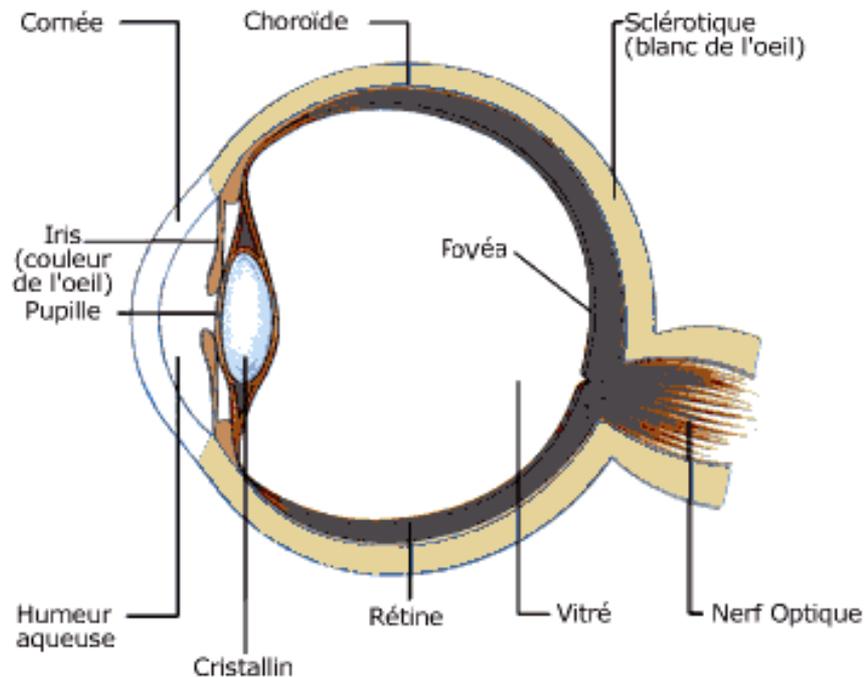


L'œil

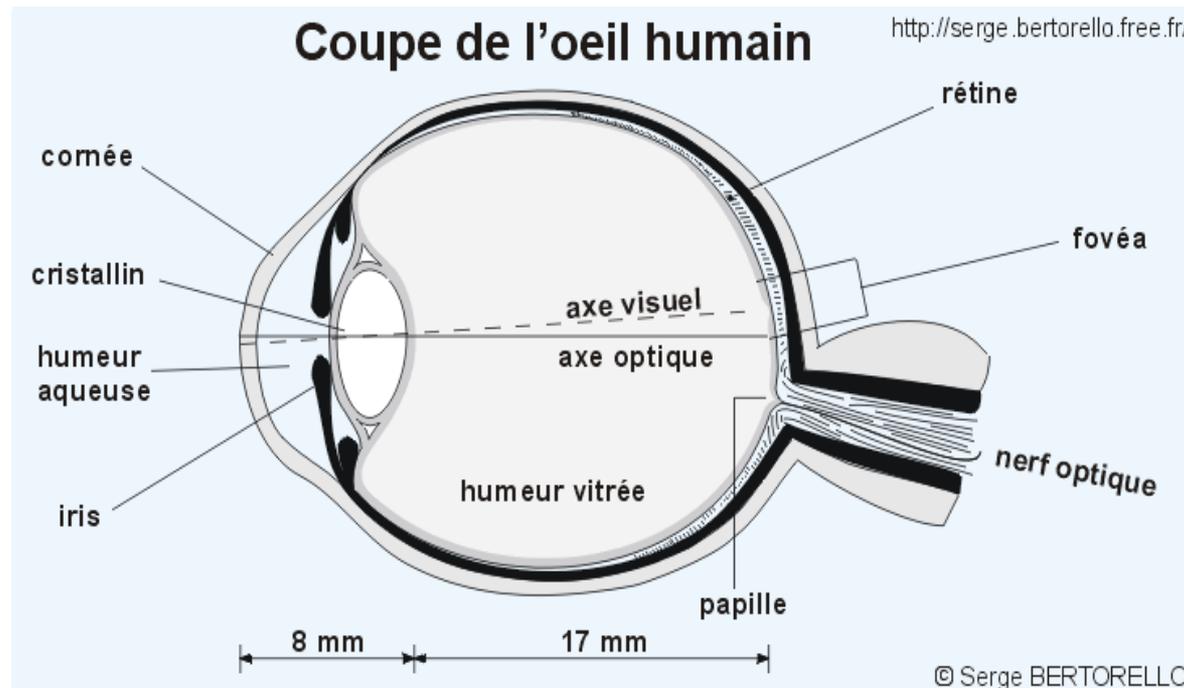
# L'œil

- La plupart des instruments d'optique ayant pour but d'aller au-delà des possibilités de l'œil humain, il est essentiel de comprendre avant tout ses caractéristiques, limites et ses défauts.
- La fonction de l'œil est de recevoir et de transformer une partie de l'énergie de la lumière formant une image du monde extérieur en influx nerveux qui sont transmis au cerveau. L'œil fonctionne comme un appareil photographique.
- Le globe oculaire ressemble à une petite boule d'un diamètre de 2,5 cm, d'une masse d'environ 7 grammes et d'un volume de 6,5 cm<sup>3</sup>.



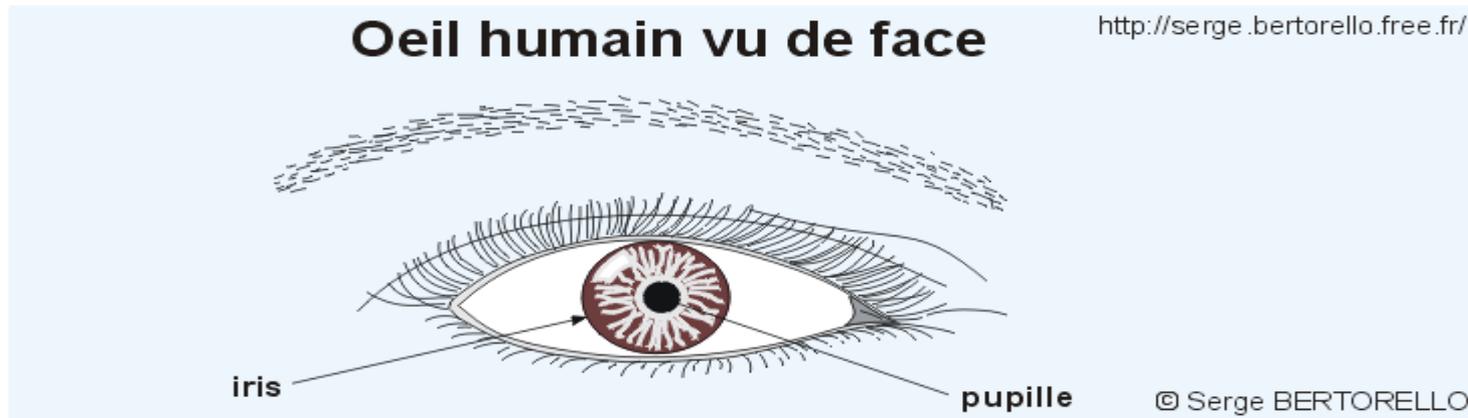
# Structure de l'œil

- Le cristallin constitue avec la cornée et l'humeur aqueuse un objectif qui projette sur la rétine une image renversée des objets situés devant l'œil.
- La rétine tapisse le fond de l'œil. Elle est le capteur des informations visuelles qu'elle convertit en message nerveux destiné au cerveau.
- La surface utile de cet objectif est la pupille dont le diamètre varie en fonction de la luminosité ambiante. En effet, l'iris animé par un mouvement réflexe dilate ou rétracte son orifice central pour réguler le flux lumineux entrant dans l'œil.

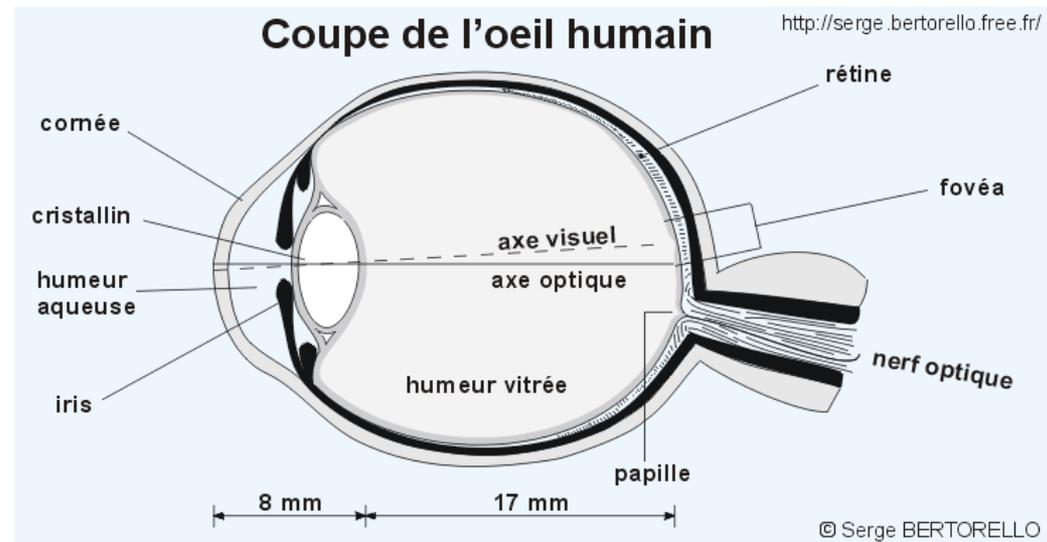


# Pupille

- La surface utile de l'*objectif* de l'œil est la pupille dont le diamètre varie en fonction de la luminosité ambiante.
- En effet, l'iris animé par un mouvement réflexe dilate ou rétracte son orifice central pour réguler le flux lumineux entrant dans l'œil.



# Le cristallin



- Le cristallin est plus qu'une simple lentille. En effet il se déforme pour adapter sa puissance dioptrique à la distance de l'objet. Il fournit ainsi une image nette. C'est l'accommodation de l'œil.
- Notre cerveau analyse les images fournies par l'œil et dirige en permanence l'accommodation du cristallin. Ce processus est inconscient.
- Un œil normal est dit emmétrope. Sans accommodation (au repos), il perçoit une image nette d'un point éloigné à l'infini.
- Le point, le plus éloigné pour une vision nette, est appelé ***punctum remotum***.
- Le point le plus proche qui puisse être vu nettement est le ***punctum proximum***. Pour un jeune adulte, il est habituellement à une vingtaine de centimètres de l'œil.

- En observant à travers l'oculaire d'un instrument d'optique, l'œil accommode à une courte distance d'environ 30 à 50 centimètres, il n'est pas au repos. Cette distance accommodation est variable selon les individus. Il est donc normal que deux personnes qui ont une bonne vue fassent un réglage de mise au point différent.
- Le cristallin est un organe fragile. Un accident, une maladie ou la vieillesse peut entraîner la perte de sa transparence, c'est la cataracte. Dans ce cas, il faut ôter chirurgicalement le cristallin et le remplacer par une lentille. L'œil peut voir de nouveau mais sans accommodation.

# L'accommodation de l'œil

- Sans accommodation (au repos), un œil normal perçoit une image nette d'un point éloigné à l'infini. Avec l'accommodation l'œil peut percevoir une image nette aussi d'objets beaucoup plus proches.
- La distance  $\Delta$  la plus éloigné pour une vision nette, est appelé **punctum remotum**.
- La distance  $\delta$  la plus proche qui puisse être vu nettement est le **punctum proximum**. Pour un jeune adulte, il est habituellement à une vingtaine de centimètres de l'œil.
- La différence  $\Delta - \delta$  est le **parcours de vision nette**.

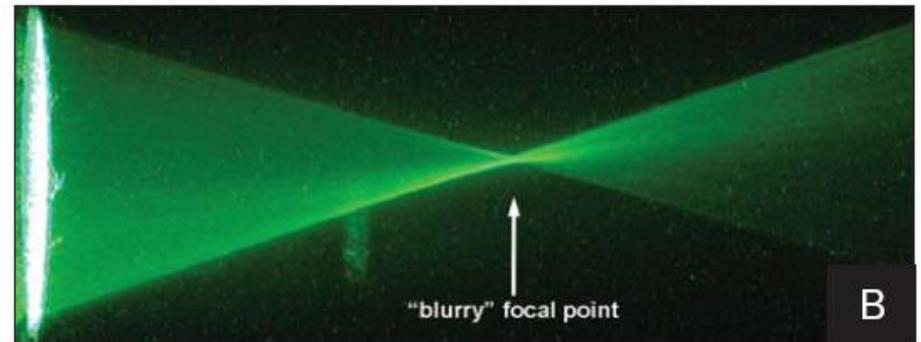
Amplitude dioptrique d'accommodation :	$\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\Delta}$	[m <sup>-1</sup> ] ou [dioptrie]	
--	---------------------------------------	----------------------------------	--

La distance  $\delta$  de référence est par convention prise = 25 cm.

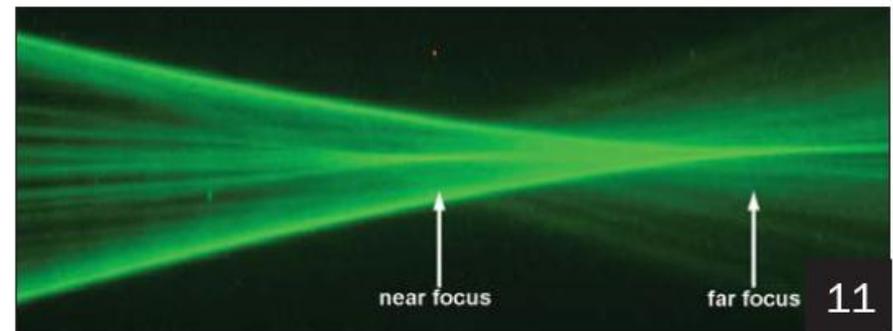
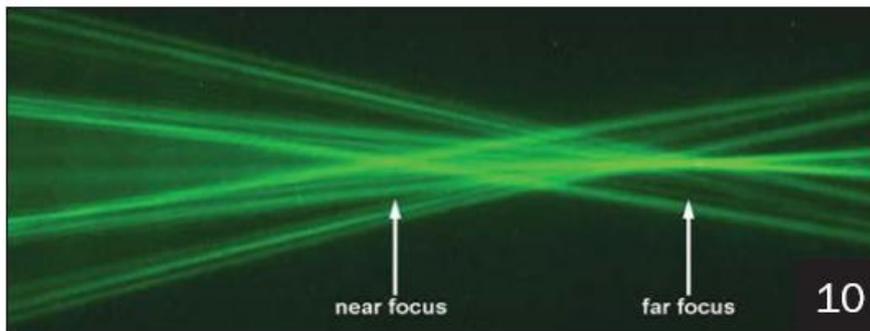
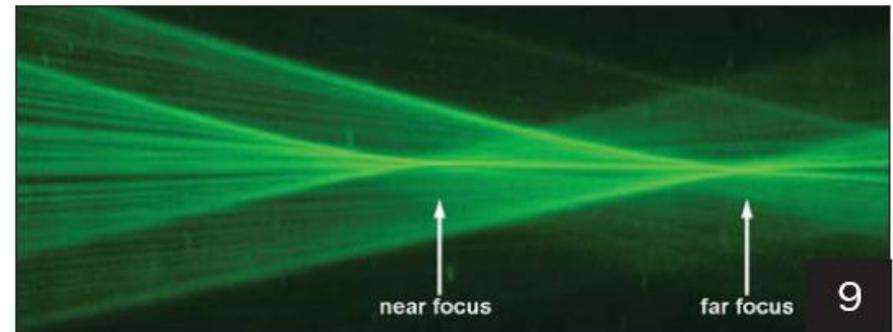
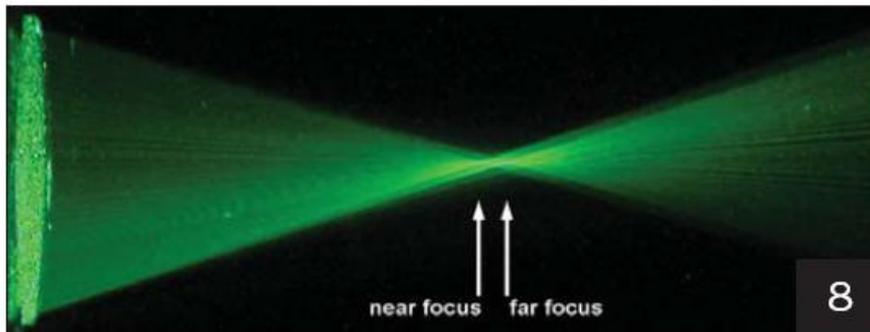
En effet un œil normal voit nettement de 25 cm à l'infini, ce qui correspond à une amplitude de 4 dioptries.

Chez les enfants le PP est situé à une distance plus proche, de l'ordre de 10 cm.

## Lentilles intra-oculaires monofocales



## Lentilles intra-oculaires multifocales



**Figure 8.** Visualization of the light path behind the Tecnis ZM900 lens in the ACE Model. **Figure 9.** Visualization of the light path of the Tecnis ZM900 lens in the ACE Model eye with a 5-mm pupil. **Figure 10.** Visualization of the light path of the ReZoom NXG1 lens in the ACE Model eye with a 5-mm pupil. **Figure 11.** Visualization of the light path of the AcrySof ReSTOR SA60D3 lens in the ACE Model eye with a 5-mm pupil.

# Modèles optique de l'œil

Tous les milieux transparents de l'œil forment une succession de dioptries, donnant sur la rétine une image réelle et inversée des objets.

Abordons quelques données optiques (moyennes) de l'œil :

<b>Structures</b>	<b>Rayon de courbure antérieur</b>	<b>Rayon de courbure postérieur</b>	<b>Indice de réfraction</b>
cornée	7,8 mm	6,8 mm	1,377
humeur aqueuse	-	-	1,336
cristallin	10 mm	6 mm	1,413
humeur vitrée	-	-	1,336

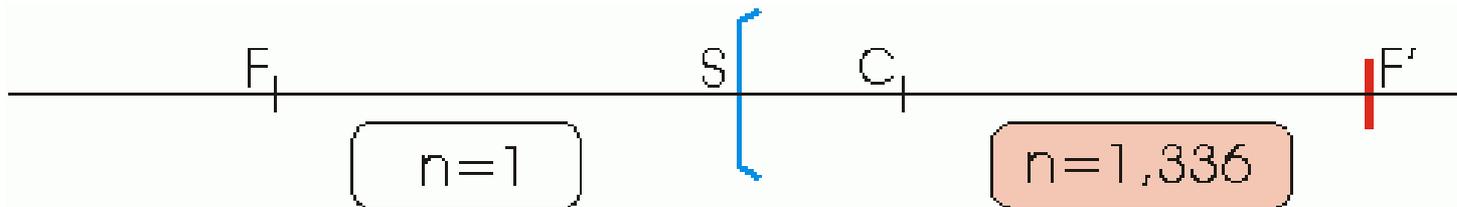
Il existe plusieurs simplifications de ce système optique définissant ce qu'on appelle **l'œil réduit**.

# Principaux paramètres optiques

- Les rayons contribuant à la formation de l'image sur la fovéa ou la tache jaune sont paraxiaux et l'oeil est un système centré qui fonctionne donc dans les conditions de l'approximation de Gauss.
- Les milieux extrêmes, l'air et l'humeur vitrée, étant différents les **points nodaux** et les **points principaux** sont distincts et le rapport des distances focales  $f_i / f_o$  est égal à **1,336**.
- La cornée avec un rayon de courbure de 8 mm se comporte comme une paroi transparente et la convergence du dioptré sphérique d'entrée est d'environ  $0,336/0,008$ , soit **42 dioptries**.
- Le cristallin a la convergence d'une lentille épaisse d'indice relatif  $(1,42/1,336) / 1,336 = 1,063$ .  
Avec les rayons de courbure indiqués, ceci conduit à une convergence d'environ **16,8 dioptries**.
- La convergence de l'ensemble étant alors très voisine de **60 dioptries**.

# L'œil comme un dioptre sphérique

- Pour un œil " moyen " normal la distance focale image  $f_i$  est voisine de 24 mm tandis que la distance focale objet  $f_o$  est voisine de 18 mm.
- Quand un œil normal observe un objet éloigné (on dit " à l'infini " par commodité pour les calculs correspondants) le foyer image  $F'$  est sur la rétine et le foyer objet  $F$  environ 15 mm en avant de la cornée.
- Avec une bonne approximation, l'œil est équivalent à un **dioptré sphérique** de sommet  $S$  et de centre  $C$  tel que  $r = \mathbf{SC} = \mathbf{6\ mm}$  séparant l'air et le milieu d'indice 1,336.



$$f_o \approx 0.006 / 0.336 \approx 0.018 \text{ m}$$

$$f_i \approx 0.006 \cdot 1,336 / 0.336 \approx 0.024 \text{ m}$$

(valeurs typiques)

Rappelons l'équation du dioptre sphérique

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r}$$

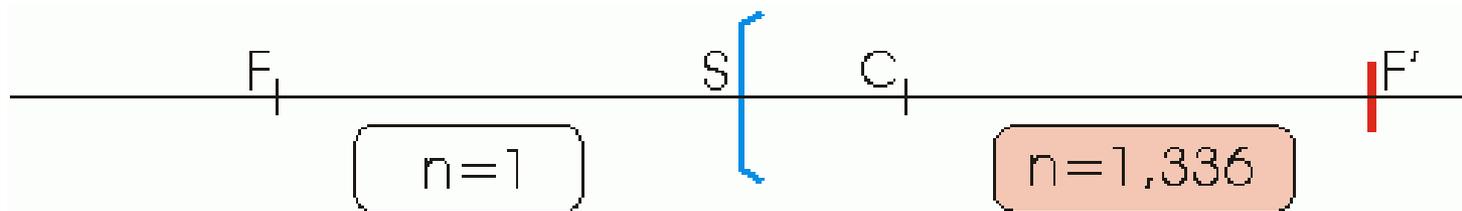
Cette expression permet de définir deux distances focales distinctes:

distance focale image:

$$f_i = \frac{r n}{n-1} = \frac{0,006 \cdot 1,336}{0,336} = 0,024 \text{ m}$$

distance focale objet:

$$f_o = \frac{r}{n-1} = \frac{0,006}{0,336} = 0,018 \text{ m}$$



# Exercice

Un œil normal s'accommode bien pour voir des objets entre l'infini et 25 cm.

Considérons l'œil comme un dioptre sphérique avec  $n = 1,336$ .

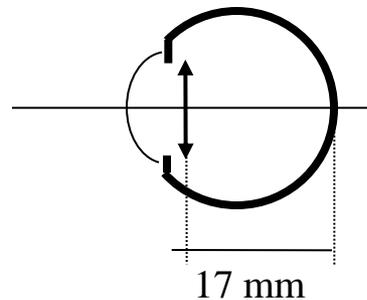
En supposant que sa rétine soit à 24 mm,

1. quel est la variation de distances focale image qui est nécessaire au dioptre pour avoir une image correcte pour les cas extrêmes. (**rep.** 24 mm, 21.9 mm)
2. Quelle serait la variation correspondante du rayon du dioptre théorique dans ce modèle ?



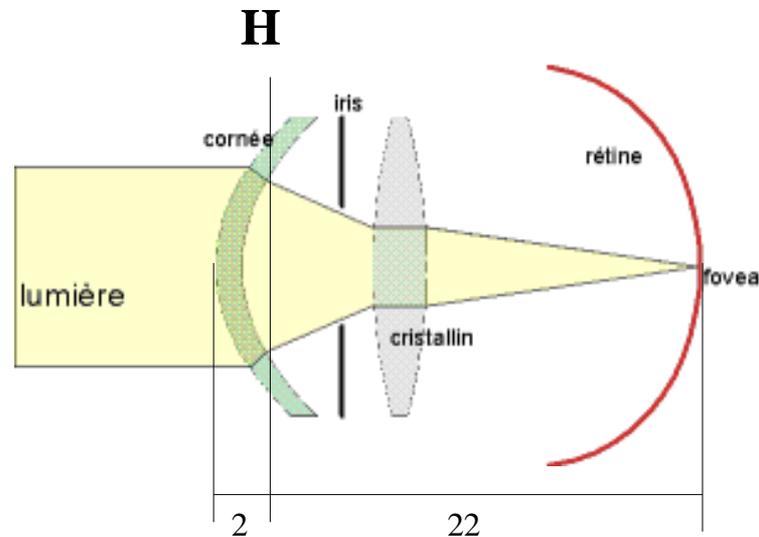
# L'œil comme une lentille

- Un autre modèle très simple de l'œil est composé d'une seule lentille mince de 23~24 mm de focale nominale. Dans ce modèle, toute la convergence est assurée par cette lentille placée dans un milieu d'indice 1. La focale varie évidemment avec l'accommodation.
- Dans une variante descriptive du modèle, on a une lentille mince située à 17 mm de la rétine.
  - On tient compte ici de l'indice de réfraction de l'humeur vitrée (~1,34)
  - Ainsi l'image d'un objet situé à une distance  $\infty$  de l'œil se forme à une distance  $p' = 17$  mm.



Œil réduit composé d'une seule lentille

# L'œil comme un système de deux lentilles

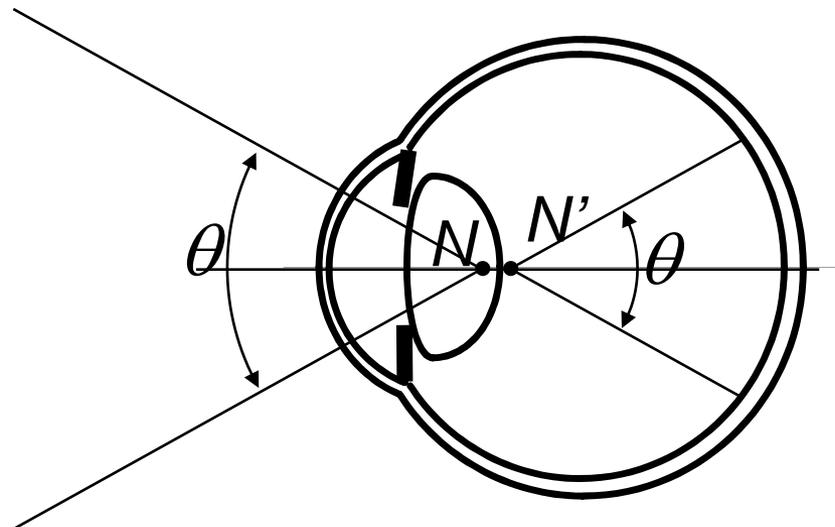


Ceci donne un **système centré** avec les valeurs typiques suivantes:

- distance focale image : 22 mm
- distance focale objet : 17 mm
- **plans principaux** objet et image confondus et se trouvant 2 mm derrière la face antérieure de cornée.
- Puissance:  $D = +60$  [dioptries]
- indice de réfraction :  $n = 1,337$
- amplitude dioptrique = 4 ~ 6

# Champ de l'œil (angle de vision)

- Le champ de vision nette est défini par le cône de sommet C dont la génératrice s'appuie sur la fovéa.
- Son ouverture  $\theta$  est d'environ  $3.5^\circ$ .
- Par déplacement du globe oculaire de  $30$  à  $40^\circ$  autour de l'axe optique on obtient le champ de vision directe.



# Pouvoir séparateur de l'œil

- Pouvoir séparateur de l'œil :  $3/10\ 000$  radians (dans de bonnes conditions)
- Le pouvoir séparateur dépend de l'éclairage et de la fatigue.

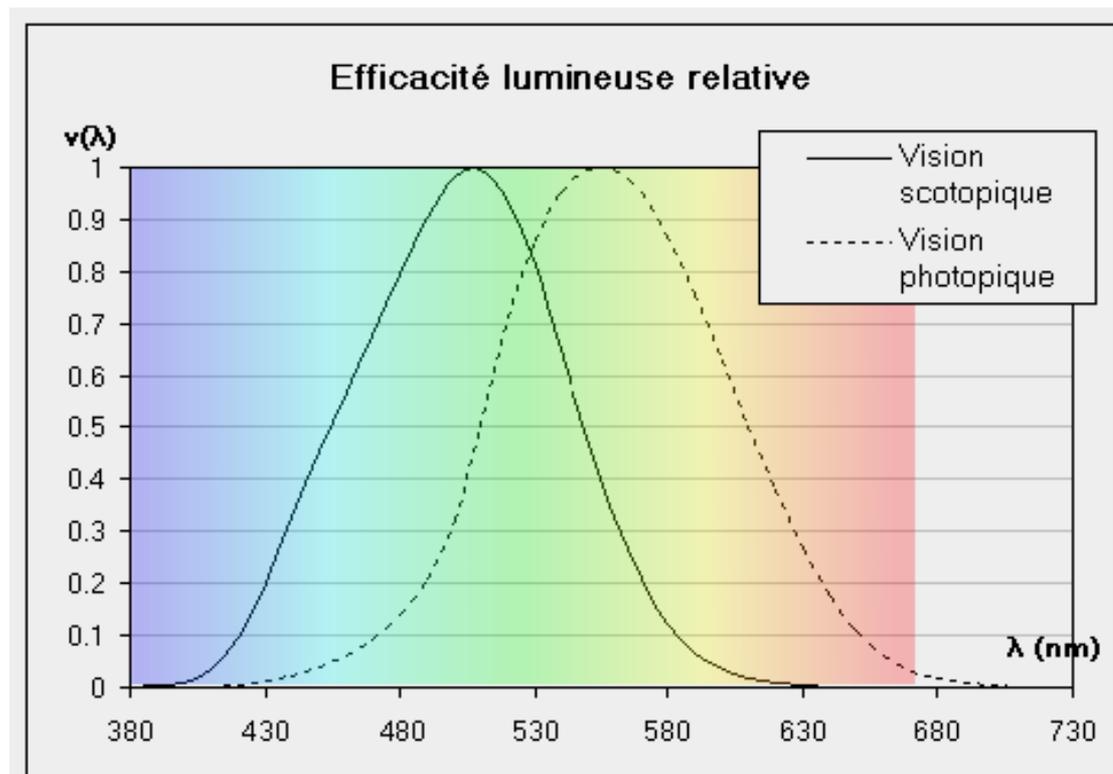
# Exercice

L'**iPhone-4** vante un *retina display* de 326 px/in.

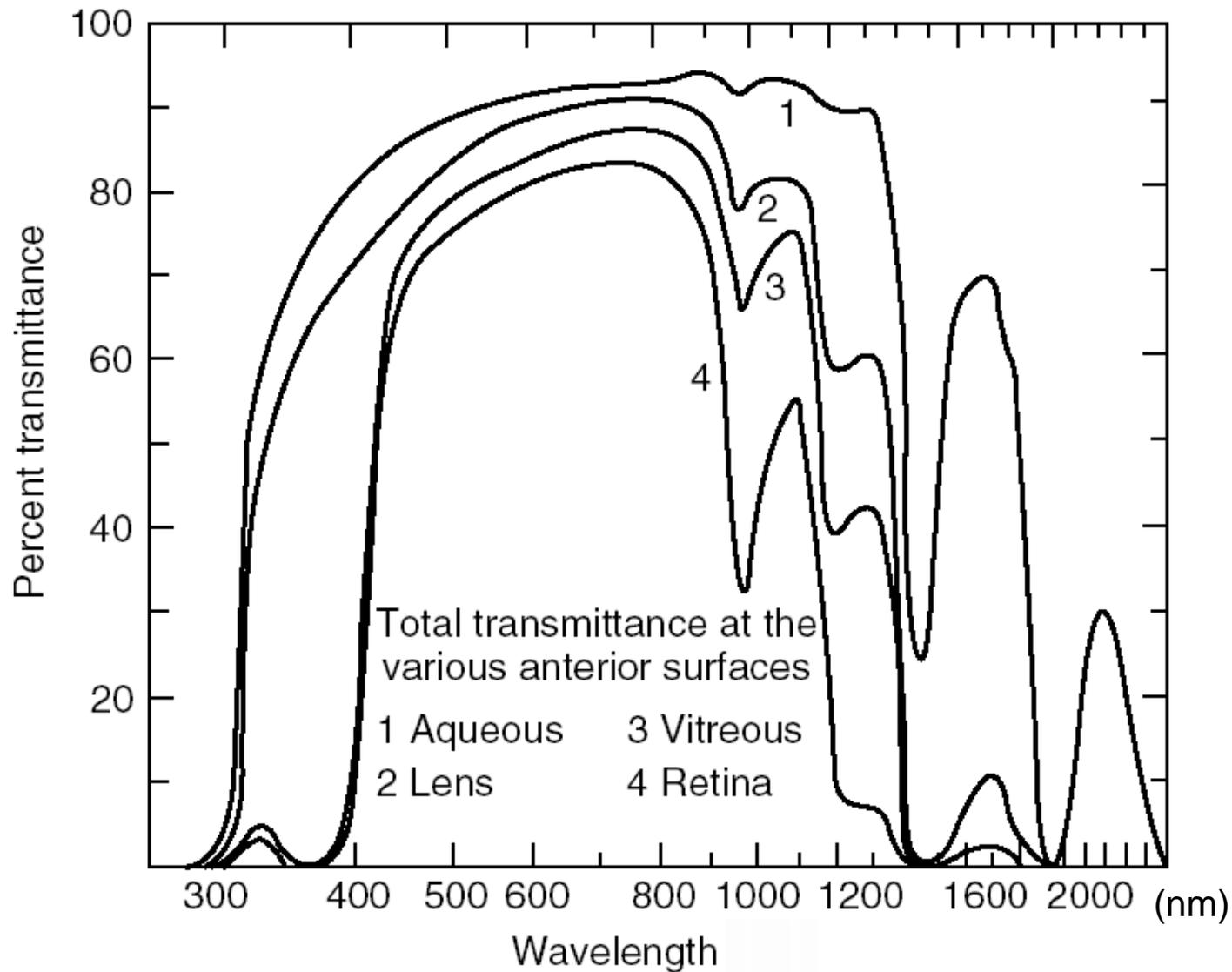
- Quelle est la taille du pixel ?
- L'écran est-il vraiment à la limite de résolution de la rétine humaine ?

# Sensibilité de l'œil

- La sensibilité de l'œil en vision **photopique** (vision de jour) n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde. Le maximum de sensibilité de l'œil est obtenu pour une longueur d'onde de 555 nanomètres.



# Transmission spectrale





# Les défauts dioptriques de l'œil

- **L'œil myope :**
- On dit que l'œil est myope lorsqu'il ne peut pas voir avec netteté un point à l'infini même en accommodant.
- On peut considérer que l'œil est trop grand pour son optique, car dans ce cas l'image est formée en avant de la rétine.



- **L'œil hypermétrope :**

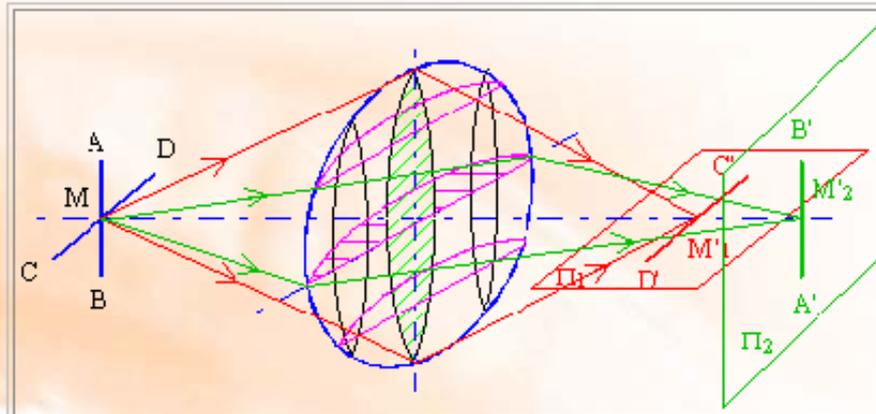
- Dans ce cas l'œil est trop petit pour son optique. Si l'affection est légère, il pourra voir nettement un objet éloigné en accommodant. Les difficultés augmentent en rapprochant l'objet.
- L'image d'un objet éloigné est formée en arrière de la rétine
- On compense ce défaut avec une lentille convergente



# Les défauts dioptriques de l'œil

## ■ L'astigmatisme

Il arrive parfois que la cornée soit ellipsoïdale au lieu d'être sphérique: ainsi les surfaces limitant les différents milieux de l'œil ne sont pas de révolution autour de son axe optique tout en possédant cependant deux plans de symétrie à  $90^\circ$  passant par cet axe. On dit alors que l'œil est astigmatique.



Un œil astigmatique fournit d'un point objet axial ou quasi axial, non pas une image ponctuelle, mais deux focales rectangulaires contenues dans des plans de symétrie.

Il se comporte alors comme une lentille sphéro-cylindrique: une face sphérique de rayon  $R$  et une face cylindrique de rayon  $R'$ .

La lentille sphéro-cylindrique transforme un pinceau axial issu de  $M$  en un pinceau dont les rayons s'appuient sur deux focales rectangulaires situées dans les plans de symétrie  $\Pi_1$  et  $\Pi_2$ .

La lentille a donc deux convergences principales et donc deux foyers objets principaux et deux foyers images principaux.

Pour corriger l'œil astigmatique il suffira de lui associer un verre sphéro-cylindrique astigmatique qui présente les défauts inverses de ceux de l'œil, les sections principales étant interverties. On peut également corriger cet astigmatisme à l'aide de lentilles sphéro-toriques ou de verres de contact dans des cas plus graves.

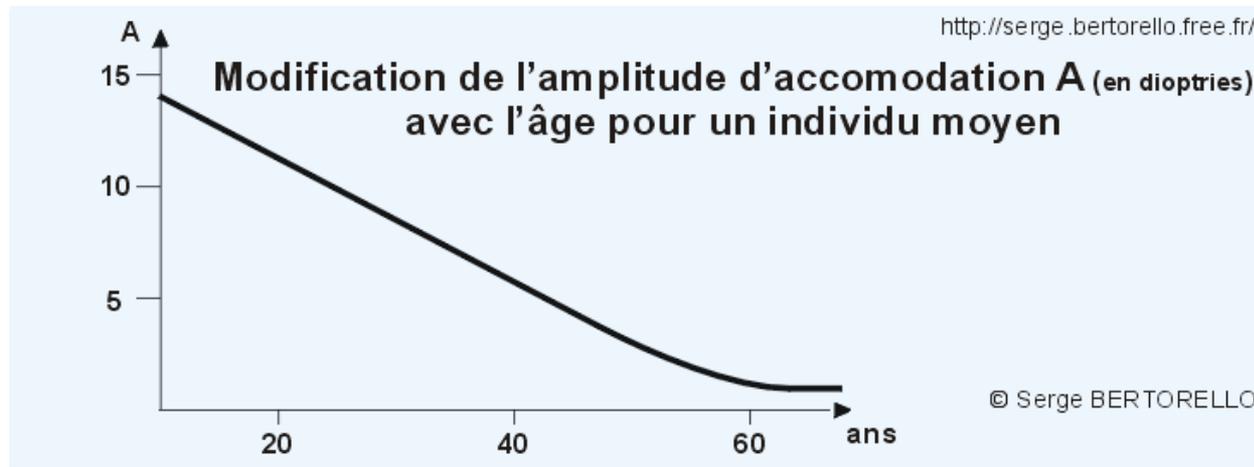
## Correction de l'astigmatisme:

- Lorsque l'œil est astigmatique, il n'est **pas possible** d'améliorer la netteté avec des lentilles convergentes ou divergentes. La puissance dioptrique (donc la focale) de l'œil n'est pas la même pour toutes les parties de la pupille. Ainsi, par exemple, une "tranche" verticale de l'œil fournit une image en arrière de la rétine alors qu'une "tranche" horizontale la fournit en avant.
- Pour compenser l'astigmatisme on utilise des lentilles "déformées" dont la distance focale varie selon l'angle du diamètre concerné. Dans le cas le plus simple, et le plus fréquent, l'astigmatisme est dit "régulier". Il possède alors deux focales perpendiculaires.
- On le corrige à l'aide de **verres cylindriques** ou **toriques**.
- Mais rappelons aussi que cette affection existe souvent (mais pas toujours) **couplée à une myopie** ou une hypermétropie.

# Les défauts dioptriques de l'œil

## La presbytie

- Avec le vieillissement la faculté d'accommodation diminue progressivement, c'est la presbytie.
- Elle concerne tous les humains emmétropes ou amétropes, elle n'est donc pas anormale.
- Pour un emmétrope presbyte la vision de près peut être corrigée par le port d'un verre convergent.
- Cette correction est semblable à celle d'un hypermétrope pour la vision lointaine. Ceci provoque souvent une confusion entre presbytie et hypermétropie.



# Correction des défauts de la vue

Rappel

## ***Punctum proximum*** et ***punctum remotum***

- On appelle ***punctum proximum*** d'un œil, le point le plus proche que l'on peut observer distinctement. Il s'éloigne avec l'âge (presbytie). Pour un confort normal il devrait être  $\leq 25$  cm .
- On appelle ***punctum remotum*** d'un œil, le point le plus éloigné que l'on peut observer distinctement.  
Pour un œil normal il est situé à l'infini (ce qui pratiquement est à plus de 5 m).

# Correction des défauts de la vue

## Myopie

- Supposons un œil myope ayant un **punctum remotum** de 0.5 m.
- Il nous faut donc une lentille divergente qui forme d'un objet à l'infini une image (virtuelle) à 0.5 m, que notre œil pourra bien voir.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-0.5} = -2 \text{ D}$$

# Hypermétropie

- Supposons un œil hypermétrope myope ayant un **punctum proximum** de 1,25 m.
- Il nous faut donc une lentille convergente qui forme d'un objet à 25 cm (0,25 m) une image (virtuelle) à 1,25 m, que notre œil pourra bien voir.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{0,25} + \frac{1}{-1.25} = 3,2 \text{ D}$$

# Applet - l'oeil et ses défauts

<http://hypo.ge.ch/www/physic/simulations/optique/oeil.html>

<http://www.ub.edu/javaoptics/index-en.html>

(télécharger l'applet *eyemodel*)

# Exercices

- Une personne presbyte avec un PP de 2 m utilise des lunettes de pour voir de près (à 25 cm).  
Quelle est la vergence de ses lunettes ?
- Une personne myope utilise des lunettes de -2 dioptries pour voir de loin. Sans lunettes, quel est son PR ?
- Une personne myope arrive au mieux à focaliser un objet à 20 cm.  
De combien son œil est-il trop « grand » (ou sa distance focale image trop courte) ?
- Un enfant voit net de 8 cm à l'infini.  
Quelle est son amplitude dioptrique ?
- Vous êtes 3 m devant une TV. Quelle est la taille du plus petit pixel que l'œil pourrait résoudre ?

# Travail personnel

Etudier le chapitre du polycopié:

- « L'oeil »