

LE DOSSIER Astigmatisme

Traitement de l'astigmatisme régulier par Lasik

RÉSUMÉ : Le Lasik est un moyen de correction très efficace de l'astigmatisme. Ce défaut orienté nécessite un contrôle précis de l'axe du traitement et la réalisation d'un volet cornéen adapté. Les conséquences d'une erreur d'axe se traduiront par un astigmatisme résiduel d'axe différent de l'axe initial, qui peut être analysé par le calcul vectoriel.

Nous proposons, dans cet article, un calcul vectoriel simplifié permettant d'évaluer simplement l'erreur d'axe commise devant un astigmatisme postopératoire.

Avant de réaliser le volet cornéen, il est important de visualiser le profil ablatif prévu pour exposer au laser Excimer un plan stromal suffisant.

L'astigmatisme qui servira de base au traitement est l'astigmatisme oculaire global dont la face antérieure de la cornée constitue l'élément principal.

Les profils ablatifs de l'astigmatisme, réalisés par le laser Excimer, pourront être de type myopique ou hypermétropique. Dans les deux cas, les zones de transition avec le reste de la cornée seront progressives de façon à ce que la courbure cornéenne se rapproche d'une sphère.

L'élimination d'un kératocône fruste est capitale avant d'envisager ce traitement, dans la mesure où cette pathologie se traduit souvent initialement par un astigmatisme.



→ J.-P. ROZENBAUM
Centre Vision Ouest, SARTROUVILLE.
CNO Quinze-Vingts, PARIS.

Le Lasik permet un traitement efficace de l'astigmatisme. Avant d'envisager cette procédure, il faudra éliminer avec soins l'existence d'un kératocône fruste dont la première expression se traduit souvent par un astigmatisme.

L'astigmatisme est un **défaut optique orienté**. Le traitement laser devra être réalisé sur un axe précis et une zone optique large pour permettre des zones de transition progressive. Le contrôle de l'axe a été amélioré par les systèmes de contrôle de la cyclotorsion intégrés au laser. **La qualité du traitement dépendra donc de la maîtrise de l'axe du traitement et de la réalisation d'un volet adapté.**

L'astigmatisme est **essentiellement lié à la forme de la cornée**. Mais, contrairement à l'implantation intraoculaire torique, le traitement par laser chez le sujet phaque devra corriger l'astigmatisme oculaire global et pas seulement cornéen.

Le calcul vectoriel de l'astigmatisme est un élément fondamental qui permet de comprendre et de quantifier l'**astigmatisme secondaire induit par une erreur d'axe**. Une formule de calcul vectoriel simplifié sera proposée dans cet article, et pourra être utilisée pour analyser ses résultats [1, 2].

Seul l'astigmatisme régulier sera abordé dans cet article.

LE DOSSIER

Astigmatisme

Quelques rappels

L'astigmatisme peut se définir par ses conséquences cliniques, par son origine anatomique ou par son formalisme [7]. Il peut être isolé ou associé à une myopie ou une hypermétropie.

1. Prévalence

Selon certaines études, l'astigmatisme serait supérieur ou égal à 1 dioptrie dans 35 % des cas et supérieur à 2 dioptries dans 8 % [12].

Les astigmatismes importants seraient plus fréquemment directs ou indirects, plus rarement obliques [10].

2. Conséquences visuelles

>>> L'astigmatisme oculaire réduit, en fonction de sa magnitude et de l'équivalent sphérique, l'acuité visuelle et la sensibilité aux contrastes.

>>> L'astigmatisme non corrigé va percevoir une ovalisation des formes, une fatigue accommodative dans sa tentative de lutter contre l'absence de stigmatisme fovéal [7].

>>> L'astigmatisme régulier ou défocus cylindrique [7] est corrigible par un verre torique.

>>> L'astigmatisme irrégulier ne sera que partiellement compensé par les verres en raison d'aberrations de haut degré (*High order aberrations* [HOA]) mesurées par les topographes-aberromètres.

3. Anatomie

>>> L'astigmatisme total est principalement lié à la **toricité cornéenne antérieure**.

>>> L'**astigmatisme de la face postérieure** serait en moyenne de 0.30D avec des extrêmes allant de 0.01 à 1.10D. Il serait plutôt de type inverse [12].

>>> La **toricité** de la cornée est la conséquence d'une courbure dont le **rayon varie de façon progressive** entre deux axes extrêmes séparés par un angle de 90° (c'est-à-dire la puissance dioptrique). Lorsque le méridien le plus puissant (le plus courbe) est vertical (proche de 90°/270°), l'astigmatisme est direct. Lorsqu'il est horizontal, proche de (0°/180°), il est inverse. Lorsqu'il est proche des axes (45°/225° ou 135°/315°), il est oblique.

>>> L'**astigmatisme cristallinien** est statistiquement inférieur à 0.50D en l'absence de cataracte [3, 4].

Formalisme de l'astigmatisme

1. Formulation verres correcteurs

Contrairement à ce que peut laisser penser la formulation de l'astigmatisme en cylindre et axe, la courbure cornéenne réelle **ne correspond pas à 2 dioptries de puissance différente et séparés de 90°**; la toricité cornéenne correspond à **une variation progressive** de la courbure cornéenne entre les deux axes extrêmes, séparés de 90°. Cette notion fondamentale permet **d'imaginer le profil photoablatif** d'un traitement et les zones de transition nécessaires.

2. Formulation polynomiale

Les aberromètres quantifient le déphasage du front d'onde induit par l'astigmatisme. L'astigmatisme correspond à un déphasage de forme parabolique autour du défocus (équivalent sphérique). Cet effet est scindé en deux fonctions polynomiales, Z2 (-2) et Z2 (+2), qui traduisent le déphasage infligé au front d'onde [3]. La fonction Z2 (+2) traduira la composante directe ou inverse de l'astigmatisme. La fonction Z2 (-2) traduira la composante oblique (45°/135°). Chaque fonction sera affectée d'un coefficient RMS, C2

(+2) et C2 (-2), exprimé en microns. Par exemple un astigmatisme direct à 90° sera exprimé par un C2 (+2) positif et un C2 (-2) égale à zéro [3].

3. Coefficient de Fourier

L'astigmatisme est assimilé à une harmonique dont le signal est représenté par la mesure de la variation de puissance kératométrique sur un anneau circulaire de 360°, situé à une distance donnée du centre cornéen. La magnitude de l'astigmatisme va être définie par la distance entre le point le plus haut et le plus bas. L'axe de l'astigmatisme va être défini par la position des pics et des creux [3].

Représentation vectorielle de l'astigmatisme

1. Le calcul vectoriel

Il revêt une **importance fondamentale** pour évaluer le rapport entre erreur d'axe et l'astigmatisme résiduel [3, 4, 6, 7]. L'astigmatisme peut être représenté par un vecteur dont la longueur représente la magnitude et la direction représente l'axe par rapport à une direction de référence (0-180°). Par convention, le vecteur dirigé vers le haut traduit un astigmatisme positif et le vecteur dirigé vers le bas, un astigmatisme négatif. Pour corriger un astigmatisme, il faut réaliser un traitement qui va générer un astigmatisme de même magnitude mais de sens opposé [4].

2. Conséquence d'une erreur d'axe Calcul vectoriel simplifié

Nous proposons ici une formule de calcul vectoriel simplifié [1, 2]. Le calcul vectoriel montre qu'une erreur d'axe de 30° [3, 6, 7] laisse un astigmatisme résiduel de même magnitude, mais d'axe différent. Il existe une proportionnalité entre l'erreur d'axe et l'importance de l'astigmatisme post-opératoire.

LE DOSSIER Astigmatisme

$$\text{Astigmatisme résiduel} = \text{Astigmatisme initial} \times \frac{\text{erreur d'axe}}{30}$$

Un patient est opéré d'un astigmatisme préopératoire = 90° +1.4D.

La réfraction postopératoire est de : 67,5° +1.4D.

Cela ne signifie pas que l'erreur d'axe réalisé lors de l'opération a été de 22,5°.

L'astigmatisme induit est supérieur à l'astigmatisme initial.

En appliquant cette formule, on peut évaluer l'erreur d'axe Er pendant l'opération :

$$-1.4D = 1D \times Er/30;$$

$$-1.4 \times 30 = 1 \times Er;$$

$$-42^\circ = \text{Erreur d'axe.}$$

En conclusion, la réfraction postopératoire 67,5° +1.4D chez ce patient montre une erreur d'axe Er de 42° au cours de l'intervention (patient traité sur 132° au lieu de 90°).

La mesure postopératoire retrouvera un cylindre de 1.4D orienté sur un axe de 90° - (42/2) ; = 69°. 69° étant la bissectrice des vecteurs 90° et 42°.

ENCADRÉ : Application du calcul vectoriel simplifié.

CRS-Master Treatment Summary: 4/17/2015, 9:02:55 AM, Admin,

Patient Information
1/1/1970

Treatment Information

Method STANDARD SCA	Procedure LASIK	Profile Aberration Smart Ablation
-------------------------------	---------------------------	---

Flap Creation: Visumax 110µm

Refraction @ 12.50 mm

Type	Sphere [D]	Cylinder [D]	Axis	Diameter [mm]
Manifest Spectacle Refraction	0.00	2.00	80	6.50
Applied Target Refraction	0.00	0.00	80	6.50
Intended Correction	0.00	2.00	80	6.50

Safety Panel

Position	Pachymetry [µm]	RST Limit [µm]	Post-Op RST [µm]	Ablation Depth [µm]
r = 3.39 mm, a = 171°	550	250	398	42

K-Reedings

Source	DEFAULT	
K Mean	7.86 mm	42.94D

z-Settings

Shift	0.00 µm
Clip	0.00 µm

Flap

Diameter	9.50 mm
Mean Thickness	110 µm
Standard Deviation	0 µm <input checked="" type="checkbox"/>

Ablation Pattern

FIG. 1: Astigmatisme hypermétropique simple (80° +2,00).

Par exemple si on traite un astigmatisme de 2D en faisant une erreur d'axe de 30°, on laissera un astigmatisme d'une magnitude de 2D mais sur un axe différent. Cependant, le décalage d'axe retrouvé par l'examen postopératoire ne sera pas de 30°. Le calcul vectoriel permet d'évaluer la valeur et l'axe du nouvel astigmatisme induit. Ce calcul est intéressant pour faire la différence entre traitement insuffisant et erreur d'axe. Cette formule peut être également utilisée pour évaluer le résultat d'un implant intraoculaire torique.

On peut ainsi formuler de façon simplifiée (d'après J.-P. Rozenbaum [1, 2]) (cf. **encadré**).

Les profil ablatif du laser Excimer

Important : L'astigmatisme ne correspond pas à deux focales séparées de 90°, mais à une infinité de focales dont la puissance augmente (ou diminue) progressivement entre ces deux méridiens principaux.

La programmation du laser indiquera la puissance focale sur ces deux méridiens. La photoablation sera maximale sur l'axe du traitement, et permettra des zones de transition progressives et douces avec les zones de moindre traitement de façon à limiter l'induction de HOA. Ce traitement imposera des zones optiques larges pour améliorer la qualité de vision.

1. Astigmatisme hypermétropique simple

Exemple: (80° +2) (fig. 1)

>>> Signification: les faisceaux lumineux passant par l'axe 80° sont focalisés sur la fovéa. Les faisceaux, en s'éloignant de cet axe, se focalisent ensuite de plus en plus en arrière de la fovéa avec un maximum sur l'axe 170°.

>>> Traitement : la cambrure de la cornée devra être augmentée sur l'axe 170°. Le profil ablatif, de type cylindre positif, aura la forme d'ailes de papillon orientée perpendiculairement à l'axe de

l'astigmatisme (170° dans cet exemple), avec un maximum d'ablation sur la périphérie du lit stromal et comportant une transition progressive avec les zones de moindre ablation.

2. Astigmatisme myopique simple

Exemple : (80° -2) (fig. 2)

>>> Signification : les faisceaux lumineux passant par l'axe 80° seront focalisés sur la fovéa. Les faisceaux, en s'éloignant de cet axe, se focalisent ensuite de plus en plus en avant de la fovéa avec un maximum sur l'axe 170°.

>>> Traitement : la photoablation devra créer une concavité (cylindre négatif) de façon à aplanir le méridien le plus cambré. Elle aura une forme de fuseau orienté sur 80° avec un maximum d'ablation sur ce méridien et comportant une transition progressive avec les zones de moindre ablation.

3. Astigmatisme composé

● *Astigmatisme composé myopique*

Exemple : (0° -4) -4 (fig. 3)

>>> Signification : les faisceaux lumineux sont tous focalisés en avant de la rétine. Ils focaliseront de plus en plus en avant de la fovéa depuis un minimum sur l'axe 0° jusqu'à un maximum sur l'axe 90°.

>>> Traitement : la photoablation corrigera la composante sphérique puis la composante cylindrique en un temps. Dans cet exemple, la photoablation sera de type sphérique sur -4D, et se complètera d'une ablation en cylindre négatif sur l'axe 0°.

● *Astigmatisme composé hypermétropique*

Exemple : (0° +3) +3,00 (fig. 4)

>>> Signification : les faisceaux lumineux sont tous focalisés en arrière de la rétine. Ils focaliseront de plus en plus en arrière de la fovéa depuis un minimum sur l'axe 90° jusqu'à un maximum sur l'axe 0°.

CRS-Master Treatment Summary: 4/17/2015, 9:01:32 AM, Admin,

Patient Information
1/1/1970

Treatment Information

Method STANDARD SCA	Procedure LASIK	Profile Aberration Smart Ablation
-------------------------------	---------------------------	---

Flap Creation: Visumax 110µm

Refraction @ 12.50 mm

Type	Sphere [D]	Cylinder [D]	Axis	Diameter [mm]
Manifest Spectacle Refraction	0.00	-2.00	80	6.50
Applied Target Refraction	0.00	0.00	80	6.50
Intended Correction	0.00	-2.00	80	6.50

Safety Panel

Position	Pachymetry [µm]	RST Limit [µm]	Post-Op RST [µm]	Ablation Depth [µm]
r = 2.59 mm, a = 260°	550	250	388	52

K-Reedings

Source	DEFAULT
K Mean	7.86 mm 42.94D

Ablation Pattern

z-Settings

Shift	0.00 µm
Clip	0.00 µm

Flap

Diameter	9.50 mm
Mean Thickness	110 µm
Standard Deviation	0 µm <input checked="" type="checkbox"/>

FIG. 2 : Astigmatisme myopique simple (80° -2,00).

LE DOSSIER Astigmatisme



FIG. 3 : Astigmatisme composé myopique : -4 (0° -4).



FIG. 4 : Astigmatisme composé hypermétropique : +3 (0° +3).

CRS-Master Treatment Summary: 4/17/2015, 9:04:18 AM, Admin,

Patient Information
1/1/1970

Treatment Information

Method	Procedure	Profile
STANDARD SCA	LASIK	Aberration Smart Ablation

Flap Creation: Visumax 110µm
Refraction @ 12.50 mm

Type	Sphere [D]	Cylinder [D]	Axis	Diameter [mm]
Manifest Spectacle Refraction	3.00	-2.00	80	6.50
Applied Target Refraction	0.00	0.00	80	6.50
Intended Correction	1.00	2.00	170	6.50

Safety Panel

Position	Pachymetry [µm]	RST Limit [µm]	Post-Op RST [µm]	Ablation Depth [µm]
r = 3.39 mm, a = 261°	550	250	380	60

K-Reedings

Source	DEFAULT
K Mean	7.86 mm 42.94D

Ablation Pattern

z-Settings

Shift	0.00 µm
Clip	0.00 µm

Flap

Diameter	9.50 mm
Mean Thickness	110 µm
Standard Deviation	0 µm <input checked="" type="checkbox"/>

FIG. 5 : Astigmatisme mixte : +3 (80° -2) = -1 (170° +2).

>>> Traitement : la photoablation corrigera la composante sphérique puis la composante cylindrique en un temps. Dans cet exemple, la photoablation sera de type sphérique sur +3D, et se complètera d'une ablation en cylindre positif sur l'axe 90°.

4. Astigmatisme mixte

Exemple: (80° -2) +3 (fig. 5)

>>> Signification : cette formule peut également se formuler par +1 (170° +2).

>>> Traitement : le laser utilisera souvent de façon automatique (cylindre positif, cylindre négatif ou cylindre croisé) la formule qui consomme moins de tissu cornéen.

Contrôle de la cyclotorsion

Le contrôle de la cyclotorsion revêt un intérêt indiscutable lorsque l'astigmatisme est supérieur à 1.50D. Nous avons vu qu'une erreur de 15° va laisser un astigmatisme résiduel de 0.75D pour un astigmatisme initial de 1.50D. Plus l'astigmatisme est élevé, plus les conséquences d'une erreur d'axe sont importantes [11].

La variation d'axe entre la position assise et couchée varierait, selon les études, de 2° à 10°. Elle serait supérieure à 10° dans 8 % des cas [13]. La variation d'axe durant l'intervention (*dynamic rotation*) liée à la cyclotorsion serait minime, évaluée de 1 à 3° dans la plupart des cas [13].

Nous ne devons pas oublier l'importance du centrage. L'impact théorique d'un décentrement sur les aberrations optiques est proportionnellement supérieur à l'effet de la cyclotorsion [11]. Lorsqu'on ne dispose pas de système couplé au laser de contrôle de la cyclotorsion, le repérage manuel de l'axe par marqueur s'impose sur des astigmatismes importants.

1. Les systèmes de reconnaissance oculaires

Ils sont basés sur une reconnaissance infrarouge ou pixélisée de l'iris et des vaisseaux limbiques. L'image sera prise en préopératoire avec des appareils couplés à des aberromètres, topographes ou autres systèmes de prise d'image. Le patient devra garder la tête droite pendant la mesure. On distingue :

>>> Les systèmes statiques sont les plus fréquents. Le système de reconnaissance est intégré au laser, il corrige d'emblée l'erreur d'axe consécutive à la mauvaise position du patient et à la cyclotorsion avant de débiter le laser (**fig. 6**). Durant l'intervention, le système de *tracking* maintiendra le centrage, mais ne modifiera plus l'axe déterminé au début.

>>> Les systèmes dynamiques [14] contrôlent la cyclotorsion pendant le déroulement du laser.

>>> Les systèmes de neurostimulation peropératoire sont peu utilisés [9]. Le patient fixe des lignes verticales ou horizontales projetées par des diodes pendant l'opération.

2. Marquage non numérique des axes

L'intérêt du marquage manuel des axes s'impose sur des astigmatismes significatifs en l'absence de systèmes numériques.

Le volet cornéen

Il est important, avant de poser l'anneau de succion, de prévisualiser l'axe et la

géométrie du profil photoablatif. Le volet cornéen doit permettre d'exposer au laser Excimer une zone stromale suffisante, et la position de charnière doit être adaptée.

Le volet cornéen est réalisé le plus fréquemment par laser femtoseconde. Le microkératome est encore utilisé par certains opérateurs. La technique du SMILE offre également la possibilité de traiter l'astigmatisme, mais ne dispose pas à ce jour de système de contrôle de la cyclotorsion.

1. La charnière

Elle doit être suffisamment périphérique pour ne pas être exposée au faisceau du laser Excimer, et sera **protégée** si elle se situe dans l'axe du traitement (**fig. 7**). Certains opérateurs positionnent la charnière en fonction de cet axe.

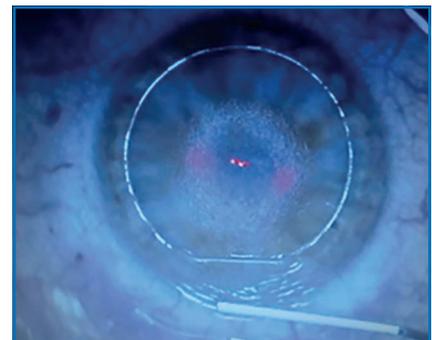


FIG. 7 : Volet de diamètre suffisant et protection de la charnière.

2. Le diamètre du volet

C'est un point fondamental. Si la photoablation du laser Excimer dépasse les limites du volet de façon significative, les conséquences visuelles seront difficiles à traiter, même en cas de reprise. Elles seront souvent définitives, et se traduiront par des HOA gênantes. Il est donc fondamental que le diamètre du volet corresponde à la zone de photoablation. Pour certains opérateurs, la forme programmée du volet sera ovalisée, avec un axe correspondant à celui de la photoablation.



FIG. 6 : Reconnaissance oculaire numérique : contrôle statique avec correction de la cyclotorsion.

LE DOSSIER

Astigmatisme

Reprise en cas de résultats insuffisants

En cas de traitement insuffisant, la reprise est réalisée après soulèvement du volet, à condition que son diamètre soit correct. Si le diamètre et la position du volet sont incorrects, le résultat d'un retraitement pourra être compromis. **Il faudra éliminer une ectasie** postopératoire avant toute reprise, en réalisant des tomographies cornéennes d'évaluation voire d'autres examens (OCT cornéen).

La nouvelle programmation consistera à réaliser :

- soit un traitement standard sphéro-cylindrique correspondant à l'amétropie postopératoire,
- soit un traitement customisé (topo-guidé ou aberroguidé) si le traitement initial est asymétrique ou décentré.

Conclusion

Nous retiendrons les points suivants :

- veillez à la rectitude de la tête lors des mesures préopératoires ;
- positionner la tête correctement lorsque le patient est allongé ;
- le marquage préopératoire peut être utilisé en l'absence de système de reconnaissance oculaire ;
- utiliser les contrôles de cyclotorsion intégrés au laser, d'autant plus que l'astigmatisme est supérieur à 1.5D ;

- faire un volet suffisamment large et positionné ;
- penser non seulement au centrage mais également à la charnière qui doit être périphérique, surtout si elle est dans l'axe de la photoablation ;
- protéger la charnière au cours du traitement ;
- repositionner soigneusement le volet cornéen.

Bibliographie

1. ROZENBAUM JP. Correction de l'astigmatisme par Lasik. *Réalités Ophtalmologiques*, 2015 (en cours de publication).
2. ROZENBAUM JP, SMADJA D. Validation of a simplified formula to evaluate axes errors in Toric intraocular lenses surgery. (en cours de publication).
3. GATINEL D. Composantes de l'astigmatisme oculaire. *Réalités Ophtalmologiques*, 2014; 210:1-8.
4. GATINEL D. Redécouvrir l'astigmatisme. *Réalités Ophtalmologiques*, 2007;147 – cahier 2.
5. GATINEL D, HOANG-XUAN T, AZAR DT. Three-dimensional representation and qualitative comparisons of the amount of tissue ablation to treat mixed and compound astigmatism. *J Cataract Refract Surg*, 2002;28:2026-2034.
6. REINSTEIN DZ, ARCHER TJ, RANDLEMAN JB. JRS Standard for reporting astigmatism outcomes of refractive surgery. *J Cataract Refract Surg*, 2014;30:654-659.
7. THIBOS LN, HORNER D. Power vector analysis of the optical outcome of refractive surgery. *J Cataract Refract Surg*, 2001;27:80-85.
8. WANG TJ, LIN YH, CHANG DCK *et al.* Comparison of the effects of cylindrical correction with and without iris recognition technology in wavefront laser-assisted in situ keratomileusis. *Clin Experiment Ophthalmol*, 2012;40:239-246.
9. GAUTHIER L. Correction de l'astigmatisme au laser Excimer. *J Fr Ophtalmol*, 2012;35: 206-211.
10. TOUZEAU O, GAUJOUX T, BULLET J *et al.* Relations entre les paramètres de la réfraction : sphère, cylindre et axe. *J Fr Ophtalmol*, 2012;35:587-598.
11. ARBA-MOSQUERA S, MERAYO-LLOVES J, DE ORTUETA D. Clinical effects of pure cyclotorsional errors during refractive surgery. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2008; 49:4828-4836.
12. FEBBRARO JL. L'astigmatisme chez nos patients adultes. Distribution, évolution et impact visuel. *Pratiques en Ophtalmologie*, 2014;8:196-199.
13. KHALIFA M, EL-KATEB M, SHAFIK SHAHEN M. Iris registration in wavefront-guided lasik to correct mixed astigmatism. *J Cataract Refract Surg*, 2009;35:433-437.
14. NEUHANN I, LEGE B, BAUER M *et al.* Static and dynamic Rotational Eye Tracking during lasik treatment of myopic astigmatism with the Zyoptik laser Platform and advanced control Eye Tracker. *J Cataract Refract Surg*, 2010;26:17-27.
15. FRAUNFELDER FW, WILSON SE. Laser in situ keratomileusis versus photorefractive keratectomy in the correction of myopic astigmatism. *Cornea*, 2001;20:385-387.
16. KATZ T, WAGENFELD L, GALAMBOS P *et al.* Lasik versus photorefractive keratectomy for high myopic astigmatism. *J Cataract Refract Surg*, 2013;29:824-831.
17. LETSCH J, MALECAZE F. Chirurgie de l'astigmatisme : les profils d'ablation. *Les Cahiers d'Ophtalmologie*, 2013;170:48-50.

L'auteur a déclaré ne pas avoir de conflits d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.