

## PRISE EN COMPTE DES PARAMETRES PUPILLAIRES POUR LE CENTRAGE DES PROFILS D'ABLATION

Christophe Panthier, Imène M. Salah, Romain Courtin, Emmanuel Guilbert, Alain Saad, Damien Gatinel.

Service d'ophtalmologie du Dr Gatinel, Fondation Rothschild, 25 rue Manin, 75019 Paris.

Mots Clés : modifications pupillaires ; axe pupillaire; image de Purkinje; axe visuel; angle Kappa ; chirurgie réfractive.

Keywords : pupil center shift; pupillary axis ; Purkinje images ; visual axis ; Kappa angle ; refractive surgery.

Le choix du centrage des profils de photoablations au laser excimer fait l'objet d'un débat classique en chirurgie réfractive (1–3). Alors que certains auteurs travaillent sur le centre pupillaire d'autres, au contraire, lui préfèrent le vertex cornéen, plus proche de la lignée de visée (2). De plus, avec l'essor des traitements personnalisés (topo et aberro-guidés) en chirurgie réfractive, la prise en compte de la dynamique pupillaire suscite un intérêt a priori justifié afin d'optimiser les résultats postopératoires.

En effet, lors d'une chirurgie réfractive, la cornée est sculptée de façon à fournir une correction réfractive appropriée sur une zone optique de variant habituellement de 5,0 à 6,5 mm de diamètre. Si l'ablation cornéenne est bien centrée lorsque la pupille est de petite taille mais se décentre lorsque la pupille est en mydriase, les patients peuvent percevoir des halos lumineux, des éblouissements en conditions de faible éclairage, voire subir une réduction d'acuité visuelle ou de sensibilité au contraste.

La pupille de l'œil est constituée par l'image du diaphragme irien vue au travers la cornée. L'œil n'est pas comparable à un système optique symétrique où les lentilles sont centrées autour d'un axe de révolution commun, et où la pupille serait également centrée sur cet axe. L'axe optique de l'œil correspond à un axe théorique, qui est déterminé comme la moyenne entre l'axe optique de la cornée et du cristallin. Il peut être compris comme un axe géométrique, mais il n'a pas de signification optique directe en raison du caractère particulier de la fixation oculaire.

La pupille de l'œil est généralement décentrée de 0,5 mm en nasal de l'axe optique. La position du disque pupillaire vis à vis des éléments réfractifs de l'œil détermine le pourtour d'un faisceau lumineux incident dans l'œil, et détermine donc en partie, la quantité et le type d'aberrations qui influencent la qualité de l'image rétinienne.

Plusieurs facteurs influencent la valeur du diamètre de la pupille. Le plus important est le niveau d'illumination. Le diamètre pupillaire peut varier de 2,0 mm en forte illumination à 8,0 mm en condition de faible illumination (4). Le diamètre pupillaire diminue lors du phénomène d'accommodation-convergence, et ceci à son

importance dans le cadre du traitement chirurgical de la presbytie. Enfin, le diamètre pupillaire diminue également avec l'âge, et la pupille réagit moins aux changements de niveaux lumineux lors du vieillissement (Birren, Casperson, & Botwinick, 1950).

Plusieurs auteurs (5,6) ont également montré qu'en conditions naturelles et pharmacologiques de dilatation, le centre pupillaire semble se déplacer vis à vis du limbe avec les variations du diamètre de la pupille (jusqu'à 0,4 mm pour certains sujets). Récemment, Mated et al. ont montré qu'il existait un shift du centre pupillaire caractérisé par un déplacement en temporal lors de la dilatation. L'amplitude de ce déplacement du centre pupillaire était en moyenne de 0,12mm avec un maximum de 0,57mm. Aucune corrélation significative n'a été mise en évidence entre le déplacement du centre pupillaire et le sexe, l'âge, l'œil étudié (droit ou gauche) ou l'amétropie. La géométrie de la pupille est une entité mouvante et la détermination du centre de celle-ci dépend de nombreux paramètres.

La pupille entretient certains rapports avec les principaux axes oculaires. L'axe pupillaire correspond à celle qui parmi les lignes perpendiculaires à la surface de la cornée passe par le centre de la pupille.

L'axe visuel relie le point de fixation (F) au premier point nodal, et le deuxième point nodal à la fovéa. Il correspond au trajet théorique le plus direct reliant la source lumineuse à la fovéa. L'axe visuel n'étant pas défini vis-à-vis de la pupille irienne, sa localisation théorique n'est donc **pas modifiée par les variations du diamètre pupillaire**. La projection de l'axe visuel dans l'aire pupillaire peut être comprise comme celle du pic de sensibilité fovéale; il constitue ainsi au moins sur le plan théorique un point de centrage idéal. Malheureusement il n'existe aucun moyen d'examen disponible en routine de repérer les coordonnées pupillaires ou la projection cornéenne de l'axe visuel.

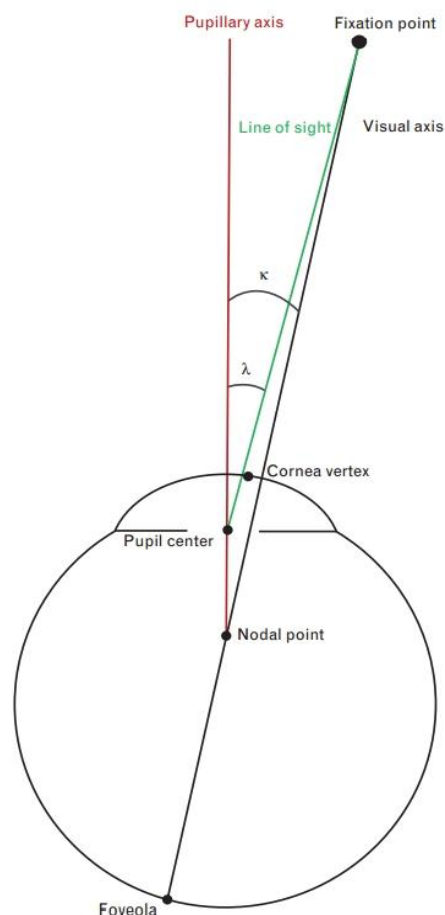
La ligne qui relie le point de fixation au centre de la pupille irienne est définie comme la ligne de visée (line of sight). La ligne de visée n'est pas un axe dont la direction est constante, puisqu'elle dépend elle-même du shift pupillaire.

Le vertex cornéen un point remarquable situé non loin de cette ligne de visée et de l'axe visuel: il correspond à la projection du reflet cornéen du point de fixation, appelé première image de Purkinje. Certaines études suggèrent que la projection de l'axe visuel dans le plan pupillaire est plus proche de l'emplacement apparent du vertex que du centre pupillaire. La localisation du vertex dépend de la stratégie de fixation (position de l'œil vis à vis de la source fixée qui fournit le reflet), mais n'est pas influencée par les mouvements pupillaires.

L'axe pupillaire et l'axe visuel ne sont pas confondus. L'axe pupillaire forme avec la ligne de visée l'angle lambda, et avec l'axe visuel l'angle kappa (figure 1). En pratique, la proximité entre l'axe visuel et la ligne de visée permet de considérer ces angles comme équivalents. Certains topographes comme l'Orbscan® fournissent une estimation dite de l'angle Kappa, à partir d'une mesure conjointe du plan et de la localisation de la pupille irienne (topographie d'élévation par balayage) et de la reconstruction de la face antérieure de la cornée. En réalité, cet angle correspond à la définition théorique de l'angle Lambda, mais en pratique cette distinction ne revêt pas une grande importance. La valeur positive de l'angle Kappa (positive car l'axe pupillaire est généralement temporal à la ligne de visée et l'axe visuel) est comprise dans la population normale entre 4° et 6°. Sa valeur tend à augmenter chez les hypermétropes et astigmatés (jusqu'à 10°, parfois plus).

La valeur de l'angle Kappa (ou Lambda) ne permet pas de réduire l'incertitude sur la position de l'axe visuel, mais elle traduit une abduction plus marquée de l'œil vis à vis de son axe optique en conditions de fixation fovéale.

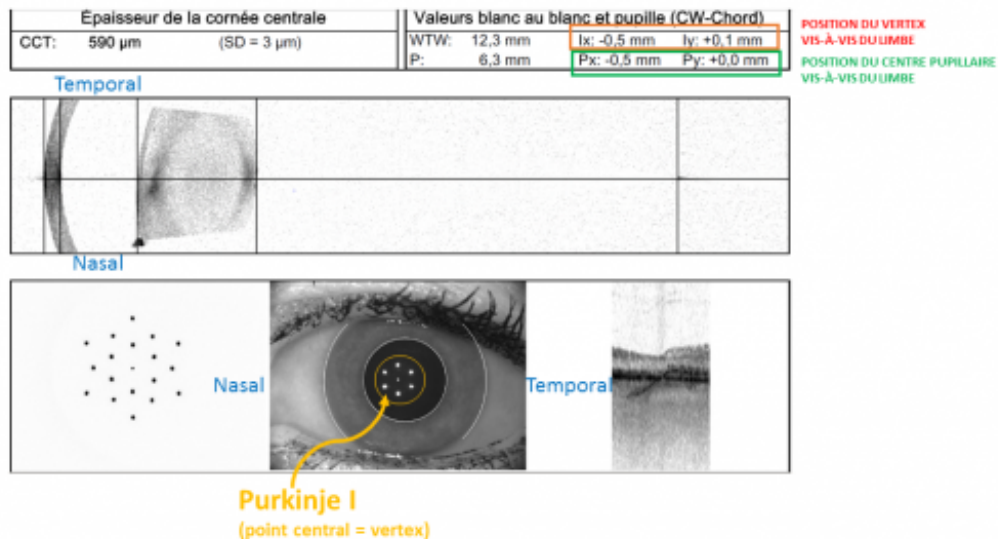
L'angle Kappa est parfois assimilé à la distance entre le centre de la pupille et le vertex, et exprimé en mm, mais cette terminologie est impropre au regard de la théorie. Toutefois, la distance vertex-centre pupillaire est naturellement influencée par la valeur de l'angle Kappa.



Certaines études considèrent le centre pupillaire comme un bon repère anatomique pour centrer les traitements personnalisés si l'on considère que ce centre se déplace relativement peu entre les différentes conditions d'illuminations (7–10). Il est d'ailleurs aujourd'hui communément admis (7) que la ligne de visée doit être prise comme référence pour le calcul des aberrations du front d'onde oculaire. Cependant, s'il y survient des variations importantes de la position du centre de la pupille lors de la dynamique pupillaire, le repérage de cet axe deviendrait moins fiable et moins reproductible entre les examens, car sa position dépendrait des variations d'éclaircissement, et du déplacement qu'elles provoquent du centre de la pupille. En effet, certaines études suggèrent qu'un faible déplacement suffit à entraîner une dégradation de la qualité de vision selon que l'axe considéré pour l'étude des aberrations optiques est fixe, alors qu'il existe un déplacement de seulement 0.07mm en condition scotopique (mydriase 7mm) et de 0.2mm en condition photopique (myosis 3mm) (10). Dans l'étude de Mabhed et al., (11) cette amplitude de déplacement représente 75% des yeux en condition mésopique et 8% en condition scotopique. Par ailleurs, le vertex cornéen apparaissant comme un repère *a priori*

plus proche de l'axe visuel que le centre pupillaire, certains auteurs recommandent de centrer par défaut le profil d'ablation sur le vertex(12,13).

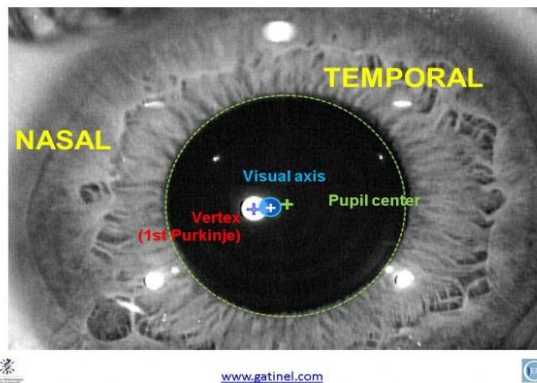
## COUPE OCT SWEEP SOURCE (IOL MASTER 700)



[www.gatinel.com](http://www.gatinel.com)

En pratique le centrage systématique d'une chirurgie réfractive sur un repère autre que le centre pupillaire est rendu difficile par l'absence de repère évident sur la cornée au cours de la procédure chirurgicale, le stroma cornéen n'étant pas à même de fournir un reflet spéculaire de bonne qualité (la surface stromale fournit un reflet diffus).

Certains repères oculaires et leur intersection apparente avec la cornée en conditions de fixation coaxiale peuvent servir de référence pour le centrage du traitement. Comme souligné, deux points sont particulièrement utiles en théorie : le vertex et le centre pupillaire. Le vertex cornéen est la projection cornéenne du reflet du centre des mires de Placido, c'est-à-dire le centre de la première image de Purkinje. (Figure 3). Répétons qu'il n'est pas visible au cours de la chirurgie photoablatrice, mais ses coordonnées peuvent être repérées vis à vis du centre pupillaire sur une carte topographique préopératoire ou encore un examen de biométrie oculaire moderne. Au cours de la chirurgie, le système de délivrance du laser détermine la position du vertex vis à vis du centre pupillaire et des informations glanées en peropératoire par le topographe muni d'une fonction de pupillométrie (ex: laser Wavelight EX500 et topolyzer Vario, Alcon Wavelight, USA).



**Figure 3:** Représentation en vue de face d'un œil gauche des points d'intersection des axes avec la face antérieure de la cornée. En rouge : vertex i.e. centre des mires de Placido, intersection entre l'axe kératométrique passant par le point de fixation et sa normale à la surface cornéenne. En bleu : axe visuel supposé. En vert : centre géométrique de la pupille (se situe dans le plan pupillaire) ([gatinel.com](http://gatinel.com))

En pratique, l'étude de la position du vertex pour les yeux atteints de myopies faibles à moyenne révèle que le centre de la pupille et le vertex sont très proches (moins de 200 microns), voire quasi superposés pour la plupart des yeux forts myopes (11). Ainsi, pour la plupart des yeux myopes, le centrage peut être effectué par défaut sur le centre de la pupille. En revanche pour les yeux hypermétropes et les astigmatés avec angle Kappa important, la distance centre pupillaire-vertex est souvent plus prononcée (plus de 300 microns, jusqu'à 800 microns). Pour ces yeux, il est préférable de choisir un centrage décalé en direction du vertex (mi-distance, ou  $\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$ ).

En cas de traitement topo ou aberro guidé, il est important de prendre en considération la dynamique pupillaire, que ce soit pour les traitements guidés par le front d'onde (puisque celui-ci est généralement mesuré vis à vis du centre pupillaire) ou pour les traitements guidés par la topographie cornéenne (qui sont généralement référencés sur le vertex... dont la position est repérée vis à vis du centre pupillaire).

En cas de traitement personnalisé, il faut adapter la luminance du système d'éclairage du laser en lumière visible afin d'obtenir une taille de pupille identique ou proche de celle de l'analyse abérométrique. Cette luminance doit être maintenue constante durant le traitement. Même si le traitement est centré sur le vertex, la position de celui-ci n'étant connue du laser et de son système de poursuite oculaire (eye tracker) que vis à vis du centre de la pupille, il est important d'obtenir une stabilité du centre pupillaire au cours de la délivrance de la photoablation.

Pour les traitements non personnalisés, et quel que soit l'amétropie à corriger, certains chirurgiens proposent de « décentrer » le traitement entre le centre pupillaire et le vertex, en se rapprochant du vertex ( $\frac{2}{3}$  -  $\frac{1}{3}$ ) afin de centrer le profil d'ablation sur la position supposée de l'axe visuel. Dans tous les cas, cette approche requiert la réalisation d'une topographie et d'une mesure pupillaire conjointe, et son transfert vers le logiciel pilotant le laser.

Conclusion :

Le centrage du traitement photoablatif peut être délivré sur le centre pupillaire pour la plupart des yeux myopes. Pour les yeux astigmatés et hypermétropes, une stratégie de traitement décalée en direction du vertex cornéen semble préférable. Cette stratégie requiert une mesure préopératoire topographique et pupillaire, et constitue en soi une variable de personnalisation importante pour améliorer la qualité visuelle des yeux opérés de chirurgie réfractive cornéenne.

Référence :

1. Applegate RA, Thibos LN, Twa MD, Sarver EJ. Importance of fixation, pupil center, and reference axis in ocular wavefront sensing, videokeratography, and retinal image quality. *J Cataract Refract Surg.* janv 2009;35(1):139-52.
2. Pande M, Hillman JS. Optical zone centration in keratorefractive surgery. Entrance pupil center, visual axis, coaxially sighted corneal reflex, or geometric corneal center? *Ophthalmology.* août 1993;100(8):1230-7.
3. Schwiegerling JT. Eye axes and their relevance to alignment of corneal refractive procedures. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. août 2013;29(8):515-6.
4. Crawford BH. The dependence of pupil size upon external light stimulus under static and variable conditions. In 1936. p. 376-95. Disponible sur: <internal-pdf://Crawford-1936-4109206272/Crawford-1936.pdf>
5. Walsh G, Charman WN. The effect of pupil centration and diameter on ocular performance. *Vision Res.* 1988;28(5):659-65.
6. Wilson MA, Campbell MC, Simonet P. The Julius F. Neumueller Award in Optics, 1989: change of pupil centration with change of illumination and pupil size. *Optom Vis Sci Off Publ Am Acad Optom.* févr 1992;69(2):129-36.
7. Applegate RA, Thibos LN, Bradley A, Marcos S, Roorda A, Salmon TO, et al. Reference axis selection: subcommittee report of the OSA Working Group to establish standards for measurement and reporting of optical aberrations of the eye. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. oct 2000;16(5):S656-8.
8. Kermani O, Oberheide U, Schmiedt K, Gerten G, Bains HS. Outcomes of hyperopic LASIK with the NIDEK NAVEX platform centered on the visual axis or line of sight. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. janv 2009;25(1 Suppl):S98-103.
9. Okamoto S, Kimura K, Funakura M, Ikeda N, Hiramatsu H, Bains HS. Comparison of wavefront-guided aspheric laser in situ keratomileusis for myopia: coaxially sighted corneal-light-reflex versus line-of-sight centration. *J Cataract Refract Surg.* nov 2011;37(11):1951-60.
10. Tabernero J, Atchison DA, Markwell EL. Aberrations and Pupil location under corneal topography and Hartmann-Shack illumination conditions. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* avr 2009;50(4):1964-70.

11. Mabed IS, Saad A, Guilbert E, Gatinel D. Measurement of pupil center shift in refractive surgery candidates with caucasian eyes using infrared pupillometry. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. oct 2014;30(10):694-700.
12. Arbelaez MC, Vidal C, Arba-Mosquera S. Clinical outcomes of corneal vertex versus central pupil references with aberration-free ablation strategies and LASIK. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. déc 2008;49(12):5287-94.
13. Reinstein DZ, Gobbe M, Archer TJ. Coaxially sighted corneal light reflex versus entrance pupil center centration of moderate to high hyperopic corneal ablations in eyes with small and large angle kappa. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. août 2013;29(8):518-25.