer la taille de l'image,  $q'$  est multiplié par la distance entre le point nodal et la rétine. Pour l'œil réduit emmétrope d'Emsley, cette distance équivaut 16.67 mm (22.22 mm - 5.55 mm).

Donc: Taille de l'image =  $(0.1 \text{ rad}) \times (16.67 \text{ mm}) = 1.67 \text{ mm}$ .

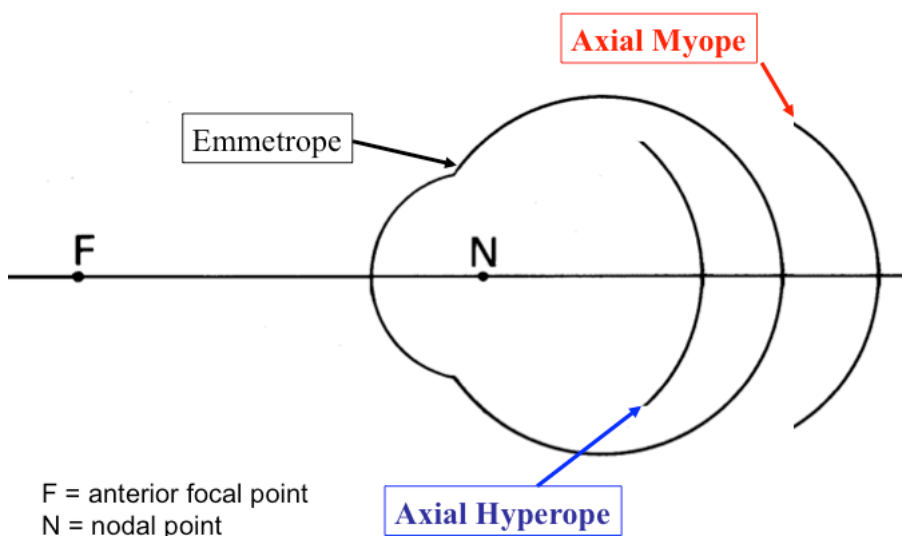


**Figure 4.2:** L'utilisation de l'œil emmétrope réduit d'Emsley pour calculer la taille de l'image

## TAILLE DE L'IMAGE - AMÉTROPIE AXIALE NON-CORRIGÉE

Lorsqu'on analyse des images rétinienne chez les patients avec une amétropie, la présence d'une erreur réfractive a été bien attribuée à l'une des deux causes suivantes – une longueur axiale anormale (amétropie axiale) ou une composante réfractive anormale (amétropie réfractive). Mais en réalité, les étiologies ne peuvent pas vraiment être divisées en deux catégories distinctes. Par définition, une amétropie axiale est une erreur réfractive causée par une longueur axiale inappropriée. La puissance réfractive (c'est-à-dire le système optique de l'oeil) d'un amétrope axial est normal. Dans un oeil schématique, une amétropie axiale pourrait donc être représentée par les mêmes surfaces réfractives d'un oeil emmétrope mais la rétine serait à une position différente. Pour les myopies axiales, la longueur axiale sera plus grande que la normale. Pour les hypermétropes axiales, la longueur axiale sera plus courte que la normale. En comparaison, une amétropie réfractive est une erreur de réfraction causée par une composante optique anormale. La longueur axiale est normale, mais l'oeil a soit trop (myopie réfractive) ou pas assez (hypermétropie réfractive) de puissance réfractive. Les modèles de yeux schématiques réduits pour les amétropies réfractives ont la même longueur axiale que l'oeil emmétrope réduit, mais la courbure de la surface équivalente est différente. Le rayon de courbure pour la surface de réfraction est plus courte que la normale pour la myopie réfractive et vice versa pour l'hypermétropie réfractive.

Le diagramme dans la Figure 4.3 illustre 3 yeux schématiques réduits représentant une emmétropie, un myopie axiale de 5.0 D, et une hypermétropie axiale de 5.0 D. Étant donné que les deux derniers sont des amétropies axiales, les puissances dioptriques des yeux sont les mêmes que l'oeil standard emmétrope d'Emsley et les points nodaux ainsi que les surfaces réfractives des trois yeux sont identiques. Considérons qu'on prenait 3 différents objets, en plaçant un à l'infini qui sous-tend un angle de 0.1 rad au point nodal de l'oeil emmétrope, un au point éloigné de l'oeil myope pour qu'il sous-tende aussi 0.1 rad et un troisième objet (virtuel) au point éloigné de l'oeil hypermétrope sous-tendant encore une fois 0.1 rad (voir Figure 4.4). Sous ces circonstances, les rayons extrêmes des objets passant par les points nodaux peuvent être utilisés pour calculer la taille de l'image rétinienne. De plus, ces rayons donnent une comparaison directe de la taille de l'image dans ces 3 types de yeux. Étant donné que ce sont les intersections de ces rayons à travers les points nodaux avec les rétines respectives qui démarquent la taille des images rétiniennes, dans les amétropies axiales non-corrigées, la taille de l'image rétinienne est directement proportionnelle à la longueur axiale. L'image dans l'oeil d'un myope sera plus grande que celle dans l'oeil emmétrope, qui, elle, sera plus grande que celle dans l'oeil hypermétrope.



**Figure 4.3:** Les longueurs axiales différentes dans l'hypermétropie axiale, la myopie axiale et l'emmétropie. Notez que le point focal antérieur et le point nodal sont équivalents.

**Anterior focal point: point focal antérieur      Nodal point: point nodal**

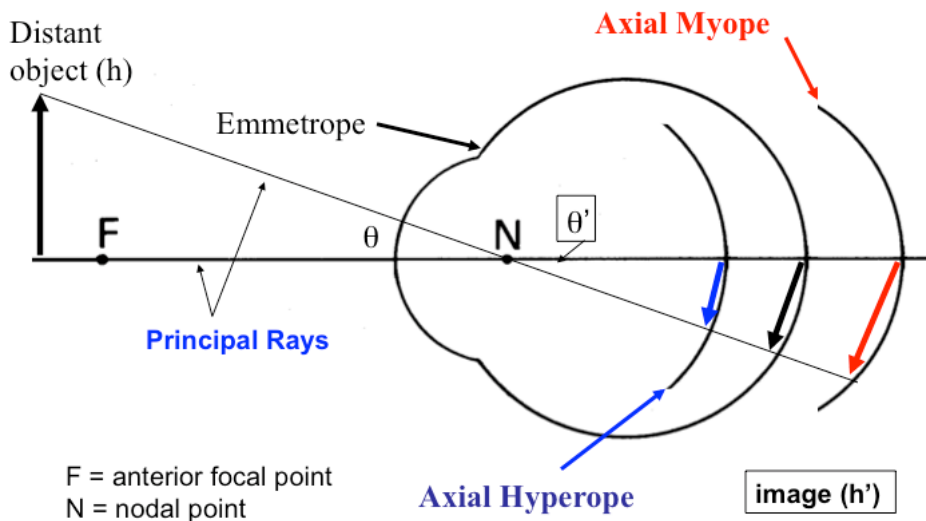


Figure 4.4: La taille de l'image dans l'amétropie axiale est directement proportionnelle à la longueur axiale

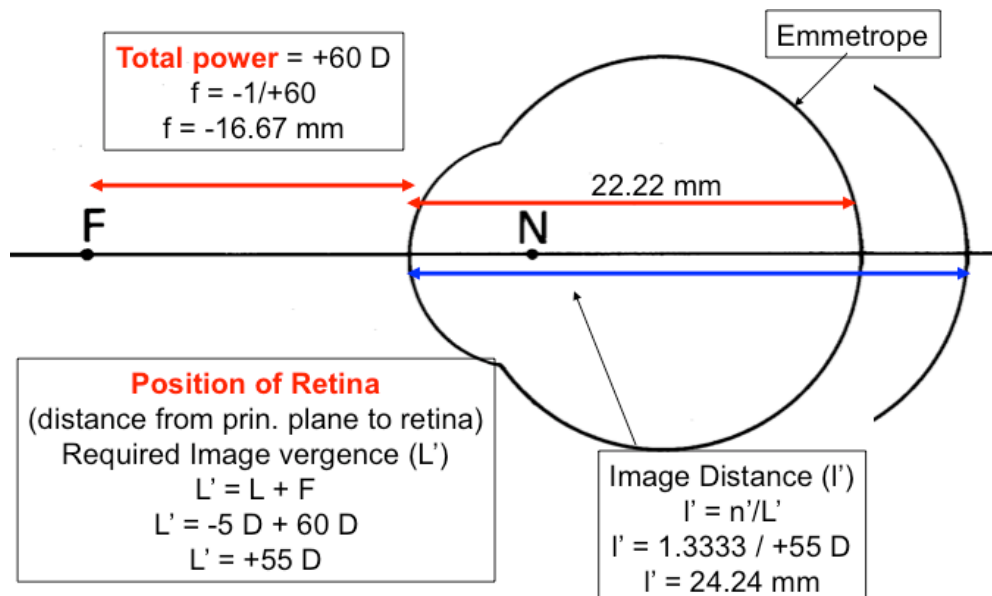


Figure 4.5: En trouvant la distance entre l'image et la surface de réfraction dans une myopie axiale de 5 D, on peut ensuite trouver la distance entre le point nodal et la rétine, de même que la taille de l'image.

La taille de l'image rétinienne ( $h'$ ) dans un oeil myopique est trouvée en multipliant l'angle que sous-tend l'image au point nodal (0.1 rad) par la distance entre le point nodal et la rétine.

$$h' = (18.69 \text{ mm}) \times (0.1 \text{ rad})$$

$$h' = 1.87 \text{ mm}$$

On a préalablement déterminé que l'image produite dans un oeil emmétrype par un objet qui sous-tend un angle visuel de 0.1 rad est de 1.67 mm (page 4). Une comparaison entre la myopie et l'emmétropie démontre que l'image dans l'oeil d'un myope est d'environ 12% plus grande que celle dans l'oeil d'un emmétrype.

Pour l'oeil hypermétrope:

$L'$  – la vergence de la lumière requise dans l'espace image afin de mettre au point une image sur la rétine

$$L' = +5.0 \text{ D} + 60.0 \text{ D}$$

$$L' = +65.0 \text{ D}$$

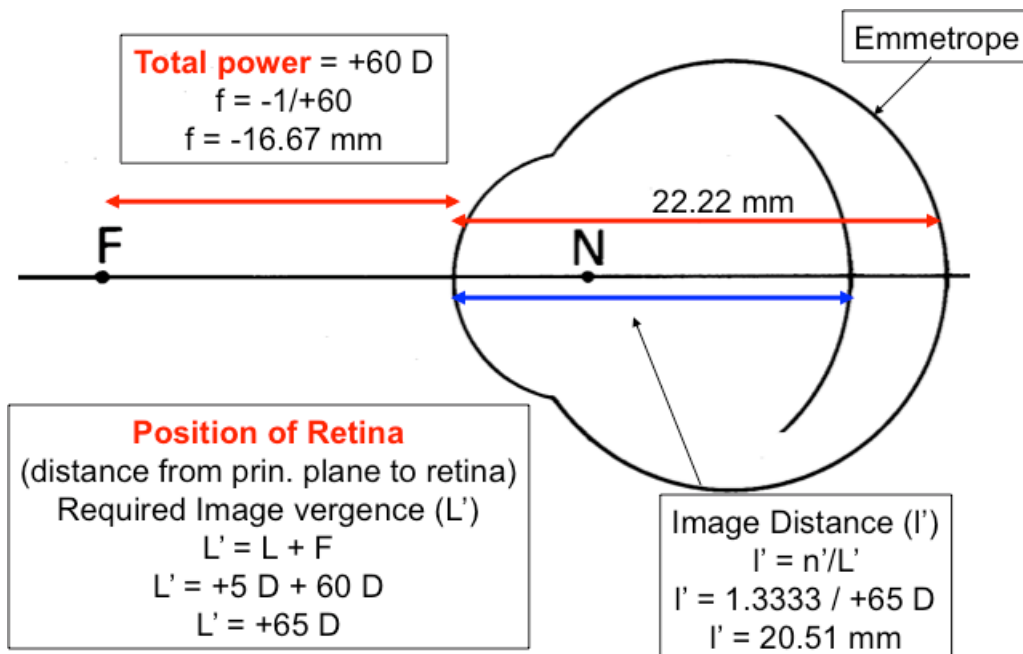
$l'$  – la distance entre la surface de réfraction et la rétine (voir Figure 4.6).

$$l' = 1.333/+65.0 \text{ D}$$

$$l' = 20.51 \text{ mm}$$

La distance entre le point nodal et la rétine de cet oeil hypermétrope est:

$20.51 \text{ mm} - 5.55 \text{ mm} = 14.96 \text{ mm}$   
 $h' - \text{la taille de l'image rétinienne.}$   
 $h' = (14.96 \text{ mm}) \times (0.1 \text{ rad})$   
 $h' = 1.50 \text{ mm}$



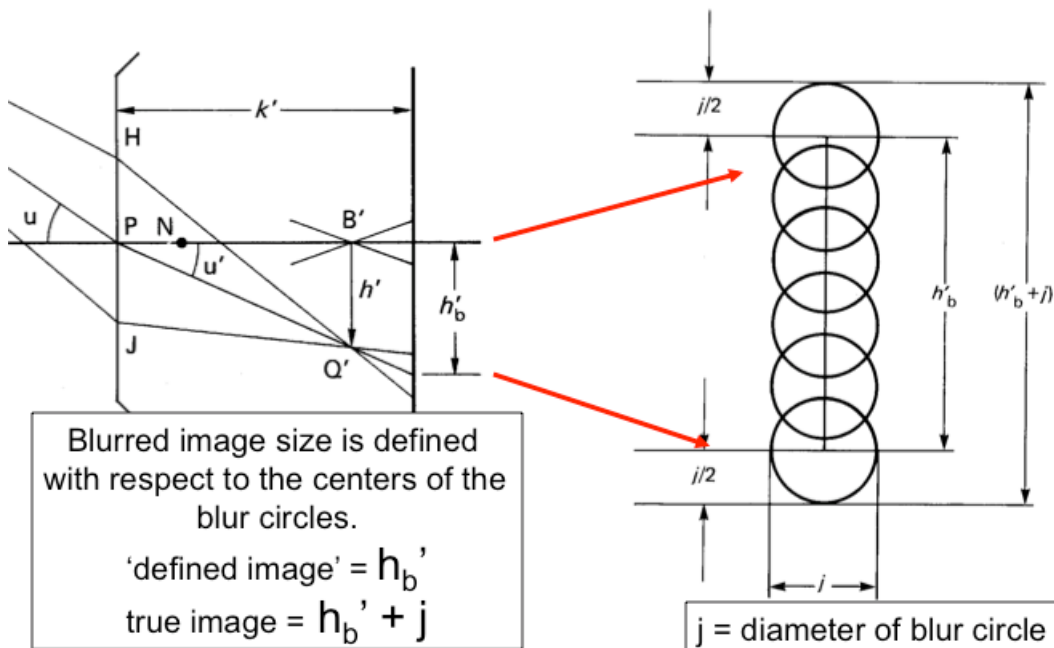
**Figure 4.6:** En trouvant la distance entre l' image et la surface de réfraction dans une hypermétropie axiale de 5 D, on peut ensuite trouver la distance entre le point nodal et la rétine, de même que la taille de l'image.

Note. Dans les exemple ci-dessus, l'erreur de réfraction était spécifié selon le plan principal de l'oeil. Ces corrections réfractives se nomment réfractions selon le plan principal ou réfractions oculaires. Dans les conditions cliniques de base, l'importance de l'erreur de réfraction du patient est spécifiée selon le plan de la lentille (le plan du visiomètre) et on le nomme le plan de réfraction des lunettes. La réfraction oculaire peut être calculée à partir du plan de réfraction des lunettes si le vertex est connu et vice versa. Sauf si indiqué autrement, les erreurs de réfraction dans ce chapitre seront spécifiées selon le plan principal.

## TAILLE DE L'IMAGE - AMÉTROPIE RÉFRACTIVE NON CORRIGÉE

Quand un objet n'est pas conjugué avec la rétine, l'image formée sur la rétine ne sera pas mise au point et chaque point objet sera représenté par un cercle flou. Pour un objet situé à l'infini, la taille de ce cercle flou dépend surtout de l'importance de l'erreur de réfraction et de la taille de la pupille. Dans certains cas, il est souhaitable de déterminer la taille de l'image flou. Dans ce cas, la taille de l'image ne peut pas être déterminée en utilisant le rayon passant par le point nodal de l'oeil. Les rayons provenant des extrémités de l'objet qui passent par le centre de la pupille d'entrée (les rayons principaux) sont utilisés afin de déterminer la taille de l'image rétinienne. Les rayons principaux sont utilisés, car la taille d'une image rétinienne floue est définie comme la distance entre les centres des cercles flous, associés aux extrémités de l'objet. Les rayons passant par le point nodal ne forment pas les centres des cercles flous. Ce sont les rayons principaux qui croisent la rétine au centre d'un cercle flou. Dans ce cas, le rayon principal peut donc aussi être utilisé afin de déterminer la taille d'une image rétinienne nette. Par contre, il est important de réaliser que la taille de l'image déterminée par le rayon principal ne représente pas la taille physique actuelle de l'image floue. Comme illustré à la Figure 4.7, la taille physique de l'image sera la même que la taille de l'image indiquée par le rayon principal, plus le diamètre d'un des cercles flous.





**Figure 4.7:** La taille physique de l'image sera la même que la taille de l'image indiquée par le rayon principal, plus le diamètre d'un des cercles flous

**Blurred image size is defined with respect to the centers of the blur circles :** la taille de l'image floue est définie par rapport aux centres des cercles flous.

Dans l'exemple qui suit, on démontre que le rayon principal peut être utilisé afin de déterminer la taille de l'image rétinienne. Considérons qu'il y a un objet situé à l'infini qui sous-tend un angle de 0.1 rad à la pupille d'entrée de l'oeil emmétrope réduit d'Emsley. Contrairement au rayon passant par le point nodal, le rayon principal sera dévié suite à la réfraction au plan principal. L'angle sous-tendu par l'image à la pupille d'entrée sera moins de 0.1 rad (voir Figure 4.8).

Afin de calculer la taille de l'image rétinienne, la distance entre le plan principal et la rétine doit être connue et l'angle de réfraction du rayon principal doit être calculé. Une version simplifiée de la loi de Snell peut être utilisée afin de déterminer l'angle de réfraction.

La loi de Snell,

$$n(\sin(i)) = n'(\sin(i'))$$

Étant donné que les angles d'incidence pour les rayons paraxiaux seront relativement petits, les angles peuvent être exprimés en radians et les fonctions sinus peuvent être éliminées. Soit,

$$ni = n'i'$$

$$i' = ni/n'$$

Étant donné  $n = 1$  et  $n' = 4/3$  (pour l'oeil réduit d'Emsley):

$$i' = 3/4(i) = 0.75i$$

Pour l'exemple illustré ci-dessus:

$$i' = 0.1 \text{ rad}(3/4) = 0.075 \text{ rad}$$

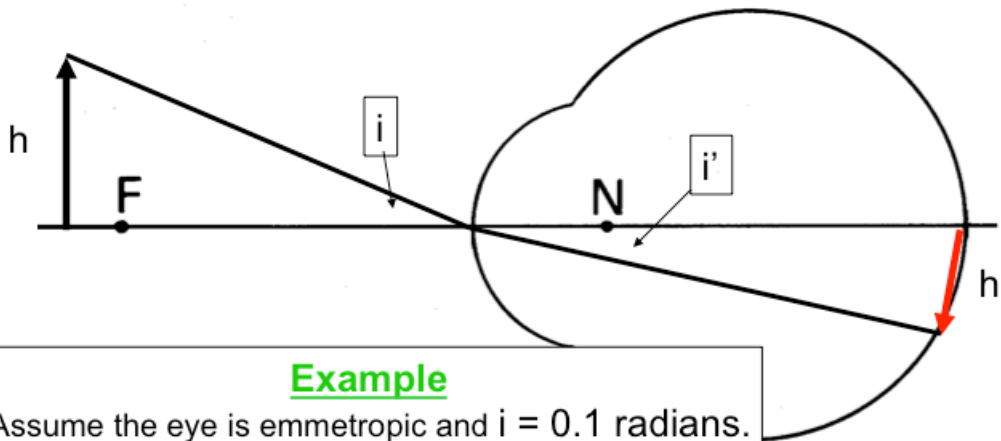
La taille de l'image rétinienne ( $h'$ ):

$$h' = i' \text{ (distance entre le plan principal et la rétine)}$$

$$h' = 0.075 \times 22.22 \text{ mm}$$

$$h' = 1.67 \text{ mm}$$





### Example

Assume the eye is emmetropic and  $i = 0.1$  radians.

$$i' = 0.1/1.3333 = 0.075 \text{ rad}$$

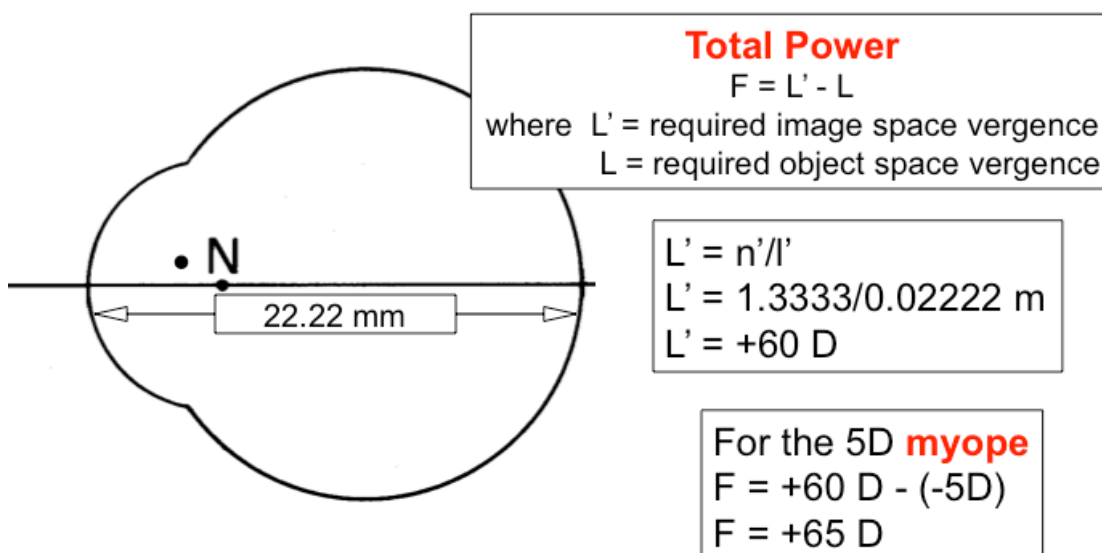
$$h' = (0.075 \text{ rad})(22.22 \text{ mm})$$

$$h' = 1.67 \text{ mm}$$

Figure 4.8: L'utilisation de l'angle de réfraction du rayon principal afin de calculer la taille de l'image

Une des caractéristiques essentielles du rayon principal est le fait qu'il peut être utilisé afin de démontrer la relation entre la taille de l'image rétinienne pour une amétropie réfractive non corrigée et la taille de celle formée dans l'oeil emmétrope. Considérons l'image rétinienne d'un objet situé à l'infini, qui sous-tend un angle de 0.1 rad au centre de la pupille d'entrée, formée dans un oeil myope de 5.0 D. Comme illustré à la Figure 4.9, la longueur axiale d'un myope réfractif de 5.0 D est identique à celle d'un oeil emmétrope. Par contre, la puissance réfractive totale est de 5.0 D plus élevée (soit  $F = +65.0$  D) que celle de l'oeil emmétrope. Par conséquent, une image nette de l'objet situé à l'infini sera créée au point X. La lumière pourra subséquemment diverger de X pour former un cercle flou sur la rétine. Par définition, la taille de l'image chez ce myope réfractif non corrigé sera déterminée par le rayon principal. Étant donné l'angle d'incidence du rayon principal de 0.1 rad, l'angle que sous-tend le rayon principal suite à la réfraction sera de 0.075 rad. Dans ce cas, l'angle de réfraction sera le même pour un amétrope non corrigé et un emmétrope

La longueur axiale sera aussi la même (22.22 mm; la distance entre le plan principal et la rétine). En conséquence, la taille 'définie' de l'image dans l'oeil amétrope non corrigé sera la même taille que celle de l'image dans l'oeil emmétrope (soit de  $22.22 \text{ mm} \times 0.075 \text{ rad} = 1.67 \text{ mm}$ , comme image rétinienne).



**Figure 4.9:** La longueur axiale d'une myopie réfractive de 5.0 D est identique à celle de l'oeil emmétrope, par contre, la puissance réfractive totale est de 5.0 D de plus (soit  $F = +65.0$  D)

Par contre, d'après la Figure 4.7, il est évident que la taille physique (pas la taille définie) de l'image floue dans l'oeil myopique réfractif sera plus grande que l'image nette dans l'oeil emmétrope. La taille physique réelle de l'image floue peut être déterminée en calculant le diamètre d'un des cercles flous. Si on considère que la pupille d'un oeil ayant une myopie réfractive est de 5mm en diamètre (n'oublions pas que la pupille coïncide avec les surfaces réfractives de l'oeil réduit), la taille du cercle flou peut être calculé en utilisant les rapports de triangles semblables. Pour ce faire, la position du point X doit être déterminée comme suit:

$$L' = L + F$$

(Étant donné que l'objet est à l'infini  $L = 0$ )

$$L' = 0 + 65.0 \text{ D} = +65.0 \text{ D}$$

$$l' = n'/L'$$

( $l'$  = distance entre la surface réfractive et X)

$$l' = 1.333/+65.0 \text{ D}$$

$$l' = 20.51 \text{ mm}$$

Étant donné que le triangle ABX est similaire au triangle CDX, le ratio de la base des triangles (soit le ratio de la taille de la pupille par rapport à la taille du cercle flou) sera égal au ratio des altitudes des triangles (soit le ratio entre la distance du plan principal à X de même que celle entre X et la rétine).

$$CD = 0.417 \text{ mm}$$

(soit le diamètre du cercle flou = 0.417 mm)

Donc, la taille physique actuelle de l'image floue est de:

$$0.417 \text{ mm} + 1.67 \text{ mm} = 2.087 \text{ mm}$$

## TAILLE DE L'IMAGE - AMÉTROPIE CORRIGÉE

L'utilité d'une lentille correctrice est de permettre la mise au point de la lumière de l'infini au point éloigné de l'oeil ayant une amétropie. En plus d'éliminer le flou rétinien, les lentilles de correction altèrent la taille de l'image formée dans l'oeil amétrope. L'effet de la puissance d'une lentille de correction sur la taille de l'image rétinienne peut être décrite par deux facteurs, la magnification due aux lentilles et la magnification relative due aux lentilles.

La **Magnification due aux Lentille (ML)** nous décrit comment les lentilles de correction affectent la taille de l'image rétinienne non corrigée. C'est défini comme le ratio entre la taille de l'image d'un objet éloigné dans l'oeil amétrope corrigé et la taille de l'image floue dans l'oeil amétrope non corrigé, donc:

$$ML = \frac{\text{taille corrigée de l'image}}{\text{taille non corrigée de l'image}}$$

On peut démontrer que ML est aussi:

$$ML = \frac{\text{distance entre PR et lentille de correction}}{\text{distance entre PR et plan principal primaire}}$$

(PR = Punctum Remotum, soit le point éloigné)

Cette relation démontre que ML dépend de l'importance de l'erreur de réfraction et de la position de la lentille de correction. ML a toujours un signe positif. Pour les hypermétropes, étant donné que le PR est derrière l'oeil et que le plan de la lentille est toujours devant l'oeil, ML sera toujours supérieure à 1.0 (voir section des yeux aphakes). Pour les myopes, le PR et le plan de la lentille sont devant l'oeil. Le PR étant habituellement plus loin que la lentille de correction, ML sera inférieure à 1.0. Pour les yeux hypermétropes et myopes, plus la distance vertex est élevée, plus l'effet de la lentille sur la taille de l'image non-corrigée est élevé, et plus grande sera la déviation de ML par rapport au 1.0.

La magnification due aux lentilles est souvent appelée magnification angulaire (contrairement à la magnification linéaire,  $M = h'/h = L/L'$ ) car la contribution du système optique de l'oeil amétrope à la taille de l'image est la même dans les yeux corrigés et non corrigés. Le ratio des images (corrigée/non corrigée) démontre la différence dans les angles que sous-tendent les rayons principaux à la surface de réfraction dans les conditions corrigées et non corrigées.

**Note:** Du point de vue clinique, ML est importante car elle peut être utilisée afin de prédire certaines altérations de la perception de l'espace produite par les lentilles de correction. Par exemple, considérons un jeune hypermétrope non corrigé qui a la capacité d'accommoder afin de compenser son erreur de réfraction. Lorsque corrigés avec des lentilles, les objets à distance seront nets (l'oeil n'accommode pas), mais plus grande que dans l'état non corrigé. En général, quand un objet est magnifié, le système visuel interprète le changement de la taille comme un changement de la position de l'objet. Donc, lorsque les lentilles sont portées pour les premières fois, les objets peuvent paraître plus près qu'elle ne l'étaient sans correction.

La **Magnification Relative due aux lentilles (MRL)** décrit comment la taille de l'image dans l'oeil amétrope corrigé se compare à celle de l'**oeil emmétrope moyen**. C'est défini comme le ratio de la taille des images rétinienues produites par un objet éloigné dans l'oeil amétrope corrigé et dans l'oeil emmétrope moyen, donc:

$$\text{MRL} = \frac{\text{puissance équivalente de l'oeil emmétrope}}{\text{puissance équivalente de l'oeil emmétrope \& de la lentille de correction}}$$

**Note:** Du point de vue clinique, MRL est importante car le ratio entre MRL de l'oeil droit et de l'oeil gauche nous indique la taille relative des images dans les 2 yeux.

Pour tout système optique, la taille de l'image d'un objet éloigné sera **directement proportionnelle** à la longueur focale **équivalente** du système optique. Étant donné que la longueur focale de tout système optique est en lien avec sa puissance réfractive équivalente (en considérant que le système optique est dans l'air), la taille de l'image est **inversement proportionnelle** à la **puissance réfractive équivalente** du système optique.

Alors:

$$\text{MRL} = \frac{+60.00 \text{ D}}{\text{Foeil} + \text{Flentille} - [d (\text{Foeil})(\text{Flentille})]}$$

La puissance équivalente de la combinaison oeil amétrope-lentille peut être calculée en utilisant l'équation suivante pour la puissance équivalente d'un système de lentilles.

$$\text{Feq} = \text{Foeil} + \text{Flentille} - \frac{d}{n} (\text{Foeil})(\text{Flentille})$$

Où,

Feq = puissance équivalente totale

Foeil = puissance de l'oeil amétrope

Flentille = puissance de la lentille de correction

n = indice de réfraction entre les lentilles et l'oeil (habituellement 1.0)

d = distance (mètres) entre le plan principal secondaire de la lentille et le plan principal de l'oeil

Note: d n'est pas la distance vertex. Cliniquement, la distance vertex d'une lentille de correction est mesurée de l'apex de la cornée jusqu'à la face arrière de la lentille.

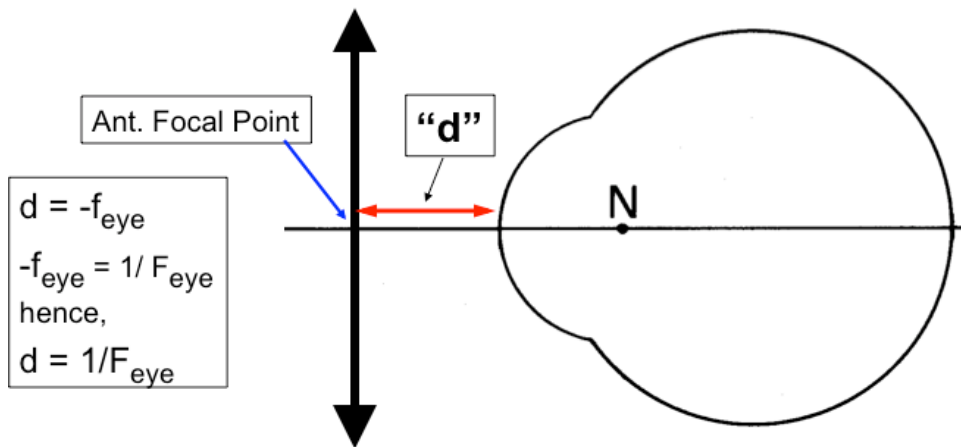
En assumant qu'on utilise l'oeil réduit d'Emsley comme oeil standard emmétrope, la relation pour MRL devient:

$$\text{MRL} = \frac{+60.00 \text{ D}}{\text{Foeil} + \text{Flentille} - [d (\text{Foeil})(\text{Flentille})]}$$

(N'oublions pas que la puissance équivalente de l'oeil réduit emmétrope d'Emsley est de 60.00 D.)

Cette relation forme, depuis longtemps, la base de la Loi de Knapp, une des lois les plus importantes en clinique.

Loi de Knapp: Pour les amétropies axiales, MRL sera de 1.0 lorsque le plan principal secondaire de la lentille de correction coïncide avec le point focal antérieur (voir Figure 4.10).



**Figure 4.10:** La Loi de Knapp dit que pour les amétropies axiales, MRL est égale à 1 quand le plan principal secondaire coïncide avec le point focal antérieur de l'oeil

Considérons ce qui arrive à cette équation lorsque la lentille de correction est au point focal antérieur de l'oeil. Lorsque la lentille de correction est au point focal antérieur de l'oeil,  $d$  est égale à la longueur focale antérieure de l'oeil (foeil).

Étant donné que:

$$F_{\text{oeil}} = -1 / F_{\text{oeil}} = -d$$

(**Note**  $d$  sera toujours une valeur positive)

Substituons  $1/F_{\text{oeil}}$  pour  $d$

$$MRL = \frac{F(\text{oeil emmétré})}{F_{\text{oeil}} + F_{\text{lentille}} - [d (F_{\text{oeil}})(F_{\text{lentille}})]} \text{ donc } +60 \text{ D}$$

Simplifions

$$MRL = \frac{+60 \text{ D}}{F_{\text{oeil}} + F_{\text{lentille}} - F_{\text{lentille}}}$$

$$MRL = \frac{+60 \text{ D}}{F_{\text{oeil}}}$$

$$MRL = \frac{(\text{puissance de l'oeil schématique})}{(\text{puissance de l'oeil amétrope})}$$

Dans d'autres mots, lorsqu'une lentille de correction est ajustée pour être portée au point focal antérieur de l'oeil, la puissance équivalente de la combinaison oeil-lentille est égale à la puissance de l'oeil amétrope seule. Étant donné que la puissance réfractive d'un oeil amétrope (axial) est égale à la puissance d'un oeil emmétré (soit +60 D quand on utilise l'oeil réduit d'Emsley):

$$MRL = \frac{+60.0 \text{ D}}{+60.0 \text{ D}} = 1.0$$

Donc, quand la lentille est placée au point focal antérieur d'un oeil ayant une amétropie axiale, la taille de l'image rétinienne nette dans l'oeil amétrope sera de même taille que l'image formée dans l'oeil emmétré. Ce point peut être illustré de façon graphique. Dans le Figure 4.11, trois yeux (un emmétré, un oeil hypermétrope (axial) et un oeil myope(axial)) sont superposés. Étant donné que l'erreur de réfraction de chacun de ces yeux est la même, les longueurs focales antérieures seront aussi égaux. Afin de démontrer que  $MRL = 1.0$  pour le myope et pour l'hypermétrope corrigés au point focal antérieur, considérons les rayons des points extrêmes d'un objet éloigné dirigés au point focal antérieur des trois yeux. Les centres optiques des lentilles de correction pour le myope et l'hypermétrope coïncident avec les points focaux antérieurs et alors, les rayons dirigés en direction des points focaux antérieurs passeront par

les centres optiques des lentilles sans être déviés. Les rayons croisent les plans principaux des trois yeux et seront réfractés parallèlement à l'axe optique. Étant donné que les images formées dans les trois yeux sont toutes mises au point, l'intersection des rayons avec le point focal antérieur et les rétines respectives de chaque oeil seront tracées et démontreront la taille des images rétinienne nettes. Étant donné que le rayon passant par le point focal antérieur, après la réfraction, est parallèle à l'axe optique, la taille de l'image rétinienne sera indépendante de la longueur axiale de l'oeil.

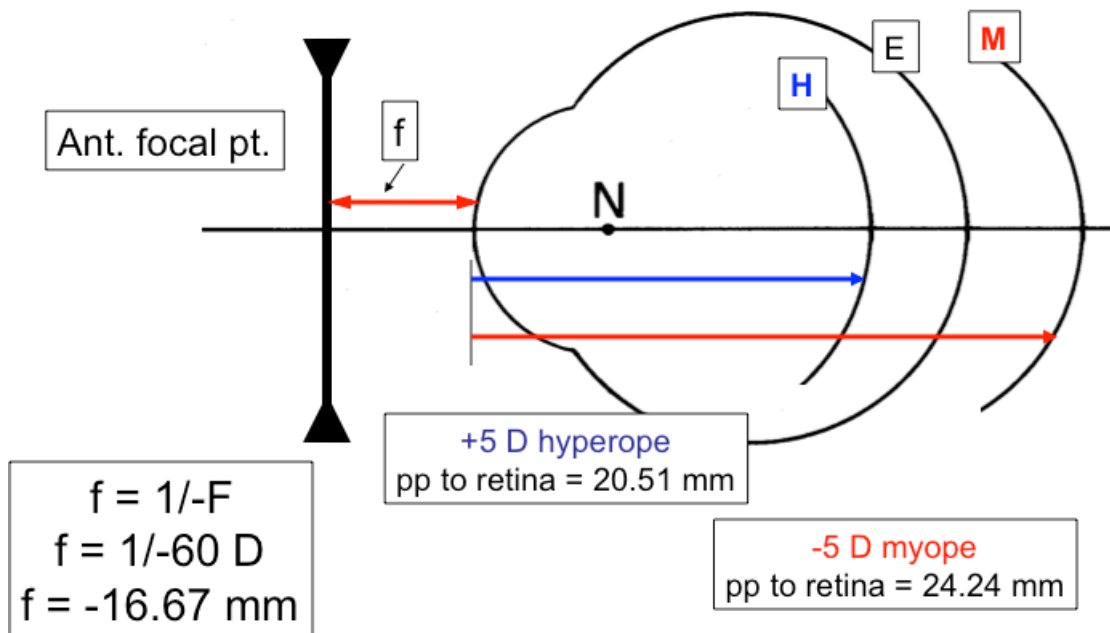


Figure 4.11: Amétropies axiales corrigées au point focal antérieur

## ML ET MRL – YEUX AMÉTROPE, CORRIGÉS

Les exemples suivants vont illustrer:

1. Les effets des lentilles de correction sur la taille de l'image rétinienne dans les amétropies axiales et réfractives,
2. Les différences entre la taille des images chez les myopes corrigés vs. les hypermétropes corrigés, et
3. Les différences entre la taille des images associées à la correction de l'oeil amétrope au point focal antérieur (donc avec les lentilles de correction) vs. au plan principal de l'oeil (donc avec lentilles cornéennes).

Note. Chez la majorité des patients, le point focal antérieur sera près, mais légèrement devant le plan des lentilles (comparons la position du point focal antérieur de l'oeil #1 de Gullstrand avec un vertex lunettes de 13 ou de 14 mm. Notons aussi que, étant donné que les plans principaux de l'oeil sont dans l'humeur aqueuse, il n'est pas possible de placer la lentille de correction au plan principal (assumant qu'on utilise pas une lentille intraoculaire). L'effet approximatif des lentilles cornéennes peut être démontré en considérant que la correction est située aux plans principaux de l'oeil d'Emsley réduit.

## AMÉTROPIES AXIAUX - CORRIGÉES PAR DES LUNETTES

Considérons qu'un patient a une réfraction oculaire (ou réfraction du plan principal) de  $-5.00$  D (soit une myopie de  $5.00$  D) et un deuxième patient hypermétrope a une réfraction oculaire de  $+5.00$  D. Considérons que le plan des lunettes coïncide avec les points focaux antérieurs des yeux amétropes (donc assumons que  $p'$  de la lentille de correction coïncide avec  $f$  des yeux amétropes).

Note: N'oublions pas que étant donné que ces amétropies sont axiaux, les longueurs focales antérieures des yeux amétropes seront égaux à la longueur focale antérieure de l'oeil emmétrope.

$$f = 1/-F$$

$$F = +60.00 \text{ D}$$

Donc,

$$f = 1/-60.00 \text{ D}$$

$$f = -16.67 \text{ mm}$$

c'est-à-dire que les points focaux antérieurs sont à 16.67 mm devant le plan principal (la surface réfractive équivalente).

Différentes approches peuvent être utilisées afin de calculer ML et la MRL pour ces yeux amétropes. La première approche illustrée impliquera le calcul de la taille des images rétiniennes formées dans les yeux corrigés et non corrigés et la taille des images formées par le même objet dans un oeil emmétrope. Dans ce cas, il est utile de commencer par le calcul de la taille des images rétiniennes dans l'oeil non corrigé. Pour simplifier, assumons que l'objet éloigné sous-tend un angle visuel de 0.1 radians.

**Note:** La taille sélectionnée de l'objet n'est pas critique – c'est-à-dire que les valeurs de ML et de MRL ne dépendent pas de la taille exacte sélectionnée de l'objet. La sélection d'un objet qui sous-tend 0.1 rad simplifie les calculs.

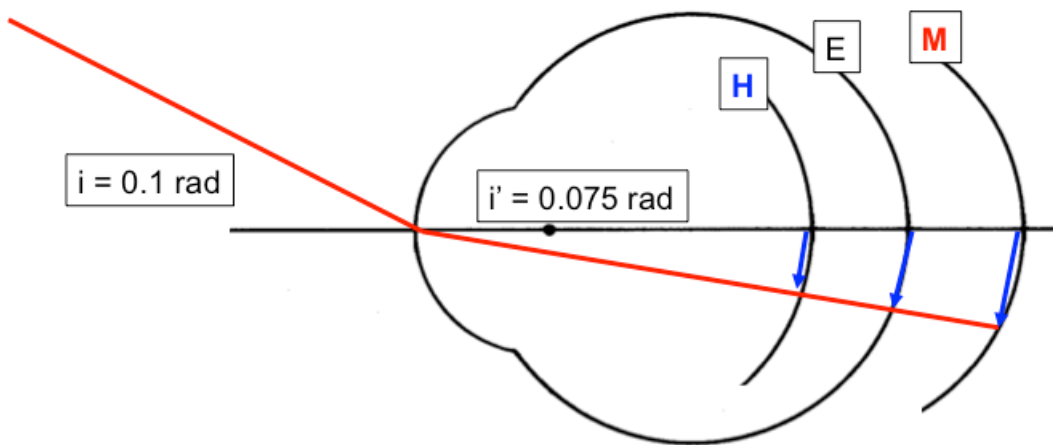
Dans la Figure 4.12, les rayons principaux provenant de l'objet éloigné sont montrés pour les yeux amétropes non corrigés et pour l'oeil emmétrope standard réduit. Afin de calculer la taille de l'image rétinienne pour ces trois yeux, les angles sous-tendus par les images rétiniennes aux plans principaux doivent être déterminés et la distance entre les plans principaux et les rétines doivent être connues. L'angle de réfraction des rayons principaux (c'est-à-dire l'angle sous-tendu par les images rétiniennes à la surface de réfraction) peut être calculé en utilisant la loi de Snell, simplifiée pour les rayons paraxiaux.

$$n_i = n'_i$$

$$i' = i/n$$

$$i' = 0.1 \text{ rad}/1.333$$

$$i' = 0.075 \text{ rad}$$



**Figure 4.12:** L'angle de réfraction des rayons principaux provenant d'un objet éloigné peut être calculé en utilisant la loi de Snell pour les yeux amétropes non corrigés

La distance entre la surface de réfraction et la rétine est de 22.22 mm pour l'oeil emmétrope réduit d'Emsley. Cette distance doit être calculée pour l'oeil myope et pour l'oeil hypermétrope. Comme démontré précédemment (pages 6 & 7) ceci implique le calcul de la vergence de la lumière dans l'espace image ( $L'$ ) requise afin de permettre la mise au point sur les rétines amétropes et la distance image ( $l'$ ) associée à cette vergence de l'espace image. La distance entre les surfaces de réfraction et les rétines pour la myopie axiale de 5 D et l'hypermétropie axiale de 5 D sont de 24.24 mm et de 20.51 mm, respectivement. Les tailles des images rétinienne (voir Figure 4.13) pour l'oeil emmétrope et pour les yeux amétropes non corrigés:

Emmétropie

$$h' = (0.075 \text{ rad}) \times (22.22 \text{ mm})$$

$$h' = 1.67 \text{ mm}$$

Hypermétropie axiale non corrigée

$$h' = (0.075 \text{ rad}) \times (20.51 \text{ mm})$$

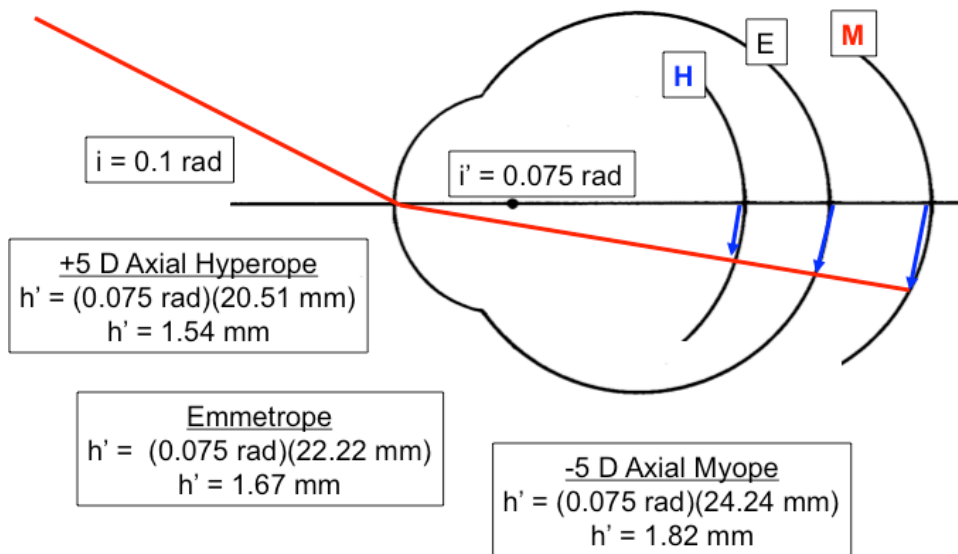
$$h' = 1.54 \text{ mm}$$

Myopie axiale non corrigée

$$h' = (0.075 \text{ rad}) \times (24.24 \text{ mm})$$

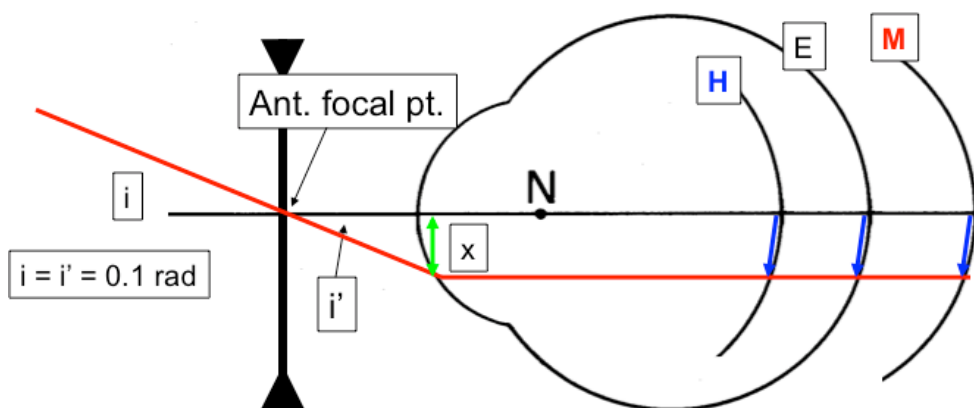
$$h' = 1.82 \text{ mm}$$





**Figure 4.13:** La taille de l'image peut être calculée en utilisant la distance entre les surfaces de réfraction et la rétine pour les yeux ayant des amétropies axiales.

Quand ces amétropies sont corrigées à l'aide de lunettes placées au point focal antérieur, les angles d'incidence des rayons principaux aux plans principaux des yeux amétropes seront altérés par les lentilles de correction (voir Figure 4.14). Dans le cas de l'oeil myope, le nouvel angle d'incidence pour les rayons principaux provenant des extrémités de l'objet sera inférieur à 0.1 rad. Pour l'oeil hypermétrope, l'angle d'incidence sera supérieur à 0.1 rad. Dans ce cas, les rayons qui simplifieront le calcul sont ceux passant par les points focaux antérieurs. On assume que la lentille de correction est infiniment mince et que le centre optique de cette dite lentille coïncide avec le point focal antérieur de l'oeil, ce qui permet aux rayons provenant de l'objet éloigné en direction du point focal antérieur ne seront pas déviés par la lentille (donc  $q = q'$ ). Lorsque ces rayons atteignent les plans principaux de l'oeil, ils seront réfractés parallèlement à l'axe optique et croiseront les rétines, ce qui permettra de tracer la taille des images. Étant donné que ces rayons sont parallèles aux axes optiques dans l'espace image, la distance entre l'intersection de ces rayons au plan principal et les axes optiques (la distance X dans la Fig 4.14) sera égale à la taille de l'image rétinienne. Afin de trouver la distance X, l'angle sous-tendu par l'objet au point focal antérieur et la longueur focale doivent être connus. Étant donné que l'objet est situé à l'infini optique, on peut assumer que l'objet sous-tendra le même angle au point focal antérieur que celui qu'il sous-tend au centre de la pupille d'entrée (étant donné que l'objet est à l'infini optique et que la différence entre les distances objets mesurées au point focal antérieur et au plan principal sera petite, cette hypothèse n'affectera pas les calculs). Donc, afin de calculer la taille des images dans les yeux amétropes corrigés, on multiplie simplement la longueur focale antérieure par l'angle visuel sous-tendu par l'objet.



**Figure 4.14:** Pour être en mesure de calculer la taille de l'image dans les yeux amétropes corrigés, on multiplie la longueur focale antérieure par l'angle visuel sous-tendu par l'objet



Hypermétrope (taille corrigée de l'image)

$$h' = (16.67 \text{ mm}) \times (0.1 \text{ rad})$$

$$h' = 1.67 \text{ mm}$$

Donc,

$$ML = \text{taille corrigée de l'image} / \text{taille non corrigée de l'image}$$

$$ML = 1.67 \text{ mm} / 1.54 \text{ mm} = 1.08$$

c'est-à-dire que la taille corrigée de l'image est d'environ 8% plus grande que la taille non corrigée de l'image.

$$MRL = \text{taille corrigée de l'image} / \text{taille emmétrope de l'image}$$

$$MRL = 1.67 \text{ mm} / 1.67 \text{ mm} = 1.0$$

Myope (taille corrigée de l'image)

$$h' = (16.67 \text{ mm}) \times (0.1 \text{ rad})$$

$$h' = 1.67 \text{ mm}$$

Alors,

$$ML = 1.67 \text{ mm} / 1.82 \text{ mm}$$

$$ML = 0.92$$

$$MRL = 1.67 \text{ mm} / 1.67 \text{ mm}$$

$$MRL = 1.0$$

## AMÉTROPIES AXIAUX AVEC LENTILLES CORNÉENNES

Dans cet exemple, considérons les deux mêmes amétropies axiaux que celles dans la section précédente (soient une myopie de 5.0 D et une hypermétropie de 5.0 D) et assumons que les lentilles cornéennes sont bien ajustées aux plans principaux des yeux. La Figure 4.15 illustre les effets de lentilles correctrices au niveau du plan principal sur les tailles des images rétinienne dans les yeux myopes et hypermétropes (axiaux). Assumons que ces yeux amétropes et les lentilles cornéennes sont centrés (donc que les centres optiques des surfaces réfractives ont un axe commun), alors les centres optiques des lentilles de correction coïncident avec les vertex des surfaces de réfraction des yeux (les pupilles d'entrée des yeux). Comme résultat, les rayons principaux provenant des extrémités de l'objet croiseront les centres optiques des lentilles de correction et, donc, ne seront pas déviés par les lentilles de correction. Évidemment, ces rayons seront déviés par réfraction (en direction de l'axe optique) aux surfaces réfractives des yeux. Par contre, étant donné que les lentilles de correction n'ont pas dévié les rayons principaux, leurs angles d'incidence seront les mêmes dans cet état corrigé que ceux dans l'état non corrigé. Donc, les angles dont sous-tendent les images aux plans principaux de l'image seront les mêmes dans les conditions corrigées et non corrigées (ces valeurs ont été calculées précédemment à la page 17). Étant donné que la taille des images non corrigées n'ont pas été changées par les lentilles de correction (les lentilles ont simplement permis la mise au point), alors,

$$ML = 1.0$$

Pour l'hypermétrope axial et le myope axial.

Comme indiqué par la loi de Knapp, MRL dans ces amétropies axiaux corrigées avec des lentilles cornéennes aux plans principaux ne sera pas 1.0. Au lieu,

Pour l'hypermétrope,

$$MRL_H = 1.54 \text{ mm} / 1.67 \text{ mm}$$

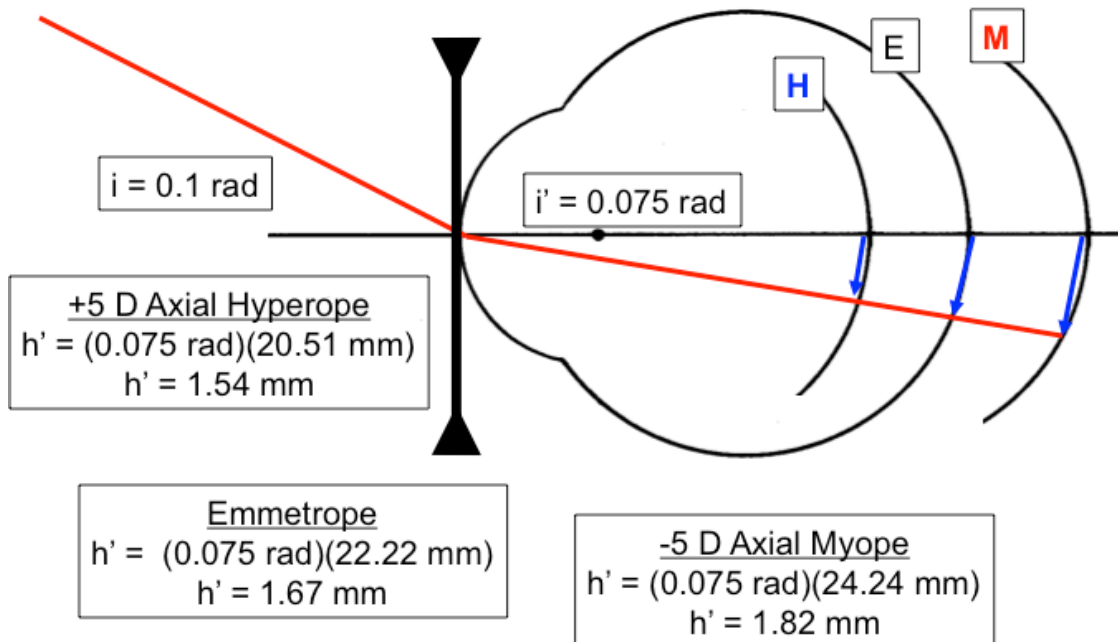
$$MRL_H = 0.92$$

Pour le myope,

$$MRL_M = 1.818 \text{ mm} / 1.67 \text{ mm}$$

$$MRL_M = 1.089$$

**Note:** La taille qui est relativement grande (soit une  $MRL > 1.0$ ) qui résulte de la correction de myopies grâce aux lentilles cornéennes est l'une des raisons expliquant la vision optimale chez les individus avec ce type d'erreur de réfraction (meilleures acuités visuelles). Pour les hypermétropies axiales, c'est le contraire quand à la taille de l'image.



**Figure 4.15:** Si la lentille de correction est placée au plan principal, la taille de l'image sera la même que celle dans l'oeil non corrigé (comme démontré à la Figure 4.13)

## AMÉTROPIES RÉFRACTIVES CORRIGÉES PAR DES LUNETTES

Considérons qu'un patient a une myopie réfractive de 5.0 D et qu'un autre patient a une hypermétropie réfractive de 5.0 D. Comme dans l'exemple précédent avec les amétropies axiales, on va démontrer la taille des images sans être mises au point dans les yeux non corrigés.

La Figure 4.16 démontre une caractéristique importante des amétropies réfractives. Dans l'état non corrigé, les rayons principaux d'un objet éloigné (soit un objet qui sous-tend 0.1 radians) seront réfractés de la même façon dans les yeux amétropes que dans les yeux emmétropes. En conséquence, les angles que sous-tendent les images aux plans principaux des images seront les mêmes que ceux dans l'oeil standard emmétrope, peu importe l'importance de l'erreur de réfraction. Car, par définition, les longueurs axiales des yeux amétropes sont les mêmes que celles de l'oeil standard emmétrope, donc les images rétinienne non corrigées dans l'oeil amétrope seront de tailles égales à celles formées dans l'oeil emmétrope.

donc pour un objet à l'infini sous-tendant 0.1 rad,

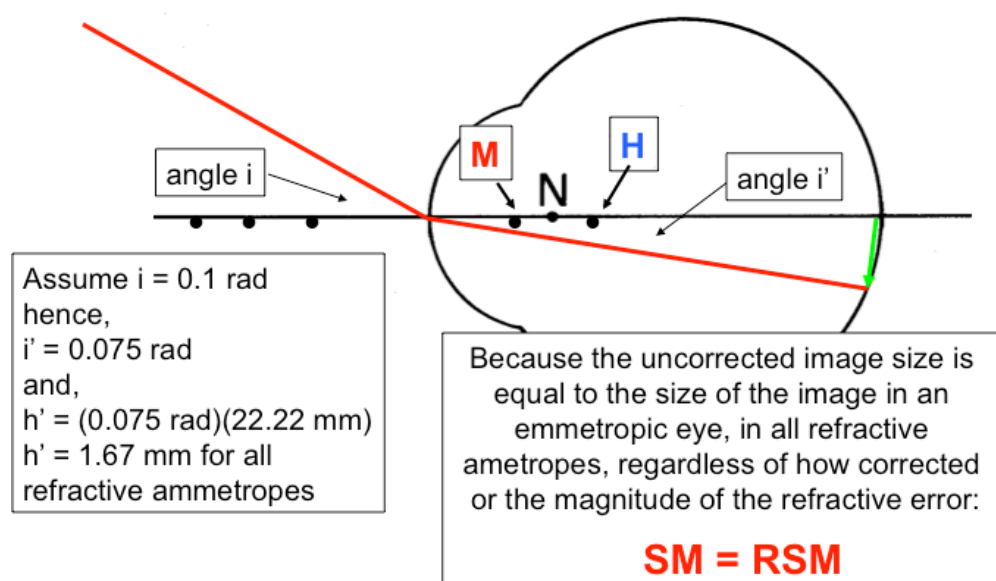
$$h' = (0.075 \text{ rad}) \times (22.22 \text{ mm}) = 1.67 \text{ mm}$$

Étant donné que la taille des images non corrigées dans ces yeux amétropes est la même que celles formées dans les yeux emmétropes, peu importe le mode de correction de ces erreurs de réfraction (lentilles cornéennes ou lunettes), ML sera égale à MRL. Cette propriété des amétropies réfractives est un produit des relations suivantes:

$$ML = \frac{\text{taille corrigée de l'image}}{\text{taille non corrigée de l'image}}$$

$$MRL = \frac{\text{taille corrigée de l'image}}{\text{taille de l'image emmétrope}}$$

Étant donné que la taille des images non corrigées est identique à la taille des images chez les yeux emmétropes, ces relations sont équivalentes.



**Figure 4.16:** Pour un objet éloigné, l'angle d'incidence et l'angle de réfraction des rayons principaux seront égaux pour toutes les amétropies réfractives

**Because the uncorrected image size is equal to the size of the image in an emmetropic eye, in all refractive ametropes, regardless of how corrected or the magnitude of the refractive error:  $SM=RSM$ . : Étant donné que la taille de l'image**

*non-correctée est égale à celle de l'œil emmétrope, pour toutes les amétropies, peu importe la stratégie de correction ou l'importance de l'erreur de réfraction:  $ML=MRL$ .*

La Figure 4.17 illustre les effets sur la taille de l'image rétinienne dû à la position de la lentille de correction, située au point focal antérieur d'un amétrope réfractif. Comme démontré, les longueurs focales antérieures pour les amétropies réfractives ne sont pas les mêmes. Le système optique de l'oeil myope (réfractif) est caractérisé par un surplus de puissance réfractive. Dans ce cas, pour une erreur réfractive de 5.00 D au niveau du plan principal, la puissance de réfraction équivalente totale de l'oeil myope est de +65.00 D. La longueur focale antérieure est de 1/65.00 D (considérant que l'oeil est dans l'air) ou de 15.4 mm. Le système optique de l'oeil hypermétrope réfractif ne possède pas assez de puissance pour permettre la mise au point de la lumière parallèle dans l'objet espace sur la rétine. Étant donné que l'oeil hypermétrope a moins de puissance que l'oeil myope ou emmétrope, il aura une longueur focale antérieure plus longue (1/55.0 D; 18.18 mm).

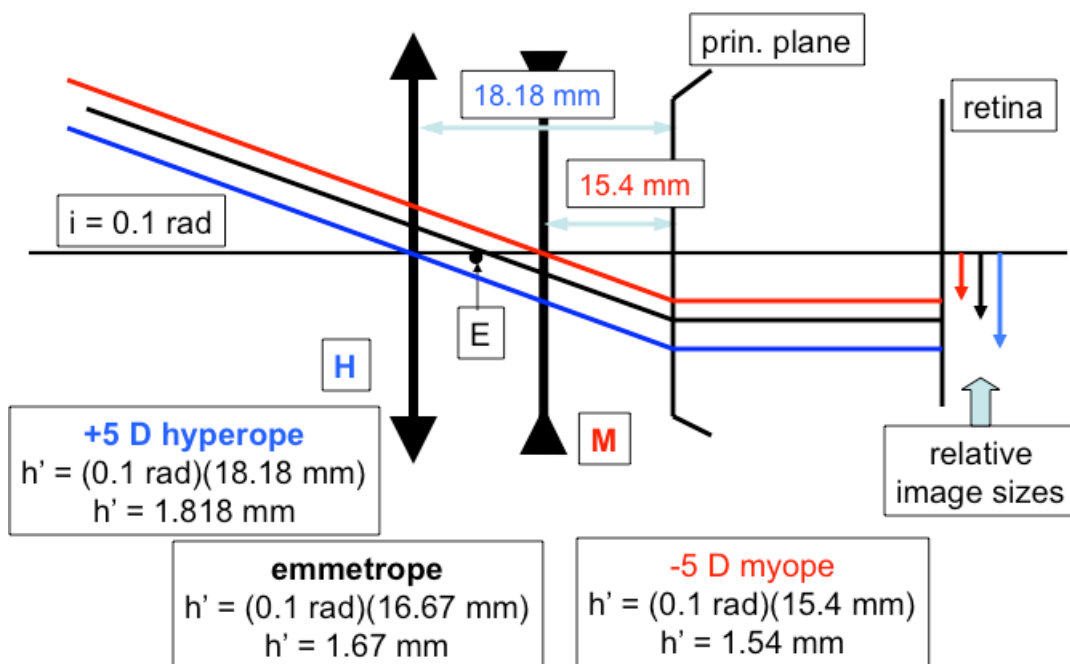


Figure 4.17: Amétropies réfractives au point focal antérieur et leurs tailles d'images relatives

Lorsque ces amétropies sont corrigées avec les lentilles de correction placées aux points focaux antérieurs, la taille des images rétinienne est directement proportionnelle aux longueurs focales respectives. Ce point est illustré en considérant les rayons passant par les points focaux antérieurs de ces yeux. Étant donné que les centres optiques des lentilles de correction coïncident avec les points focaux antérieurs, ces rayons ne seront pas déviés par les lentilles de correction. Lorsque ces rayons atteignent les surfaces de réfraction, ils seront réfractés parallèlement aux axes optiques et leurs intersections avec leurs rétines respectives délimiteront les images rétinienne mises au point. Grâce à la géométrie, on sait que le rayon passant par le point focal antérieur de l'oeil d'un hypermétrope croquera le plan principal de l'oeil sous les croisements des rayons correspondants des emmétropes et des myopes. La taille de l'image peut être calculée en déterminant la distance entre les axes optiques (le rayon provenant de la base de l'objet) et le croisement (à la surface de réfraction de l'oeil) des rayons provenant des extrémités de l'objet.

Pour l'hypermétrope,

$$h' = (0.1 \text{ rad}) \times (18.18 \text{ mm})$$

$$h' = 1.818 \text{ mm}$$

Pour le myope,

$$h' = (0.1 \text{ rad}) \times (15.4 \text{ mm})$$

$$h' = 1.54 \text{ mm}$$



Pour l'**emmétrope**,

$$h' = (0.1 \text{ rad}) \times (16.67 \text{ mm})$$

$$h' = 1.67 \text{ mm}$$

ML et MRL peuvent être déterminées par le calcul des ratios appropriés des images. Donc,

Pour l'**hypermétrope**,

$$ML_{HL} = MRL_H = 1.818 \text{ mm} / 1.67 \text{ mm} = 1.089$$

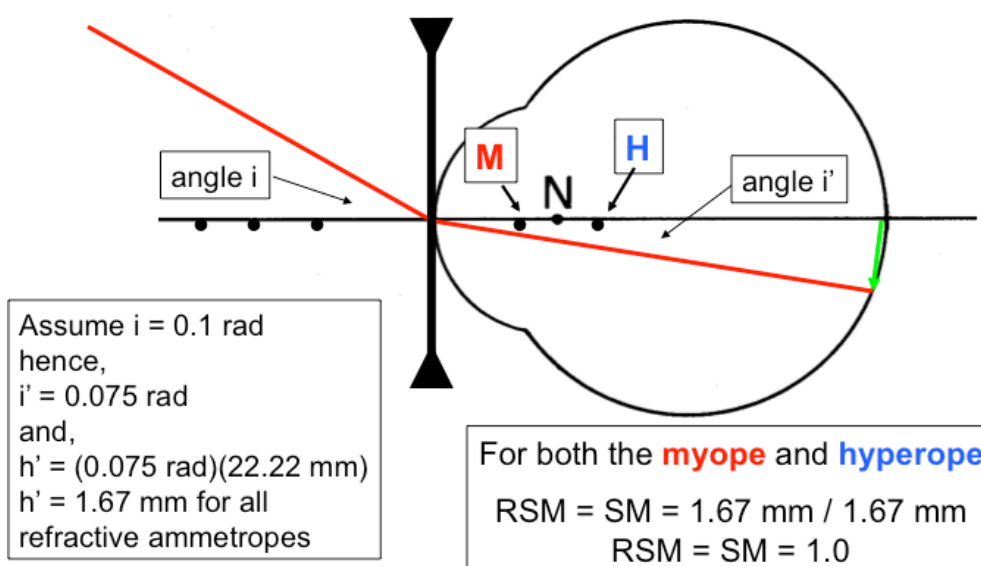
Pour le **myope**,

$$ML_M = MRL_M = 1.54 \text{ mm} / 1.67 \text{ mm} = 0.92$$

Un examen des MRL pour les amétropies réfractives démontre que les hypermétropes corrigés avec les lentilles de correction vont bénéficier de la grande taille de l'image obtenue par cette stratégie de correction.

## AMÉTROPIES RÉFRACTIVES CORRIGÉES AVEC LENTILLES CORNÉENNES

Dans les amétropies réfractives, lorsque la lentille est déplacée en direction du plan principal, la ML et la MRL s'approchent de 1. Comme illustré dans la Figure 4.18, lorsque la lentille de correction est positionnée au plan principal,  $ML = MRL = 1.0$ . Comme discuté précédemment, lorsque le centre optique de la lentille de correction coïncide avec le centre de la pupille d'entrée de l'oeil schématisé (donc le vertex de la surface de réfraction), la lentille de correction n'altère pas la trajectoire du rayon principal. Alors, l'angle que forme l'image rétinienne à la surface de réfraction n'est pas affecté par la présence d'une lentille de correction. La lentille de correction permet d'obtenir une image mise au point. Étant donné que les amétropies réfractives ont toutes les mêmes longueurs axiales qu'un oeil emmétrope, la taille des images mises au point dans l'amétropie réfractive sera égale à la taille de l'image produite dans l'oeil emmétrope standard.



**Figure 4.18:** Pour les amétropies réfractives, lorsque la lentille de correction est positionnée au niveau du plan principal,  $ML = MRL = 1.0$

## COROLLAIRES CLINIQUES DE LA LOI DE KNAPP

1. Si un patient a une anisométrie due à une différence de longueurs axiales entre les deux yeux, (donc une anisométrie axiale), le patient devrait être ajusté en lunettes afin de réduire la quantité d'anisétropie au minimum.
2. Si un patient a une anisométrie, c'est causée par la différence des puissances réfractives des deux yeux (soit une anisométrie réfractive), le patient devrait être ajusté en lentilles cornéennes afin de réduire la quantité d'anisétropie à un minimum.

## RÈGLE D'OR EN CLINIQUE

Si la Loi de Knapp est violée et un individu a une anisométrie axiale qui est corrigée par des lentilles cornéennes, la stratégie de correction est la suivante: une différence d'environ 2% dans la taille des images rétinienne entre l'oeil gauche et l'oeil droit pour chaque 1 D d'anisométrie. Si un anisotrope réfractif est ajusté en lunettes, la procédure de correction est la suivante: une différence interoculaire de 1.5% dans la taille de l'image pour chaque dioptrie d'anisométrie.

**Note:** Il est très important de reconnaître que ces corollaires cliniques sont basés sur l'hypothèse que la taille de l'image perçue est une fonction simple de la taille physique de l'image rétinienne. Par contre, dans les recherches plus récentes, le changement de la densité des récepteurs de la rétine peut compenser les différences dans la taille physique de l'image rétinienne chez les individus qui ont une anisométrie axiale. Il semblerait que lorsque l'oeil grandit, la mosaïque rétinienne des éléments neuronaux élargissent. En conséquence, dans les anisotropies axiales, les différences interoculaires de longueurs axiales pourraient produire des tailles d'images physiques différentes, mais le même nombre (ou proportion) de récepteurs neuronaux pourrait être stimulé dans chaque oeil. Si c'est vrai, alors la meilleure stratégie afin d'éviter l'anisétropie est avec des lentilles cornéennes, peu importe si les différences interoculaires dans l'erreur de réfraction sont de nature axiales ou réfractives.

## TAILLE DE L'IMAGE RÉTINIENNE DANS DIVERSES CONDITIONS

### LA LENTILLE N'EST PAS AU POINT FOCAL ANTÉRIEUR

Dans la section ci-haute, la taille de l'image rétinienne et les valeurs de ML et de MRL ont été calculé pour les positions des lentilles de correction qui n'étaient pas nécessairement pratiques. Par exemple, dans un oeil amétrope normal, il n'est pas possible de placer la lentille de correction au plan principal de l'oeil. Dans le même ordre d'idées, le point focal antérieur est au-delà du vertex typique pour une paire de lunettes. Dans cette section, nous examinerons les procédures afin de calculer la taille de l'image à une distance vertex plus traditionnelle.

### EFFICACITÉ DE LENTILLES DE CORRECTION

Pour une amétropie donnée, (c'est-à-dire pour une réfraction donnée selon le plan principal), l'erreur de réfraction peut être corrigée par une série de différentes lentilles placées à différentes distances vertex. Avec plusieurs patients, on va positionner la face arrière de la lentille de correction à une distance vertex différente de celle où était placé le visiomètre durant l'examen de la vue. On doit donc être en mesure de déterminer la puissance effective appropriée requise afin de corriger l'oeil selon une distance vertex spécifique. Une connaissance de la puissance efficace des lentilles est utile afin de calculer la taille des images rétiniennes lorsque la lentille de correction est positionnée à un endroit non idéal (ex: plan principal, etc.)

**Note.** En conditions cliniques, la **puissance vertex** est utilisée pour exprimer la puissance réfractive d'une lentille donnée (les puissances montrées sur le visiomètre sont les puissances vertex). La distance vertex est spécifiée par rapport au vertex arrière de la lentille de correction. Plus précisément, la distance vertex est définie comme la distance entre le point visuel de la lentille (le croisement de l'axe visuel de l'oeil de la surface arrière de la lentille) et la cornée.

En général, les manuels nous donnent la formule suivante afin de calculer la puissance effective pour des lunettes:

$$F_{\text{eff}} = \frac{K}{1 + D(K)}$$

Où,

$F_{\text{eff}}$  = puissance effective requise  
 $K$  = plan principal de réfraction  
 $d$  = distance vertex voulue (en mètres)

L'équation suivante est utilisée afin de calculer le changement de puissance requise afin de compenser un changement de vertex d'une lentille de correction.

$$F_{\text{nouveau}} = \frac{F_{\text{ancien}}}{1 - (d_1 - d_2)F_{\text{ancien}}}$$

Où,

$F_{\text{nouveau}}$  = la puissance effective requise  
 $F_{\text{ancien}}$  = puissance avec l'ancienne distance vertex  
 $d_1$  = ancienne distance vertex  
 $d_2$  = nouvelle distance vertex

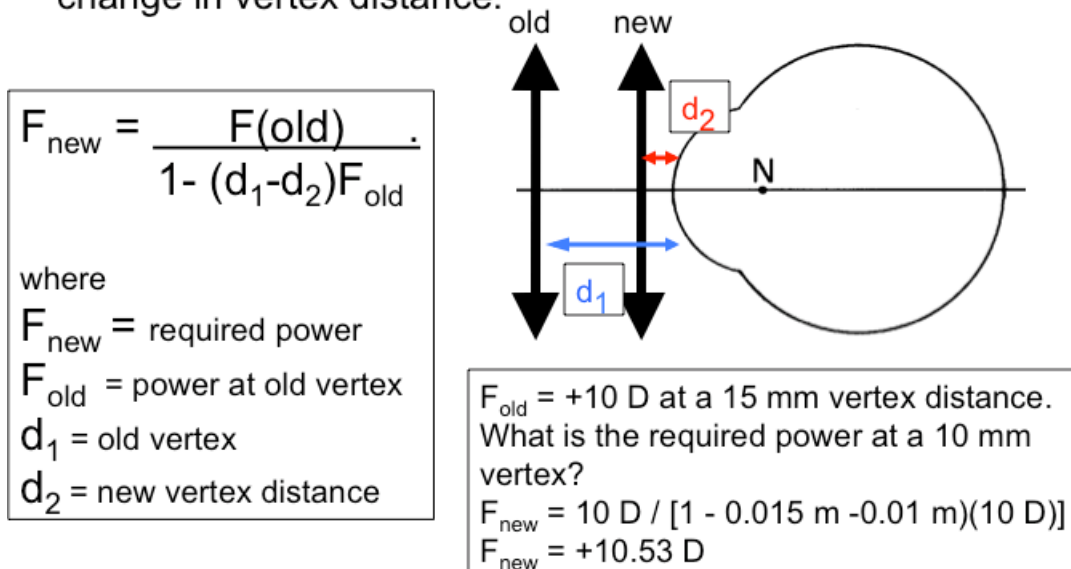
Pour la plupart des amétropies, les effets d'une distance vertex qui change sont relativement petits et pas cliniquement significatifs. Par contre, pour des amétropies plus significatives, (au-delà d'environ 7.00 D), un petit changement de vertex peut quand même produire des changements cliniquement significatifs dans la puissance effective. Par exemple, considérons les changements dans la puissance effective requises afin de corriger l'oeil hypermétrope illustré à la Figure 4.19. Considérons que l'examen a été fait avec le visiomètre ayant une distance vertex de 15 mm et l'erreur de réfraction était de +10.00 D. Pour réduire la magnification, on choisit un vertex lunettes de 10 mm. Quelle puissance de lentilles est requise pour le vertex lunettes de 10 mm?

$$F_{\text{nouveau}} = \frac{+10.00 \text{ D}}{1 - (0.015 \text{ m} - 0.01 \text{ m})10.0 \text{ D}}$$

$$F_{\text{nouveau}} = +10.53 \text{ D}$$

donc quand la lentille de correction est positionnée à un vertex de 10 mm, la puissance doit être augmentée de 0.53 D afin de produire l'effet désiré.

Change in power required to compensate for a change in vertex distance.



**Figure 4.19:** Le changement de puissance requis afin de compenser un changement de distance vertex dans un oeil hypermétrope de +10 D

Cet exemple et les équations ci-dessus indiquent que, lorsque la distance vertex d'une lentille de correction pour un hypermétrope est diminuée, la puissance de la lentille doit être augmentée afin de corriger l'erreur de réfraction du patient. Pour le myope, la puissance de la lentille de correction doit être diminuée si la distance vertex est diminuée.

Souvent,  $d_1$  et  $d_2$  sont inversés dans ces équations et il y a donc un erreur dans le calcul, ce qui nous donne la mauvaise puissance pour la lentille de correction. Ne mémorisez donc pas ces formules, rappelez-vous simplement de l'utilité d'une lentille de correction. Si vous comprenez cette utilité, et la définition du PR, il est facile de déterminer la puissance nécessaire pour une distance vertex donnée.

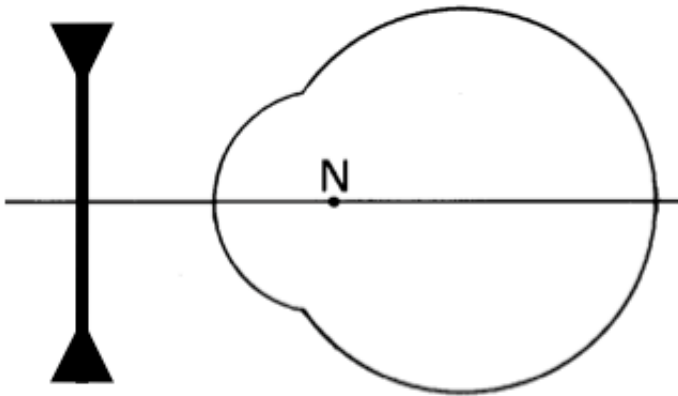
**Point éloigné :** Par définition, le point éloigné de l'oeil est le point de l'espace qui est conjugué avec la rétine quand les yeux sont dans l'état non accommodé.

**Utilité des lentilles de correction:** L'utilité de toute lentille de correction est de permettre la mise au point de la lumière provenant d'un objet à l'infini, au point éloigné de l'oeil (qui formera une image de l'objet éloigné au PR de l'oeil).

Afin de répondre aux prérequis pour une lentille de correction, la longueur focale de la lentille doit être égale à la distance entre le point éloigné de l'oeil et le plan voulu des lunettes. La réciproque de cette distance correspond à la puissance appropriée de la lentille.

## CALCULS DE LA TAILLE DES IMAGES

Considérons que le patient a une myopie axiale de -5.00 D (plan principal de réfraction) qui sera corrigée avec des lunettes situées à 10 mm en avant du plan principal (voir Figure 4.20). Assumons que le patient regarde un objet éloigné qui sous-tend un angle de 0.1 radians à la surface de réfraction de l'oeil non corrigé. Calculons la taille de l'image rétinienne dans l'état corrigé.



**Figure 4.20:** Assumons que le patient a une myopie axiale -5.00 D (plan de réfraction principal) qui sera corrigée avec des lunettes placées 10 mm devant le plan principal.

### APPROCHE GÉOMÉTRIQUE

Avec cette approche, la taille de l'image de l'objet éloigné sera calculée. Cette image sera ensuite traitée comme l'objet qui donnera l'image rétinienne. En calculant la taille de ce nouvel 'objet' (l'image de l'objet éloigné formé au point éloigné par réfraction due à la lentille de correction), l'angle d'incidence du rayon principal (au plan principal de l'oeil suite à la réfraction due à la lentille de correction) peut être calculé. Une version simplifiée de la loi de Snell peut être utilisée afin de calculer l'angle que forme l'image rétinienne à la surface de réfraction de l'oeil. Ensuite, si la distance entre la surface de réfraction et la rétine est connue, l'image rétinienne peut être calculée.

Premièrement, calculez la distance entre la surface de réfraction de l'oeil et la rétine.

$$l' = n'/L'$$

$$l' = 1.3333 / +55.0 \text{ D}$$

$$l' = 24.24 \text{ mm}$$

Deuxièmement, calculez la taille de l'image formée au point éloigné de l'oeil. On sait que l'image sera formée au PR de l'oeil (dans ce cas, 20 cm devant l'oeil myope de 5 D) et que la distance entre la lentille de correction et le point éloigné est de 19 cm (20 cm moins 1 cm de vertex). Afin de déterminer la taille de l'image, considérons que le rayon provenant du haut de l'objet éloigné qui passe par le centre optique de la lentille de correction. Il ne sera pas dévié et formera la partie du haut de l'objet virtuel au PR de l'oeil (on considère que la base de l'objet coïncide avec l'axe optique). On sait que l'image se formera au plan du point éloigné, on doit donc seulement considérer un rayon. L'angle d'incidence du rayon passant par le centre optique est de 0.1 rad et il n'est pas dévié par la réfraction. L'image formée au plan du point éloigné sous-tendra aussi 0.1 rad au centre optique de la lentille de correction, donc la taille de l'image formée au plan du point éloigné peut être facilement calculée.

$$h' = (0.1 \text{ rad}) \times (19.0 \text{ cm})$$

$$h' = 1.9 \text{ cm}$$

L'image du point éloigné agit comme l'objet pour l'oeil. Dans ce cas, l'angle sous-tendu par l'objet virtuel au centre de la pupille d'entrée peut être calculé et la taille résultante de l'image rétinienne est déterminée en utilisant les rayons principaux. L'angle sous-tendu par l'objet virtuel,

$$\text{angle} = 1.9 \text{ cm} / 20 \text{ cm} = 0.095 \text{ rad}$$

la lentille négative réduit l'angle d'incidence des rayons principaux des extrémités de l'objet (entre 0.1 rad et 0.095 rad).

L'angle que forme l'image rétinienne au plan principal de l'oeil peut être déterminé en calculant l'angle de réfraction du rayon principal en utilisant une version simplifiée de la loi de Snell.

$$i' = i/n$$

$$i' = 0.095 \text{ rad} / 1.333$$

$$i' = 0.07125 \text{ rad}$$

La taille de l'image rétinienne peut être calculée en multipliant  $i'$  par la distance entre la surface de réfraction et la rétine.

$$h' = (0.07125 \text{ rad}) \times (24.24 \text{ mm}) = 1.73 \text{ mm}$$

Les effets de la lentille de correction sur la taille de l'image rétinienne peuvent être résumés en calculant la ML et la MRL.

$$ML = \frac{1.73 \text{ mm (taille corrigée de l'image)}}{1.818 \text{ mm (taille non corrigée de l'image)}}$$

$$SM = 0.95$$

la lentille de correction minimise la taille de l'image rétinienne non corrigée.

$$MRL = \frac{1.73 \text{ mm (taille corrigée de l'image)}}{1.67 \text{ mm (taille de l'image emmétrope)}}$$

$$MRL = 1.036$$

malgré que la lentille de correction a causé une réduction de la taille de l'image rétinienne non corrigée, l'image nette résultante était encore plus grande (environ 3.6%) que l'image rétinienne formée dans l'oeil emmétrope standard (voir Figure 4.21).

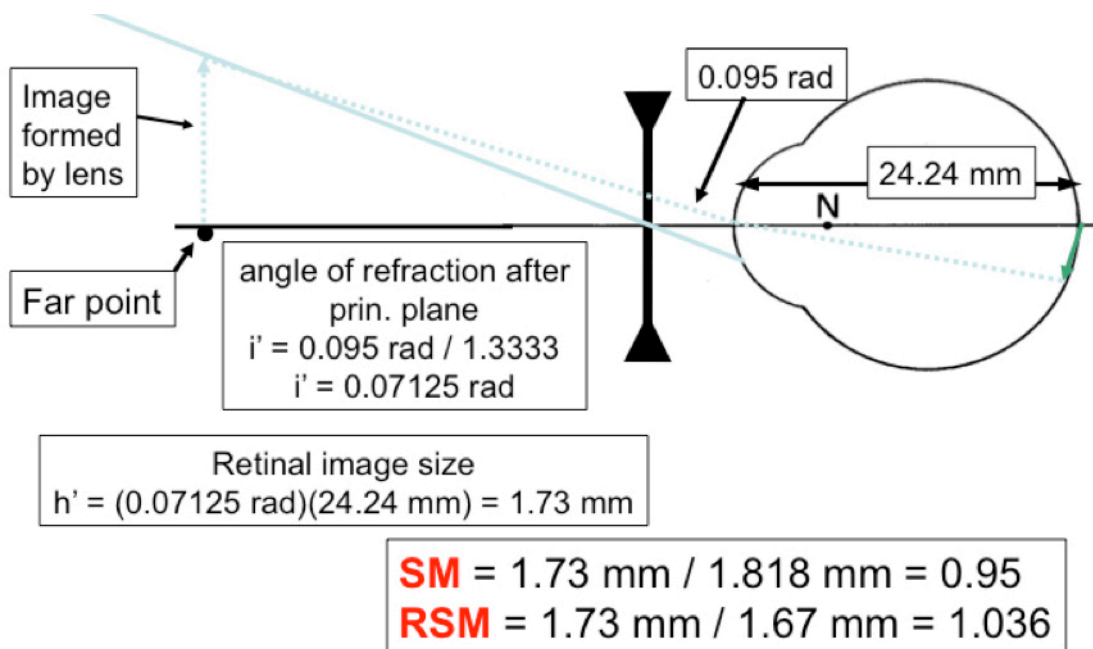


Figure 4.21: L'approche géométrique afin de calculer la taille de l'image rétinienne

#### APPROCHE DE MAGNIFICATION LINÉAIRE

Une fois que vous déterminez la taille de l'image formée par la lentille de correction au plan éloigné de l'oeil, la taille de l'image rétinienne peut être calculée en utilisant des formules standards de magnification linéaire. C'est, par contre, important de réaliser que cette approche peut seulement être utilisée quand l'image rétinienne est mise au point (voir Figure 4.22).

La première étape de cette approche est de calculer la magnitude de la magnification linéaire.

$$M = h' / h = L / L'$$

Donc, la magnification, le ratio de taille entre l'image ( $h'$ ) et l'objet ( $h$ ), est égale au ratio de la vergence de la lumière dans l'espace objet et l'espace image.

Vergence de l'objet ( $L$ )

(Au plan principal de l'oeil)

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

Vergence de l'image ( $L'$ )

$$L' = L + F = -5.0 \text{ D} + 60.0 \text{ D} = +55.0 \text{ D}$$

Magnification ( $M$ )

$$M = -5.00 \text{ D} / +55.0 \text{ D}$$

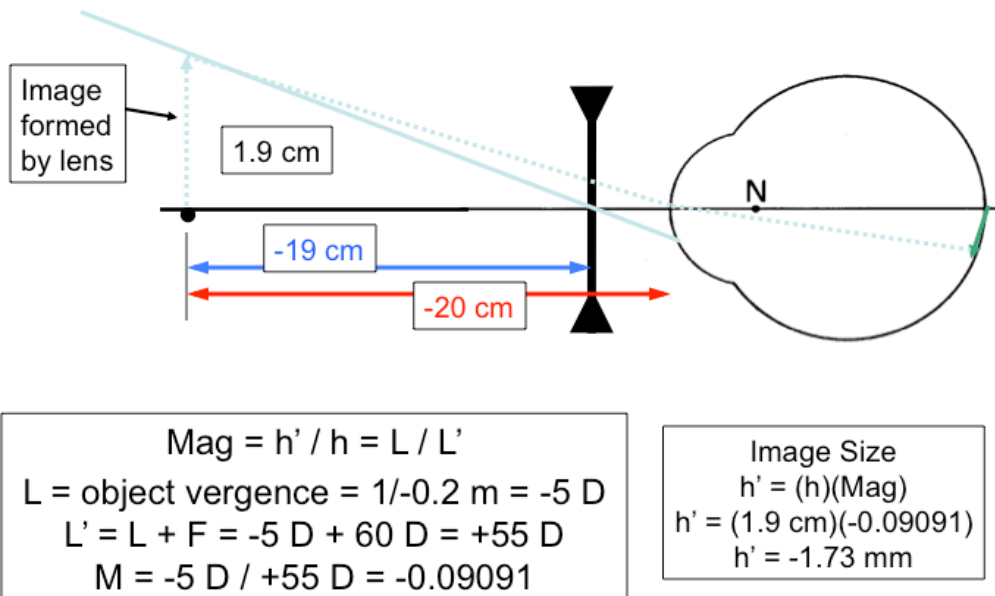
$$M = -0.09091$$



(Rappelons que le signe négatif indique que l'image est inversée)

Taille de l'image rétinienne ( $h'$ )

$$\begin{aligned} h' &= h(M) \\ h' &= 1.9 \text{ cm } (-0.09091) \\ h' &= -1.73 \text{ mm} \end{aligned}$$



**Figure 4.22:** L'approche de magnification linéaire afin de calculer la taille de l'image rétinienne

### APPROCHE DE MAGNIFICATION PAR LES LUNETTES

Une technique évidente afin de déterminer la taille de l'image rétinienne implique le calcul de ML et de la taille de l'image rétinienne non corrigée (voir Figure 4.23). En général, la relation suivante peut être employée afin de déterminer la ML

$$\text{ML} = \frac{\text{distance entre plan des lunettes et PR}}{\text{distance entre plan principal et PR}}$$

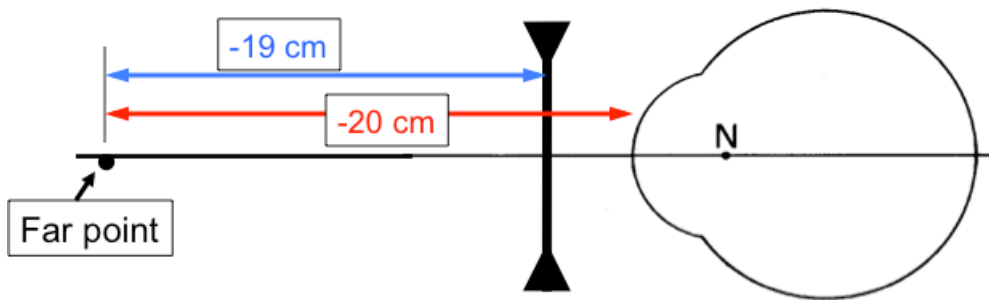
Pour cet exemple,

$$\begin{aligned} \text{SM} &= -19 \text{ cm} / -20 \text{ cm} \\ \text{SM} &= 0.95 \end{aligned}$$

La taille de l'image rétinienne non corrigée (1.818 mm) était calculée ci-haut. La taille corrigée de l'image peut être trouvée en multipliant la taille non corrigée de l'image par le ML.

$$\text{ML} = \frac{h'_c \text{ (image corrigée)}}{h'_{un} \text{ (image non corrigée)}}$$

$$\begin{aligned} h'_c &= \text{SM} (h'_{un}) \\ h'_c &= (0.95) \times (1.818 \text{ mm}) = 1.73 \text{ mm} \end{aligned}$$



$$SM = \frac{\text{distance between Spec. Plane \& Far point}}{\text{distance between Prin. Plane \& Far point}}$$

$$SM = -19 \text{ cm} / -20 \text{ cm} = 0.95$$

$$SM = h'(\text{corrected}) / h'(\text{uncorrected})$$

$$h'(\text{corrected}) = (0.95)(1.818 \text{ mm}) = 1.73 \text{ mm}$$

**Figure 4.23:** L'approche de magnification causée par les lunettes pour calculer la taille de l'image rétinienne

Distance between spec. plane & far point: distance entre le plan des lunettes et le PR

Distance between prin. plane & Far point: distance entre le plan principal et le PR.

#### APPROCHE DE PUISSANCE ÉQUIVALENTE

La taille de l'image rétinienne peut être déterminée en calculant MRL des puissances équivalentes de l'œil emmétrype et des combinaisons lentille-œil amétrope (voir Figure 4.24). Ensuite, l'image rétinienne corrigée peut être déterminée en multipliant la taille de l'image d'un œil emmétrype par la MRL. La relation suivante peut être utilisée pour déterminer la MRL:

$$MRL = \frac{F_{emm} \text{ (puissance de l'œil emmétrype)}}{F_e + F_l - dF_eF_l \text{ (puissance de l'œil+lentille)}}$$

**Note.** Pour utiliser cette relation, tu dois connaître la puissance effective de la lentille de correction -- pas seulement la réfraction oculaire.

Puissance effective de la lentille de correction (distance vertex de 1 cm),

$$F_l = 1 / -0.19\text{m}$$

$$F_l = -5.26\text{D}$$

(Rappelons que la longueur focale de la lentille de correction doit être égale à la distance entre le plan des lunettes et le PR de l'œil)

Par définition, la puissance de réfraction d'une amétropie axiale est de:

$$F_e = +60.00 \text{ D}$$

Magnification Relative Linéaire:

$$MRL = \frac{+60.0 \text{ D}}{60.0 \text{ D} - 5.26 \text{ D} - 0.01(60.0 \text{ D})(-5.26 \text{ D})}$$

$$MRL = \frac{+60.0 \text{ D}}{+57.898 \text{ D}}$$

Taille de l'Image Rétinienne,

$h'_{\text{œil corrigé}} = \text{RSM} (h'_{\text{œil emmétrépe}})$

$$h'_c = (1.036) \times (1.67 \text{ mm})$$

$$h'_c = 1.73 \text{ mm}$$

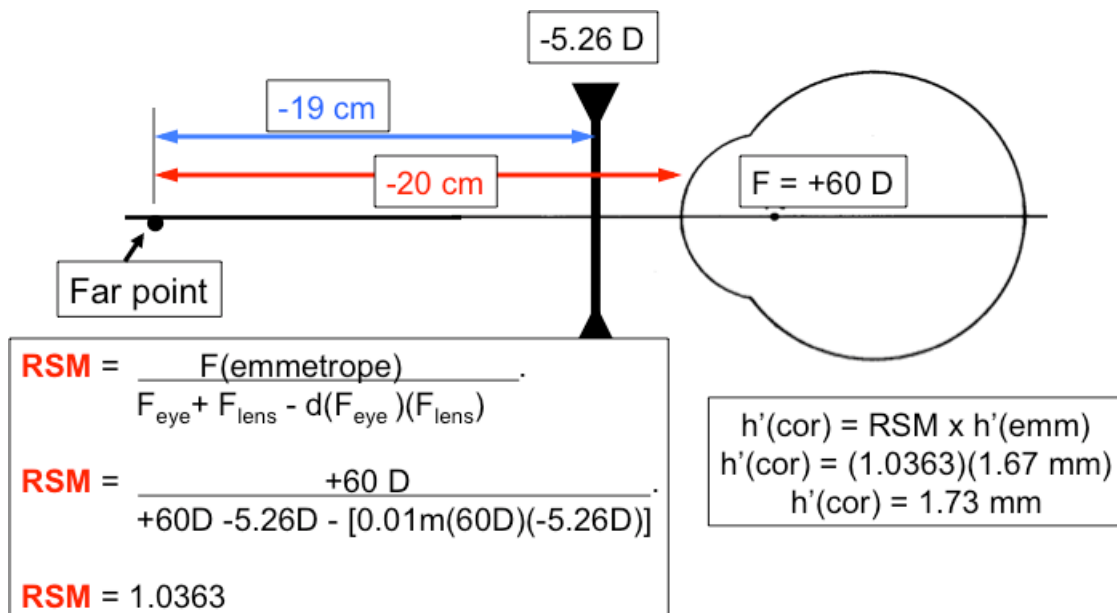


Figure 4.24: Calcul de la taille de l'image rétinienne en utilisant l'approche de la puissance équivalente.