

Analyse quantitative des aberrations oculaires d'ordre élevé grâce au système de Shack-Hartmann chez des porteurs de lentilles de contact

Laurent Fumery, Bernard Barthelemy, Optométriste.

L'objectif de notre étude est d'analyser l'effet des lentilles de contact sur les aberrations oculaires d'ordre élevé, c'est-à-dire supérieur à 3. Trois groupes de sujets ont été étudiés : un groupe de porteurs sains de lentilles souples sphériques, un groupe de porteurs sains de lentilles rigides et un groupe de porteurs de lentilles rigides atteints de kératocône. Toutes nos mesures ont été réalisées grâce à l'aberromètre KR-9000PW de type Shack-Hartmann de la société Topcon et grâce à la décomposition du front d'onde par les polynômes de Zernike. Grâce au test statistique des séries appariées, nous avons mis en évidence une diminution significative des aberrations asymétriques d'ordre 3 et 5 grâce aux lentilles rigides chez le porteur atteint de kératocône. Pour les porteurs sains de lentilles souples et de lentilles rigides, aucune différence significative n'a été mise en évidence. Nous avons cependant constaté chez les sujets sains, une augmentation des aberrations asymétriques et notamment de coma lorsque la lentille rigide se décentre.

MOTS CLES : Aberrométrie, polynômes de Zernike, Aberromètre de Shack-Hartmann, Lentille souple, Lentille rigide, Kératocône.

The aim of our study is to analyse the effect of contact lenses on high order ocular aberrations, that is to say more than 3. Three groups have been studied : the first is composed of soft contact lenses wearers without ocular disease, the second of rigid contact lenses wearers without ocular disease and the last one of rigid contact lenses wearers with keratocone. The aberrations have been measured with the Shack-Hartmann aberrometer TOPCON KR9000-PW and thanks to the decomposition of the wave front with the Zernike polynomials.

We have proved that the high order ocular aberrations decrease when the patients with keratocone wear their rigid contact lenses. For the healthy soft contact lenses wearers and rigid contact lenses wearers, no difference was found between with and without contact lens. However, when the rigid contact lens is not centred, we noticed that the asymmetrical high order ocular aberrations increased, especially the coma aberration.

KEY WORDS : Aberrometry, Zernike polynomials, Shack-Hartmann aberrometer, soft contact lens, rigid contact lens, keratocone.

L'aberrométrie est une technique récente de mesure des aberrations. A l'origine développée en astronomie, les chercheurs l'ont ensuite appliquée à l'ophtalmologie et plus particulièrement à la chirurgie réfractive. Nous avons souhaité utiliser cette nouvelle technique en contactologie.

Nous avons analysé l'effet des lentilles de contact souples et rigides sur les aberrations géométriques oculaires d'ordre élevé, c'est-à-dire supérieur à 3.

GENERALITES

Principe de fonctionnement d'un aberromètre de type Shack-Hartmann.

Le principe général de l'aberromètre de Shack-Hartmann consiste à envoyer dans l'oeil du patient un faisceau qui sera réfléchi sur la surface rétinienne [10, 18, 19] (Fig.1). Ainsi naît le front d'onde émergent partant de la rétine et traversant les milieux oculaires jusqu'à la surface antérieure cornéenne. Ce front d'onde va être décomposé en n micro-faisceaux grâce à une matrice de n micro-lentilles. Chaque micro-faisceau va se focaliser sur un capteur CCD placé à la distance focale des lentilles de la matrice (Fig.2). Le point de focalisation est appelé centroïde [21].

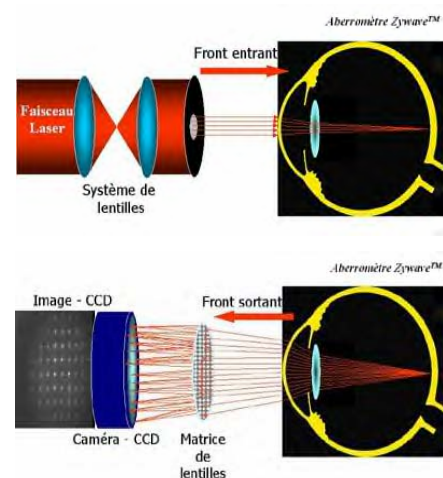


Figure 1 Principe de l'aberromètre de Shack-Hartman[24]

Pour un front d'onde appelé plan (fig 2), c'est-à-dire sans aberrations, chaque micro-faisceau va se focaliser au foyer image de la micro-lentille

correspondante [21]. Pour un front d'onde déformé (fig 2), c'est-à-dire ayant subi les aberrations des différents milieux, le micro-faisceau ne va pas se focaliser exactement au foyer de la micro-lentille. C'est l'analyse de la position de ce centroïde réel par rapport au centroïde théorique [21] qui permettra grâce à un logiciel informatique de quantifier les aberrations oculaires (Fig.2). L'analyse est réalisée grâce à la décomposition du front d'onde par les polynômes de Zernike [9, 14, 20] à partir des décalages des centroïdes.

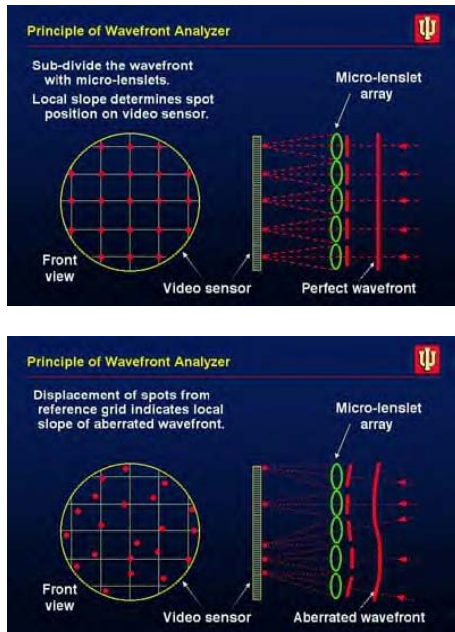


Figure 2 Principe d'analyse de l'aberromètre de Shack-Hartmann [23]

Les polynômes de Zernike

Les polynômes de Zernike sont l'outil mathématique qui permet de quantifier les aberrations [14]. Ils permettent de reconstituer l'équation générale du front d'onde [9]. Cette équation correspond à la somme des polynômes de Zernike pondérés des coefficients de Zernike. L'intérêt majeur de la décomposition du front d'onde par ces polynômes est de pouvoir déterminer chaque aberration de manière indépendante puisque à un coefficient de Zernike correspond une aberration particulière [14]. La formule générale d'un polynôme de Zernike est :

$$Z_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos m\theta ; & \text{for } m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin m\theta ; & \text{for } m < 0 \end{cases}$$

La composante radiale du polynôme est caractérisée par l'ordre n et la composante sinusoidale θ par la fréquence azimutale m. Les valeurs ρ et θ caractérisent le repère pupillaire orthonormé (cercle

d'unité 1) dans lequel s'appliquent les polynômes de Zernike [14, 17].

L'équation du front d'onde est [23] :

$$W(r, \theta) = a_0^0 \cdot Z_0^0 + a_1^{-1} \cdot Z_1^{-1} + a_1^{+1} \cdot Z_1^{+1} + a_2^{-2} \cdot Z_2^{-2} + a_2^0 \cdot Z_2^0 + \dots = \sum_{\text{order}} \sum_{\text{frequency}} a_n^f \cdot Z_n^f$$

Un coefficient de Zernike est noté $a(n; m)$ et son unité est le micromètre [17]. Les coefficients nous renseignent sur une aberration particulière. Pour évaluer le niveau d'aberrations total de l'oeil, nous allons utiliser la valeur du RMS ou Root Mean Square, qui correspond à la racine carrée de la variance du front d'onde par rapport à la sphère de référence (front non déformé) [24]. Le RMS est calculé par le logiciel à partir des coefficients de Zernike. On peut également calculer le RMS pour chaque ordre. Par exemple le RMS 4 nous renseigne sur le niveau général d'aberrations d'ordre 4 et est calculé à partir des 5 coefficients de Zernike de l'ordre 4.

Modélisation des aberrations

Une table périodique pyramidale (fig 3) [23] représente l'ensemble des coefficients de Zernike et des aberrations.

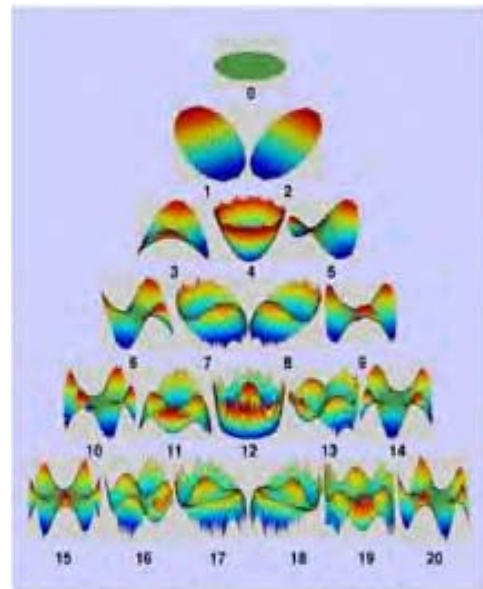


Figure 3 Table périodique des coefficients de Zernike [22, 23, 26, 27]

La valeur de n définit le type d'aberration. Pour n pair, nous traitons des aberrations symétriques comme l'aberration sphérique et pour n impair, il s'agit des aberrations asymétriques comme

l'aberration de coma [14, 17]. Quand n est strictement inférieur à 3, il s'agit des aberrations d'ordre faible et pour n supérieur ou égal à 3, des aberrations d'ordre élevé. Les valeurs de m possibles sont fonction de n. La valeur de m peut être (-n ; -n+2, -n+4 ... n-4, n-2, n). Quand m est positif, il s'agit de la composante horizontale de l'aberration et quand m est négatif, il s'agit de sa composante verticale [14, 17].

Pour l'ordre n=3, les valeurs possibles de m sont -3, -1, +1, et +3. Pour lire le coefficient a(3,-1), nous procédons de la façon suivante :

- La valeur n=3 est impaire, il s'agit d'une aberration asymétrique
- La valeur de m est négative, il s'agit donc de la composante verticale

Quand le coefficient est négatif, on dit que le front d'onde est en retard par rapport au front d'onde de référence et quand il est positif, on dit qu'il est en avancée de phase [17].

Les facteurs de variation des aberrations

Les facteurs modifiant les aberrations oculaires sont les suivants :

- Le diamètre pupillaire [17]

Le niveau d'aberrations oculaire croît de façon exponentielle avec le diamètre pupillaire et cette augmentation est plus marquée pour les ordres faibles que les ordres élevés.

- Les déformations cornéennes [1, 15]

On entend par déformation cornéenne, toute courbure cornéenne anormale. Elles peuvent avoir pour origine la chirurgie réfractive (LASIK, PKR, Kératotomie radiaire) [4, 10, 15] qui augmente principalement les aberrations sphériques et de coma en cas de zone d'ablation décentrée [4], mais aussi une origine pathologique comme le kératocône qui accroît les aberrations asymétriques.

- Les déformations cristalliniennes

Le lenticône [13] est une ectasie du cristallin qui augmente principalement l'aberration sphérique si celui-ci est centré.

- La qualité du film lacrymal [15, 16]

Une mauvaise répartition ou mauvaise qualité lacrymale perturbe la planéité du front d'onde.

- Les troubles de la transparence [15]

Les taries cornéennes ou la cataracte interfèrent avec le faisceau émergent de l'aberrromètre et viennent perturber la mesure.

- Les lentilles de contact [3, 5, 7, 12]

Peu d'études ont été réalisées sur l'aberrrométrie en lentille, il semblerait cependant que les aberrations avec et sans lentilles souples soient les mêmes et qu'il y ait une diminution du niveau d'aberrations chez le porteur de lentilles rigides. L'orthokératologie [8] est une technique qui augmente également les aberrations sphériques quand la lentille est centrée et les aberrations asymétriques en cas de décentrement de la lentille.

MATERIELS ET METHODES

Caractéristiques de la population étudiée

Nous avons étudié l'effet des lentilles sur les aberrations oculaires d'ordre élevé parmi trois groupes de porteurs de lentilles.

Les caractéristiques de ces porteurs sont récapitulées dans le tableau suivant :

Groupe	N	Age	K mm	Diam pup mm
LSH sains	14	28+/-12	7.84+/-0.26	6.19+/-0.74
LRPG sains	20	27.5+/-9.6	7.81+/-0.26	6.12+/-0.93
LRPG kératocône	11	27+/-9.4	7.16+/-0.56	5.77+/-0.6

Tableau 1 : Caractéristiques de la population étudiée

L'orientation moyenne des cônes était de 255 degrés pour les yeux droits et de 282 pour les yeux gauches. La kératométrie moyenne au sommet du cône est 6.14 +/- 0.71 mm.

Protocole expérimental

Toutes les mesures d'aberrrométrie ont été réalisées avec le même appareil et dans les mêmes conditions. L'aberrromètre utilisé est l'aberrromètre KR-9000PW de la société Topcon [25]. Il permet de mesurer les aberrations oculaires, la topographie cornéenne, les aberrations cornéennes, la réfraction automatique et les diamètres pupillaires. Toutes nos mesures ont été réalisées dans l'obscurité afin d'obtenir un diamètre pupillaire le plus grand possible sans utilisation de collyres mydriatiques [5, 6]. Nous n'avons pas utilisé de collyre cycloplégique pour paralyser l'accommodation pour des raisons législatives. Chaque mesure était déclenchée 3 secondes après le clignement afin d'obtenir une répartition et une qualité lacrymale optimales ainsi qu'un bon centrage de la lentille [15, 16].

Les tests ont été réalisés dans l'ordre suivant :

- *Aberrométrie et topographie sans lentille*

Cette mesure était réalisée en premier lieu pour éviter toute déformation cornéenne par la lentille. Cependant pour des raisons pratiques pour les patients, certains portaient leurs lentilles juste avant la mesure. Il était toujours vérifié sur la topographie l'absence de warpage.

- *Examen du segment antérieur*

Avant la pose de la lentille, un examen à la lampe à fente était réalisé afin de vérifier l'absence de signes de sécheresse oculaire ou de cataracte et de taie [15].

▪ *Pose de la lentille*

Les lentilles rigides portées étaient des Menicon EX ou Maxilens. Les zones optiques étaient sphériques. Le rayon adapté suivait la règle du fabricant et la puissance compensait l'amétropie du patient. Les lentilles souples étaient des 1 Day Acuvue de rayon 8.50 mm et de puissance compensant l'amétropie sphérique. Les patients atteints de kératocônes étaient équipés de leurs lentilles habituelles adaptées selon la méthode des 3 points.

Toutes les lentilles étaient massées avant la pose afin d'éviter des dépôts ou une mauvaise mouillabilité.

▪ *Evaluation de l'adaptation*

Dix minutes après la pose des lentilles, un contrôle à la lampe à fente était réalisé afin de vérifier l'état de surface, la mouillabilité de la lentille et le centrage [5, 16].

▪ *Aberrométrie avec lentille*

Cette mesure était réalisée dans les mêmes conditions que la mesure sans lentille afin d'établir des comparaisons fiables.

▪ *Examen du segment antérieur au retrait de la lentille*

RESULTATS

Nous avons utilisé le test des séries appariées puisque nous avons comparé une variable entre deux échantillons non indépendants (sans et avec lentilles). Le risque que nous nous sommes fixé, est de 5%. La table utilisée est la table de Student à (N-1) degrés de liberté.

Abb	ON	LS	DIFF	ddl	t	CCI
RMS T	0,492	0,525	0,032	13	0,526	NS
RMS 3/5	0,395	0,418	0,023	13	0,352	NS
RMS 4/6	0,266	0,311	0,044	13	1,129	NS
RMS 3	0,366	0,374	0,007	13	0,115	NS
RMS 4	0,219	0,284	0,066	13	1,707	NS
RMS 5	0,117	0,179	0,062	13	1,58	NS
RMS 6	0,104	0,119	0,015	13	0,877	NS

Tableau 2 : Résultats statistiques des porteurs sains de LSH

Abb	ON	LR	DIFF	ddl	t	CCI
RMS T	0,634	0,589	-0,045	19	0,355	NS
RMS 3/5	0,513	0,458	-0,055	19	0,522	NS
RMS 4/6	0,35	0,357	0,007	19	0,094	NS
RMS 3	0,402	0,414	0,012	19	0,181	NS
RMS 4	0,297	0,334	0,037	19	0,45	NS
RMS 5	0,245	0,167	-0,077	19	0,802	NS
RMS 6	0,153	0,111	-0,041	19	1,814	NS

Tableau 3 : Résultats statistiques des porteurs sains de lentilles rigides

Abb	ON	LR	DIFF	ddl	t	CCI
RMS T	2,045	1,137	-0,907	10	4,115	DS
RMS 3/5	1,949	0,974	-0,975	10	4,168	DS
RMS 4/6	0,582	0,508	-0,074	10	0,95	NS
RMS 3	1,9	0,941	-0,96	10	3,87	DS
RMS 4	0,547	0,487	-0,06	10	0,709	NS
RMS 5	0,368	0,212	-0,156	10	2,398	DS
RMS 6	0,207	0,123	-0,084	10	1,903	NS

Tableau 4 : Résultats statistiques des porteurs de lentilles rigides atteints de kératocône

Nous avons complété l'analyse des RMS par l'analyse des coefficients de Zernike. Le tableau suivant ne fait apparaître que les résultats statistiques significatifs. Pour les autres coefficients, aucune différence n'a été constatée. Seul le coefficient a(3 -1) présentait une différence significative lorsqu'il était traité en valeur absolue. Pour les coefficients, a(5 -3), a(5 -1), a(4 0) et a(4 4), seule la direction du front d'onde était modifiée.

Aberratio n	ON	LR	DIFF	DDL	t	CCI
a 3 -1	-4,723	2,018	6,742	10	5,267	DS
a 3 -1 VA	4,723	2,063	-2,66	10	4,43	DS
a 5 -3	-0,08	0,167	0,247	10	2,754	DS
a 5 -1	0,773	0,021	-0,752	10	4,476	DS
a 4 0	-0,243	0,944	1,187	10	3,509	DS
a 4 4	0,287	-0,239	-0,527	10	2,361	DS

Tableau 5 : Résultats statistiques des coefficients de Zernike des kératocônes

DISCUSSION

Pour les porteurs de lentilles souples, le niveau d'aberrations oculaires d'ordre élevé est resté le même que sans lentille. Nos résultats concordent avec l'étude de HONG et al [5] qui proposaient comme explication la conservation du niveau d'aberrations oculaires par « moulage » de la lentille souple sur la cornée. Pour les porteurs de lentilles rigides, nous n'avons constaté aucune différence entre avec et sans lentille. Ce niveau d'aberrations oculaires d'ordre élevé est probablement resté le même à cause d'un niveau faible d'aberrations cornéennes d'ordre élevé. Ainsi la lentille rigide grâce à son ménisque de larmes n'a que peu d'effets de régularisation sur ces aberrations cornéennes déjà faibles. Cependant, pour deux de nos sujets, nous avons pu constater une augmentation conséquente du niveau d'aberrations oculaires d'ordre élevé quand la lentille rigide se décentrait. Cette augmentation

concernait principalement les aberrations asymétriques et notamment l'aberration de coma suivant l'axe du décentrement de la lentille (fig 4).

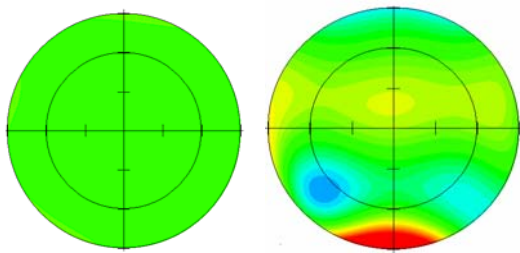


Figure 4 Carte d'aberrations oculaires d'ordre élevé du patient X sans et avec lentille rigide décentrée

Nous avons constaté une diminution significative du niveau d'aberrations oculaires d'ordre élevé et plus précisément des aberrations asymétriques (ordres 3 et 5) lorsque les patients atteints de kératocône portaient leur lentille rigide. Sans les lentilles rigides, ces patients présentent un niveau d'aberrations asymétriques important. L'aberration prédominante est la composante verticale de l'aberration de coma (coefficient $a(3;-1) = -4.723$).

Ceci est dû aux paramètres suivants [2] :

- **L'orientation du cône**

Le cône généralement en position inféro-temporale génère une aberration de coma suivant le même axe c'est-à-dire vertical.

- **La différence de kératométrie entre centre et périphérie cornéenne**

Cette différence engendre une différence de réfraction entre rayons centraux et périphériques donc de l'aberration de coma

- **La hauteur du cône**

Plus le cône est haut, plus la différence de réfraction des rayons augmente.

- **Le décentrement du cône**

Plus le cône est décentré, plus l'aberration de coma est accrue. Dans le cas théorique d'un cône symétrique et parfaitement centré, nous constaterions des aberrations sphériques élevées.

Le niveau d'aberrations oculaires d'ordre élevé est dû aux aberrations cornéennes d'ordre élevé générées par la déformation du cône suivant un axe presque vertical. La composante verticale de l'aberration de coma $a(3;-1)$, prédominante, est modifiée grâce au ménisque de larmes sous la surface interne de la lentille rigide, qui régularise cette surface. Nos résultats concordent parfaitement avec les études menées par Barbero et al [1], par Sayuri et al [13] ou encore par Thibos et al [15] qui prévoient une amélioration du niveau d'aberrations oculaires d'ordre élevé chez le patient atteint de kératocône portant sa lentille rigide.

Les cartes d'aberrations suivantes illustrent nos explications précédentes. Nous pouvons constater

une similitude entre les cartes oculaire et cornéenne au niveau de l'aberration de coma, qui suit le même axe que le cône. Quand le patient porte sa lentille rigide, l'aberration de coma a quasiment disparu.

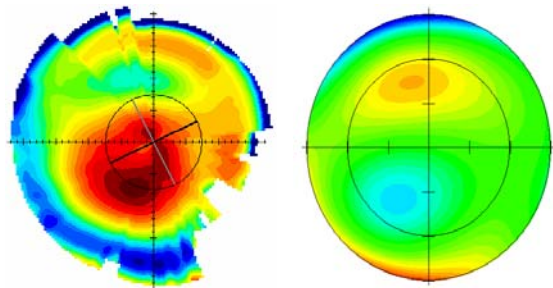


Figure 5 : Topographie et Carte d'aberrations cornéennes d'ordre élevé du patient Y

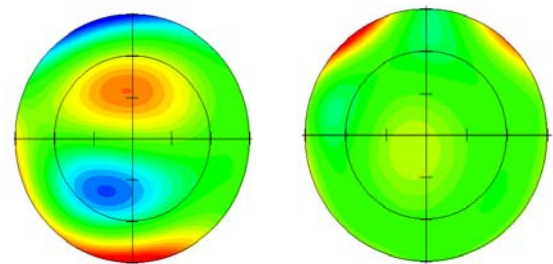


Figure 6 : Carte d'aberrations oculaires d'ordre élevé du patient Y sans et avec lentille rigide

CONCLUSION

Nous n'avons montré aucune différence significative sur les aberrations oculaires d'ordre élevé chez les sujets sains entre avec et sans lentille, souple ou rigide. Cependant dès que la corne présente des déformations conséquentes comme le kératocône, nous constatons une diminution significative du niveau d'aberrations oculaire d'ordre élevé et notamment des aberrations asymétriques générées par le cône. Les lentilles rigides par le biais du ménisque de larmes viennent régulariser la surface cornéenne et compenser les aberrations cornéennes d'ordre élevé.

Les facteurs expliquant le niveau d'aberrations oculaires d'ordre élevé important chez les patients atteints de kératocône sont les suivants :

- L'orientation du cône
- La différence de kératométrie entre centre et périphérie cornéenne
- La hauteur du cône
- Le décentrement du cône

Ces facteurs d'origine cornéenne sont ainsi compensables par la lentille rigide et le ménisque de larmes.

En conclusion, nous avons constaté que l'analyse aberrométrique était en relation étroite avec l'analyse topographique, pour mieux prévoir les facteurs en cause dans les niveaux d'aberrations oculaires d'ordre élevé.

BIBLIOGRAPHIE

1. BARBERO S, BSc, MARCOS S, PhD, MERAYO-LLOVES J, MD PhD, MORENO-BARIUSO E, PhD.
Validation of the estimation of corneal aberrations from videokeratography in keratoconus.
Journal of refractive surgery, Vol 18, pages 263-270, mai-juin 2002.
2. BARTHELEMY B. et THIEBAUT. T
Adaptation des kératocônes, Généralités.
La revue d'optométrie, LR'O, N° 5, pages 38-47, janvier 2003.
3. COLLINS M.J, BROWN B, ATCHISON D.A, NEWMAN S.D.
Tolerance to spherical aberration induced by rigid contact lenses.
Optical. Physiol. Opt. Vol 12, pages 24-28, janvier 1992.
4. GATINEL D, Ophthalmologiste.
Les profils d'ablation.
Réflexions Ophthalmologiques, N° 48, Tome 6, pages 37-40, octobre 2001.
5. HONG X, PhD, HIMEBAUGH N, OD, THIBOS L.N, PhD FAAO.
On eye evaluation of optical performance of rigid and soft contact lenses.
Optometry and Vision Science, Vol 78, N° 12, pages 872-880, décembre 2001.
6. HOWLAND H.C.
High order wave aberrations of eyes.
Optical. Physiol. Opt. Vol 22, pages 434-439, juin 2002.
7. HUFFMAN K, BS, ROSS S, BS, PACK L, OD, SALMON T.O, OD, PhD, FAAO, HOENES R, M.A.
Visual and optical performance of frequency 55 aspheric versus spheric contact lenses.
Poster présenté à l'American Academy. San Diego. Décembre 2002.
8. JOSLIN C.E, OD, FAAO, SHAHIDI M, PhD.
Higher order Wavefront aberrations in corneal refractive therapy.
Poster présenté à l'American Academy. San Diego. Décembre 2002.
9. KOCH D.C, MD.
Introduction to Wavefront technology.
Review of ophthalmology, CME, Continuing Medical Education
PO Box 488, Canal street station, New York, 10013.
10. MORENO-BARIUSO E, MERAYO LLOVES J, MARCOS S, NAVARRO R, LLORENTE L, BARBERO S.
Ocular aberrations before and after myopic corneal refractive surgery : LASIK-Induced changes measured with Laser Ray Tracing.
Investigate Ophthalmology and Visual Science, Vol 42, N° 6, pages 1396-1403, mai 2001.
11. MORENO-BARIUSO E, PhD, MARCOS S, PhD, NAVARRO R, PhD, BURNS S.A, PhD.
Comparing Laser Ray Tracing, the Spatially Resolved Refractometer, and the Hartmann-Shack sensor to measure the ocular wave aberration.
Optometry and Vision Science, Vol 78, N° 3, pages 152-156, mars 2001.
12. PATEL N, OD, EDMONSON L.L, A.M, OD, FAAO, EDMONSON W, MAT, OD, FAAO.
Masking astigmatism and correcting spherical aberrations with a front surface aspheric hydrogel.
Poster présenté à l'American Academy. San Diego. Décembre 2002.
13. SAYURI N, MD, NAOYUKI M, MD, TERUHITO K, MD, TEIKO S, MD, TAKASHI F, MD, YASUO T, MD, YOKO H, BS, TOSHIFUMI M, BE.
Evaluation of lenticular irregular astigmatism using wavefront analysis in patients with lenticonus.
Archives of Ophthalmology, Vol 120, pages 1388-1393, octobre 2002.
14. SCHWIEGERLING J.
Scaling Zernike expansion coefficients to different pupil sizes.
Journal of the optical society of America A, Vol 19, N° 10, pages 1937-1945, octobre 2002.
15. THIBOS L.N, PhD, FAAO, HONG X, MS.
Clinical applications of the Shack-Hartmann aberrometer.
Optometry and Vision Science, Vol 76, N° 12, pages 817-825, décembre 1999.
16. THIBOS L.N, HONG X, BRADLEY A, BEGLEY C.
Deterioration of retinal image quality due to breakup of the corneal tear film.
Invest Ophthalmol Vis Sci, Vol 40, page 544, 1999.
17. THIBOS L.N, HONG X, BRADLEY A, CHENG X.
Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes.
Journal of the optical society of America A, Vol 19, N° 12, pages 2329-2348, décembre 2002.
18. THIBOS L.N.
Principles of Hartmann-Shack aberrometry.
Journal of refractive surgery, Vol 16, N° 5, pages 563-566, septembre-octobre 2000.
19. TROUVE O.
Principes et résultats du système Wavelight Allegretto.
Réflexions ophtalmologiques, N° 48, tome 6, pages 33-35, octobre 2001.
20. Wavefront Sciences, Optics and Instrumentation.
Zernike polynomials used to describe Wavefront aberrations.
Planche de description de Wavefront Sciences, 14810 Central Ave SE, Albuquerque, New Mexico, 87123.
www.wavefrontsciences.com

SITES INTERNET

21. <http://www.enspm.u-3mrs.fr/pdfsup13/le.pdf>
Projet transverse L. ESCOUBAS.
L'analyse de front d'onde par la méthode de Shack-Hartmann : un exemple de projet transverse.
22. <http://www.oculus.de>
23. <http://research.opt.indiana.edu>
24. <http://www.snof.org/chirurgie/supervision.html>
La Super Vision.
25. <http://www.topcon.com/med/kr9000pwinfo.htm>
26. <http://www.wavefrontsciences.com/ophthalmic/zernike.html>
27. <http://wyant.optics.arizona.edu/zernikes/zernikes.htm>
Logiciel de représentation des aberrations.