



D. GATINEL
Fondation Ophtalmologique Adolphe de Rothschild, PARIS.
CEROC (Centre d'Expertise et de Recherches en Optique Clinique).
gatinel@gmail.com

Correction de la presbytie : la multifocalité personnalisée grâce aux aberrations optiques de haut degré

Les techniques chirurgicales dites multifocales sont destinées à compenser la perte du pouvoir accommodatif liée à l'âge et reposent sur l'augmentation de la multifocalité (cornéenne pour le presbyLasik, interne pour l'implant pseudophaque multifocal réfractif). Sur le plan réfractif, ces procédures partagent le même objectif que l'adaptation de lentilles de contact multifocales. Elles en diffèrent toutefois par leur méthode (soustractive et non additive), leur site d'action (stroma cornéen pour le laser/chambre postérieure pour les implants) et leur non réversibilité.

L'utilisation d'une correction multifocale diffère également des techniques de monovision qui reposent sur la délivrance de traitements monofocaux, et où un œil (généralement l'œil dominant) est destiné à la vision de loin, alors que l'autre l'est à la vision de près.

La multifocalité est souvent assimilée à une multiplicité de puissances réfractives affectées à différentes zones pupillaires ; cependant, ce type de représentation ne permet pas de véritablement apprécier l'effet d'une correction multifocale sur la vision de loin, dont le maintien d'une certaine qualité est l'élément clé d'une chirurgie réussie.

■ FRONT D'ONDE ET MULTIFOCALITE

Plusieurs indices pointent vers le front d'onde oculaire comme un élément clé pour la multifocalité.

Le recueil du front d'onde oculaire permet une étude exhaustive des propriétés réfractives de l'œil : il permet de prédire la réfraction des rayons entrants en tout point de la pupille. Cette prédiction concerne un large diamètre pupillaire, car on effectue généralement la mesure de front d'onde en conditions

mésopiques. A la manière du vieil adage "Qui peut le plus peut le moins", la connaissance du front d'onde sur un large diamètre permet le calcul de la puissance dioptrique locale sur n'importe quelle sous-zone pupillaire. Connaître le front d'onde oculaire permet aussi de prédire la qualité de l'image rétinienne, ainsi que les performances pour des cibles observées en vision de loin et de près, et ce pour différents diamètres ou sous domaines pupillaires. Signalons au passage que l'asphéricité cornéenne (facteur Q), ou tout autre type de description semi-quantitative du profil cornéen (front d'onde cornéen seul) ne fournissent qu'un aspect parcellaire, plus topographique que fonctionnel, et relié de manière très indirecte aux propriétés réfractives de l'œil concerné.

Pour comprendre le lien entre aberrations et profondeur de champ, examinons une situation (théorique) où la mesure du front d'onde oculaire conclut à l'absence d'aberration de haut degré (front d'onde plan après correction de l'amétropie sphéro-cylindrique). Dans cette situation, les rayons lumineux issus d'un point source situé à l'infini sont focalisés de manière ponctuelle dans une région de l'espace (la rétine du patient emmétrope). La qualité optique est excellente (l'image d'un point est un point : stigmatisme), mais la profondeur de champ faible, ce qui signifie que si l'on éloigne ou rapproche le point fixé, la qualité de l'image rétinienne se dégrade rapidement (*fig. 1*).

Si l'on introduit une aberration optique de haut degré, la qualité optique se détériore (réduction du stigmatisme), mais la profondeur de champ augmente, c'est-à-dire que si l'on déplace le point source vis-à-vis de l'œil, la dégradation de l'image sera moindre que dans le cas précédent. L'enjeu d'une correction multifocale efficace et bien tolérée est d'accroître la profondeur de champ, sans trop réduire la qualité optique de l'œil, en particulier en vision de loin !

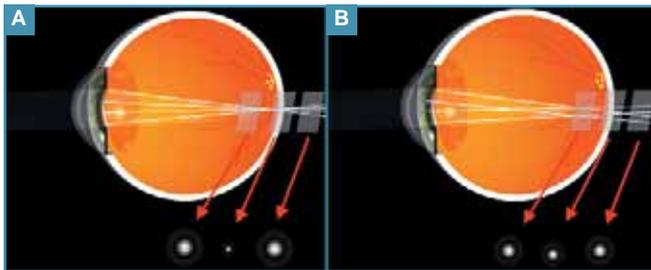


Fig. 1 : Aberrations optiques et profondeur de foyer (pour un même diamètre pupillaire). **A :** en l'absence d'aberrations optiques de haut degré, le stigmatisme est respecté, la profondeur de foyer (la profondeur de champ dans l'espace objet) est réduite. **B :** en présence d'aberrations optiques de haut degré, il existe une réduction du stigmatisme, mais la profondeur de foyer augmente (D. Gatinel).

Si l'absence de vision utile de près non corrigée constitue un échec pour le presbyte désireux de s'affranchir totalement des lunettes, c'est toutefois la dégradation de qualité de la vision de loin qui est à l'origine des plaintes les plus véhémentes des patients et mécontents de la chirurgie. Cette dégradation est liée à l'induction d'un taux élevé d'aberrations optiques de bas et haut degrés – que l'étude du front d'onde permet d'ailleurs de qualifier et quantifier. L'induction d'un taux élevé d'aberrations optiques de haut degré peut être à l'origine d'une réduction de la qualité de vision, alors même que l'acuité visuelle à contraste maximal demeure préservée. Certaines plaintes fonctionnelles (halos, images fantômes, éblouissements) observées après chirurgie réfractive empirique de la presbytie ou insertion d'implants multifocaux sont souvent corrélées à l'induction d'un taux élevé d'aberrations optiques de haut degré [1-4]. L'aberration de type coma est classiquement responsable d'images fantômes, de diplopie monoculaire, alors que l'aberration sphérique est souvent incriminée en cas de halos ou d'éblouissements [5].

Nous avons étudié avec attention le profil aberrométrique d'yeux adaptés avec succès avec divers types de lentilles multifocales [6]. Les aberrations retrouvées significativement élevées lors du port de ces lentilles étaient de type coma et aberrations sphériques. Une partie de ces aberrations reflétait le caractère multifocal des lentilles testées, tout en étant liée à l'induction d'une acuité visuelle de près.

Cela n'est pas très étonnant si l'on considère que l'aberration sphérique correspond au différentiel de réfraction entre le centre et les bords de la pupille. Un œil qui présente un taux élevé d'aberration sphérique est donc un œil avec une variation de la réfraction entre le centre et les bords de la pupille : c'est un œil multifocal (**fig. 2**) ! Les lentilles multifocales avec addition pour la vision de près au centre induisent de l'aber-

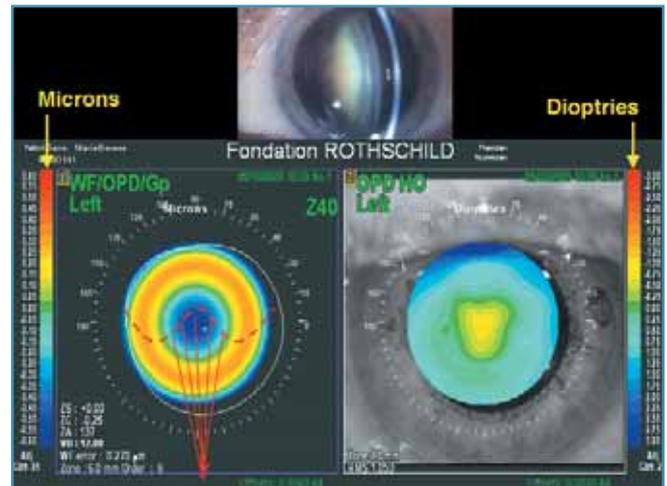


Fig. 2 : Exemple de front d'onde dominé par l'aberration sphérique négative (à gauche), induite par une cataracte nucléaire. Les rayons lumineux peuvent être assimilés à la direction locale de propagation du front d'onde. L'examen du profil du front d'onde sur la carte WF (wavefront) révèle la présence d'une concavité centrale (milieu du "sombbrero"), ce qui traduit l'existence d'une "myopisation" centrale. Cette addition est évidente sur la carte OPD des variations de la puissance dioptrique dans la pupille (à droite) (D. Gatinel).

ration sphérique négative, alors que les lentilles avec addition pour la vision de près en périphérie induisent de l'aberration sphérique positive [6]. Nous avons postulé que si une partie de ces aberrations sphériques était directement liée à la géométrie asphérique de ces lentilles, les aberrations de type coma étaient probablement induites par leur décentrement relatif vis-à-vis de la pupille irienne. En effet, les lentilles multifocales testées présentaient toutes une symétrie de révolution et ne pouvaient donc induire d'aberrations impaires en cas de centrage optimal. Le décentrement de la pupille vis-à-vis de la cornée et du sac capsulaire, l'absence d'axe optique commun de ces structures (corrélés à la valeur de l'angle kappa) rendent inéluctable l'induction de coma lors de l'insertion ou la pose de lentilles multifocales.

La coma peut être comprise comme une aberration qui naît d'un gradient de pouvoir réfractif entre deux bords opposés de la pupille. Si ce gradient est tel qu'il correspond à une augmentation de la puissance réfractive en nasal inférieur (direction habituelle du myosis accommodatif), il y a alors une incontestable probabilité pour que cette aberration de coma soit source de multifocalité et de meilleure vision de près (**fig. 3**).

L'existence d'un myosis accommodatif permet de sélectionner la partie centrale (réduction concentrique du diamètre) ou paracentrale (réduction non concentrique du diamètre, avec décalage généralement nasal inférieur) de l'aberration considérée. Dans le cas de l'aberration sphérique négative et de la

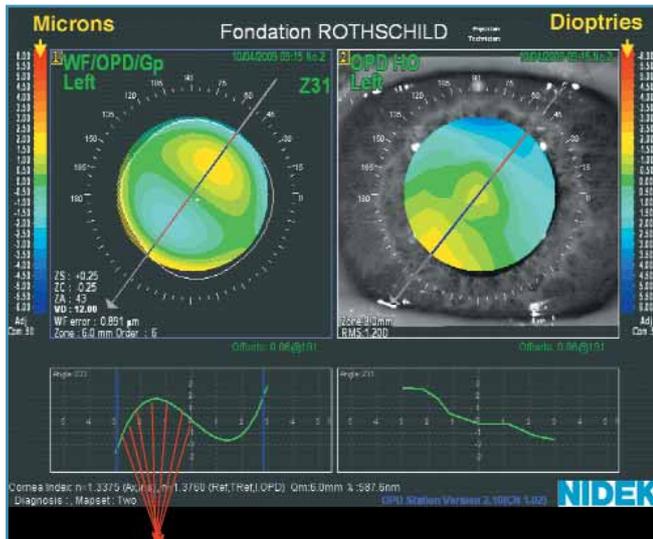


Fig. 3 : Aberration de coma oblique, de direction nasale inférieure (à gauche). Le front d'onde oculaire a été mesuré chez un patient de 59 ans opéré de Lasik hypermétrope. L'acuité visuelle non corrigée est de 8/10 Parinaud 2 sans correction. Cette aberration explique l'augmentation de puissance dioptrique en nasal inférieur (à droite), elle-même à l'origine des performances en vision de près non corrigée (D. Gatinel).

coma oblique positive, ce *shift* pupillaire modifie la réfraction dans le sens de la myopisation, utile à la vision de près. Cela suggère que l'analyse des mouvements de constriction pupillaire doit être effectuée si l'on veut établir un traitement multifocal optimisé.

Oshika *et al.* ont calculé le taux d'aberrations optiques de la cornée de patients pseudophaques [7]. L'influence de ces aberrations était évaluée en stimulant la fonction d'étalement du point (PSF) et la courbe de contraste d'origine optique (MTF) à partir du recueil du front d'onde. Une corrélation entre pseudo-accommodation et aberration de type coma verticale a été retrouvée. Ces auteurs ont également démontré qu'une variation de puissance de 0.50 D (défocalisation) avait plus d'effet délétère sur la qualité de l'image rétinienne lorsque l'œil ne présentait aucune aberration de haut degré que lorsqu'il présentait un taux modéré de coma.

Il apparaît ainsi que pour optimiser la performance du traitement multifocal de la presbytie, la mise au point d'un profil personnalisé, qu'il soit cornéen ou délivré par l'insertion d'un implant, doit impérativement prédire la valeur du taux d'aberrations optiques nécessaire et suffisant pour augmenter la profondeur de champ du patient considéré. Cela implique la connaissance des aberrations optiques préexistantes et de la dynamique pupillaire.

Le front d'onde multifocal construit par une méthode non empirique est indépendant d'un support organique (cornée, cristallin, etc.), mais peut être induit pour devenir celui de l'œil du patient par différents vecteurs : profil d'ablation cornéenne au laser Excimer (obtenu par "soustraction" cornéenne du chemin optique séparant les aberrations optiques préopératoires du front d'onde multifocal idéal), lentille de contact ou implant intraoculaire customisés, etc. La modulation du front d'onde initial vers le front d'onde idéal multifocal dictera donc les caractéristiques de l'implant ou de la lentille multifocale.

La récente introduction des implants ajustables par irradiation lumineuse ultraviolette (*Light Adjustable Lens*) fournit un vecteur très adapté à la mise en pratique de ce type de concept ; une fois l'implant posé, il est possible de prendre en compte sa position relative au jeu pupillaire et au dioptre cornéen. Plutôt que se contenter d'une approche aussi grossière que l'induction d'une "pastille" d'addition dioptrique centrale sur l'implant sans tenir compte du retentissement sur la vision de loin et des aberrations préexistantes, il apparaît avantageux d'intégrer dans le *pattern* d'irradiation *in vivo* de la lentille à la fois la correction des aberrations "inutiles" pour la multifocalité et néfastes à la qualité de vision de loin, et l'induction d'un "cocktail" d'aberration correspondant au meilleur compromis entre respect d'une certaine qualité optique de loin et augmentation de la profondeur de champ.

■ LA MULTIFOCALITE MAITRISEE : L'UTILISATION RAISONNEE DES ABERRATIONS DE HAUT DEGRE POUR ACCROITRE LA PROFONDEUR DE CHAMP

Si l'idée du design d'un front d'onde multifocal semble séduisante, il reste à surmonter une difficulté d'ordre analytique : quelles sont les relations précises entre le taux d'une aberration de haut degré donnée et les variations de puissance dioptrique induites localement ?

Nous avons étudié les relations entre aberrations optiques de haut degré afin de mieux comprendre leurs effets vis-à-vis de la multifocalité. Nous avons alors découvert qu'il était possible de prédire mathématiquement la variation moyenne de focale induite par une aberration donnée, et ce pour un diamètre pupillaire donné (*fig. 4A et 4B*). Cette variation focale n'est pas restreinte aux aberrations de degré 2 (myopie et astigmatisme qui modifient l'équivalent sphérique), mais concerne l'ensemble des imperfections optiques du système oculaire et donc les aberrations de haut degré.

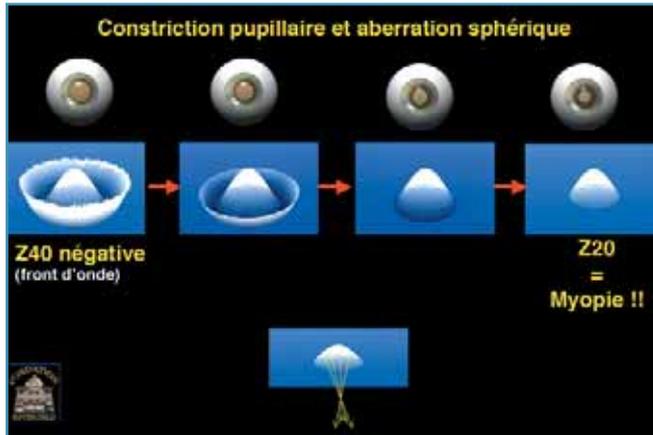


Fig. 4A : Effet des variations du diamètre pupillaire (constriction) sur l'aberration sphérique. Si l'on "sélectionne" le centre de la déformation du front d'onde, on passe d'un profil "en sombrero", à un profil "en calot". Mathématiquement, cette déformation correspond à une focalisation des rayons vers un *ponctum remotum* à distance "finie" (myopie). L'induction d'une myopie centrale est synonyme de l'induction d'une addition centrale utile pour la vision de près. La constriction pupillaire en vision de près favorise cette "myopisation" (D. Gatinel).

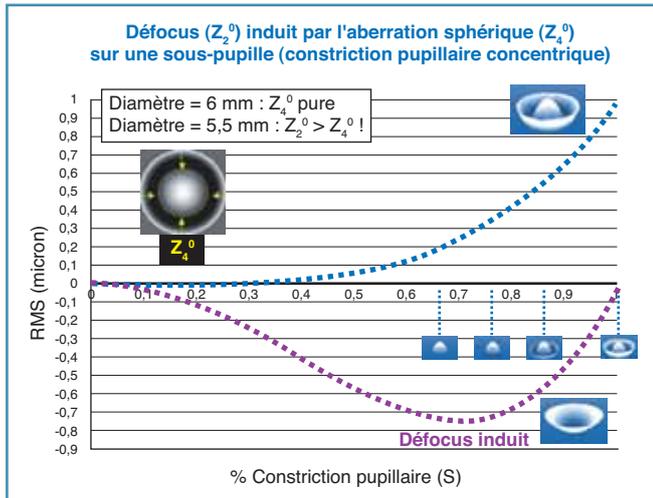


Fig. 4B : L'aberration sphérique exprimée par le polynôme de Zernike Z_{40} induit du défocus sur une zone centrale obtenue dans cet exemple par réduction concentrique (voir les petits schémas en médailles). Notre algorithme permet le calcul du défocus éventuellement présent sur n'importe quelle sous-pupille pour chacune des aberrations répertoriées dans la classification de Zernike. Dans cet exemple, le défocus maximal est atteint quand le diamètre pupillaire est réduit de 30 %. Toutes les aberrations ne sont pas égales en termes de défocus induits, et de pourcentage de réduction pupillaire optimal. Certaines aberrations n'induisent du défocus que sur des sous-pupilles non concentriques (D. Gatinel).

En particulier, il est possible de calculer l'addition (en dioptries) induite par l'aberration sphérique négative sur une sous-pupille particulière (**fig. 3B**). Pour cela, il faut connaître l'amplitude de variation du diamètre pupillaire ainsi qu'un éventuel déplacement du centre pupillaire mis en jeu lors du myosis accommodatif.

1. – Design des zones réfractives

Le recueil et l'étude des variations du diamètre pupillaire sont une étape cruciale. La pratique de la conduite de nuit et/ou d'activités en ambiance mésopique représente une situation particulièrement exigeante pour la réalisation d'une technique de chirurgie multifocale maîtrisée. Dans tous les cas, le patient doit être prévenu du risque de dégradation de sa qualité de vision nocturne.

Le pourtour des zones respectivement dédiées à différentes focales (vision de loin, vision intermédiaire, vision de près) peut être déterminé à partir du jeu pupillaire d'un patient donné, et cela pour une activité donnée dans une ambiance lumineuse donnée. Par exemple, il est possible d'étudier les variations du diamètre et du centrage de la pupille dans différentes conditions de luminosité (photopique, mésopique, scotopique) et de distance de travail (33 cm, 70 cm, infini, etc.). Le *shift* pupillaire en vision de près doit être mesuré, afin de définir un sous-domaine optimal pour l'addition de près. Le recueil de ces données (jeu pupillaire, souhaits du patient) permet de définir les contours des zones réfractives.

2. – Choix des aberrations optiques de haut degré

Plutôt que de "jouer" avec le seul défocus myopique (correction dioptrique accomplie sur la zone dédiée à la vision de loin, puis addition sur zone de près, etc.), nous avons proposé d'utiliser d'emblée une sélection d'aberrations de haut degré pour bâtir la correction multifocale sur les zones réfractives précédemment établies. Rappelons que ces aberrations contiennent du défocus myopique sur des sous-domaines concentriques ou non !

La combinaison optimale est obtenue grâce à un algorithme spécial qui utilise des fonctions mathématiques d'optimisation à partir de contraintes prédéterminées. L'algorithme "sélectionne" le type et le taux exact d'aberrations de haut degré nécessaire à la construction du front d'onde, permettant d'induire une multifocalité donnée (en fonction de l'addition dioptrique requise et des domaines pupillaires choisis) (**fig. 5**). Nous avons également inclus dans les paramètres d'optimisation pris en compte dans l'élaboration du profil multifocal les éléments quantitatifs de qualité de vision tels que l'erreur RMS du front d'onde, le critère de Strehl (qualité de la PSF) ou l'aire sous la courbe de la fonction de transfert de modulation-MTF (contraste de l'image rétinienne). De ce fait, le taux et les conséquences sur la qualité de vision de la combinaison des aberrations optiques introduites par une correction multifocale donnée sont connus avant délivrance du traitement (**fig. 6**) !

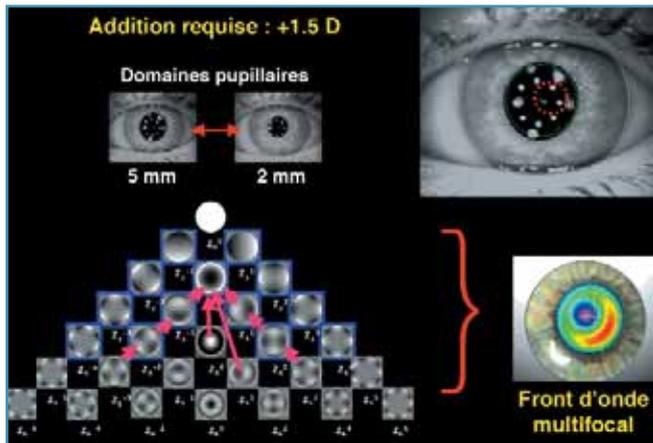


Fig. 5 : Construction d'un front d'onde multifocal. A partir des données du jeu pupillaire, on construit des sous-pupilles. Connaissant le "degré de multifocalité" induit par chaque aberration, on peut alors générer un ou plusieurs fronts d'onde oculaires multifocaux, pour induire exactement le degré d'addition prédéfini sur le domaine souhaité (ex. : 1.5 D sur une sous-pupille de 1,5 mm) (D. Gatinel).

Notre méthode offre une souplesse accrue, puisque la correction prend la forme d'un front d'onde oculaire théorique résultant de l'intégration d'une correction pour la vision de loin et la vision de près, voire d'une ou plusieurs visions intermédiaires. Concernant le design de lentilles multifocales (ex. : lentille ajustable à la lumière, implant multifocal personnalisé, profil d'ablation pour le presby-Lasik), l'intégration des données correspondant à la correction pour la vision de loin et de près en un seul profil d'ablation constitue un progrès tangible, éliminant le risque de superposition des zones optiques et de transition induit par les traitements séquentiels.

Une autre possibilité de personnalisation offerte par cette méthode est de favoriser l'expression de certaines aberrations dans le front d'onde résultant final par une technique de pondération sélective. Cela est important si l'on réalise que des mécanismes de compensation neuronale peuvent pondérer l'effet subjectif d'une aberration donnée sur la fonction visuelle [8].

Il est possible de proposer pour un même patient une ou plusieurs corrections multifocales en pondérant différemment vision de loin et vision de près, etc. Par exemple, différentes magnitudes pour l'addition de

près peuvent être testées, afin de déterminer une marge de sécurité pour la préservation de la qualité de vision de loin.

Ces tests peuvent être objectifs (calcul de l'impact sur la qualité de l'image rétinienne) ou subjectifs (utilisation de l'optique adaptative pour montrer au sujet l'effet de la correction proposée). Cela est d'autant plus important que les candidats à la multifocalité en ignorent souvent les contraintes visuelles, sauf quand ils ont l'expérience du port de lentilles de contact multifocales :

- la connaissance du taux des aberrations induites permet de simuler l'effet de la correction multifocale envisagée par le calcul de métriques objectives de qualité optique comme la Fonction d'Étalement du Point et la courbe de Transfert de Modulation,
- la réalisation d'images simulant la déformation d'optotypes, de lentilles comportant les corrections générées ou d'une technique d'optique adaptative peut également permettre d'étudier la perception subjective d'un patient donné à la multifocalité proposée. Ces techniques permettent d'étudier l'effet théorique de la correction avant sa réalisation.

Dès lors que l'on maîtrise les liens entre dynamique pupillaire, aberrations et puissance dioptrique induite, la possibilité de créer des *patterns* personnalisés de multifocalité devient réalité.

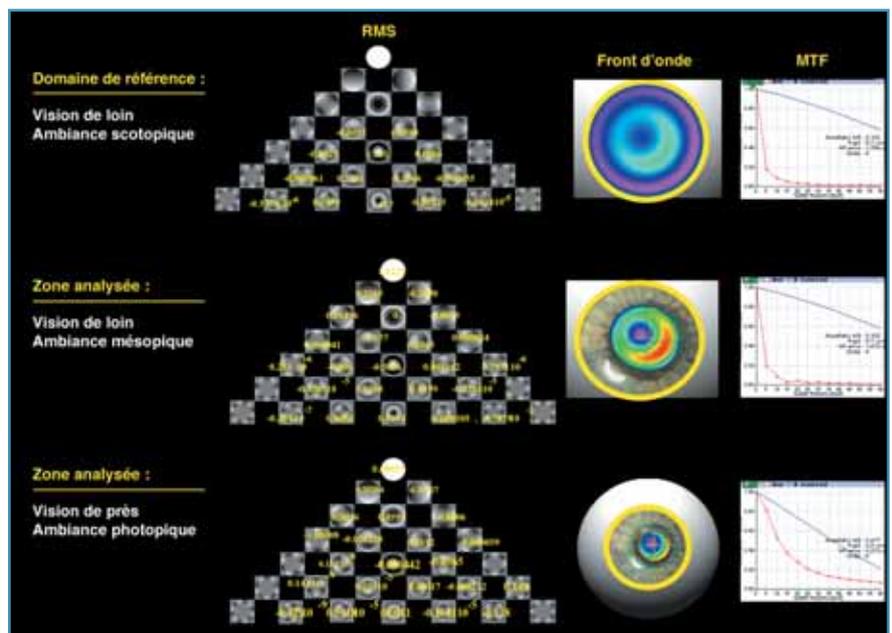


Fig. 6 : Exemple de traitement multifocal proposé pour une série de diamètres pupillaires obtenus dans diverses conditions de luminosité et de distances d'observation. L'utilisation d'une méthode analytique et non purement empirique permet de prédire de façon précise le taux RMS et la nature exacte de chaque aberration induite pour l'obtention de la multifocalité, en plus de la correction éventuelle de la vision de loin. La connaissance de ces aberrations permet en retour de prédire l'effet du traitement sur la qualité de vision (ici par exemple le calcul de la fonction de transfert de modulation : MTF) (D. Gatinel).

3. – Résultats attendus du contrôle de la multifocalité induite

Notre ambition initiale était de suppléer à l'absence de modèle précis pour l'induction maîtrisée de la multifocalité. Nous avons attentivement étudié les résultats issus de simulations théoriques réalisées à partir d'un algorithme développé pour générer des corrections multifocales à partir de données cliniques recueillies auprès de patients bien réels (dynamique pupillaire, degré d'addition à pourvoir). Les *patterns* que nous avons générés étaient très semblables en qualité (type d'aberrations induites) et en quantité (taux RMS) à ceux mesurés en pratique clinique chez des sujets présentant une multifocalité efficace et bien tolérée (naturelle ou obtenue après chirurgie comme le Lasik hypermétrope, ou port de lentilles multifocales). De plus, certaines simulations induisent après recalcul pour des diamètres pupillaires intermédiaires un faible degré d'astigmatisme oblique ou inverse, dont l'effet bénéfique sur la multifocalité est admis et documenté [9].

■ CONCLUSION

Les techniques de chirurgie réfractive multifocales destinées à la compensation de la presbytie comme presbyLasik doivent satisfaire un compromis subtil entre pseudo-accommodation accrue et maintien d'une qualité de vision acceptable pour le patient. Ce compromis dépend de divers autres facteurs comme la plasticité cérébrale du patient (adaptation à la modification de la qualité optique), mais reste principalement soumis à l'influence des aberrations optiques générées.

L'aberrométrie est aujourd'hui couramment utilisée pour la compréhension et l'établissement d'un traitement éventuel des troubles de la qualité de vision. Elle fournit une analyse plus précise et se substitue avantageusement à une conception purement "focale" ou "dioptrique" de la multifocalité. Il faut dépasser les explications superficielles ou simplificatrices

(ex. : "fabriquer une cornée prolate") avancées par les tenants de méthodes dites innovantes pour la correction de la presbytie. La simplification n'apporte dans ce domaine qu'un bénéfice marketing, l'aberrométrie étant une discipline relativement nouvelle en ophtalmologie. L'intégration de nombreuses variables est toutefois nécessaire pour atteindre le niveau de prédictibilité et de sécurité nécessaire pour asseoir une technique multifocale.

La prise en compte de paramètres comme la dynamique pupillaire, le contrôle des aberrations optiques induites, ainsi que leur effet sur les variations de puissance réfractive au sein de la pupille sont autant d'étapes incontournables pour améliorer la reproductibilité et les résultats des techniques d'induction de multifocalité pour corriger la presbytie.

Bibliographie

1. SEILER T, KAEMMERER M, MIERDEL P *et al.* Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. *Arch Ophthalmol*, 2000 ; 118 : 17-21.
2. VERDON W, BULLIMORE M, MALONEY RK. Visual performance after photorefractive keratectomy : a prospective study. *Arch Ophthalmol*, 1996 ; 114 : 1465-72.
3. APPEGATE RA, HILMANTEL G, HOWLAND HC *et al.* Corneal first surface optical aberrations and visual performance. *J Refract Surg*, 2000 ; 16 : 507-14.
4. TOMIDOKORO A, SOYA K, MIYATA K *et al.* Corneal irregular astigmatism and contrast sensitivity after photorefractive keratectomy. *Ophthalmology*, 2001 ; 108 : 2209-12.
5. CHALITA MR, XU M, KRUEGER RR. Correlation of aberrations with visual symptoms using wavefront analysis in eyes after laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg*, 2003 ; 19 : S682-6.
6. PEYRE C, FUMERY L, GATINEL D. Comparison of high-order optical aberrations induced by different multifocal contact lens geometries. *J Fr Ophthalmol*, 2005 ; 28 : 599-604.
7. OSHIKA T, MIMURA T, TANAKA S *et al.* Apparent accommodation and corneal wavefront aberration in pseudophakic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2002 ; 43 : 2882-6.
8. ARTAL P, CHEN L, FERNANDEZ EJ *et al.* Adaptive optics for vision : the eye's adaptation to point spread function. *J Refract Surg*, 2003 ; 19 : S585-7.
9. DATILES MB, GANCAYCO T. Low myopia with low astigmatic correction gives cataract surgery patients good depth of focus. *Ophthalmology*, 1990 ; 97 : 922-6

Conflit d'intérêt: Brevet Ocular wavefront-correction profiling United States Patent 20060023162.