BrienHoldenVisionInstitute

ABERROMÉTRIE

AUTEUR

Thomas Salmon : Northeastern State University, États-Unis

RÉVISION PAR LES PAIRS

Scott Steinman : Southern California College of Optometry, États-Unis

CE CHAPITRE INCLUT UNE RÉVISION DE :

- Aberrométrie
- Optique visuelle
- Bases de l'aberrométrie
- Aberrations d'ordre supérieur
- Exactitude des aberromètres
- Compensation des aberrations de l'oeil humain
- Correction optique adaptative de l'oeil
- Lien entre VMQ, coefficients de Zernicke et vision

INTRODUCTION À L'ABERROMÉTRIE

« Après la vie telle quelle, le cadeau le plus précieux que Dieu a offert est le don de la vue. » Président Frank Devlyn.

En tant qu'optométristes, une de nos missions est de protéger, restaurer et améliorer la vision de nos patients. Quelles sont les causes d'une mauvaise vision?

- Maladies oculaires telles que le glaucome ou les cataractes
- Maladies systémiques telles qu'une tumeur au cerveau qui atteint les voies visuelles
- Lésions oculaires, telles qu'un traumatisme contondant à l'oeil
- Anomalies développementales, telles que l'amblyopie
- Erreurs réfractives

INTRODUCTION À L'ABERROMÉTRIE (SUITE)

La cause la plus commune de mauvaise vision est l'erreur réfractive, donc une des mesures les plus importantes que nous prenons est l'évaluation de la qualité optique. Les optométristes ont une grande connaissance de l'optique, ce sont donc les professionnels les mieux qualifiés pour prendre soin des besoins visuels des patients. Discutons d'un des développements récents les plus excitants dans le domaine de l'optique visuelle : l'aberrométrie.

Q. Qu'est-ce que l'aberrométrie?

R. L'aberrométrie est aussi connue sous le terme de détection de front d'onde. C'est une technique utilisée pour mesurer les erreurs réfractives de manière beaucoup plus détaillée que ce qu'il est possible de faire avec les méthodes traditionnelles de réfraction en clinique, comme la réfraction subjective.

Le front d'onde est défini comme étant la surface associée à la propagation d'une vague qui est déterminé en associant tous les points d'une vague ayant la même phase.

L'aberrométrie opte pour une approche différente pour mesurer les erreurs réfractives : elle mesure la forme du front d'onde de la lumière qui a passé à travers les éléments optiques de l'œil. En analysant la forme du front d'onde, on peut déterminer la quantité et le type d'erreurs réfractives présentes dans l'œil, incluant ;

- Les erreurs de défocalisation sphérique (myopie, hypermétropie)
- Les erreurs astigmatiques
- Les aberrations d'ordre supérieur (coma, aberrations sphériques et autres)

RÉVISION DE L'OPTIQUE VISUELLE

SIMILITUDES ENTRE UN OEIL ET UNE CAMÉRA

L'oeil humain est souvent comparé à une caméra. Les deux sont des instruments optiques qui ont été créés pour former des images. D'autres similarités sont décrites dans le tableau 1-1.

OEIL SCHÉMATIQUE

L'exemple de la caméra peut nous aider à comprendre l'œil, et les yeux schématiques sont également utiles. Voici certains exemples :

- L'œil schématique no 1 de Gullstrand. Cornée à deux surfaces, lentille à quatre surfaces, surfaces sphériques et symétriques.
- L'oeil réduit de Gullstrand-Emsley. Cornée à une surface, lentille à deux surfaces, surfaces sphériques et symétriques (voir fig. 1-1).
- L'œil d'Indiana. Cornée asphérique à une surface avec pupille. Voir l'article au site web suivant : Indiana Eye. http://research.opt.indiana.edu/Library/INEye/IndianaEye.html ; ou dans Thibos LN, Ye M, Zhang X, Bradley A. Spherical Aberration of the Reduced Schematic Eye with Elliptical Refracting Surface. Optom Vis Sci 1997; 74:458-556.

Tableau 1-1 : *Similitudes entre l'oeil et une caméra*

OEIL	CAMÉRA	FONCTION
Cornée + cristallin	Éléments de lentilles	Focaliser la lumière, former une image
Rétine	Film ou capteur CCD (caméra digitale)	Recevoir l'image, convertir les photons en signal électrique
Pupille	Ouverture de l'objectif	Contrôler la luminosité de l'image, la profondeur de la focalisation, la diffraction, les aberrations
EPR	Chambre noire, intérieur sombre	Réduire la dispersion interne de la lumière
Accommodation	Mécanisme d'auto-focus	Focus à différentes distances

RÉVISION DE L'OPTIQUE VISUELLE (SUITE)

Q. Qu'est-ce que la pupille d'entrée?

R. Il s'agit de l'image de la vraie pupille formée par la cornée. C'est donc dire qu'après réfraction par la cornée, la pupille d'entrée est l'image de la vraie pupille. Lorsqu'on regarde les yeux de quelqu'un et qu'on voit leur pupille ou leur iris, on ne voit pas la pupille réelle mais bien une image de la pupille, soit la pupille d'entrée. La pupille d'entrée est particulièrement importante en aberrométrie parce qu'on l'utilise comme plan de référence pour mesurer les aberrations de l'œil.

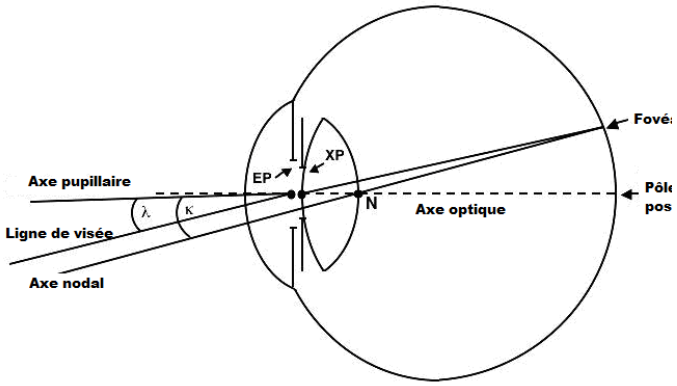
L'aberromètre du Système d'Analyse Ophtalmique Complet permet de spécifier les aberrations dans le plan des lunettes ou de la cornée, mais la mesure est habituellement faite dans le plan de la pupille d'entrée.

AXES DE L'OEIL

En optique visuelle, vous avez appris qu'il y a plusieurs axes théoriques de l'oeil ainsi que des angles importants entre ces axes. En aberrométrie, l'axe le plus important de l'œil est la ligne de visée.

La ligne de visée est le segment de droite liant le point de fixation et le centre de la pupille d'entrée. Si un rayon de lumière entre dans l'œil sur la ligne de visée, il continue son chemin à l'intérieur de l'œil à partir de la pupille de sortie jusqu'à la fovéa (figure 1-1). La ligne de visée est importante en aberrométrie puisque les mesures des aberrations de l'œil devraient être centrées sur celle-ci.

Dans le chapitre 10, il sera question de considérations neurales et du « grain » dans la rétine, de même que de l'effet de Stiles-Crawford. Nous nous pencherons sur ces derniers plus tard dans le cours lorsque nous parlerons de vision spatiale.



XP – Pupille de sortie
EP – Pupille d'entrée
N – Point nodal

Figure 1-1 : *Figure basée sur l'oeil réduit de Gullstrand-Emsley montrant certains des axes et angles importants, ainsi que l'emplacement des pupilles d'entrée et de sortie*

En ce qui concerne les méthodes pour rapporter les aberrations optiques de l'oeil, ANSI (*American National Standards Institute*) 2014 résume plusieurs des principes de base de l'aberrométrie et standardise les systèmes de mesure et d'enregistrement des aberrations.

BASES DE L'ABERROMÉTRIE

- En quoi consistent les aberrations d'ordre supérieur (AOS)?
  - Ce sont les erreurs réfractives
- Qu'est-ce qu'un aberromètre?
  - Un super autoréfractomètre
- Que sont les polynômes de Zernike?
  - Une façon de calculer les erreurs réfractives
- Qui a besoin de l'aberrométrie?
  - Les patients ayant une mauvaise vision causée par des aberrations d'ordre supérieur

BASES DE L'ABERROMÉTRIE (SUITE)

QU'EST-CE QU'UNE ABERRATION D'ORDRE SUPÉRIEUR?	• Aberrations = erreurs réfractives • Les erreurs réfractives comprennent la myopie, l'hypermétropie, l'astigmatisme et d'autres • Les erreurs réfractives d'ordre inférieur (aberrations) : sphère, astigmatisme • Les erreurs réfractives d'ordre supérieur (aberrations) : les autres • Les aberromètres mesurent les aberrations monochromatiques • Les aberrations chromatiques constituent un sujet autre • Les aberrations de Seidel existent pour les systèmes optiques faits par l'homme, pas pour l'oeil
LA TAILLE DE LA PUPILLE EST TRÈS IMPORTANTE	• Les aberrations sont plus problématiques pour les pupilles plus grandes • Le plus grand bénéfice de la correction des AOS est donc pour les pupilles de plus grand diamètre • Une façon de réduire les aberrations problématiques est de réduire la taille pupillaire • Vision supranormale = vision avec une optique parfaite, sans aberration • La meilleure acuité visuelle (MAV) est de 20/8 ou 6/2,4!
QU'EST-CE QU'UN ABERROMÈTRE?	• Aussi appelé analyseur de front d'onde • Est comme un super autoréfractomètre ; il mesure la sphère, le cylindre et les AOS
QUE MESURE L'ABERROMÈTRE?	• Les distorsions du front d'onde lumineuse qui a passé à travers l'optique de l'oeil • Les aberrations (erreurs réfractives) déforment les fronts d'onde optiques en passant dans l'œil • Mesure la forme du front d'onde pour déterminer les aberrations de l'œil • Les aberromètres de Shack-Hartmann (le type le plus populaire) mesurent la forme du front d'onde émis par l'oeil après réflexion par la rétine
COMMENT LES ABERRATIONS SONT-ELLES MESURÉES?	• Les aberromètres mesurent les fronts d'onde • Les fronts d'onde sont déformés par les aberrations de l'oeil • La plupart des yeux contiennent plusieurs types d'aberrations qui entraînent la formation d'un front d'onde irrégulier et déformé (voir fig. 1-2)

Q. Comment peut-on diagnostiquer les aberrations spécifiques de l'oeil qui provoquent ces distorsions?

R. En analysant le front d'onde en utilisant les polynômes de Zernike

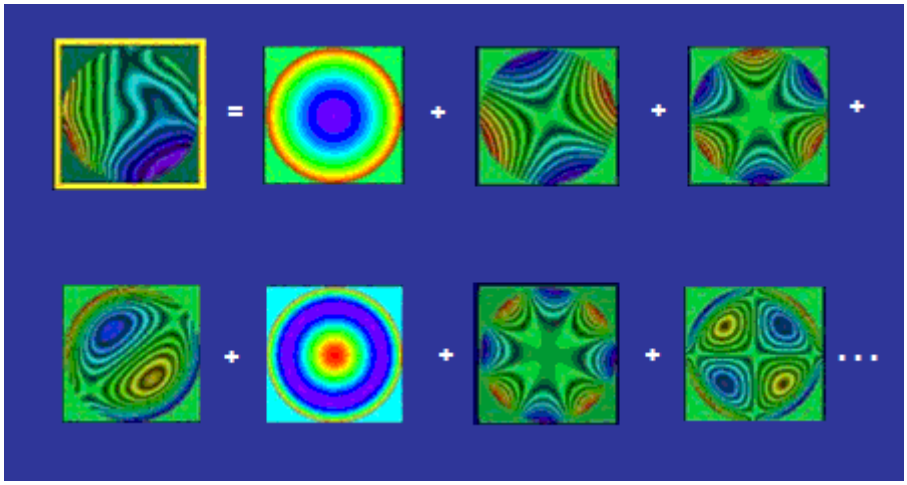


Figure 1-2 : *Le front d'onde du coin supérieur gauche contient les aberrations montrées ici*

- Les polynômes de Zernike sont un standard moderne pour rapporter les aberrations de l'oeil humain (ANSI Z-80.28-2004)
- Un système mathématique : arrange les aberrations spécifiques (modes de Zernike) en une hiérarchie (voir fig. 1-3)

BASES DE L'ABERROMÉTRIE (SUITE)

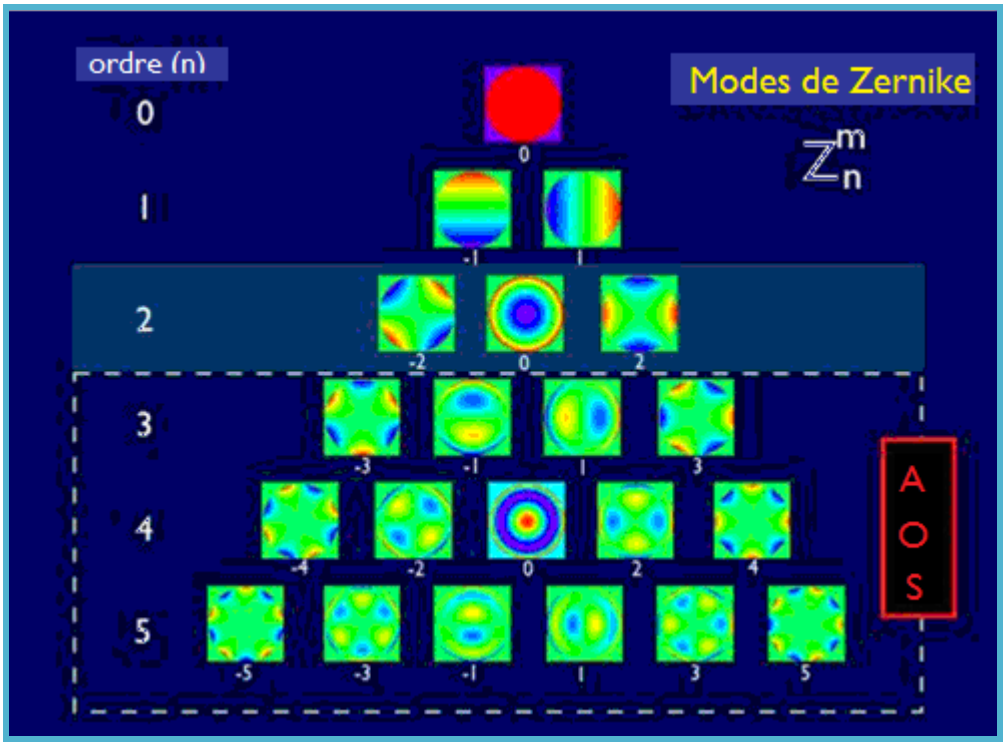


Figure 1-3 : *Modes de Zernike disposés en pyramide. Chaque mode représente une aberration.*

Tableau périodique des modes de Zernike : une pyramide telle que démontrée dans la figure 1-3.
Organisé en ordres de Zernike (rangées). Seuls les cinq premiers ordres sont montrés dans la figure 1-3.
Les modes de Zernike de chaque rangée sont numérotés.
Les modes spécifiques sont identifiés avec un n en indice et un m en exposant : Z_n^m
Où n = ordre ; m = mode
Les modes de deuxième ordre comprennent la sphère Z_2^0 et l'astigmatisme Z_2^2 et Z_2^{-2}.
Les modes de troisième ordre et plus sont appelés les aberrations d'ordre supérieur (AOS).

BASES DE L'ABERROMÉTRIE (SUITE)

La figure 1-4 démontre un exemple du front d'onde d'un oeil avec la prescription conventionnelle et celle de Zernike.

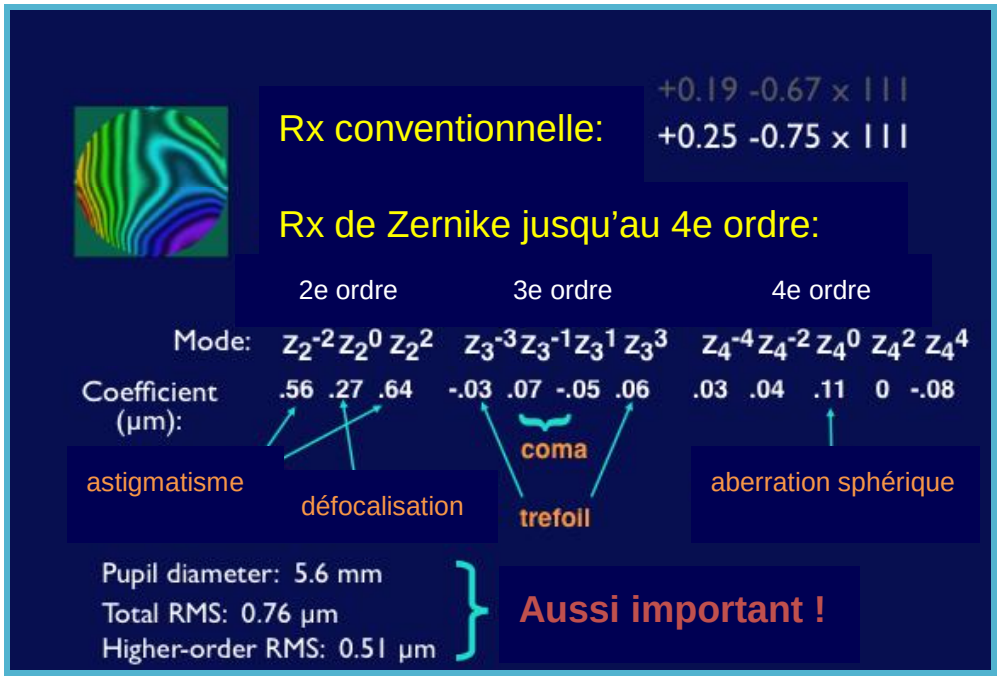


Figure 1-4 : *Front d'onde et données décrivant les erreurs réfractives d'un oeil*
Légende : pupil diameter = diamètre pupillaire ; total RMS = VMQ totale ; Higher-order RMS = VMQ d'ordre supérieur

Le diamètre pupillaire est une partie très importante des données de Zernike. Les coefficients de Zernike ne s'appliquent que pour une taille pupillaire particulière et changeront si la taille pupillaire varie.

L'unité pour les coefficients de Zernike est le micromètre (µm).

La valeurs moyenne quadratique (VMQ) totale = l'importance de toutes les erreurs réfractives de l'œil (sphère, cylindre, AOS). z_2^{-2}

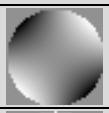
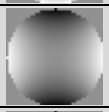
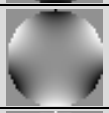
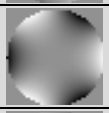
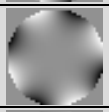
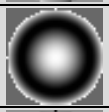
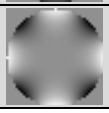
VMQ d'ordre supérieur = l'ampleur de toutes les AOS de l'oeil ensemble

Exemple de cas

- Femme de 35 ans, vient à la clinique d'optométrie pour un examen visuel complet
- A eu une kératotomie radiaire (KR) OU plusieurs années auparavant
- Se plaint de voir des ombres, de diplopie et d'éblouissement, de fatigue visuelle, de maux de tête, de difficultés à la lecture, surtout la nuit et lors de la conduite de nuit
- L'aberrométrie révèle des AOS plus grandes que la normale (non corrigeables avec des lunettes) secondaires à la KR
- Prescription d'un agoniste alpha-adrénergique (brimonidine) pour réduire le diamètre pupillaire
- La patiente utilise toujours cet agent au suivi d'un an. La vision est améliorée et la patiente ne se plaint plus d'éblouissement ni de maux de tête.

BASES DE L'ABERROMÉTRIE (SUITE)

Tableau 1-2 : *Les polynômes de Zernicke de 2e, 3e et 4e ordre*

ORDRE	MODE DE ZERNIKE	NOM	ÉQUATION (POLAIRE)	TOPOGRAPHIE
2	Z_2^{-2}	Astigmatisme oblique	$\sqrt{6}\rho^2 \sin 2\theta$	
2	Z_2^{0}	Défocalisation sphérique	$\sqrt{3}\left(2\rho^2 - 1\right)$	
2	Z_2^{2}	Asitgmatisme ALR/CLR*	$\sqrt{6}\rho^2 \cos 2\theta$	
3	Z_3^{-3}	Trefoil oblique	$\sqrt{8}\rho^3 \sin 3\theta$	
3	Z_3^{-1}	Coma vertical	$\sqrt{8}\left(3\rho^3 - 2\rho\right)\sin\theta$	
3	Z_3^{1}	Coma horizontal	$\sqrt{8}\left(3\rho^3 - 2\rho\right)\cos\theta$	
3	Z_3^{3}	Trefoil horizontal	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\theta$	
4	Z_4^{-4}	Tétrafoil oblique	$\sqrt{10}\rho^4 \sin 4\theta$	
4	Z_4^{-2}	Astigmatisme oblique de 2e ordre	$\sqrt{10}\left(4\rho^4 - 3\rho^2\right)\sin 2\theta$	
4	Z_4^{0}	Aberration sphérique	$\sqrt{5}\left(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1\right)$	
4	Z_4^{2}	Astigmatisme ALR/CLR de 2e ordre	$\sqrt{10}\left(4\rho^4 - 3\rho^2\right)\cos 2\theta$	
4	Z_4^{4}	Tétrafoil	$\sqrt{10}\rho^4 \cos 4\theta$	

CLR = contre la règle (erreur positive de front d'onde maximale à 180 degrés)
ALR = avec la règle (erreur positive de front d'onde maximale à 90 degrés)

BASES DE L'ABERROMÉTRIE (SUITE)

Tableau 1-3 : *Coefficients moyens absolus de Zernike ± écart type (µm) pour des données regroupées (OD et OS combinés) pour quatre diamètres de pupille (tiré de l'étude du Professeur Thomas Salmon, à être publié dans le Journal of Cataract and Refractive Surgery).*

TERME DE ZERNIKE	6,0 MM	5,0 MM	4,0 MM	3,0 MM
Z_3^{-3}	0.106 ± 0.088	0.069 ± 0.056	0.040 ± 0.033	0.019 ± 0.016
Z_3^{-1}	0.143 ± 0.118	0.082 ± 0.069	0.045 ± 0.038	0.021 ± 0.018
Z_3^{1}	0.090 ± 0.076	0.056 ± 0.047	0.033 ± 0.027	0.015 ± 0.013
Z_3^{3}	0.081 ± 0.066	0.052 ± 0.043	0.030 ± 0.026	0.014 ± 0.013
Z_4^{-4}	0.038 ± 0.033	0.023 ± 0.020	0.012 ± 0.011	0.005 ± 0.004
Z_4^{-2}	0.027 ± 0.023	0.017 ± 0.015	0.009 ± 0.008	0.003 ± 0.003
Z_4^{0}	0.128 ± 0.096	0.064 ± 0.049	0.028 ± 0.022	0.010 ± 0.008
Z_4^{2}	0.048 ± 0.039	0.026 ± 0.023	0.013 ± 0.013	0.005 ± 0.005
Z_4^{4}	0.043 ± 0.038	0.025 ± 0.022	0.013 ± 0.012	0.005 ± 0.005
Z_5^{-5}	0.025 ± 0.022	0.011 ± 0.010	0.004 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z_5^{-3}	0.024 ± 0.021	0.010 ± 0.009	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z_5^{-1}	0.028 ± 0.024	0.012 ± 0.011	0.004 ± 0.004	0.001 ± 0.001
Z_5^{1}	0.020 ± 0.018	0.009 ± 0.008	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z_5^{3}	0.018 ± 0.016	0.008 ± 0.007	0.003 ± 0.002	0.001 ± 0.001
Z_5^{5}	0.023 ± 0.021	0.010 ± 0.009	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z_6^{-6}	0.019 ± 0.018	0.007 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z_6^{-4}	0.014 ± 0.014	0.005 ± 0.005	0.001 ± 0.001	0.000 ± 0.000
Z_6^{-2}	0.012 ± 0.011	0.004 ± 0.004	0.001 ± 0.001	0.000 ± 0.000
Z_6^{0}	0.024 ± 0.020	0.008 ± 0.007	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z_6^{2}	0.016 ± 0.016	0.006 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z_6^{4}	0.017 ± 0.016	0.006 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z_6^{6}	0.020 ± 0.018	0.007 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000

Pour les aberrations de 3e à 5e ordre, n = 2,205 pour 6,0 mm et n = 2,560 pour 5,0, 4,0 et 3,0 mm
Pour les aberrations de 6e ordre, n = 1 871 pour 6,0 mm et n = 2,008 pour 5,0, 4,0 et 3,0 mm

BASES DE L'ABERROMÉTRIE (SUITE)

Tableau 1-4 : *Valeurs moyennes quadratiques (VMQ) ± écart type (µm) pour les modes polaires et de Zernike combinés, ordres de Zernike et aberrations d'ordre supérieur totales (ordres 3 à 5) pour quatre diamètres pupillaires. Valeurs réunies à partir de toutes les données de l'OD et de l'OS (tiré de l'étude du Professeur Thomas Salmon, à être publié dans le Journal of Cataract and Refractive Surgery)*

VMQ POUR	6,0 MM	5,0 MM	4,0 MM	3,0 MM
MODES POLAIRES				
Z31	0.185 ± 0.118	0.109 ± 0.069	0.061 ± 0.039	0.029 ± 0.018
Z33	0.147 ± 0.091	0.095 ± 0.058	0.055 ± 0.035	0.026 ± 0.017
Z40	0.128 ± 0.096	0.064 ± 0.049	0.028 ± 0.022	0.010 ± 0.008
Z42	0.060 ± 0.039	0.034 ± 0.023	0.018 ± 0.013	0.007 ± 0.005
Z44	0.063 ± 0.042	0.038 ± 0.025	0.020 ± 0.013	0.008 ± 0.005
Z51	0.039 ± 0.025	0.017 ± 0.011	0.006 ± 0.004	0.001 ± 0.001
Z53	0.033 ± 0.022	0.014 ± 0.010	0.005 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z55	0.037 ± 0.025	0.016 ± 0.011	0.005 ± 0.004	0.001 ± 0.001
Z60	0.024 ± 0.020	0.008 ± 0.007	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z62	0.023 ± 0.017	0.008 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z64	0.025 ± 0.018	0.009 ± 0.007	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z66	0.030 ± 0.022	0.010 ± 0.008	0.003 ± 0.002	0.000 ± 0.000
MODES COMBINÉS				
Type coma (Z31+Z51)	0.192 ± 0.115	0.112 ± 0.068	0.062 ± 0.039	0.029 ± 0.018
Type Sphaberr (Z40+Z60)	0.133 ± 0.094	0.065 ± 0.048	0.029 ± 0.021	0.010 ± 0.008
ORDRES DE ZERNIKE				
3	0.251 ± 0.123	0.153 ± 0.075	0.087 ± 0.043	0.041 ± 0.021
4	0.169 ± 0.090	0.090 ± 0.046	0.043 ± 0.022	0.016 ± 0.008
5	0.067 ± 0.034	0.030 ± 0.016	0.010 ± 0.005	0.002 ± 0.001
6	0.057 ± 0.030	0.020 ± 0.011	0.005 ± 0.003	0.001 ± 0.001
OS totaux (ordres 3 à 6)	**0.327 ± 0.130**	**0.186 ± 0.078**	**0.100 ± 0.044**	**0.045 ± 0.021**

Pour les aberrations de 3e ordre aux aberrations de 5e ordre, n = 2,205 pour 6,0 mm et n = 2,560 pour 5,0, 4,0 et 3,0 mm.
Pour les aberrations de 6e ordre, n = 1871 pour 6,0 mm et n = 2,008 pour 5,0, 4,0 et 3,0 mm.

ABERRATIONS D'ORDRE SUPÉRIEUR (AOS)

Tableau 1-5 : *Exemples de données d'une classe de psychophysique visuelle et neurophysiologie (PVN). La 1ère rangée comprend les coefficients de Zernike pour un oeil ayant des AOS élites.*

ENTITÉ	PUPILLE	VMQ O.S.	Z (3, −3)	Z (3, −1)	Z (3, 1)	Z (3, 3)	Z (4, 0)
Meilleur de l'année dernière	6.0	0.13	−0.07	0.02	−0.09	0.01	0.00
12 meilleurs du groupe	5.0	0.11	−0.02	0.00	0.04	0.07	0.02
Moyenne du groupe	5.0	0.21	0.00	−0.01	0.00	−0.01	0.04
Moyenne absolue du groupe	5.0	0.21	0.08	0.08	0.06	0.07	0.07
Normes OCO absolues	5.0	0.19	0.07	0.08	0.06	0.05	0.06
Yeux LASIK (absolus)	6.0	0.34	0.09	0.02	0.09	0.02	0.27
Rapports LASIK		1.03	0.81	0.14	1.00	0.25	2.07

Comment calculer la valeur moyenne pour chaque AOS pour la classe?

- Additionner la valeur pour chaque sujet
- Diviser par le nombre de sujets
- Pour la plupart des aberrations sauf l'aberration sphérique Z(4,0), la moyenne est habituellement près de 0. Pouvez-vous expliquer pourquoi? Notez que ceci était également vrai pour la classe
- Pourquoi voudrait-on connaître la moyenne des valeurs absolues?
- Comparez la moyenne de la classe à celle des normes Oklahoma College of Optometry (OCO) (publié dans JCRS en déc 2006)

ABERRATIONS D'ORDRE SUPÉRIEUR (AOS) (SUITE)

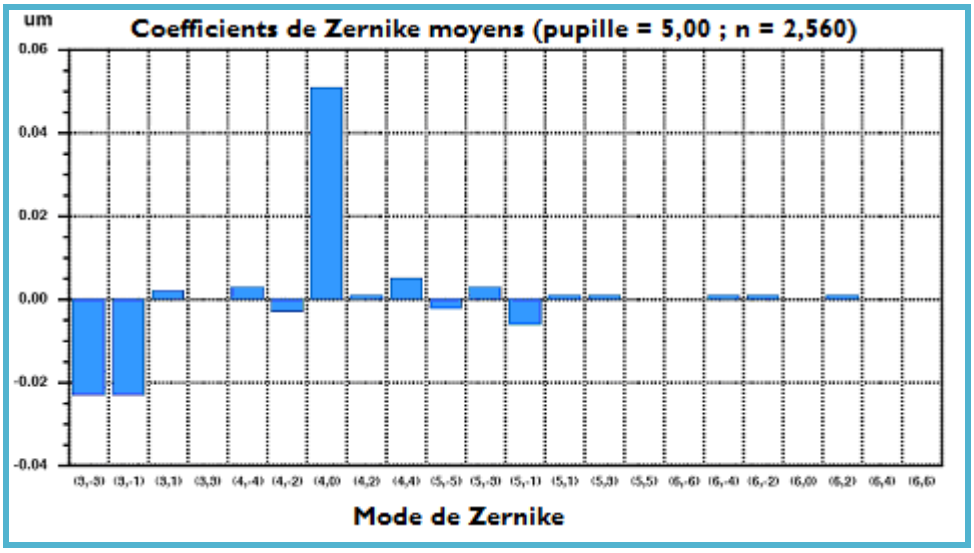


Tableau 1-5 : *Coefficients de Zernike moyens pour une pupille de 5 mm*

Déterminer les coefficients de Zernike pour un diamètre pupillaire différent

Formule approximative pour grader la valeur d'un coefficient de Zernike pour un diamètre pupillaire différent :

$$\text{Coefficient2} = \frac{\text{pupil2}\hat{}\text{n}}{\text{pupil1}\hat{}\text{n}}(\text{coefficient1})$$

Où n = ordre de Zernike pour ce coefficient

Exemple

Supposons que la valeur Z_4^0 (aberration sphérique) pour une pupille de 6,0 mm est de 0,13. Pour une pupille de 5,0 mm, la valeur Z_4^0 serait estimée à l'aide des chiffres suivants :

- Coefficient1 = 0,13 µm
- Diamètre pupillaire1 = 6,0 mm
- Diamètre pupillaire2 = 5,0 mm
- n = 4 (aberration de quatrième ordre)

$$\text{Coefficient2} = \frac{5\hat{}4}{6\hat{}4}(0.13) = (0.48)(0.13) = 0.06\,\mu\text{m}$$

Prenez note que cette formule ne s'applique que pour un seul mode de Zernike et non à la VMQ, qui elle combine plusieurs modes. Pour calculer une VMQ, il faut :

- Trouver chaque coefficient de Zernike un par un
- Calculer la VMQ pour les modes que l'on veut combiner

CALCUL DE LA VMQ

En ayant les coefficients pour chaque mode de Zernike, il est facile de calculer la VMQ pour ces modes combinés. Ceci permet de quantifier l'importance des aberrations totales combinées (modes de Zernike). La formule pour la VMQ est :

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\sum[(C_n^m)^2 + (C_n^m)^2 + (C_n^m)^2 + K]}$$

Où RMS est le terme anglais pour VMQ (*root mean square*)

C_n^m fait référence aux coefficients de Zernike d'intérêt. On peut calculer l'erreur de VMQ du front d'onde pour toute combinaison de modes de Zernike, mais il est utilisé le plus souvent pour les AOS totales ou pour l'effet combiné de tous les modes dans un ordre.

Par exemple, en utilisant les valeurs de coefficients de Zernike de la rangée 1 du tableau 3-1 (l'oeil élite), on peut calculer la VMQ pour les aberrations de troisième ordre combinées.

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\sum\left[(-0.07)^2 + (0.02)^2 + (-0.09)^2 + (0.01)^2 + (0)^2\right]} = 0.12\,\mu\mathrm{m}$$

PRÉCISION DES ABERROMÈTRES

Des travaux préliminaires, incluant les recherches du Professeur Thomas Salmon à la Northeastern State University, ont testé la précision des capteurs de Shack-Hartmann pour les mesures de l'optique de l'œil humain. Avec des lentilles d'essai, son aberromètre pouvait mesurer des distorsions allant jusqu'à 0,02 µm, ce qui équivaut à environ 0,008 dioptries (D) d'erreur réfractive. Ce niveau de précision est difficile à atteindre avec l'œil humain à cause de facteurs tels que :

- Le mouvement des yeux et de la tête lors de la prise de mesures
- Les fluctuations de l'accommodation et de la taille pupillaire
- Les fluctuations de la couche de larmes

De plus, il est difficile de valider des instruments aussi précis, puisqu'ils dépassent de loin toute autre forme de mesure des erreurs réfractives. Il a toutefois trouvé que les mesures prises avec le dispositif de Shack-Hartmann étaient très près de celles prises par aberrométrie subjective (en utilisant une technique inventée par Smirnov dans les années 1960 ; fig. 1-6) pour les mêmes yeux (fig. 1-7). Sa recherche a démontré que, en moyenne, les mesures de sphère et de cylindre du Système d'Analyse Ophtalmique Complet concordent bien avec la réfraction subjective clinique. D'autres recherches récentes avec des modèles d'œil ont vérifié que les aberromètres de Shack-Hartmann permettent une prise de mesure précise des aberrations d'ordre supérieur.

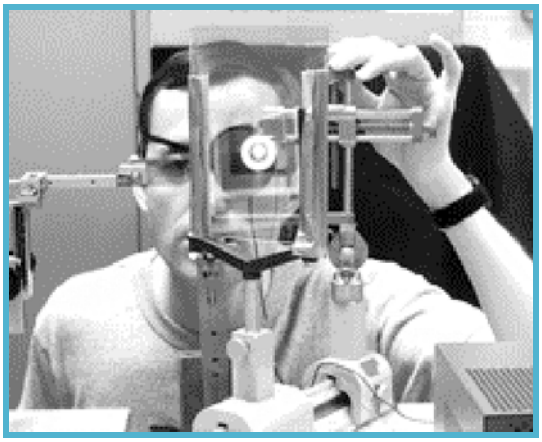


Tableau 1-6 : *Mesure des aberrations en utilisant un dispositif de type Smirnov*

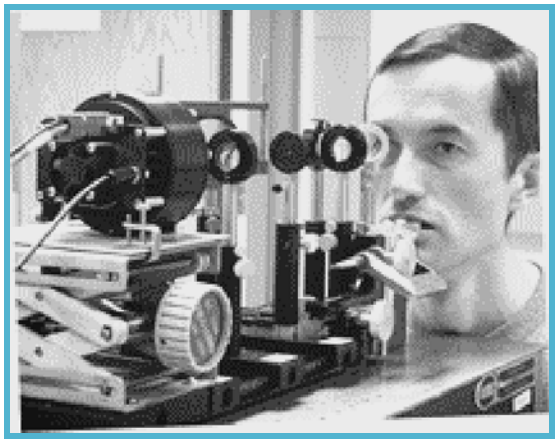


Tableau 1-7 : *Utilisation d'un capteur de Shack-Hartmann*

COMPENSATION DES ABERRATIONS DANS L'OEIL HUMAIN

Les fabricants de lentilles optimisent les systèmes d'imagerie optique en équilibrant les aberrations positives d'un élément avec les aberrations négatives d'un autre. Ceci arrive jusqu'à un certain point avec l'astigmatisme. La cornée a souvent un astigmatisme avec la règle mais le cristallin a généralement un léger astigmatisme contre la règle. L'astigmatisme total de l'œil est donc généralement moindre que celui de la cornée.

Pour plusieurs années, les scientifiques se sont questionnés à savoir s'il y a équilibration des aberrations d'ordre supérieur. L'équilibrage effectif entre la cornée et le cristallin varie de personne en personne, et chez la même personne, de mode en mode. Certaines personnes ont un équilbrage bénéfique (la lentille aide à neutraliser la cornée), alors que d'autres ont un équilibrage négatif (les aberrations du cristallin s'ajoutent à celles de la cornée) pour certains modes.

Une étude par Artal *et al.* (2002) suggère que pour plusieurs yeux de jeunes adultes en santé, les aberrations d'ordre supérieur internes tendent à avoir un signe opposé aux aberrations cornéennes correspondantes. Dans ces cas, les aberrations cornéennes seront équilibrées par l'optique interne et l'efficacité de l'équilibration dépendra de l'importance relative des aberrations cornéennes et des aberrations internes. Avec le temps et les changements du cristallin liés à l'âge, l'équilibration effective dans ces yeux semble se détériorer et il en résulte une augmentation des aberrations de l'œil avec l'âge (fig. 1-8).

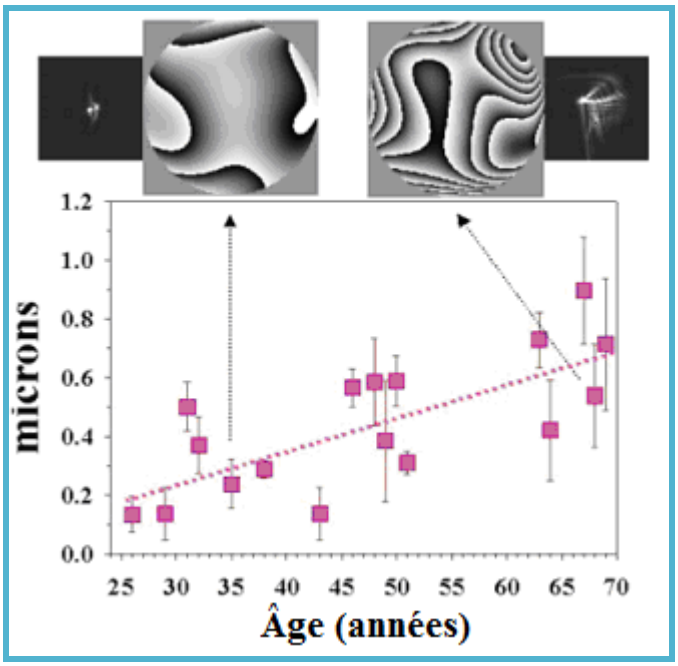


Tableau 1-8 : *Variation des aberrations avec l'âge*

Les aberrations totales d'ordre supérieur (erreur VMQ) pour 17 yeux, pour des sujets âgés entre 25 et 70 ans. Les aberrations d'ordre supérieur semblent augmenter avec l'âge, bien qu'il y ait des variations individuelles. Les flèches indiquent les cartographies des aberrations du front d'onde et les fonctions d'étalement des points correspondent à deux points de données pour un œil plus jeune et un œil plus âgé. (Pris de : Artal P, Guirao A, Berrio E, Williams DR. J Vision, 2001;1: 1-8. Copié avec permission.)

CORRECTION PAR OPTIQUE ADAPTATIVE

Les analyseurs de front d'onde ont été développés pour l'armée et pour les astronomes pour mesurer et compenser les aberrations atmosphériques. Aujourd'hui, les télescopes les plus grands du monde ont des analyseurs de front d'onde pour mesurer les aberrations et un miroir déformable pour corriger les aberrations. L'optique adaptative (OA) fait référence aux systèmes qui mesurent et corrigent les aberrations, surtout celles d'ordre supérieur. Les systèmes d'OA, utilisés d'abord en astronomie, ont aussi été appliqués à l'œil humain pour :

1. Corriger la vision
2. Améliorer les photographies de fond d'œil

BÉNÉFICES VISUELS DE LA CORRECTION DES ABERRATIONS

Les chercheurs de l'University of Rochester Center for Visual Science ont corrigé des aberrations monochromatiques oculaires avec un miroir déformable et ont mesuré l'amélioration de la vision. Ils ont aussi étudié les bénéfices qu'apportent la correction de l'aberration chromatique et la correction des aberrations monochromatiques et chromatiques. La correction des aberrations chromatiques seulement permet une légère amélioration de la vision que la meilleure prescription en lunettes. La correction des aberrations monochromatiques seulement permet une vision encore meilleure, et la plus grande amélioration se retrouve lorsque les deux types d'aberrations d'ordre supérieur sont corrigées (figure 1-9).

PHOTOGRAPHIE DE FOND D'OEIL PAR OPTIQUE ADAPTATIVE

La correction visuelle n'est pas le seul bénéfice clinique de l'optique adaptative. La correction des aberrations de l'œil permet aussi d'obtenir des images beaucoup plus claires de la rétine. Les chercheurs de la University of Rochester Center ont conçu un ophtalmoscope à optique adaptative qui a permis une vue jamais expérimentée auparavant de la microstructure d'une rétine vivante (figure 1-10), dont des photos de cônes individuels de la macula. Ceci a permis aux Drs Austin Roorda et David Williams d'étudier l'arrangement des cônes S, M et L, qui sont les trois photorécepteurs qui fournissent l'apport sensoriel de base pour la vision des couleurs.

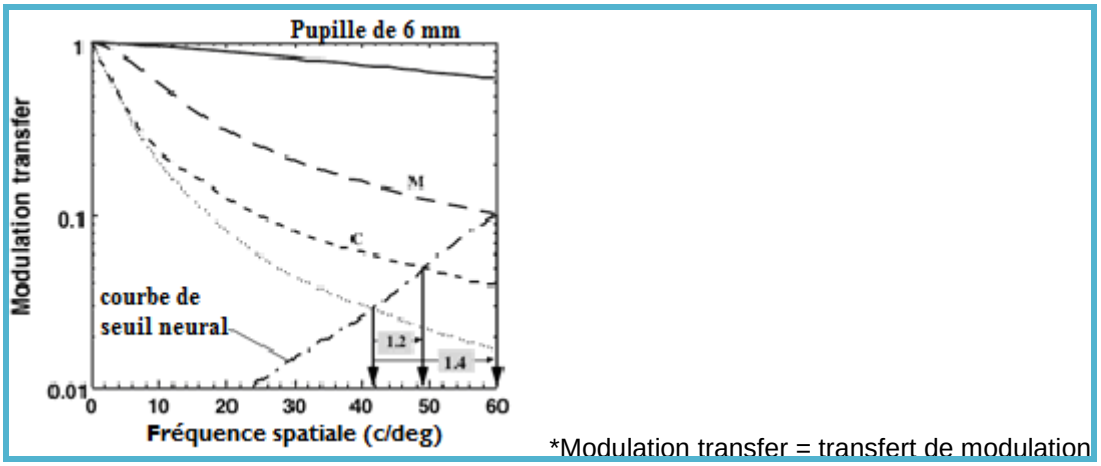


Tableau 1-9 : *Transferts de modulation théoriques (TMT) après correction de la défocalisation et de l'astigmatisme seulement (courbe du bas), correction additionnelle de l'aberration chromatique seulement (courbe C), correction de la défocalisation, de l'astigmatisme et des aberrations monochromatiques (courbe M) et correction de toutes les aberrations (courbe du haut). L'acuité visuelle s'améliore d'un facteur de 1,2 lorsque les aberrations chromatiques sont corrigées et par un facteur de 1,4 lorsque les aberrations monochromatiques sont corrigées (tiré de Yoon GY and Williams DR. J. Opt. Soc. Am. A, 2002;19: 266-275. Copié avec autorisation).*

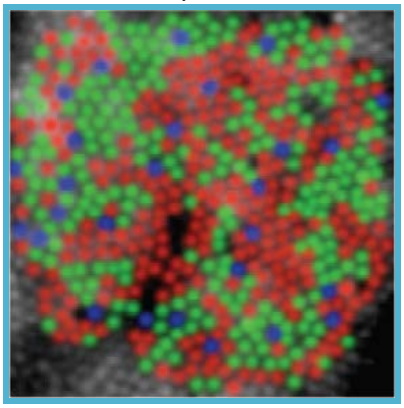


Tableau 1-10 : *Photo de fond d'oeil à haute résolution montrant les cônes dans la macula*

Des couleurs simulées ont été ajoutées pour identifier les cônes S (bleus), M (verts) et L (rouge). Obtenue en utilisant une caméra de fond d'œil à optique adaptative. Image reproduite avec la permission de **Dr Austin Roorda, University of Houston**

LIEN ENTRE LA VMQ, LES COEFFICIENTS DE ZERNIKE ET LA VISION

Des études ont démontré que, pour des yeux ayant beaucoup d'aberrations, il y a une bonne corrélation entre la VMQ des aberrations d'ordre supérieur et l'acuité visuelle (Applegate, Ballentine, Gross, Sarver et Sarver, 2003a).

La relation entre l'optique et la vision est plus confuse parce que, comme Applegate l'a démontré, les aberrations ne sont pas toutes égales (Applegate, Sarver et Khemsara, 2002). Certains modes dégradent plus l'AV que d'autres, même en ayant la même VMQ. En considérant les modes individuels de façon isolée, ceux ayant un plus petit exposant (le m de Z_n^m) pour chaque ordre de Zernike (c'est-à-dire les modes près du centre de la pyramide) ont des effets plus drastiques sur l'AV. Par exemple, 0,2 µm de Z_4^0 est pire que 0,2 µm de Z_4^{-2} ou Z_4^4.

Applegate *et al.* (2003b) ont étudié les effets de paires de modes de Zernike sur la vision et ont trouvé que l'interaction entre les modes est complexe. Pour certaines paires de modes, les aberrations dans un mode peuvent aider à neutraliser les aberrations d'un autre mode. Par exemple, 0,25 µm de VMQ de défocalisation peut être pire que 0,25 µm pour Z_2^0 et Z_4^0 ensemble. Par contre, certains modes exacerbent les effets négatifs sur la vision. Par exemple, 0,25 µm de VMQ pour Z_4^0 plus Z_4^{-2} est pire que 0,25 µm VMQ pour Z_4^0 seul (Applegate *et al.,* 2003a).

On en conclut que la VMQ est un mauvais prédicteur de vision lorsque les aberrations sont relativement petites, ce qui serait le cas dans un oeil normal ou un oeil qui a subi une chirurgie réfractive réussie guidée par front d'onde. Thibos et autres ont donc tenté de trouver une formule mathématique métrique dérivée des coefficients de Zernike, qui réussirait aussi à prédire l'AV. Il a testé 33 métriques et plusieurs ont bien fonctionné. Ils fonctionnaient si bien qu'il a spéculé qu'elles pourraient donner de meilleurs résultats que la réfraction subjective (notre norme d'excellence) pour déterminer la réfraction des lunettes qui produirait la meilleure AV (Thibos *et al*., 2004).

EXEMPLES DE RECHERCHES RÉCENTES SUR LES ABERRATIONS

- L'aberrométrie a été utilisée pour comparer comment deux types de larmes artificielles se comportent sur l'œil
- L'aberrométrie a été utilisée pour étudier les changements dans l'optique de l'oeil lorsque le corps subit des changements de glycémie chez les non-diabétiques et les diabétiques
- L'aberrométrie a été utilisée pour comparer la qualité optique de deux lentilles cornéennes asphériques qui sont supposées corriger les aberrations sphériques
- L'aberrométrie a été utilisée pour étudier le mouillage et le séchage à la surface de lentilles cornéennes

NORMES DE ZERNIKE – DOIT ÊTRE MÉMORISÉ

- (Veuillez vous référer aux tableaux de référence de l'OCO)
- Connaître les modes de Zernike suivants, leur appellation Z et leurs formes
- Aberrations de deuxième ordre
- Aberrations de troisième ordre
- Aberration sphérique (au milieu des cinq aberrations de 4e ordre)
- Connaître la VMQ des AOS pour une pupille de 6,0 mm

LECTURES RECOMMANDÉES/OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

- Salmon TO, van de Pol C. **Evaluation of a clinical aberrometer for lower-order accuracy and repeatablity, higher-order repeatability and instrument myopia**. Optom J Am Opt Assoc 2005;76:461-72.
- Rodriguez PN, Gonzalez L, Hernandez JL. **Accuracy and reproducibility of Zywave, Tracey, and experimental Aberrometers**. J Ref Surg 2004;20:810-817
- Salmon TO, West RW, Gasser W, Kenmore T. **Measurement of refractive errors in young myopes using the COAS Shack-Hartmann aberrometer**. Optom Vis Sci 2003;80:6-14
- Cheng X, Himebaugh NL, Kollbaum PS, Thibos LN, Bradley A. **Validation of a clinical Shack-Hartmann aberrometer**. Optom Vis Sci 2003;80:587-595
- Moreno-Barriuso E, Marcos S, Navarro R, Burns SA. **Comparing laser ray tracing, the spatially resolved refractometer, and the Hartmann-Shack sensor to measure the ocular wave aberration**. Optom Vis Sci 2001;78:152-156
- Salmon TO, Thibos LN, Bradley A. **Comparison of the eye's wave-front aberration measured psychophysically and with the Shack-Hartmann wave-front sensor**. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis 1998;15:2457-2465
- Amano SA, Yamagami S, Miyai T, Miyata K, Samejima T, Oshika T. **Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations**. Am J Ophthalmol 2004;137:988-992
- Cheng H, Barnett J, Vilupuru A, et al. **A population study on changes in wave aberrations with accommodation.** J Vision 2004;4:272-280
- Brunette I, Bueno JM, Parent M, Hamam H, Simonet P. **Monochromatic aberrations as a function of age, from childhoodto advanced age**. Invest Ophthalmol Vis Sci 2003;44:5438-5446
- Wang L, Koch DD. **Ocular higher-order aberrations in individuals screened for refractive surgery**. J Cataract Refract Surg 2003;29:1896-1903
- Thibos LN, Bradley A, Hong X. **A statistical model of the aberration structure of normal, well-corrected eyes**. Ophthalmic Physiol Opt 2002;22:427-433
- Thibos L, Hong X, Bradley A, Cheng X. **Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes**. J Opt Soc Am A 2002;19:2329- 2348
- Castejon-Mochon JF, LopezGil N, Benito A, Artal P. **Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population**. Vis Res 2002;42:1611-1617
- Porter J, Guirao A, Cox I, Williams DR. **Monochromatic aberrations of the human eye in a large population**. J Opt Soc Am A 2001;18:1793-1803
- ANSI. **American National Standard for Ophthalmics—Methods for reporting optical aberrations of eyes**: ANSI, 2004
- Thibos L, Applegate R, Schwiegerling J, Webb R, Members VST. **Standards for Reporting the Optical Aberrations of the Eye**. In: Lakshminarayanan V, editor. **Vision Science and Its Applications**. Santa Fe, NM: Optical Soc Am, 2000:232-244
- Atchison D, Scott D, Cox M. **Mathematical Treatment of Ocular Aberrations: a User's Guide**. In: Lakshminarayanan V, editor. **Vision Science and Its Applications**. Santa Fe, NM: Optical Soc Am, 2000: 110-130
- Campbell CE. **Matrix method to find a new set of Zernike coefficients from an original set when the aperture radius is changed**. J Opt Soc Am A 2003;20:209-217
- Schwiegerling J. **Scaling Zernike expansion coefficients to different pupil sizes**. J Opt Soc Am A 2002;19:1937-1945
- Ginis HS, Plainis S, Pallikaris A. **Variability of wavefront aberration measurements in small pupil sizes using a clinical Shack-Hartmann aberrometer**. BMC Ophthalmol 2004;4:1
- Campbell C. **A New Method for Describing the Aberrations of the Eye Using Zernike Polynomials**. Optom Vis Sci 2003;80:79-83
- Thibos L. **The chromatic eye: a new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans**. Appl Optics 1992;31:3594-3600
- Levy Y, Segal O, Avni I, Zadok D. **Ocular higher-order aberrations in eyes with supernormal vision**. Am J Ophthalmol 2005;139:225-228

LECTURES RECOMMANDÉES/OUVRAGES DE RÉFÉRENCE (SUITE)

- Zadok D, Levy Y, Segal O, Barkana Y, Morad Y, Avni I. **Ocular higher-order aberrations in myopia and skiascopic wavefront repeatability**. J Cataract Refract Surg 2005;31:1128-1132
- Netto MV, Ambrosio R Jr., Shen TT, Wilson SE. **Wavefront analysis in normal refractive surgery candidates**. J Refract Surg 2005;21:332-338
- Artal P, Ferro M, Miranda I, Navarro R. **Effects of aging in retinal image quality**. J Opt Soc Am A 1993;10:1656-1662
- Guirao A, Gonzalez G, Redondo M, Geraghty E, Norrby S, Artal P. **Average optical performance of the human eye as a function of age in a normal population**. Invest Ophthalmol Vis Sci 1999;40:203-213

  Calver RI, Cox MJ, Elliot DB. **Effect of aging on the monochromatic aberrations of the human eye**. J Opt Soc Am A 1999;9:2069-2078
- McClellan JS, Marcos S, Burns SA. **Age-related changes in monochromatic wave aberrations of the human eye**. Invest Ophthalmol Vis Sci 2001;42:1390-1395
- He JC, Sun P, Held F, Thorn F, Sun X, Gwiazda JE. **Wavefront aberration in eyes of emmetropic and moderately myopic school children and young adults**. Vis Res2002;42:1063-1070
- Artal P, Berrio E, Guirao A. **Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age**. J Opt Soc Am A 2002;19:137-143
- Wang L, Santaella RM, Booth M, Koch DD. **Higher-order aberrations from the internal optics of the eye**. J Cataract Ref Surg 2005;31:1512-1519
- Applegate RA, Ballentine C, Gross H, Sarver EJ, Sarver CA. **Visual acuity as a function of Zernike mode and level of root mean square error**. Optom Vis Sci. 2003 Feb;80(2):97-105
- Applegate RA, Sarver EJ, Khemsara V. **Are all aberrations equal?** J Refract Surg. 2002 Sep-Oct; 18(5):S556-62
- Applegate RA, Marsack JD, Ramos R and Sarver EJ. **Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance**. 2003. Journal of Cataract & Refractive Surgery 29 (8): 1487-1495
- Thibos, L. N., Hong, X., Bradley, A., & Applegate, RA. **Metrics of optical quality of the eye. 2004**. Journal of Vision