

inverse pour les annuler. Ainsi, pour la myopie simple, la modification cornéenne induite par le port nocturne de la lentille d'orthokératologie se traduira par un défocus hypermétropique classé $Z^{\circ 4}$ et, pour l'hypermétropie, par un défocus myopique classé $Z^{\circ 2}$ dans les polynômes de Zernike (figure 2). Ces deux schémas affichent aussi clairement la multifocalité naturellement induite par l'orthokératologie dans sa méthode même ; soit respectivement une prolaticité cornéenne exagérée pour l'hyperope corrigé, et une cornée oblate avec anneau périphérique myopisant pour le sujet myope également traité.

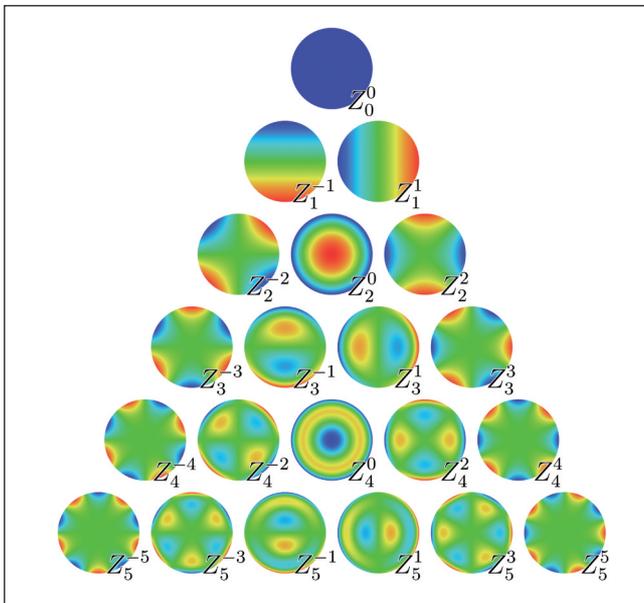


Figure 2. Tableau des aberrations optiques selon Zernike : celle du classique « Bull eye » de l'œil myope corrigé correspond au $Z^{\circ 4}$ et celle de l'œil hypermétrope « Fish eye » au $Z^{\circ 2}$.

Restauration du jeu pupillaire naturel

Le jeu pupillaire naturel améliore la performance visuelle spontanée optique de l'œil par l'addition de trois effets physiologiques que l'on peut réunir sous le terme d'apodisation de transmission pupillaire [5].

Ce sont :

- l'effet Stiles-Crawford ;
- l'approximation de Gauss ;
- elle-même conditionnée par le myosis de fixation, s'il est voisin de 3 mm.

Notons également que le passage d'un diamètre de pupille de 5 mm à 2 mm correspond à un gain de profondeur de champ de plus de 3 dioptries, en vision intermédiaire et rapprochée. Au détriment momentané de la performance visuelle de loin, par déficit d'éclairement si la lumière n'est pas intense [6]. Mais la pupille ne reste pas fixe (figure 3).

Intégration mentale, transmission pupillaire (tache d'Airy) et effet Stiles-Crawford

L'intégration mentale du message visuel se fait entre 200 à 240 millisecondes ou environ 24/100 de seconde et représente l'addition de l'image de 6 à 8 pupilles fixes de diamètres variables obtenue par chaque fixation d'environ 3/100 de seconde [7].

La transmission lumineuse d'une pupille fixe est illustrée par la tache d'Airy (figure 3). Elle est constituée d'un disque à luminance décroissante du centre vers la périphérie, cerclé d'anneaux d'interférences diffractives provoquées par le rebord pupillaire.

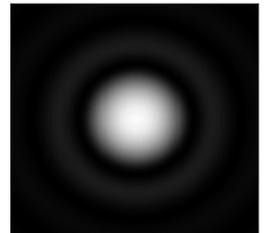


Figure 3. La tache d'Airy est l'illustration des interférences diffractives périphériques, créées par l'effet de bord diffractif d'une pupille fixe.

Cette transmission est le reflet du caractère corpusculaire (photonique), mais aussi ondulatoire (quantique) de la lumière.

Fort heureusement, toutes ces diffractions périphériques et leurs sommes résultant de plusieurs fixations seront annulées par l'effet Stiles-Crawford, capable en effet d'annuler 30% de la transmission lumineuse adjacente au rebord pupillaire sur un diamètre de 5 mm, par exemple, renforçant ainsi l'utilisation du faisceau lumineux centro-pupillaire [7,8]. Mais aussi par l'approximation de Gauss, qui augmentera la profondeur de champ lors du myosis de fixation si le diamètre pupillaire descend au voisinage de 3 mm (figure 4).

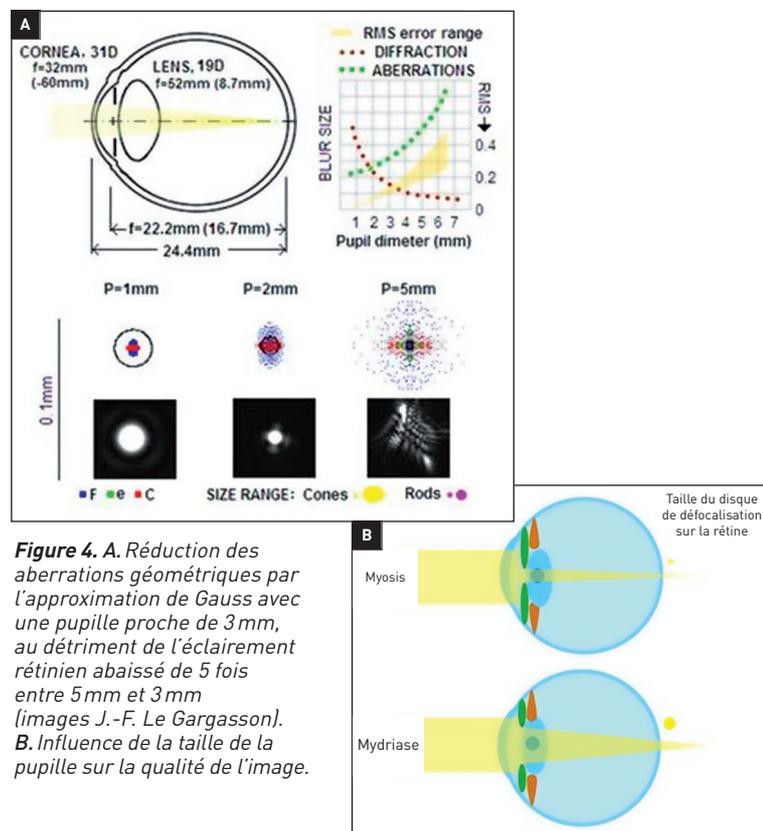


Figure 4. A. Réduction des aberrations géométriques par l'approximation de Gauss avec une pupille proche de 3 mm, au détriment de l'éclairement rétinien abaissé de 5 fois entre 5 mm et 3 mm (images J.-F. Le Gargasson). B. Influence de la taille de la pupille sur la qualité de l'image.

Dossier

Pupille apparente, pupille réelle d'entrée lumineuse ; efficacité de l'effet Stiles-Crawford

Réalisons un petit calcul pour imaginer l'extraordinaire performance visuelle que permet le jeu pupillaire normal. Reprenons notre pupille de **5 mm** : l'effet grossissant de la cornée et la profondeur de la chambre intérieure (environ 3 mm) l'augmentant de 14%, et l'effet Stiles-Crawford éliminant 30% de la transmission lumineuse à effet diffractif, sa surface réelle est donc de $\pi r^2 = (5/2) (5/2) (3,1416) = 19,635 \text{ mm}^2$; mais la pupille d'entrée réelle sera de 86% x 70% de cette valeur, soit $19,635 \times 0,86 \times 0,70 = 11,820 \text{ mm}^2$ et le nouveau $r^2 = 11,820/3,1416$, soit $3,762 \text{ mm}^2$ et $r = \sqrt{3,762 \text{ mm}^2} = 1,939 \text{ mm}$, d'où $d = 3,88 \text{ mm}$.

L'effet Stiles-Crawford rétrécit donc la pupille apparente de **5 mm à 3,88 mm** d'entrée lumineuse réelle : soit une réduction de $5 - 3,88 = 1,12 \text{ mm}$, et avec une surface d'entrée réduite à 60% de l'initiale ($0,86 \times 0,70 = 0,60$).

Avec une pupille de 4,5 mm, le calcul ne donne plus qu'une réduction pupillaire de 1 mm. Soit 3,5 mm. Et pour 3 mm, environ 2,3 mm ou une réduction de 0,70 mm.

En l'absence d'altération diffractive centro-pupillaire, l'effet Stiles-Crawford est maximal pour des variations pupillaires de 6 à 3 mm et sans action, ou alors négligeable, pour des pupilles $\leq 2 \text{ mm}$ (figure 4, A) [6].

Rappels

Apodisation : le terme apodisation définit tout procédé visant à restructurer une tache de diffraction produite par un instrument optique.

Effet Stiles-Crawford : il est lié à l'effet directionnel des cônes qui sont des cellules ciliées orientées vers le centre de la pupille d'entrée lumineuse de l'œil (point nodal). Les photons non captés directement seront absorbés par l'épithélium pigmentaire et ne pourront ainsi plus être recaptés par d'autres cellules. Cet effet atténue donc la sensibilité rétinienne à la lumière diffractive adjacente au bord pupillaire et renforce ainsi la sensibilité lumineuse au centre de fixation à l'aplomb. de la fovéa.

Approximation de Gauss : si le système optique considéré est un système centré, les angles d'incidence des rayons sont faibles, les points d'incidence sont donc proches de l'axe optique et le système est dit approximativement stigmatique. Ces conditions sont réalisées en cas de pupille d'entrée voisine ou inférieure à 3 mm.

En résumé : le flou visuel et les diffractions interférentielles induites par les aberrations optiques multifocales réalisées par l'orthokératologie stimuleront le jeu pupillaire, dont la focalisation centro-pupillaire sur le signal lumineux le plus intense améliorera la performance visuelle et la profondeur de champ, en les éliminant, lors des fixations.

Résumé pratique des effets orthokératologiques

L'orthokératologie modifie la courbure cornéenne et ainsi l'éclairement rétinien. Elle va donc aussi modifier le jeu pupillaire dans sa dynamique, préalablement plus ou moins figé, ou moins compliant, consécutivement aux amétropies (voir supra). Le diamètre pupillaire du myope en sera donc fréquemment réduit de **1 à 1,5 mm** à la fixation (figure 5) [9], celui de l'hypermétrope se verra plutôt légèrement augmenté de **0,3 à 0,5 mm** (voir cas clinique n° 1). Ce retour à un jeu pupillaire naturel n'est donc possible que par un retour d'équilibre des tonus orthosympathique/parasymphatique restaurés, probablement guidé par la qualité de l'image rétinienne obtenue (figure 4, A et B). Car l'étude aberrométrique centrée sur la nouvelle pupille de fixation réduite chez le myope ne montre pas plus d'aberration qu'avant l'adaptation [9].

Enfin, l'épargne accommodative obtenue par la modification cornéenne multifocale sélectionnée activement par le jeu pupillaire retrouvé lors de la fixation est indépendante du système zonulo-ciliaire [4,5]. Elle participe donc partiellement au mécanisme de freinage de la myopie, par compensation du retard accommodatif (accommodative lag) avec accroissement du rapport AC/AA [2,10] et peut ainsi être utilisée pour corriger la presbytie.



Figure 5. Myosis relatif après correction parfaite de l'œil gauche et mydriase anisochorique par sous-correction d'une demi-dioptrie myopique de l'œil droit à la fixation (image R. Luscan).

Cas cliniques pratiques

Besoins additionnels/âge et aux performances visuelles

Les besoins additionnels en vision rapprochée sont bien sûr variables d'un individu à l'autre, ils sont conditionnés par l'âge, mais aussi par la performance visuelle (figure 6).

Cas clinique n° 1

Analysons ici le cas de cet homme de 52 ans, hypermétrope de **+1,50** des deux yeux, requérant une addition de **+1,75** pour une acuité de 12/10 et P2. Le réservoir central de la lentille orthokératologique, correctrice hyper-

Dossier

Besoins accommodatifs/âge et performance visuelle

La haute définition diminue la puissance nécessaire d'addition :
Pour 12/10, retrancher 0,50 dioptrie

| âge | Amax | ACC conf Amax/2 | Add conf 0,80m | Add conf 0,66m | Add conf 0,50m | Add conf 0,40m |
|------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ≈ 47 | 2,25 | 1,125 | +0,12D | +0,37D | +0,87D | +1,37D |
| ≈ 50 | 2,00 | 1,00 | +0,25D | +0,50D | +1,00D | +1,50D |
| ≈ 53 | 1,75 | 0,875 | +0,37D | +0,62D | +1,12D | +1,62D |
| ≈ 55 | 1,50 | 0,75 | +0,50D | +0,75D | +1,25D | +1,75D |
| ≈ 57 | 1,25 | 0,625 | +0,62D | +0,87D | +1,37D | +1,87D |
| ≈ 60 | 1,00 | 0,50 | +0,75D | +1,00D | +1,50D | +2,00D |
| ≈ 65 | 0,75 | 0,375 | +0,87D | +1,12D | +1,62D | +2,12D |
| ≈ 70 | 0,50 | 0,25 | +1,00D | +1,25D | +1,75D | +2,25D |

tableau des accommodations résiduelles/âge et des besoins additionnels suivant les distances (JP.MEILLON)

Figure 6. Tableau des accommodations résiduelles/âge.

métropique, a bien créé un bombement d'hyperprolaticité multifocale (plages jaune et orange) intéressant la totalité de l'aire pupillaire et remplissant parfaitement les besoins dioptriques (figure 7). Il convient aussi de noter le discret élargissement pupillaire, qui facilite la vision de loin et témoigne de l'épargne accommodative restituée. Il est souvent plus évident à l'observation directe lors de la fixation.

Cas clinique n° 2

Autre cas, un peu extrême mais facilité par une cornée initiale assez oblate et concernant un homme de 55 ans, hypermétrope de +4,50 (-0,75 à 120°), nécessitant une addition de +2 pour 12/10 P1,5 sur son œil droit (figure 8). Ici encore, le dôme d'hyperprolaticité multifocale intéresse la totalité de la surface pupillaire. Le résultat final donnant un confortable 10/10 P2 binoculaire.

Cas clinique n° 3

Analysons ce troisième cas d'une femme de 47 ans, myope astigmatique de -4,25 (-2,50 à 145°) sur son œil droit (l'œil gauche est similaire avec axe à 60°), totalement réticente aux lunettes (figure 9). Elle portait depuis 10 ans des lentilles souples hydrophiles rendues très instables par un astigmatisme bilatéral asymétrique lui laissant 7/10 P2 en 2012. L'équipement en orthokératologie renouvelé, inchangé depuis cette date, a remonté progressivement son acuité à 10/10 P1,5 en 2015. On notera ici la pupille stable à moins de 3 mm et parfaitement centrée adjacente à la pente interne de l'anneau en demi-tore ovale myopisant. Sa forme représente ainsi la fusion des aberrations de Zernike, classées Z⁰/4 et Z⁻²/2. Sa réserve accommodative immédiatement disponible s'élève à 1,5 dioptrie. Mais elle pourra augmenter en fonction de son jeu pupillaire et de l'éclairement disponible.

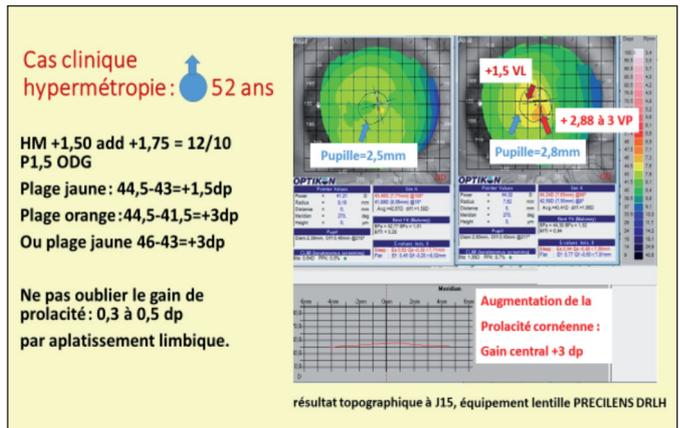


Figure 7. Cas clinique n° 1 (image R. Luscan).

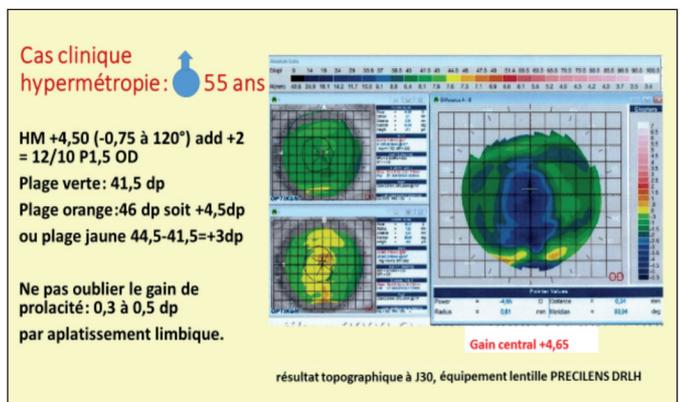


Figure 8. Cas clinique n° 2 (image R. Luscan).

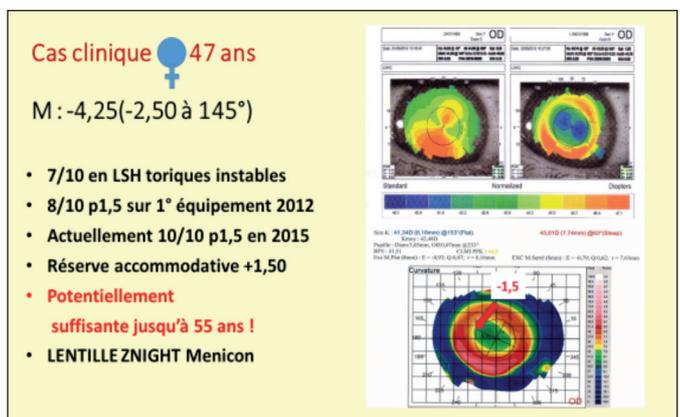


Figure 9. Cas clinique n° 3 (image R. Luscan).

Cas clinique n° 4

Un ultime cas d'un homme de 47 ans, myope de -4 globalement symétrique et requérant une addition de +1,25 pour 12/10 P2. Ce cas illustre bien le retour à un

myosis de fixation plus serré et dynamique avec un diamètre passé de 4,65 à 3,65 mm, bien situé dans la pente interne de l'anneau de demi-tore myopisant (figure 10).

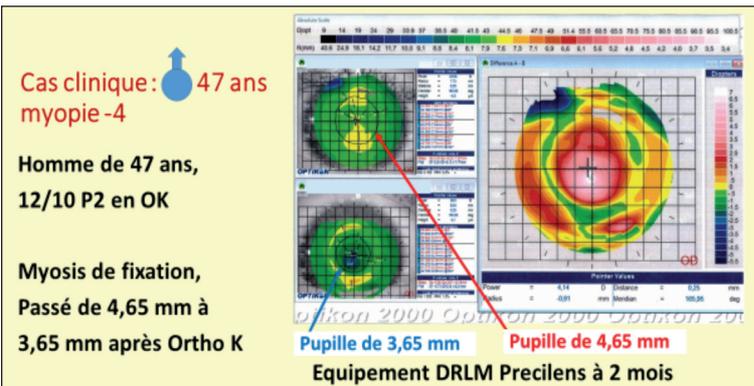


Figure 10. Cas clinique n°4 (image R. Luscan).

Cas cliniques A et B

Ces deux cas sont réunis sur la figure 11 pour illustrer respectivement sur A, la mauvaise position de l'anneau de demi-tore myopisant, ici, inexploitable par le jeu pupillaire du fait de son éloignement. Et sur B, sa correcte position adjacente à la pupille, dans une zone proche de l'apex de l'anneau. Le patient A de 44 ans, dont l'œil droit, désormais emmétrope, a bénéficié d'un lasik pour une myopie de -3,75, réalisé par moi-même il y a 20 ans, nécessite une addition proximale de +0,75 ODG pour une lecture confortable de près, malgré une pupille apparente de 3,3 mm. La patiente B, myope de -4 de son œil droit, corrigé par orthokératologie, dispose d'une réserve accommodative lui permettant d'atteindre 53 à 55 ans sans recours itératif à une addition de près.

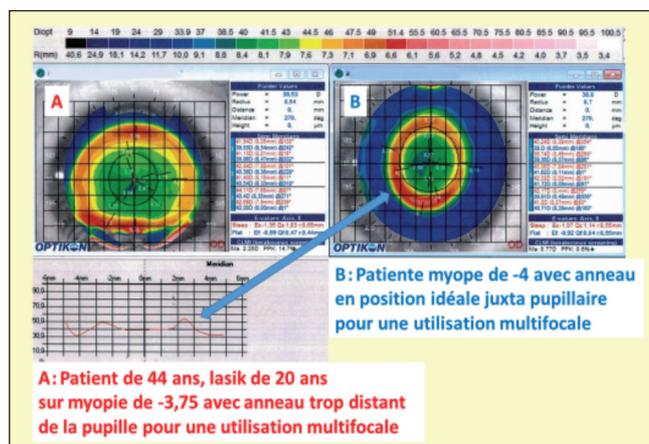


Figure 11. A. Anneau trop distant, d'où addition nécessaire + 1 pour P2. B. Anneau bien positionné pour multifocalité jusqu'à un âge supérieur ou égal à 55 ans (image R. Luscan).

Conseils pratiques et limites d'efficacité

Pour un résultat optimal, il conviendra de ne prendre que des patients très motivés et conscients du temps et du délai parfois difficiles à faire coïncider avec certains emplois du temps.

- Comme dans les autres équipements précédents, aucun marquage épithélial ou kératite ponctuée positive à la fluorescéine ne doit être accepté après ablation de la lentille.
- Bien évaluer le jeu pupillaire par l'examen du réflexe photomoteur du patient (RPM).
- Se méfier aussi des fixations erratiques avec **grands angles kappa**, potentielles sources de coma !
- Rechercher le meilleur centrage possible de l'anneau myopisant qui doit être adjacent au rebord pupillaire (figure 11), mais surtout peu éloigné et encore moins trop pénétrant dans l'aire pupillaire. Là encore, il y a possible source de **coma** avec diffractions centro-pupillaires non éliminables par l'effet Stiles-Crawford (figure 12), un discret décentrement temporel avec entrée de l'apex de l'anneau en nasal est parfois tolérable. Il sera assez semblable à celui des lentilles souples à addition périphérique, souvent naturellement décentrées par l'angle Kappa et la transition limbique plus haute en nasal.

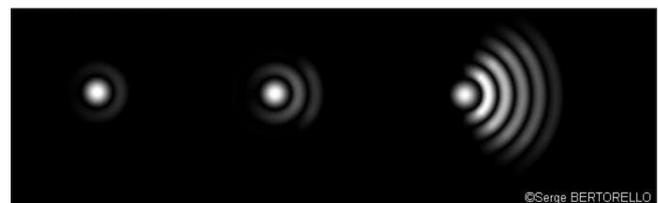


Figure 12. Images des diffractions centro-pupillaires par coma liées à la pénétration partielle de l'anneau myopisant dans l'aire pupillaire, non éliminable par l'effet Stiles-Crawford (image S. Bertorello).

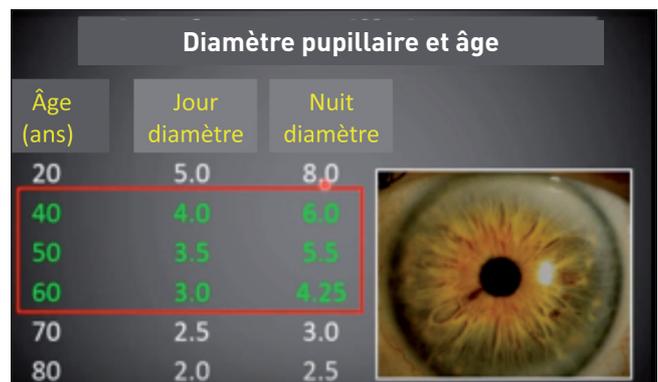


Figure 13. Compliances pupillaires jour/nuit et âges (R. Kojima ; Pacific University Oregon).

Dossier

- Chez l'hypermétrope de plus de 60 ans, se méfier du myosis relatif, dont la compliance s'affaiblit avec l'âge (figure 13).

Indications

Le principe correctif de l'orthokératologie reposant sur la modulation de l'épaisseur épithéliale cornéenne, il est donc théoriquement limité par l'épaisseur de cette couche, soit environ $50 \mu \pm 10\%$. Nos possibilités correctives courantes sont donc de -5 à $+5$ dioptries $\pm 10\%$ avec 1 dioptrie/10 μ d'épithélium modifié. Il peut arriver d'obtenir des corrections myopique > -6 , voire $-6,50$, elles sont possibles avec des anneaux de demi-tore myopisants de plus petits diamètres dont la pente interne s'avère plus abrupte du fait de la plus courte distance entre leurs apex et l'axe optique. Et aussi en cas de grandes valeurs d'excentricité, si les lentilles sont réalisables ($> 0,70$).

Myopie

Si une myopie moyenne modérée ≥ -2 est idéale pour commencer, les réfractions entre -2 et $-5,50$ chez les myopes, et entre $+1$ et $+3,5$ pour les hypermétropes, en sont les indications idéales suivant les possibilités tirées des données kératométriques topographiques initiales. Les emmétropes peuvent être équipés par une légère bascule monofocale de l'œil dominé, pour une presbytie initiale. Toutefois, je préfère personnellement le respect de la symétrie d'équipement binoculaire restituant la synchronie naturelle et doublant ainsi la définition visuelle à chaque plan de fixation.

Hypermétropie

Dans l'hypermétropie avérée, je prescris la réfraction lunette hypermétropique saturée avec le cylindre exprimé en négatif, à laquelle j'ajoute une demi-correction de l'addition minimale de près.

Soit $+3,25$ pour un sujet de 50 ans avec $+2,50$ ($-0,75$ à 0°) ADD $+1,50$ avec 12/10 et P2 ; donc $+2,50 + 1,50/2 = +3,25$.

Remarques communes

Cet équipement suffit habituellement pour une lecture de corps de polices d'impression courants, toutefois ceux-ci diminuant ou étant présentés sur des supports mobiles moins lumineux ou d'utilisation plus rapprochée. L'usage d'une correction additionnelle accessoire d'une demi-valeur de l'addition/âge sera alors prescrit.

Il me paraît plus prudent de ne se lancer dans l'équipement des presbytes qu'après une certaine maîtrise pratique et des adaptations réussies en ortho-K portant sur quelques dizaines de patients incluant les réfractions monofocales courantes. Enfin, il convient de se méfier

des équipements de fortes amétropies (≥ -6 ou $\geq +4,5$). Les résultats se révélant souvent instables sur le long terme, la déception des patients peut être importante au regard des espoirs suscités par les premiers résultats.

Toute la précision de nos équipements reposera sur la précision, la qualité des topographies et leur reproductibilité, permettant ainsi la limitation du recours encore trop fréquent aux échanges.

Conclusion

L'orthokératologie restaure une vision naturelle œil nu à toutes distances, créant une épargne accommodative indépendante du système zonulo-ciliaire. Elle utilise pour cela le retour d'un jeu pupillaire naturel sur une cornée devenue multifocale, tous deux induits par la méthode même.

Cette vision semble possible jusqu'à un âge très avancé en l'absence de cataracte, dans un environnement lumineux suffisant, adapté pour un bon éclairage rétinien. Elle supprime tout dioptré additif de compensation, respectant la physiologie lacrymale normale en période diurne.

Références bibliographiques

- [1] Croft MA, McDonald JP, Katz A *et al.* Extralenticular and lenticular aspects of accommodation and presbyopia in human versus monkey eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2013;54(7):5035-48.
- [2] Ren Q, Yue H, Zhou Q. Effects of orthokeratology lenses on the magnitude of accommodative lag and accommodative convergence/accommodation. *Zhong Nan Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban.* 2016;41(2):169-73.
- [3] Mutti DO, Mitchell GL, Hayes JR *et al*; CLEERE Study Group. Accommodative lag before and after the onset of myopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2006;47(3):837-46.
- [4] García-Lázaro S, Ferrer-Blasco T, Radhakrishnan H *et al.* Artificial pupil versus contralateral balanced contact lens fit for presbyopia correction. *Arq Bras Oftalmol.* 2014;77(2):76-80.
- [5] Zheleznyak L, Jung H, Yoon G. Impact of pupil transmission apodization on presbyopic through-focus visual performance with spherical aberration. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2014;55(1):70-7.
- [6] Hickenbotham. A, Tiruveedhula. P, Roorda. A. Comparison of spherical aberration and small pupil profiles in improving depth of focus for presbyopic corrections. *J Cataract Refract Surg.* 2012;38(12):2071-9.
- [7] Rodieck RW. *The first steps in seeing.* Sinauer Associates, 1998.
- [8] Faria-Ribeiro M, Navarro R, González-Méjome JM. Effect of pupil size on wavefront refraction during orthokeratology. *Optom Vis Sci.* 2016;93(11):1399-1408.
- [9] Leconte M. Adaptation en lentilles de contact d'orthokératologie. Analyse réfractive, topographique, aberrométrique et endothéliale, à propos de 34 yeux après 3 mois de port. Thèse pour le diplôme d'État de Docteur en médecine, 2015. Faculté de médecine Henri Warembourg, université Lille 2 Droit et Santé.
- [10] Zhu M, Feng H, Zhu J, Qu X. The impact of amplitude of accommodation on controlling the development of myopia in orthokeratology. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi.* 2014;50(1):14-9.