COMPENSATION D'UN ŒIL
EN LENTILLES DE CONTACT ŒIL
(ÉVENTUELLEMENT ASTIGMATE)

1) RAPPEL SUR LES NOTIONS D'ASTIGMATISMES « CORNÉEN », INTERNE ET TOTAL

L'astigmatisme « **total** » d'un œil est celui que nous avons considéré jusqu'à présent c'est-à-dire celui du système optique global de l'œil (cornée et cristallin). En contactologie, nous sommes amenés à *décomposer cet astigmatisme* en deux entités.

A) L'ASTIGMATISME « CORNÉEN » OU « OBJECTIF »

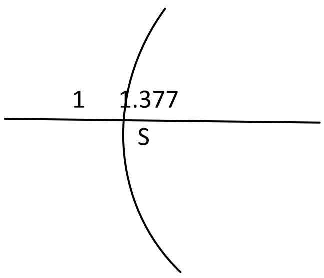
Il se mesure objectivement à l'aide d'un kératomètre ou ophtalmomètre.

Remarque :

Le dioptre antérieur de la cornée est protégé et nourri par des larmes formant un ménisque de *vergence nulle* dans tous les méridiens.

D'un point de vu optique, il n'interviendra pas dans nos considérations tant qu'un système de contact ne sera pas mis en place.

L'astigmatisme **objectif** est celui du dioptre air/ 1.377 antérieur de la cornée de sommet S.



Vocabulaire :

S est appelé **l'apex** de ce dioptre.
K désignera la valeur du rayon de courbure de ce dioptre dans le méridien principal correspondant à la section la plus **plane**.
K' désignera la valeur du rayon de courbure de ce dioptre dans le méridien principal correspondant à la section la plus **courbe**.

Exemples concrets :

- Dioptre cornéen dont les méridiens principaux sont notés 10° et 100°

avec $r_{c10°}$ = K = 8.15mm et $r_{c100°}$ = K' = 8.00mm

- $D_{c10°} = \frac{n'-n}{SC} = \frac{1377-1000}{8.15} = 46.26\delta$
- $D_{c100°} = \frac{n'-n}{SC} = \frac{1377-1000}{8.00} = 47.13\delta$

$D_{c100°} > D_{c100°}$

La formule donnant les vergences méridiennes principales de ce dioptre est aussi **D_c = 46.26 (+0.87) $_{10°}$**
L'astigmatisme est direct et vaut (mesuré en S) **$\mathcal{A}_c$ = (+0.87) $_{10°}$**
Les kératomètres sont éloignés pour un indice souvent égal à 1.336 (parfois 1.333).

- Prenons l'exemple d'un dioptre cornéen dont les méridiens principaux sont $\alpha \rightarrow K\ et\ \alpha + 90 \rightarrow K'$

Les vergences lues ne sont pas $D_{c\alpha} = \frac{377}{K}$ ou $D_{c\alpha+90} = \frac{377}{K'}$

Mais $D_{lue\ \alpha} = \frac{1336-1000}{K}$ et $D_{lue\ \alpha+90} = \frac{1336-1000}{K'}$

Ceci fournit l'astigmatisme de la cornée toute entière, cornée assimilable à un dioptre unique 1/ 1.336

$$\boxed{\mathcal{A}_{\text{cornée brute entière}} = D_{lue\ \alpha+90} - D_{lue\ \alpha}}$$

L'écart minimal de lecture des vergences est de 0.25δ ce qui correspond à un écart minimal de lecture **Δn_c** pour les rayons de courbures cornéens tel que $\left(\frac{336}{nc}\right) - \left(\frac{336}{nc+\Delta nc}\right) \approx \frac{336\,\Delta nc}{nc^{\,2}}$

Pour $n_c \approx 8$ mm ; on a $\Delta nc = 0.05$mm

La formule donnant les vergences méridiennes principales du dioptre cornéen est : $\boxed{Dc_{\alpha} = D_c\,(\mathcal{A}c)_{\alpha}}$

Avec $\mathcal{A}_c = \left(\frac{337}{K'} - \frac{336}{K}\right)_\alpha = \mathcal{A}_{lu} \times \frac{337}{336}$

$\mathcal{A}_{lu} = \left(\frac{336}{K'} - \frac{336}{K}\right)_\alpha$

B) L'ASTIGMATISME INTERNE

Il englobe celui de la **face postérieure de la cornée** et celui du **cristallin** en entier. Les indices des milieux intraoculaires sont très proches (1.337 ; 1.420 ; 1.336).

Ainsi, l'astigmatisme interne (traduisant une différence de vergences méridiennes principales nominales plus faibles que pour le dioptre cornéen antérieur) est-il souvent beaucoup *plus faible que l'astigmatisme objectif.*

Les méridiens principaux de l'astigmatisme interne n'étant pas toujours parallèles à ceux de l'astigmatisme « cornéen ». On écrira :

$$\boxed{\mathcal{A}_{total} = \mathcal{A}_{cornéen} \oplus \mathcal{A}_{interne}}$$

Remarque :

Revenons vers le début de notre cours où nous avons étudié l'œil théorique même hyperope d'environ une 1.5δ. En réalité, si on effectuait une kératométrie de cet œil, on trouverait que le dioptre cornéen est astigmate et que cet astigmatisme est direct avec **$Dc_{0°} = 42$ δ** et **$Dc_{90°} = 42.5$ δ** (effet de pesanteur, pression palpébrale). Ceci est du au fait que l'œil présente une légère amétropie sphérique. En réalité, l'astigmatisme cornéen (direct valant 0.5 δ) est compensé par l'astigmatisme qui, mesuré au même endroit est inverse de valeur 0.5δ également.

On dit de cet astigmatisme interne (inverse de 0.5δ) qu'il représente l'**astigmatisme interne physiologique**.

En effet, s'agissant d'un œil quelconque, on écrira par exemple les formules compensatrices en S

$$\boxed{\text{Cylindre compensateur } \mathcal{A}_{total} = \text{cylindre compensateur } \mathcal{A}_{cornéen} \oplus \text{cylindre compensateur } \mathcal{A}_{interne}}$$

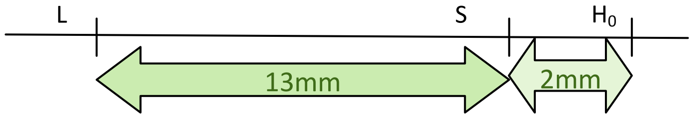
Classification des astigmatismes totaux qualifiés aussi de subjectifs :

- **Forts astigmatismes :** $\mathcal{A}_{total} \geq 3$ δ (représentés essentiellement par de l'astigmatisme cornéen)
- **Astigmatismes moyens :** $1δ \leq \mathcal{A}_{total} \leq 3$ δ
- **Astigmatismes faibles :** $\mathcal{A}_{total} \leq 1$ δ

  Ce dernier cas inclut le cas particulier $\mathcal{A}_{cornéen} = 0$ et $\mathcal{A}_{total} = \mathcal{A}_{interne}$ (souvent interne et donc gênant).

2) EXEMPLE DE CALCUL DE CET ASTIGMATISME INTERNE

Œil emmétropisé par $\mathbf{D_L= -1\ (-2)_{0°}}$ avec LH_0= 15mm et LS=13 mm
La kératométrie objective fournit les valeurs K= $n_{c10°}$ =7.8mm et K'=$n_{c100°}$ = 7.5mm
On demande la valeur du cylindre compensant en S l'astigmatisme interne de cet œil.



Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{total}$= cylindre compensateur $\mathcal{A}_{cornéen}$ ⇔ cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$

A) RECHERCHE DU CYLINDRE COMPENSATEUR EN S DE L'ASTIGMATISME TOTAL

On peut l'obtenir à partir de la formule emmétropisante à calculer en S :

- $\mathbf{D_{L\ 0°}= -1\delta}$ → LR_0= - 1000mm et SR_0= -1013mm
  → $D_{S\ 0°}= \frac{1000}{SRo} = -0.99\delta$

- $\mathbf{D_{L\ 90°}= -3\delta}$ → LR_{90}= - 333mm et SR_{90}= -346mm
  → $D_{S\ 90°}= \frac{1000}{SR90} = -2.89\delta$

D'où la formule compensatrice D_S =- 0.99 (-1.90) $_{0°}$
et en particulier Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{total}$= (-1.90) $_{0°}$

B) ASTIGMATISME CORNÉEN DONNÉ PAR LE KÉRATOMÈTRE

- $\mathbf{D_{c\ 10°}}=\frac{1377-1000}{7,8\ mm} = 48.33\delta$

- $\mathbf{D_{c\ 100°}}=\frac{1377-1000}{7,5\ mm} = 50.27\delta$

D_c =- 48.33 (+1.94) $_{10°}$

Le dioptre antérieur cornéen présente un astigmatisme direct qualifié par la valeur $\mathcal{A}_c$ =(+1.94) $_{10°}$
Il sera compensé en S par Cylindre compensateur $\mathcal{A}_c$= (-1.90) $_{0°}$

C) DÉTERMINATION DE LA VALEUR DE L'ASTIGMATISME INTERNE MESURÉ EN S

On peut raisonner soit : en formules intrinsèques (défauts) soit en formules compensatrices.

Raisonnons en cylindres compensateurs placés en S :

Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{total}$= cylindre compensateur $\mathcal{A}_{cornéen}$ ⇔ cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$
Soit (-1.90) $_{0°}$≡ (-1.94) $_{10°}$ ⇔ cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$
→ cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$≡ (-1.94) $_{10°}$ ⇔(-1.90) $_{0}$

Ici on s'affranchit des termes sphériques dont la valeur n'a aucune signification ni pour l'astigmatisme cornéen ni pour l'astigmatisme interne.

Seul le terme relatif au défaut global (celui qui apparaît en D_s) a une réalité bien concrète. C'est lui qui permet de dire si l'astigmatisme total est myopique composé, myopique simple, mixte, hypéropique simple ou hypéropique composé. Les deux autres types d'astigmatisme ne peuvent être qualifiés que de direct, oblique ou inverse.

En s'affranchissant des termes sphériques,
Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne} \equiv (-1.94)_{10°} \,\text{⊕}\, (-1.90)_{0°}$

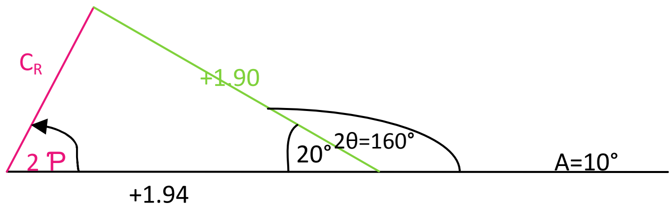
C_1 α C_2 θ=80°

P>0

$C_R^2 = 1.94^2+1.90^2 - 2*1.94*1.90 \cos 20 = 0.4462$
→ C_R=0.678

Le triangle est quasi isocèle : 4 Ꝑ + 20° ≈ 180° soit

Ꝑ ≈40° (ρ=38.5°)



Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$= $(+0.67)_{50°}$= $(-0.67)_{140°}$

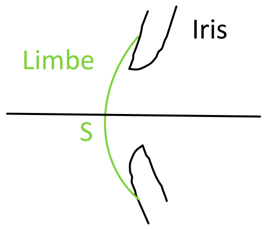
Astigmatisme oblique de valeur proche, au point de vue valeur, de l'astigmatisme interne physiologique.

3) LE MÉNISQUE DE LARMES EMPRISONNÉ ENTRE LA FACE ARRIÈRE DE LA LENTILLE ET LE DIOPTRE CORNÉEN

Toute lentille de contact emprisonne entre sa face arrière et la cornée une lentille dont il faut connaître les caractéristiques optiques.

Il y a en gros deux types de lentilles :

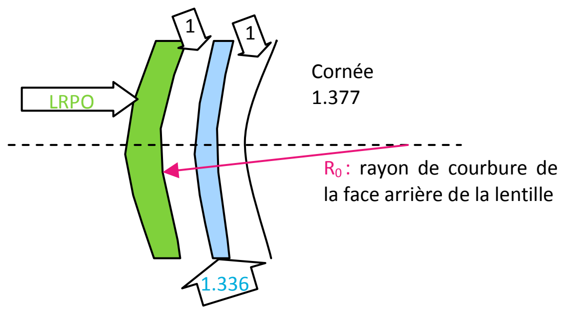
- **les lentilles semi-rigides perméables à l'oxygène (LRPO) :** le diamètre est inférieur au diamètre du limbe (zone très sensible de la cornée).



- les **lentilles souples hydrophiles (LSH)** dont le diamètre est bien supérieur à celui du limbe.

A) CAS D'UNE LENTILLE RIGIDE LRPO

La réfraction de l'œil a été mesurée dans l'air, la vergence D_{Lc} de la lentille de contact est donnée par le fabricant pour des milieux objet et image étant également de l'air.
Les calculs qui vont suivre doivent alors être menés comme si le ménisque de larmes d'indice 1.336 « baignait dans l'air ; ce qui est bien sûr faux, mais le problème posé plus haut sera solutionné en considérant que ce ménisque de larme est emprisonné entre deux lames d'air d'épaisseur nulle.



Le rayon de courbure de la face arrière (ici sphérique) de la lentille de contact est noté $\mathbf{R_0}$, ce sera aussi celui du dioptre antérieur du ménisque de larmes (également sphérique lui aussi). Le dioptre postérieur du ménisque épouse quant à la lui le dioptre antérieur cornéen.

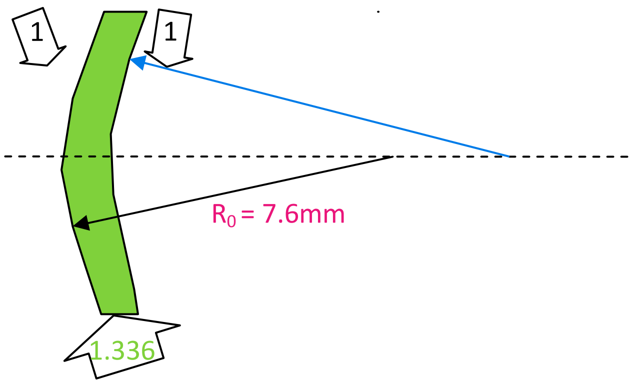
Exemple concret

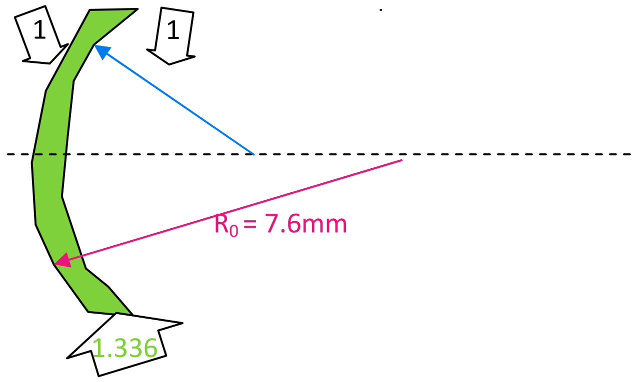
Dioptre cornéen présentant un astigmatisme direct avec K= $n_{c\,0°}$ =7.7mm et K'=$n_{c\,90°}$ = 7.4mm

Simulons un essai de profil arrière pour la lentille de contact avec R_0= 7.6mm. Dans cet exemple, la lentille de larme est sphérique face avant (caractérisée par R_0= 7.6mm) et astigmate face arrière.

Intéressons-nous à ses coupes longitudinales dans chaque méridien principal.

L'épaisseur centrale **e** est commune à tous les méridiens. Elle apparaît en particulier dans ces deux méridiens principaux. **e** est très faible.





$S_1 \approx S_2 \approx S$

Méridien 0°

Méridien 90°

<u>Cherchons l'expression D_L sphéro-cylindrique de ce ménisque de larmes. :</u>

Le terme d'épaisseur $\frac{e}{n}$ D_1 D_2 est naturellement négligeable, e étant très faible.

<u>Les vergences méridiennes principales sont :</u>

- $D_{L\,0°} = \frac{1336-1000}{7.6} + \frac{1000-1336}{7.7} = 0.57\ \delta$
- $D_{L\,90°} = \frac{1336-1000}{7.6} + \frac{1000-1336}{7.4} = -1.20\ \delta$

D'où $\boxed{D_L = +0.57\ (-1.77)_{\ 0°}}$

$\boxed{D_{L\,0°} > D_{L\,90°}}$

L'astigmatisme des larmes est donc inverse. Il est représenté par sa formule intrinsèque

$\mathcal{A}_L = (-1.77)_{\ 0°} \equiv (+1.77)_{90°}$

<u>En ce qui concerne le dioptre antérieur cornéen :</u>

- $D_{c\,0°} = \frac{1377-1000}{7.7} = 48.96\delta$
- $D_{L\,90°} = \frac{1336-1000}{7.4} = 50.94\delta$

$\boxed{\text{D'où } D_c = 48.96\ (+1.98)_{\ 0°}}$

L'astigmatisme des larmes s'écrit $\mathcal{A}_L = (-1.77)_{\ 0°} = \left(\frac{-336}{7.4} + \frac{336}{7.7}\right)_{0°}$

L'astigmatisme cornéen s'écrit $\mathcal{A}_c = (-1.98)_{\ 0°} = \left(\frac{377}{7.4} - \frac{377}{7.7}\right)_{0°}$

Il apparaît donc, quelque soit R_0, $\mathcal{A}_L = \frac{-336}{337}\mathcal{A}_c = -0.89\ \mathcal{A}_c \approx -0.9\ \mathcal{A}_c$

<u>Envisageons le système global :</u>

[Système de contact + système optique de l'œil]= [lentille de contact+larmes+cornée entière+cristallin]

- Le sous ensemble **[lentille de contact+larmes+cornée entière+cristallin]** constitue un système optique placé en S, son astigmatisme résulte des astigmatismes en présence. Son astigmatisme résultant (mesuré en S) s'écrit :

$\mathcal{A}_{t\ \text{résultant}} = \mathcal{A}_{\text{face avant de la lentille}} \Bumpeq \mathcal{A}_{\text{face arrière de la lentille}} \Bumpeq \mathcal{A}_L \Bumpeq \mathcal{A}_c$

$\mathcal{A}_{t\ \text{résultant}} = \mathcal{A}_{\text{face avant de la lentille}} \Bumpeq \mathcal{A}_L \Bumpeq -0.89\ \mathcal{A}_c$

$\mathcal{A}_{t\ \text{résultant}} = \mathcal{A}_{\text{face avant de la lentille}} \Bumpeq 0.11\ \mathcal{A}_c$

Pour le système global :

[Système de contact + système optique de l'œil]= [lentille de contact+larmes+cornée entière+cristallin]

$\mathcal{A}_{\text{global résultant global}} = \mathcal{A}_{\text{face avant de la lentille}} \Bumpeq \mathcal{A}_{\text{c interne}} \Bumpeq \mathcal{A}_L \Bumpeq 0.11 \mathcal{A}_c$

Par comparaison, l'astigmatisme du système optique de l'œil dépourvu de tout équipement peut s'écrire :

$$\mathcal{A}_{\text{œil nu}} = \mathcal{A}_{\text{interne}} \Bumpeq \mathcal{A}_{c}$$

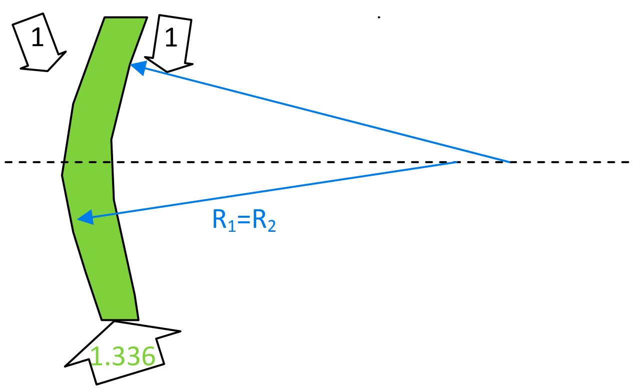
Conclusion :

- **Le ménisque de larmes a absorbé pratiquement 90% de l'astigmatisme cornéen**
- **Ainsi, le port d'une lentille LRPO à face arrière sphérique fait-il « ressortir » l'astigmatisme interne.**

Corolaire

Si l'astigmatisme résiduel est faible devant l'astigmatisme total de l'œil, il est tout à fait envisageable d'équiper cet œil avec une lentille LRPO entièrement sphérique.

B) CAS D'UNE LENTILLE SOUPLE HYDROPHILE (LSH)



Une telle lentille a pour particularité d'épouser parfaitement la face avant de la cornée. La lentille de larmes, réduite alors à un film très mince, possède dans tous les plans méridiens le même rayon de courbure pour sa face avant et sa face arrière.

Dans ce méridien quelconque :

$$D_{L\ \beta} = \frac{1336-1000}{r1} + \frac{1000-1336}{r2} = 0\ \delta = D_L$$

Vergence uniforme et nulle

Le **ménisque de larmes** possède ici une vergence uniforme (nulle de surcroit) et **n'intervient pas dans la compensation de l'astigmatisme** (éventuel) du système optique de l'œil. En particulier ici la LSH envisagée est elle-même sphérique, elle n'intervient pas non plus dans la compensation de l'astigmatisme.

Remarque :

En épousant la forme de la cornée, si cette dernière est astigmate, la face arrière de la lentille souple se déforme et prend une toricité (supplémentaire) qui se représente sur sa face avant et de manière inverse si bien que globalement, la lentille souple conserve la vergence annoncée par le fabriquant avant sa mise en place sur l'œil du client.

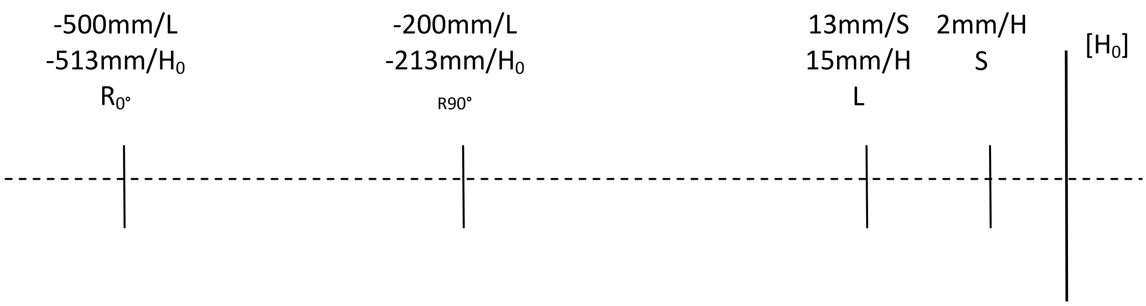
En particulier si sa formule annoncée est sphérique, elle le reste globalement après introduction sur la cornée. Cette remarque n'est vraie en toute rigueur que si l'astigmatisme cornéen n'est pas trop élevé. Ce qui est rigoureux, c'est de dire que **la lentille de contact conserve son volume**.

4) EXEMPLES D'APPLICATION :

A) ŒIL EMMÉTROPISÉ À 15MM [DE H_0] PAR D_L= -2 (-3) $_{0°}$

L'examen kératométrique de la cornée indique $n_{c10°}$ =8.0mm et $n_{c100°}$ = 7.67mm

Évaluez son astigmatisme interne en S, quelle est sa nature ? Serait-il envisageable d'équiper cet œil d'une lentille LRPO entièrement sphérique ?



L'œil présente un astigmatisme myopique composée direct avec D_{Lm}= -2 + $^{-3}/_{2}$= -3.5 δ
C'est la valeur de la sphère amenant le cmd sur la rétine.
La sphère palier valant ici Sp≈3.0 δ
Cmd en avant de [R'] tant que $\frac{1336}{H'oR'} - \frac{1336}{H'oC'} = -0.5\ \delta$ en situation palier.

$D_{L\,0°}$= $\frac{1000}{LRo} = -2.0\delta$ → $LR_{0°}$ = -500mm et $SR_{0°}$ = -513mm
La vergence compensatrice de cet œil dans le méridien 0° est : $D_{L\,0°}$= $\frac{1000}{SRo} = \frac{1000}{-513} =$ -1.95δ

$D_{L\,90°}$= $\frac{1000}{LR90} = -2.0\delta$ → LR $_{90°}$ = -200mm et $SR_{0°}$ = -213mm
La vergence compensatrice de cet œil dans le méridien 90° est : $D_{L\,90°}$= $\frac{1000}{SR90} = \frac{1000}{-213} =$ -4.70δ

D_S= -1.95 (-2.75) $_{0°}$

On ne normalise pas la valeur Ds quand une compensation en LRPO est envisagée.

Cylindre compensateur(en S) $\mathcal{A}_{total}$= (-2.75) $_{0°}$= (+2.75) $_{90°}$

<u>Calcul de l'astigmatisme « cornéen mesuré en S.</u>
les vergences principales du dioptre antérieur cornéen valant

- $D_{c\,10°}$= $\frac{1377-1000}{8} = 47.12\ \delta$
- $D_{c\,100°}$= $\frac{1377-1000}{7.67} =$ -49.15 δ

L'astigmatisme cornéen est direct puisque $\mathbf{D_{c\,100°}} > \mathbf{D_{c\,10°}}$
D'où **D_c**= +47.12 (+2.03) $_{10°}$

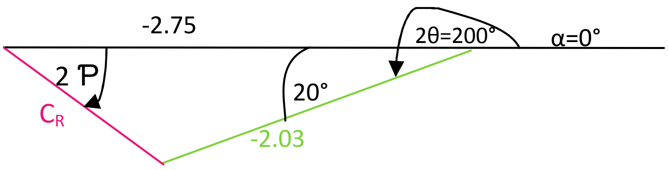
$\mathcal{A}_c$= $(-2.03)_{10°}$ donc Cylindre compensateur(en S) = $\mathcal{A}_c$= $(-2.03)_{10°}$

En formules compensatrices placées en S :
Cylindre compensateur(en S) $\mathcal{A}_{total}$= (-2.75) $_{0°}$
Cylindre compensateur(en S) $\mathcal{A}_{total}$= (+2.03) $_{10°}$ ⇨ cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$

Cylindre compensateur(en S) $\mathcal{A}_{total}$= $(+2.03)_{10°}$ ≎ $(-2.75)_{0°}$

Cylindre compensateur(en S) $\mathcal{A}_{total}$= $(-2.03)_{100°}$ ≎ $(-2.75)_{0°}$

C_2 θ=100° C_1 α



Ƥ <0

$C_R^2=2.75^2+2.03^2-2*2.75*2.03\cos 20=1.192$

→ $\boxed{C_R=-1.09\ \delta \approx 1.1\ \delta}$

$2.03^2= CR^2 + 2.75^2 - 2* 2.75* CR\cos 2$Ƥ

→ cos 2 Ƥ= 0.773 soit Ƥ= - 19.7° ≈ -20°

cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$= $(-1.1)_{0-20°}$= $(-1.1)_{180-20°}$ soit $\boxed{\text{cylindre compensateur } \mathcal{A}_{interne}= (-1.1)_{160°}}$
Cet astigmatisme interne est direct (car compensé par un cylindre négatif horizontal) et vaut 1.1 δ

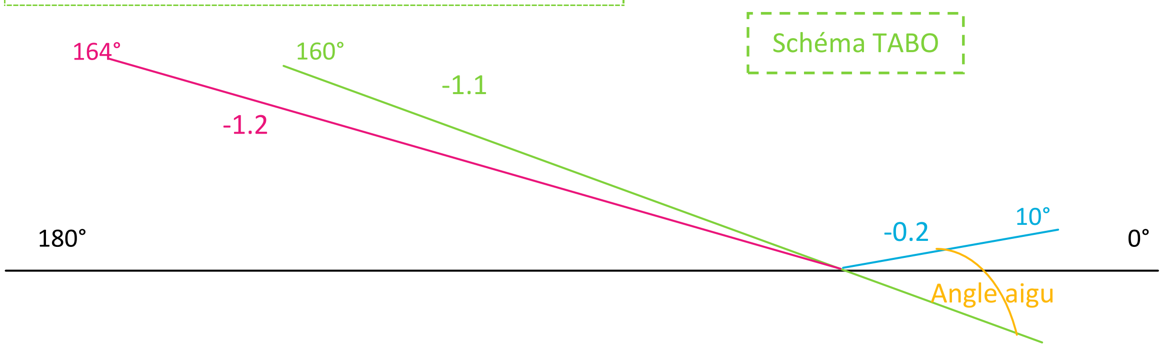
Rappel : l'astigmatisme interne physiologique est inverse et vaut 0.5δ

Si on équipe cet œil d'une lentille LRPO sphérique, alors $\mathcal{A}_{résiduel}$= 10% $\mathcal{A}_C$ ≎ $\mathcal{A}_{inverse}$

Soit en Cylindre compensateur(en S) $\mathcal{A}_{résiduel}$= $(-0.20)_{10°}$ ≎ $(-1.1)_{160°}$

C_1 α C_2 θ=150°

$\boxed{\text{Cylindre compensateur(en S) } \mathcal{A}_{résiduel}= (-1.20)_{164°}}$



Remarque :

Le **cylindre résultant** se trouve toujours à *l'intérieur* de *l'angle aigu* formé par les deux cylindres en composition.

Cet astigmatisme est pratiquement égal à l'astigmatisme interne : il vaut 1.2 δ et est direct. Il resterait cependant 44% de l'astigmatisme total.

Remarque :

Du point de vu contactologie, une LRPO avec un profil arrière **sphérique** placé sur une cornée dont l'astigmatisme n'est pas négligeable ne constitue pas l'adaptation idéale. La lentille risque fort de s'affaisser. Dans ce cas, il est *préférable* d'utiliser une LRPO ayant un *profil arrière torique*.

B) DEUXIÈME EXERCICE

On connaît la formule emmétropisante en L tel que LH_0 = 15mm (et SH_0 = 13mm) et par D_L= $-1\ (-3)_{10°}$
La cornée présente un astigmatisme direct avec K= $r_{c\,0°}$ =7.8mm et $r_{c\,90°}$ = 7.3mm.
On envisage en première intention une adaptation en LRPO d'indice 1.5 avec un profil interne sphérique caractérisé par un rayon R_0 = 7.7mm

a) Indiquez la formule compensatrice de cet œil en S.
b) Indiquez les vergences méridiennes principales du ménisque de larmes emprisonné entre la face arrière de la LRPO et la cornée.
c) Déterminez le cylindre compensateur de l'astigmatisme interne en S.
d) Une LRPO entièrement sphérique serait-elle envisageable ici ?
e) Quels seraient les rayons de courbures de la face avant de la LRPO qui compenserait parfaitement cet œil, la face arrière étant sphérique caractérisée par le rayon de courbure R_0 = 7.7mm ?
f) Même question avec R'_0 = 7.6mm
g) La réalité montre qu'un profil arrière sphérique n'est pas adapté sur une cornée aussi torique. On va adopter un profil arrière également torique avec r_1= 7.70 mm et r_2= 7.20mm.
   - ✓ *Principe de stabilité ?*
   - ✓ *Formule de la LRPO emmétropisante dans une telle éventualité ?*

a) Formule compensatrice en S :

- $D_{L\,10°} = -1.0\ \delta \rightarrow LR_{10°} = -1000mm$ soit $SR_{10°} = SL + LR_{10°} = -13 - 1000 = -1013mm$

  ⇨ $D_{S\,10°} = \frac{1000}{-1013} = -0.99\ \delta$

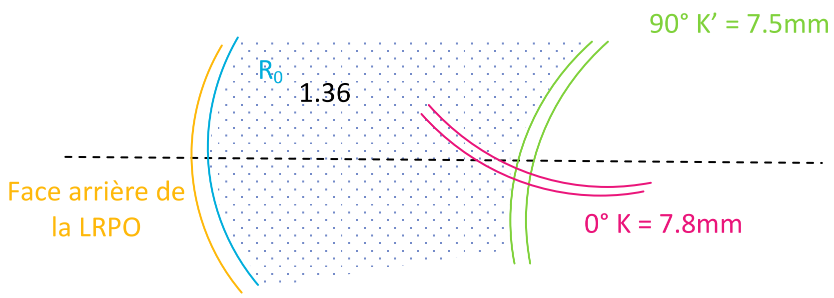
- $D_{L\,100°} = -4.0\ \delta \rightarrow LR_{10°} = -250mm$ soit $SR_{10°} = SL + LR_{10°} = -13 - 250 = -263mm$

  ⇨ $D_{S\,100°} = \frac{1000}{-263} = -3.8\ \delta$

$\boxed{D_S = -0.99\ (-2.81)_{10°}}$

b) Le ménisque de larme :

Le ménisque de larmes est mince et emprisonné entre deux lames d'air d'épaisseur nulle. La face arrière de ce ménisque de larmes est torique et présente les mêmes méridiens principaux que ceux du dioptre cornéen. La face avant de ce ménisque est sphérique. Globalement, ce ménisque est torique, ses méridiens principaux sont orientés à 0° et 90°.



On négligera le terme d'épaisseur $\frac{-e}{n}D_1D_2$ (ménisque très mince).

- $D_{\text{larmes }0°} = \frac{1336-1000}{Ro} + \frac{1000-1336}{K} = \frac{336}{7.7} - \frac{336}{7.8} = 0.56\ \delta$

- $D_{\text{larmes }90°} = \frac{1336-1000}{Ro} + \frac{1000-1336}{K'} = \frac{336}{7.7} - \frac{336}{7.3} = -2.39\ \delta$

$\boxed{D_{Larmes} = +0.56\ (-2.95)_{0°}}$

Remarque :

$D_{\text{larmes }0°} > D_{\text{larmes }90°}$

Le ménisque de larmes présente un astigmatisme inverse. La cornée présente un astigmatisme direct. C'est ce qui permet l'absorption d'environ 90% de l'astigmatisme cornéen.

c) Cherchons les cylindres compensateurs de l'astigmatisme interne de cet œil :

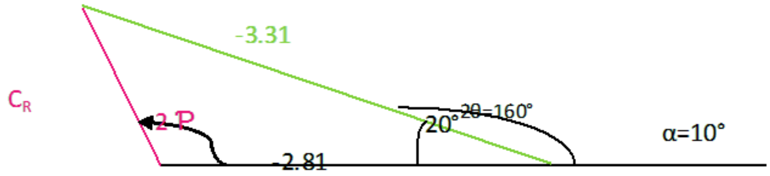
- $D_{c\,0°} = \frac{1377-1000}{7.8} = 48.33\ \delta$
- $D_{c\,90°} = \frac{1377-1000}{7.3} = 51.64\delta$

D_C= 48.33 (+3.31) $_{0°}$ → A_c= (+3.31)$_{0°}$
Cylindre compensateur $\mathcal{A}_c$= (-3.31) $_{0°}$ avec cylindre compensateur $\mathcal{A}_{total}$ = (-2.81) $_{10°}$

(-2.81) $_{10°}$= (-3.31) $_{0°}$ $\Bumpeq$ Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$
Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$ = (-2.81) $_{10°}$ $\Bumpeq$ (+3.31) $_{0°}$
Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$ = (-2.81) $_{10°}$ $\Bumpeq$ (-3.31) $_{90°}$

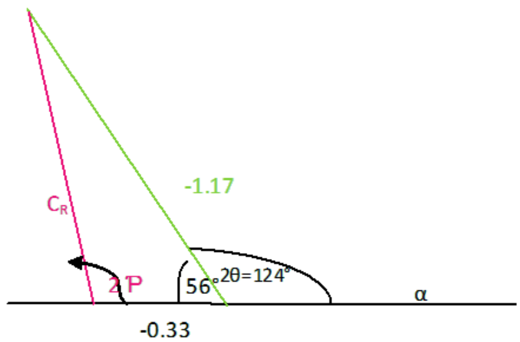
C_1 α C_2 θ=80

C_R^2= (-2.81)²+ (-3.31)²- 2*(-2.91)*(-3.31) cos 20= 1.372
→ C_R=-1.17 δ
(-3.31)²= C_R^2 + (-2.81)² - 2* (-2.81)* C_R cos 2 Ƥ
→ cos 2 Ƥ= -0.257 soit Ƥ= 52°
cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$= (-1.2)$_{62°}$
Cet astigmatisme interne est oblique, limite inverse.



d) Envisageons une adaptation avec une LRPO entièrement sphérique :

Une telle lentille absorbera environ 90% de l'astigmatisme cornéen. Dans ces conditions, on peut écrire :
Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{total}$= cylindre compensateur 10% $\mathcal{A}_{cornéen}$ $\Bumpeq$ cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$



Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{interne}$ = (-0.33) $_{0°}$ $\Bumpeq$ (-1.17) $_{62°}$

C_1 α C_2 θ=80

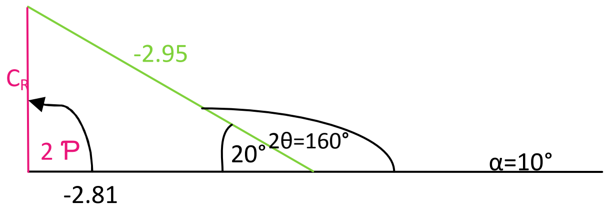
C_R^2= (-1.17)²+ (-0.33)²- 2*(-1.17)*(-0.33) cos 56= 1.372
→C_R = -1.02δ
(-1.17)²= C_R^2 + (-0.33)² - 2* (-0.33)* C_R cos 2 Ƥ
→ cos 2 Ƥ= -0.318 soit Ƥ= 54°
Cylindre compensateur $\mathcal{A}_{résiduel}$= (-1.02)$_{54°}$
Cet astigmatisme interne est oblique et vaut environ 1δ (gênant).

Une telle adaptation, même si elle n'est pas envisageable sur une cornée aussi torique, n'est pas bonne car l'acuité de serait pas optimale.

e) Envisageons une LRPO possédant un profil arrière sphérique (R_0= 7.7mm) et un profil avant torique permettant l'emmétropisation de l'œil.

Désignons par **D_{LC}** la vergence de cette lentille dite alors *compensatrice*.
D_{LC} est telle que D_{LC} $\Bumpeq$ D_I≈ D_S ≈ -0.99 (-2.81) $_{10°}$
Soit D_{LC} = D_S $\Bumpeq$ D_I =-0.99 (-2.81) $_{10°}$ $\Bumpeq$ +0.56 (+2.95) $_{0°}$
D_{LC} =-0.99 (-2.81) $_{100°}$ $\Bumpeq$ +2.39 (-2.95) $_{90°}$

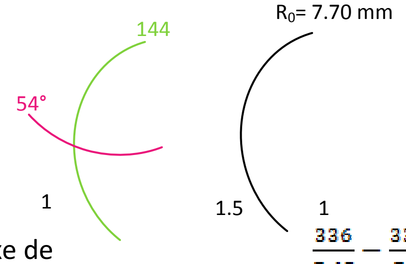
C_R^2= (-2.81)²+ (-2.95)²- 2*(-2.91)*(-2.95) cos 20= 1.372
→ C_R=-1.01 δ
(-2.95)²= C_R^2 + (-2.81)² - 2* (-2.81)* C_R cos 2 Ƥ
→ cos 2 Ƥ= -0.04 soit Ƥ= 44°



$2S_R + C_R = C_1 + C_2$ Soit $\mathbf{S_R} = \frac{-2.81-2.95+1.01}{2} = -2.38\ \delta$
S_f = -2.38 – 0.99 + 2.39= -0.98 δ d'où D_{LC}= -0.98 (-1.01) $_{54°}$
Valeur normalisée donnée par le fabricant : D_{LC} = -1 (-1) $_{54°}$

Une fois sur l'œil, la lentille doit présenter ses méridiens principaux orientés à 54° et 144°. Pour l'empêcher de tourner (pour l'instant elle possède un profil sphérique), le fabricant utilise plusieurs technique. Parmi celle-ci, un prisme ballateur (base inférieure) peut être utilisé. (Lentille « alourdie verticalement en dehors de la zone optique »).
Les méridiens principaux de la lentille (une fois en place sur l'œil avec la formule attendue) sont orientés 54° et 144°.
Soient R_1 et R_2 les rayons de courbures correspondants.
La lentille est mince :

- $D_{LC\ 54°} = \frac{1500-1000}{R1} + \frac{1000-1500}{Ro}$ = -1δ → r_1 = 7.82 mm
- $D_{LC\ 144°} = \frac{1500-1000}{R2} + \frac{1000-1500}{Ro}$ → r_2 = 7.94 mm



$\frac{336}{7.65} - \frac{336}{7.7}$ = 0.285

f) Si on modifie R_O en R'_0= 7.65mm

Le ménisque de larmes change de valeur, il devient plus convexe de δ
Le ménisque de larmes devient alors $D'_l = D_l + 0.289δ$
La vergence compensatrice **D'_{LC}** de la lentille est telle que D'_{LC} ≎ $D'_l \approx D_S$
Soit $D'_{LC} = D_S$ ≎ D'_l =Ds ≎ $-D_R$ -0.285 δ avec Ds ≎ $-D_R = D_{LC}$
$D'_{LC} = D_{LC}$ ≎ – 0.285 δ= -0.98 (-1.01) $_{54°}$ ≎ – 0.285= -1.265 (-1.01) $_{54°}$ (valeur théorique)

D'_{LC} = -1.25 (-1.0) $_{54°}$ (valeur normalisée)

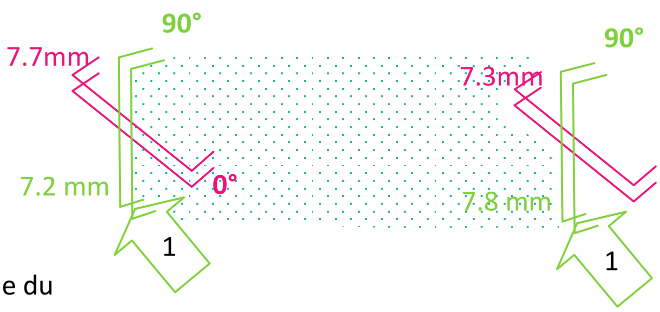
$D'_{LC\ 54°} = \frac{500}{R'1} - \frac{500}{R'0}$ = -1.2 δ → r'_1 =7.80mm
$D'_{LC\ 1444°} = \frac{500}{R'2} - \frac{500}{R'0}$ = -2.2 δ → r'_2= 7.92mm

g) Pour assurer une meilleure stabilité de la lentille, on envisage comme profil interne un profil torique dont les rayons de courbure dans les méridiens principaux sont R_1= 7.7mm et $_{R2}$=7.2mm

✓ Principe de stabilité d'une LRPO à profil interne torique une fois mise en place :

Après stabilisation, la face arrière de la lentille de contact présente ses méridiens principaux alignés sur ceux du dioptre antérieur cornéen. Le méridien le plus plat sera parallèle au méridien le plus plat et il en est de même pour le méridien le plus courbe.

Ici, face interne de la lentille :
r_1 = 7.7mm= r $_{10°}$ (après stabilisation)
puisque K= $r_{c\ 0°}$ = 7.80mm
r_2 = 7.2mm= r $_{290°}$ (après stabilisation)
puisque K'= $r_{c\ 90°}$ = 7.30mm



Soit **D''_{LC}** la vergence compensatrice de la LRPO possédant un tel profil interne et soit **D''_l** la formule du ménisque de larmes. On a alors la relation
Soit D''_{LC} (normalisable) ≎ D''_l (non normalisable) ≈ D_S formule compensatrice en S.

Le ménisque de larmes a pour vergence méridiennes principales :

- $D_{larmes\ 0°} = \frac{1336-1000}{R1} + \frac{1000-1336}{K} = \frac{336}{7.7} - \frac{336}{7.8}$ =0.56 δ
- $D_{larmes\ 90°} = \frac{1336-1000}{R2} + \frac{1000-1336}{K'} = \frac{336}{7.2} - \frac{336}{7.3}$ =+0.64δ

Ce ménisque de larme est ici quasiment sphérique, de vergence moyenne D''l ≈ 0.6δ
La lentille compensatrice théorique possède une formule D''LC telle que :
D''LC ≎ D''l≈ DS = -0.99 (-2.81) 10°
Soit D''LC = DS ≎ D''l ≈ [-0.99 -0.6] (-2.81) 10°= -1.59 (-2.81) 10°

En valeur normalisée : $\boxed{D''_{LC} = -1.50\ (-2.75)\ _{10°}}$ ou $\boxed{D''_{LC} = -1.75\ (-2.75)\ _{10°}}$ (sujet jeune)

Les méridiens principaux de la face postérieure de la lentille sont orientés à 0 et 90°. Ceux de la face avant vont déterminés par composition de cylindres : $\boxed{D''_{LC\ \text{face avant}} \oplus D''_{LC\ \text{face arrière}} = -1.50\ (-2.75)\ _{10°}}$

Le terme d'épaisseur a été négligé pour facilité la compréhension.

Cette lentille LRPO emmétropisante possède un profil bitorique :
La toricité de la *face arrière* permet la **stabilisation de la lentille** sur la cornée et la toricité de la *face avant* permet l'**emmétropisation**.