

Qualité de vision des patients porteurs d'un implant asphérique prolate après chirurgie de la cataracte

Étude comparative de la vision des contrastes et des aberrations optiques

A. Denoyer, F. Roger, S. Majzoub, P.-J. Pisella

Service d'Ophtalmologie, Centre Hospitalo-Universitaire Bretonneau, Tours.

Correspondance : P.-J. Pisella, Service d'Ophtalmologie, CHU Bretonneau, 2, boulevard Tonnelé, 37044 Tours Cedex. E-mail : pj.pisella@chu-tours.fr
Reçu le 19 juillet 2005. Accepté le 15 décembre 2005.

Quality of vision after cataract surgery in patients with prolate aspherical lens

A. Denoyer, F. Roger, S. Majzoub, P.-J. Pisella

J. Fr. Ophtalmol., 2006; 29, 2: 157-163

Purpose: To assess the quality of vision in pseudophakic patients with a prolate aspherical intraocular lens (IOL) compared to patients with a spherical IOL.

Patients and methods: Twenty patients undergoing cataract surgery were divided into two groups according to the type of IOL: ten prolate aspherical IOLs (TECNIS Z9000, AMO, USA) and ten spherical IOLs (911 CeeOn Edge, AMO, USA). The integrity of ocular functions was assessed with clinical examination and multifocal electroretinogram. Contrast sensitivities were tested preoperatively in photopic, mesopic, and glare conditions. Postoperative examinations included refractive evaluation before and after mydriasis, pupil diameter, contrast sensitivities, and wavefront aberration analysis.

Results: Postoperative best-corrected visual acuity was 0.95 ± 0.13 for the TECNIS group vs 0.98 ± 0.11 for the 911 group ($p=0.32$). Refractive evaluation revealed mydriasis myopic shift in patients with the 911 IOL (-0.10 ± 0.30 D for the TECNIS group vs -0.68 ± 0.21 D for the 911 group, $p=0.002$). Mesopic contrast sensitivity was improved in the TECNIS group regarding medium and high spatial frequencies ($p=0.003$ and $p=0.002$, respectively), whereas photopic and glare contrast sensitivities were equal in both groups. RMS for high-order aberrations was $0.36 \pm 0.07 \mu\text{m}$ in the TECNIS group vs $0.33 \pm 0.19 \mu\text{m}$ in the 911 group ($p=0.21$), and spherical aberration was lower in patients with TECNIS IOL ($Z40=0.03 \pm 0.06 \mu\text{m}$ vs $0.20 \pm 0.14 \mu\text{m}$, for the TECNIS group and the 911 group, respectively, $p=0.029$).

Conclusion: Combining contrast sensitivities and wavefront aberration analysis provided an objective assessment of the quality of vision in pseudophakic patients. Using prolate aspherical IOL could reduce spherical aberration and improve visual acuity, especially in mesopic conditions.

Key-words: Wavefront aberrations, contrast sensitivity, quality of vision, aspherical IOL, cataract.

Qualité de vision des patients porteurs d'un implant asphérique prolate après chirurgie de la cataracte

But : Étude prospective cas-témoins visant à évaluer la qualité de vision des patients porteurs d'un implant asphérique prolate comparativement à un implant sphérique standard.

Patients et méthode : Vingt patients devant avoir une intervention chirurgicale pour une cataracte ont été divisés aléatoirement en deux groupes : 10 patients (10 yeux) ont reçu un implant asphérique prolate (TECNIS Z9000, AMO, États-Unis) et 10 patients (10 yeux) ont reçu un implant sphérique standard (911 CeeOn Edge, AMO, États-Unis). L'absence de pathologie oculaire a été vérifiée par un examen clinique complet associé à un électrorétinogramme multifocal. Le bilan préopératoire comportait en outre une évaluation de la sensibilité aux contrastes en ambiance mésopique, photopique et à l'éblouissement. Le bilan

Les progrès relatifs à l'étude des aberrations optiques ont permis de mieux comprendre les modifications imprimées au front d'onde par le dioptré oculaire [1-4]. Si l'aberrromètre est devenu progressivement un outil indispensable pour la réalisation des profils d'ablation « personnalisés » en chirurgie réfractive, il s'est aussi avéré être une méthode d'évaluation objective des distorsions de l'image dans le cadre de multiples pathologies oculaires ou après traitement chirurgical [5-11]. L'étude de la sensibilité aux contrastes, quant à elle, aborde l'analyse de la qualité visuelle sous un autre angle. Les examens précis et calibrés de sensibilité aux contrastes évaluent la définition visuelle pour des niveaux lumineux définis [12], reflétant ainsi la qualité visuelle de manière plus précise que les échelles visuelles standards, et certainement plus en accord avec la fonction visuelle quotidienne [13, 14].

Concernant la chirurgie de la cataracte, l'amélioration de la qualité de vie de la population nous a conduit à opérer des patients en excellent état général et avec une espérance de vie élevée. Cette chirurgie aujourd'hui rapide, réglée et aux résultats prédictibles a dû ainsi se soumettre à une exigence en terme de qualité de vision, ce qui a favorisé le développement de nouvelles techniques – comme la chirurgie micro-

post-opératoire effectué deux mois après la chirurgie associait une étude de réfraction avant et après mydriase induite, une pupillométrie, une sensibilité aux contrastes ainsi qu'une aberrométrie.

Résultats : La meilleure acuité visuelle postopératoire ne différait pas dans les deux groupes ($0,95 \pm 0,13$ pour le groupe « TECNIS » et $0,98 \pm 0,11$ pour le groupe « 911 », $p = 0,32$). L'évaluation réfractive a révélé une myopisation en mydriase des patients porteurs de l'implant 911 ($-0,10 \pm 0,30$ D pour le groupe « TECNIS » versus $-0,68 \pm 0,21$ D pour le groupe « 911 », $p = 0,002$). Les patients porteurs de l'implant TECNIS ont montré une sensibilité accrue aux contrastes en ambiance mésopique ($p = 0,003$ aux fréquences intermédiaires et $p = 0,002$ aux fréquences élevées), alors que les sensibilités photopique et à l'éblouissement n'étaient pas différentes. La moyenne des aberrations optiques d'ordre élevé était similaire (RMS = $0,36 \pm 0,07 \mu\text{m}$ versus $0,33 \pm 0,19 \mu\text{m}$, respectivement pour les groupes « TECNIS » et « 911 », $p = 0,21$), mais le groupe TECNIS présentait une aberration sphérique significativement inférieure à celle du groupe contrôle ($Z40 = 0,03 \pm 0,06 \mu\text{m}$ versus $0,20 \pm 0,14 \mu\text{m}$, respectivement pour les groupes « TECNIS » et « 911 », $p = 0,029$).

Conclusion : L'étude combinée des aberrations du front d'onde et de la sensibilité aux contrastes a permis une évaluation objective de la qualité de vision après chirurgie de la cataracte. Comparativement à un implant sphérique standard, l'utilisation d'un implant asphérique prolate pourrait réduire les aberrations sphériques et améliorer la vision mésopique du patient pseudophake.

Mots-clés : Aberrométrie, contraste, qualité de vision, implant asphérique, cataracte.

incisionnelle – ou bien de nouveaux types d'implants à géométrie dite asphérique.

L'étude des aberrations optiques nous a appris qu'un dioptré sphérique – à l'instar des implants sphériques conventionnels – entraînait une déformation relative de la périphérie du front d'onde conduisant à un décalage de phase des ondes périphériques de l'image projetée sur la rétine. La réalisation de dioptrés asphériques prolates, c'est-à-dire dont le rayon de courbure est plus élevé en périphérie, a permis de limiter partiellement ou totalement ce déphasage périphérique appelé aussi aberration sphérique ou Z40.

Ainsi, un implant asphérique prolate (TECNIS, AMO, États-Unis) a été développé pour améliorer la fonction visuelle après chirurgie de la cataracte [15, 16]. Son profil antérieur prolate lui confère une aberration sphérique négative, contrairement aux implants sphériques standards qui possèdent un Z40 positif. Cette géométrie spécifique viserait à mieux reproduire les caractéristiques optiques d'un cristallin dont le Z40 se combine à l'asphéricité cornéenne et réduit physiologiquement l'aberration sphérique totale du dioptré oculaire [2, 17-19].

Nous avons conduit une étude prospective cas-témoins incluant une analyse de la sensibilité aux contrastes et une évaluation des aberrations optiques afin d'évaluer l'apport de l'implant TECNIS en terme de qualité de vision. Ce nouveau type d'implant « profilé » pourrait-il améliorer le confort visuel quotidien des patients pseudophakes ?

PATIENTS ET MÉTHODES

Patients

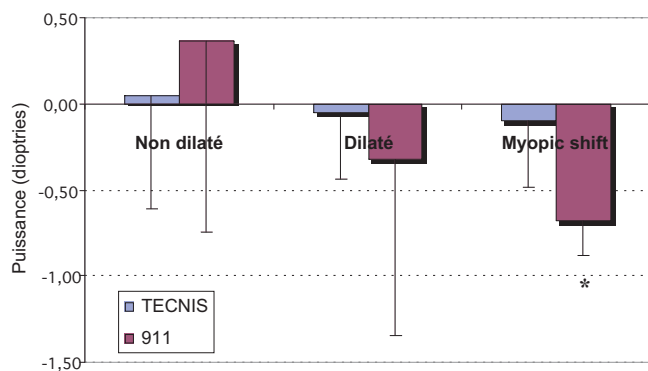
L'étude a inclus 20 patients (20 yeux), divisés aléatoirement en deux groupes : 10 yeux ont reçu un implant asphérique prolate (TECNIS Z9000, AMO, États-Unis) et 10 un implant sphérique standard (911 CeeOn Edge, AMO, États-Unis). L'âge moyen était respectivement

pour les groupes « TECNIS » et « 911 » de $76,1 \pm 4,7$ ans et $72 \pm 7,4$ ans, et le sex-ratio, de 0,25 et de 0,67. La puissance moyenne était de $20,90 \pm 1,74$ D pour les implants TECNIS et de $21,89 \pm 0,99$ D pour les implants 911 ($p = 0,11$). L'absence de toute pathologie oculaire à l'exception de la cataracte a été vérifiée 7 jours avant l'intervention par un examen clinique complet associant examen biomicroscopique, pression intraoculaire et fond d'œil afin de s'assurer que seule la cataracte était responsable de la baisse d'acuité visuelle. En complément de l'examen clinique, un électrorétinogramme multifocal (Moniteur Vision, Metrovision, France) a permis de confirmer la normalité de la fonction rétinienne, et en particulier de la fonction maculaire.

Implant et procédure chirurgicale

L'implant TECNIS (AMO, États-Unis) est un implant trois pièces associant une optique de 6 mm de diamètre en silicone et deux anses en fluorure de polyvinylidène (PVDF) pour un diamètre total de 12 mm. L'implant 911 (AMO, États-Unis) est un implant trois pièces avec une optique de 6 mm en silicone et deux anses en PVDF pour un diamètre total de 12 mm. Les deux implants possèdent donc la même géométrie planaire, les mêmes matériaux et le même index réfractif (1.46). Seul leur profil diffère : l'implant TECNIS se caractérise par une face antérieure asphérique prolate qui lui confère une aberration sphérique totale (Z40) négative égale à $-0,27 \mu\text{m}$, alors que le 911 est un implant sphérique biconvexe avec un Z40 positif.

La procédure chirurgicale réalisée par le même opérateur était identique pour les 20 yeux et visait à générer le moins d'aberrations optiques possible [11, 20, 21]. Pratiquée sous anesthésie topique, elle comportait deux incisions cornéennes limbiques de 3 mm et de 1 mm, un capsulorhexis continu de 5 mm de diamètre, une extraction cristallinienne par phakoémulsification et une implantation à l'injecteur avec contrôle du centrage de l'implant en fin d'intervention. Aucune suture de l'incision n'a été pratiquée.



1 | 2

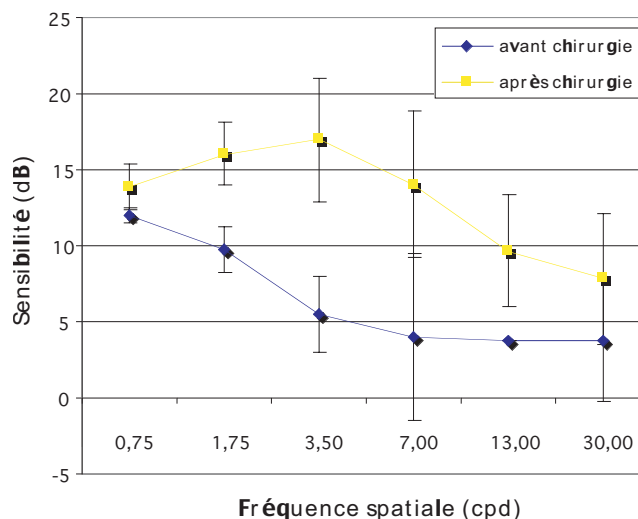


Figure 1 : Comparaison de la variation d'équivalent sphérique avant puis après mydriase pharmacologique : (*) myopisation en mydriase ou « myopic shift » du groupe « 911 » significative par rapport au groupe « TECNIS », $p = 0,002$.

Figure 2 : Sensibilité aux contrastes tout groupe confondu en ambiance mésopique avant et après chirurgie de la cataracte : augmentation significative de la sensibilité après chirurgie à toutes les fréquences spatiales testées ($p < 0,05$).

Données recueillies et analyse

Le bilan préopératoire effectué sept jours avant l'intervention comprenait une mesure de la réfraction objective, une évaluation de la meilleure acuité visuelle avec correction (MAVC) réalisée sur une échelle ETDRS, un examen clinique complet, une analyse de la sensibilité aux contrastes en ambiance photopique, mésopique et à l'éblouissement (Moniteur Ophtalmologique, Metrovision, France) ainsi qu'une aberrométrie (Wavescan, Visx, États-Unis).

Le bilan postopératoire effectué deux mois après la chirurgie comprenait une mesure de la réfraction objective avant, puis après mydriase pharmacologique (tropicamide et néosynéphrine 1 %), une évaluation de la MAVC sur échelle ETDRS, un examen ophtalmologique complet, une pupillométrie, une analyse de la sensibilité aux contrastes (Moniteur Ophtalmologique, Metrovision, France) en ambiance photopique, mésopique et à l'éblouissement ainsi qu'une aberrométrie (Wavescan, Visx, États-Unis) en ambiance mésopique sans dilatation. Tous les bilans ont été effectués par le même praticien qui était différent du chirurgien et qui n'était pas informé du groupe auquel appartenait chaque patient.

Tous les résultats ont été présentés en moyenne \pm déviation standard. Le calcul des moyennes d'acuité visuelle décimale a été effectué après conversion logarithmique. L'analyse aberrométrique a été effectuée en tenant compte du signe des aberrations et sur des données rapportées à un diamètre pupillaire de 5 mm. Compte tenu de l'effectif des deux groupes et de la distribution des patients, les données quantitatives ont été analysées par l'intermédiaire des tests non-paramétriques de Mann Whitney et de Spearman (StatView 5,

Abacus, États-Unis). Une probabilité p inférieure à 5 % a été considérée comme significative.

159

RÉSULTATS

Réfractions et « myopic shift »

La MAVC pré-opératoire était de $0,46 \pm 0,14$ dans le groupe « TECNIS » versus $0,31 \pm 0,15$ dans le groupe « 911 », avec une réfraction sphérique à $0,28 \pm 1,83$ D versus $-0,42 \pm 1,17$ D, et un astigmatisme à $-1,4 \pm 0,48$ D versus $-1,14 \pm 0,81$ D ($p = 0,11$ pour la sphère et $p = 0,44$ pour l'astigmatisme). La MAVC postopératoire ne différait pas dans les deux groupes ($0,95 \pm 0,13$ pour le groupe « TECNIS » et $0,98 \pm 0,11$ pour le groupe « 911 », $p = 0,32$). Les réfractions non dilatées étaient de $0,5 \pm 0,89$ D versus $0,67 \pm 0,90$ D pour la sphère et de $-0,9 \pm 0,56$ D versus $-0,61 \pm 0,24$ D pour le cylindre négatif, respectivement dans les groupes « TECNIS » versus « 911 » ($p = 0,76$ pour la sphère et $p = 0,53$ pour le cylindre).

Les variations d'équivalent sphérique après mydriase étaient de $-0,10 \pm 0,30$ D pour le groupe « TECNIS » versus $-0,68 \pm 0,21$ D pour le groupe « 911 », avec une myopisation en mydriase – ou myopic shift – pour le groupe « 911 » significativement supérieure à celle du groupe TECNIS ($p = 0,002$) (fig. 1).

Le diamètre pupillaire en ambiance mésopique était de $4,95 \pm 0,58$ mm pour le groupe « TECNIS » et de $5,19 \pm 1,11$ mm pour le groupe « 911 » ($p = 0,96$).

Sensibilité aux contrastes

Tout groupe confondu, l'analyse des sensibilités aux contrastes a révélé une amélioration fonctionnelle globale après remplacement du cristallin, aussi bien en ambiance photopique que mésopique ou à l'éblouissement (fig. 2).

Concernant les résultats comparatifs postopératoires, la sensibilité aux contrastes en ambiance photopique et à l'éblouissement était comparable dans les deux groupes pour toutes les fréquences spatiales (fig. 3a et 3b). En revanche, pour les contrastes en ambiance mésopique, il existait une meilleure sensibilité pour le groupe « TECNIS » aux fréquences intermédiaires et élevées comparativement au groupe « 911 » : 19,25 dB *versus* 11,89 dB aux fréquences intermédiaires et 13,45 dB *versus* 4,17 dB aux fréquences élevées pour les groupes « TECNIS » *versus* « 911 » ($p = 0,003$ et $0,002$ respectivement) (fig. 3c).

Aberrométrie

L'aberrométrie préopératoire n'a pas été contributive, la cataracte corticonucléaire nuisant au système de projection de grille selon Hartmann-Schack.

Rapportée à un diamètre pupillaire de 5 mm, l'évaluation postopératoire des aberrations optiques d'ordre élevé n'a pas montré de différence entre les deux groupes concernant la RMS ($0,36 \pm 0,07 \mu\text{m}$ pour le groupe « TECNIS » *versus* $0,33 \pm 0,19 \mu\text{m}$ pour le groupe « 911 », $p = 0,21$) (fig. 4). Après décomposition en polynômes de Zernike, les aberrations de 3^e ordre ne différaient pas dans les deux groupes qu'il s'agisse du coma ($Z31 = 0,17 \pm 0,09 \mu\text{m}$ *versus* $0,12 \pm 0,06 \mu\text{m}$, $p = 0,26$) ou bien du trefoil ($Z33 = 0,26 \pm 0,13 \mu\text{m}$ *versus* $0,27 \pm 0,16 \mu\text{m}$, $p = 0,62$). En revanche, concernant le 4^e ordre, l'aberration sphérique était voisine de 0 dans le groupe « TECNIS », et significativement inférieure à celle du groupe « 911 » ($Z40 = 0,03 \pm 0,06 \mu\text{m}$ *versus* $0,20 \pm 0,14 \mu\text{m}$, respectivement pour les groupes « TECNIS » et « 911 », $p = 0,029$). Trois patients porteurs d'un implant TECNIS présentaient un Z40 total négatif contre aucun patient dans le groupe « 911 ». La figure 5 illustre comparativement une topographie aberrométrique d'un patient porteur d'un implant TECNIS avec un Z40 voisin de 0 par rapport à un patient porteur d'un implant 911 qui présente un Z40 positif.

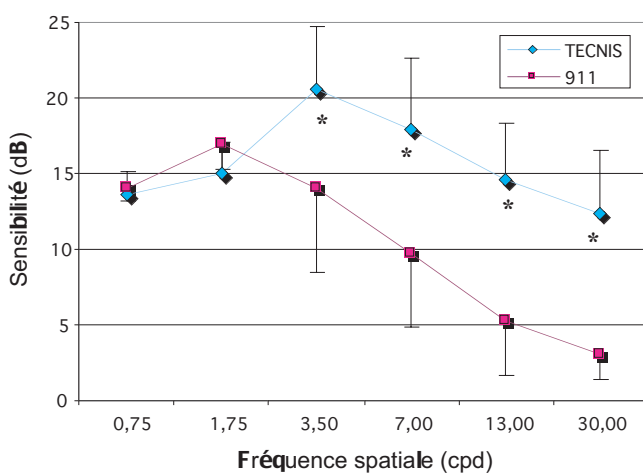
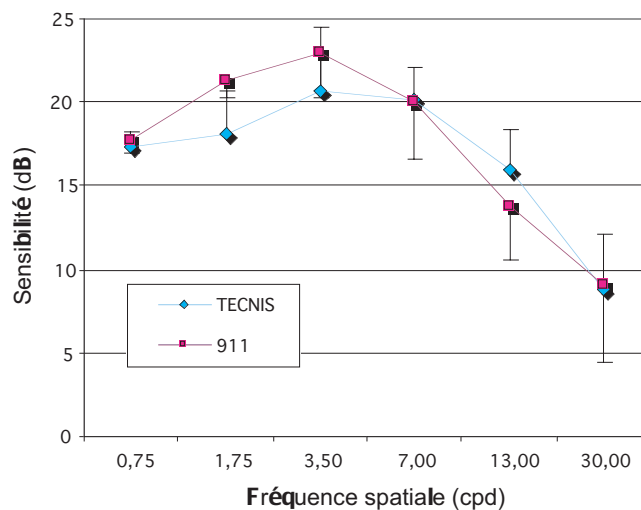
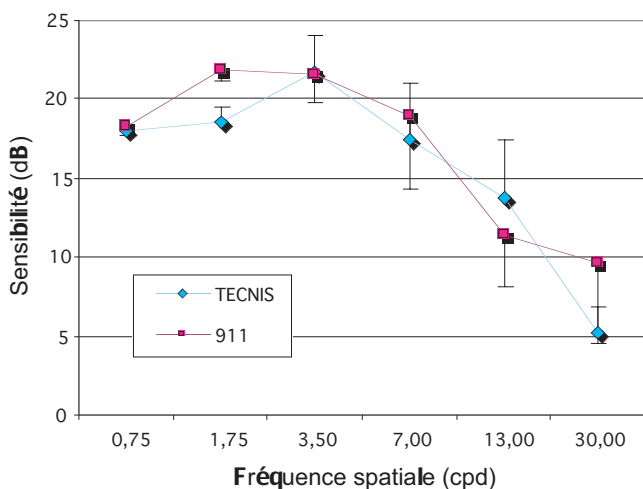
Sur l'ensemble des patients, l'aberration sphérique était significativement corrélée au myopic shift ($z = -2,72$; $p = 0,006$). Concernant la relation entre aberration sphérique et vision des contrastes, la sensibilité aux contrastes en mésopique est apparue significativement corrélée au Z40 uniquement pour une fréquence intermédiaire à 3,5 cpd ($z = -2,19$; $p = 0,028$), la sensibilité aux autres fréquences ne montrant pas de corrélation significative avec l'aberration sphérique.

DISCUSSION

L'amélioration des méthodes d'analyse des modifications du front d'onde causées par chaque élément du dioptre oculaire [1-4, 17-19] a permis la conception d'un nouveau type d'implant « profilé » qui pourrait minimiser l'aberration sphérique de l'œil [15, 16]. Cette étude prospective comparative visait à évaluer les bénéfices d'un tel implant en terme de variation réfractive, de sensibilité aux contrastes et d'aberrations optiques. Elle a été menée sur deux groupes de patients qui ne différaient ni par leur âge, ni par leurs caractéristiques réfractives pré-opératoires et qui ne présentaient aucune pathologie oculaire anatomique ou fonctionnelle, à l'exception de la cataracte. Nous avons mis en évidence d'une part une réduction objective du myopic shift et du Z40 total, et d'autre part une amélioration subjective de la qualité de vision mésopique chez les patients porteurs d'un implant asphérique prolate comparativement à un implant sphérique standard. L'aberration sphérique était de plus corrélée au « myopic shift », et dans une moindre mesure à la sensibilité aux contrastes en ambiance mésopique.

L'analyse des précédentes études portant sur cet implant a révélé une certaine hétérogénéité méthodologique. Concernant les types d'implants testés, la majorité des études publiées comparaient le TECNIS à d'autres implants qui différaient par leur construction, leur dimension et/ou leur matériau [22-26]. À l'instar de cette série, certaines étaient comparatives inter-individuelles [22, 23, 27] et d'autres comparatives intra-individuelles [24-26, 28], pour des effectifs variant de 5 à 70 yeux par groupe. Certaines séries n'incluaient pas l'étude des contrastes [27] ou bien celle des aberrations optiques [23, 24, 26, 28, 29]. Enfin, cette étude a respecté l'absence de différence de puissance d'implant afin de ne pas biaiser les résultats aberrométriques.

L'amélioration de la sensibilité aux contrastes en ambiance mésopique constatée dans cette série a été également décrite par Kershner *et al.* [23], Packer *et al.* [26], Mester *et al.* [25] et Ricci *et al.* [28], qui concluaient à un avantage en termes de vision mésopique pour l'implant TECNIS par rapport à certains implants sphériques. À l'inverse, Casprini *et al.* [22] ne trouvaient qu'une amélioration des contrastes à l'éblouissement, et Martinez *et al.* [24] n'ont pas constaté de différence significative de sensibilité aux contrastes par rapport à un implant standard. Concernant l'étude des aberrations optiques du pseudophake, Casprini *et al.* [22], Bellucci *et al.* [27] et Mester *et al.* [25] ont rapporté une diminution significative du Z40 chez les patients porteurs de l'implant TECNIS, en accord avec nos résultats. Il faut néanmoins remarquer que, contrairement à notre série, ces études ont procédé à une évaluation aberrométrique après mydriase pharmacologique, ce qui pourrait ne pas exactement correspondre aux conditions visuelles physiologiques. Enfin, la corrélation entre Z40 et « myopic shift », et dans une moindre mesure



3a|3b
3c| 4

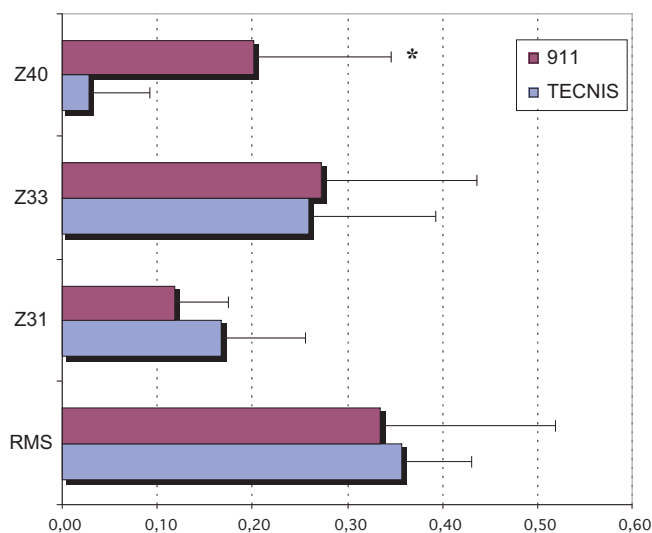


Figure 3 : Comparaison des sensibilités aux contrastes des deux groupes (a) en ambiance photopique, (b) à l'éblouissement et (c) en ambiance mésopique : (*) sensibilité aux contrastes du groupe « TECNIS » significativement supérieure à celle du groupe « 911 », aux fréquences intermédiaires (3,5 et 7 cpd) et élevées (13 et 30 cpd) ($p < 0,05$).

Figure 4 : Répartition des aberrations optiques d'ordre élevé : coma (Z31), trefoil (Z33) et aberration sphérique (Z40) : (*) aberration sphérique du groupe « TECNIS » significativement inférieure à celle du groupe « 911 » ($p = 0,029$).

entre Z40 et contrastes mésopiques, plaide en faveur d'un bénéfice visuel directement lié au profil asphérique prolate de l'implant TECNIS. Cette relation entre aberration sphérique et qualité visuelle, déjà suggérée dans certaines études [25, 27], montre à nouveau l'intérêt de la réduction des aberrations optiques pour l'amélioration de la qualité de vision du pseudophaque.

L'analyse des aberrations d'ordre élevé n'a pas relevé de différences significatives entre les deux groupes – à l'exception du Z40 –, et particulièrement concernant le coma (Z31). Les implants asphériques pourraient en effet induire une majoration du Z31 en cas de décentrement excessif de l'implant par rapport à l'axe visuel [30].

L'absence de différence significative dans cette étude peut s'expliquer par l'effectif réduit des deux groupes ou bien par la qualité de centrage des implants. Enfin, il faut noter que, de part le procédé physique utilisé par les aberromètres actuels, l'analyse aberrométrique réalisée dans cette étude ne tient pas compte des aberrations chromatiques et ne reflète donc pas exactement les distorsions de l'image en lumière naturelle [31].

Nous avons donc associé la sensibilité aux contrastes à l'aberrométrie du front d'onde, toujours étudiées dans des conditions visuelles physiologiques et sans mydriase induite, afin d'évaluer la fonction visuelle quotidienne des patients porteurs d'un implant asphérique

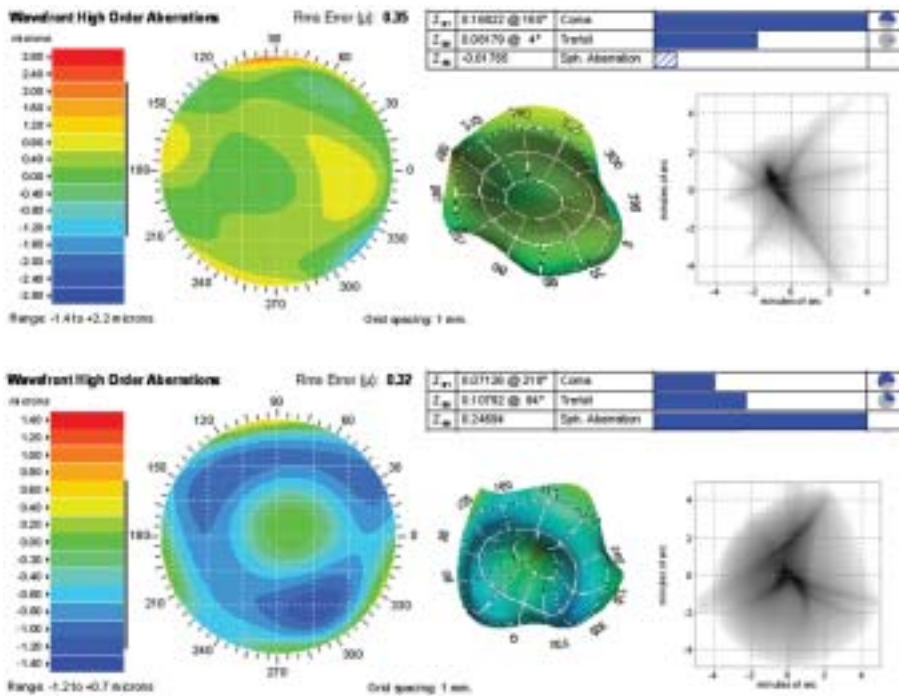
5a
5b

Figure 5 : Exemple de cartographie aberrométrique à 5 mm de diamètre pupillaire (a) chez un patient porteur d'un implant TECNIS et (b) chez un patient porteur d'un implant 911 : aberration sphérique voisine de zéro (-0,018 μm) pour le patient porteur d'un implant TECNIS alors que le patient porteur d'un implant 911 présente un Z40 positif à 0,247 μm .

prolate, comparativement à un implant de géométrie et de matériau comparables mais avec un profil sphérique standard. Nos résultats en faveur de l'implant TECNIS soulèvent cependant plusieurs interrogations. Qu'en est-il du ressenti visuel subjectif de tels patients pseudophakes dans la vie quotidienne [32] ? L'impact fonctionnel du décentrement – d'évaluation peu aisée – [15] ou la réduction de la profondeur de champs induite par une diminution du Z40 seront-ils des arguments contre les implants avec un Z40 négatif et en faveur d'autres implants en développement dits « aberration-free », comme suggéré dans une récente étude théorique [30] ? Enfin, la quête de la vision parfaite, voire de la supervision, passe-t-elle nécessairement par le « zéro aberration » [8, 33], car d'autres facteurs encore mal évalués influencent notre qualité de vision, à l'instar des phénomènes diffractifs, des aberrations chromatiques [32] et surtout du traitement cérébral de l'information visuelle ?

RÉFÉRENCES

- Cantu R, Rosales MA, Tepichin E, Curioca A, Montes V, Bonilla J. Whole eye wavefront aberrations in Mexican male subjects. *Refract Surg*, 2004;20:S685-8.
- Naseri A, McLeod SD, Lietman T. Evaluating the human optical system : corneal topography and wavefront analysis. *Ophthalmol Clin North Am*, 2001;14:269-73.
- Vinciguerra P, Camesasca FI, Calossi A. Statistical analysis of physiological aberrations of the cornea. *J Refract Surg*, 2003;19:S265-9.
- Wang L, Dai E, Koch DD, Nathoo A. Optical aberrations of the human anterior cornea. *J Cataract Refract Surg*, 2003;29:1514-21.
- Charman WN. Pupil dilation and wavefront aberration. *J Refract Surg*, 2004;20:87-8.
- Kuroda T, Fujikado T, Maeda N, Oshika T, Hirohara Y, Mihashi T. Wavefront analysis in eyes with nuclear or cortical cataract. *Am J Ophthalmol*, 2002;134:1-9.
- Kuroda T, Fujikado T, Maeda N, Oshika T, Hirohara Y, Mihashi T. Wavefront analysis of higher-order aberrations in patients with cataract. *J Cataract Refract Surg*, 2002;28:438-44.
- Levy Y, Segal O, Avni I, Zadok D. Ocular higher-order aberrations in eyes with supernormal vision. *Am J Ophthalmol*, 2005;139:225-8.
- Mierdel P, Kaemmerer M, Krinke HE, Seiler T. Effects of photorefractive keratectomy and cataract surgery on ocular optical errors of higher order. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 1999;237:725-9.
- Ninomiya S, Fujikado T, Kuroda T, Maeda N, Tano Y, Hirohara Y, et al. Wavefront analysis in eyes with accommodative spasm. *Am J Ophthalmol*, 2003;136:1161-3.
- Packer M, Fine IH, Hoffman RS. Wavefront technology in cataract surgery. *Curr Opin Ophthalmol*, 2004;15:56-60.
- Ginsburg AP. Next generation contrast sensitivity testing. In: Rosenthal BP, Cole RG, eds, *Functional Assessment of Low Vision*. St Louis, MO, Mosby, 1996:77-88.
- Chua BE, Mitchell P, Cumming RG. Effects of cataract type and location on visual function: the Blue Mountains Eye Study. *Eye*, 2004;18:765-72.
- Pesudovs K, Marsack JD, Donnelly WJ 3rd, Thibos LN, Applegate RA. Measuring visual acuity mesopic or photopic conditions, and high or low contrast letters? *J Refract Surg*, 2004;20:S508-14.
- Holladay JT, Piers PA, Koranyi G, van der Mooren M, Norrby NE. A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eyes. *J Refract Surg*, 2002;18:683-91.
- Norrby S, Artal P, Piers PA. Methods of obtaining ophthalmic lenses providing the eye with reduced aberrations. US patent 6 609 793, August 26, 2003.

17. Amano S, Amano Y, Yamagami S, Miyai T, Miyata K, Samejima T, *et al.* Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations. *Am J Ophthalmol*, 2004;137:988-92.
18. Fujikado T, Kuroda T, Ninomiya S, Maeda N, Tano Y, Oshika T, *et al.* Age-related changes in ocular and corneal aberrations. *Am J Ophthalmol*, 2004;138:143-6.
19. Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, Howland HC. Changes in corneal wavefront aberrations with aging. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1999;40:1351-5.
20. Packer M, Fine IH, Hoffman RS. Functional vision, wavefront sensing, and cataract surgery. *Int Ophthalmol Clin*, 2003;43:79-91.
21. Pesudovs K, Dietze H, Stewart OG, Noble BA, Cox MJ. Effect of cataract surgery incision location and intraocular lens type on ocular aberrations. *J Cataract Refract Surg*, 2005;31:725-34.
22. Casprini F, Balestrazzi A, Tosi GM, Miracco F, Martone G, Cevenini G, *et al.* Glare disability and spherical aberration with five foldable intraocular lenses: a prospective randomized study. *Acta Ophthalmol Scand*, 2005;83:20-5.
23. Kershner RM. Retinal image contrast and functional visual performance with spheric, silicone, and acrylic intraocular lenses. Prospective evaluation. *J Cataract Refract Surg*, 2003;29:1684-94.
24. Martinez PA, Palacin MB, Castilla CM, Comas SM, Punti BA. Spherical aberration influence in visual function after cataract surgery: prospective randomized trial. *Arch Soc Esp Oftalmol*, 2005;80:71-7.
25. Mester U, Dillinger P, Anterist N. Impact of a modified optic design on visual function: clinical comparative study. *J Cataract Refract Surg*, 2003;29:652-60.
26. Packer M, Fine IH, Hoffman RS, Piers PA. Improved functional vision with a modified prolate intraocular lens. *J Cataract Refract Surg*, 2004;30:986-92.
27. Bellucci R, Morselli S, Piers P. Comparison of wavefront aberrations and optical quality of eyes implanted with five different intraocular lenses. *J Refract Surg*, 2004;20:297-306.
28. Ricci F, Scuderi G, Missiroli F, Regine F, Cerulli A. Low contrast visual acuity in pseudophakic patients implanted with an anterior surface modified prolate intraocular lens. *Acta Ophthalmol Scand*, 2004;82:718-22.
29. Packer M, Fine IH, Hoffman RS, Piers PA. Prospective randomized trial of an anterior surface modified prolate intraocular lens. *J Refract Surg*, 2002;18:692-6.
30. Altmann GE, Nichamin LD, Lane SS, Pepose JS. Optical performance of 3 intraocular lens designs in the presence of decentration. *J Cataract Refract Surg*, 2005;31:574-85.
31. Negishi K, Ohnuma K, Hirayama N, Noda T ; Policy-Based Medical Services Network Study Group for Intraocular Lens and Refractive Surgery. Effect of chromatic aberration on contrast sensitivity in pseudophakic eyes. *Arch Ophthalmol*, 2001;119:1154-8.
32. Lesueur L, Munoz-Sastre MT, Mullet E, Dabadie B, Arne JL. Les prédicteurs de la qualité de vie en chirurgie réfractive. *J Fr Ophtalmol*, 2003;26:699-709.
33. McLellan JS, Marcos S, Prieto PM, Burns SA. Imperfect optics may be the eye's defense against chromatic blur. *Nature*, 2002;417:174-6.