

## Les particularités de la photoablation hypermétropique au laser Excimer en chirurgie réfractive cornéenne



**D. GATINEL**  
Fondation Ophthalmologique  
A. de Rothschild, PARIS.

**La correction chirurgicale de l'hypermétropie par photoablation cornéenne vise à induire une augmentation de la puissance du dioptre cornéen antérieur.**

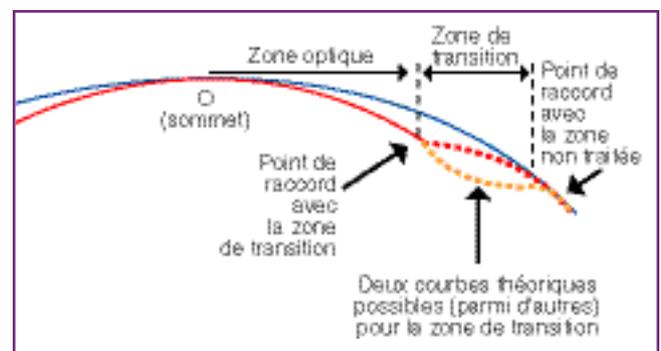
**Derrière ce simple énoncé se dissimulent en fait de nombreuses spécificités dont la connaissance permet de mieux comprendre certaines particularités cliniques relatives à la chirurgie de l'hypermétropie au laser Excimer.**

### LES PARTICULARITES DU PROFIL D'ABLATION

Qu'il soit fidèle au modèle initial de Munnerlyn [1] ou repose sur l'intégration de données topographiques et aberrométriques, tout profil d'ablation destiné à la correction de l'hypermétropie vise à cambrer globalement la surface cornéenne en regard de la zone optique [2-5]. La profondeur d'ablation induite par ce type de profil est ainsi maximale à la périphérie de celle-ci.

Cette contrainte impose la réalisation d'une large zone de transition destinée à niveler le raccord abrupt situé à la périphérie de la zone optique avec la périphérie cornéenne afin de limiter la régression cicatricielle et améliorer ainsi la prédictibilité réfractive du traitement. Deux points d'inflexion sont alors présents, l'un au bord externe de la zone optique, l'autre à la périphérie de la zone de transition: le profil cornéen est ainsi fortement remanié après le traitement photoablatif (*fig. 1*).

Les premiers profils d'ablation utilisés pour le traitement de l'hypermétropie comportaient généralement une petite zone optique (de 4,5 à 5,5 mm). Le décentrement (absence d'eye trackers performants sur les premières plateformes de laser Excimer) et la régression de l'effet réfractif étaient beaucoup plus fréquents qu'au décours des chirurgies démyopisantes effectuées à la même époque [6]. Au fil des années, une tendance à l'élargissement de la zone optique a été observée, permettant de limiter les conséquences des décentres modérés et la régression de l'effet réfractif, ainsi que de bénéficier de la possibilité de larges découpes offertes par certains microkératomes en LASIK.



**Fig. 1 :** Représentation schématique en coupe du profil cornéen avant (en bleu) et après (en rouge) photoablation hypermétropique. Le profil d'ablation délivré en regard de la zone optique est dicté par l'hypermétropie à corriger. Le profil d'ablation délivré en regard de la zone de transition a pour but de raccorder de façon harmonieuse la zone optique centrale cambrée avec la cornée périphérique non traitée. Plusieurs motifs sont possibles selon les contraintes choisies: continuité (tracé orange), minimisation du volume photoablaté (tracé rose). (Schéma D. Gatinel)

Plus la zone optique est grande (jusqu'à 6,5 mm), plus le sillon périphérique à niveler est profond, ce qui requiert la réalisation d'une large zone de transition [4, 5]. La zone d'ablation totale (zone optique et zone de transition) est donc étendue (de 8,5 à 10 mm environ selon les systèmes).

Le "design" de la zone de transition représente certainement un point crucial du traitement hypermétrope. Si elle permet de niveler le raccord abrupt de la périphérie de la zone optique, elle stimule fortement les mécanismes de cicatrisation épithéliale. En effet, le volume de cornée photoablaté nécessaire à sa réalisation est supérieur à celui utilisé pour sculpter la zone optique (car proportionnel à la surface de la zone de transition qui est elle-même supérieure à celle de la zone optique) [5]. Certains systèmes permettent d'ajuster le diamètre de la zone de transition selon le choix de l'utilisateur. Pour des raisons de secret industriel, les caractéristiques précises du profil d'ablation délivré en regard de la zone de transition ne sont pas divulguées par les fabricants de lasers Excimer (*fig. 1*).

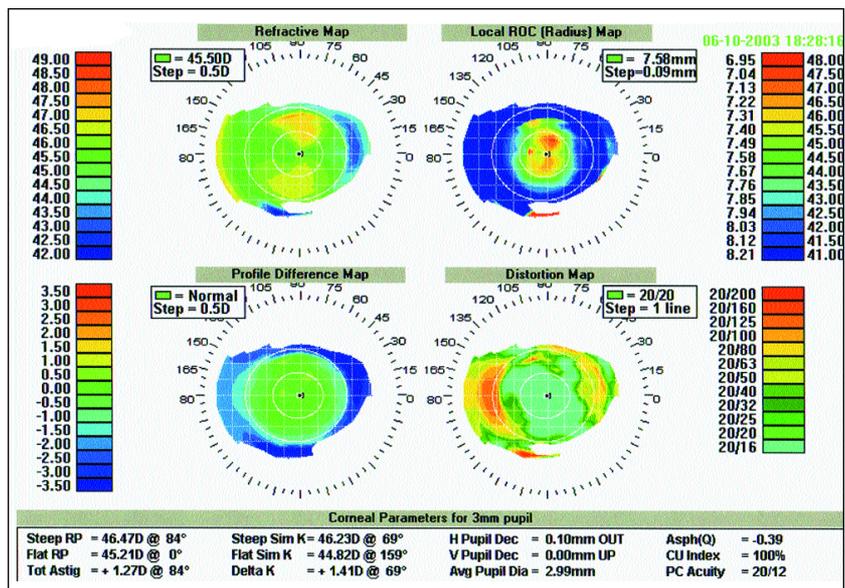
### LES PARTICULARITES DU PROFIL CORNEEN APRES PHOTOABLATION HYPERMETROPIQUE

La kératométrie centrale moyenne que l'on utilise pour le calcul biométrique ou l'adaptation de lentilles de contact n'est qu'une première approximation des propriétés réfractives d'une cornée donnée et ne permet pas d'en étudier avec précision les propriétés optiques en conditions non paraxiales (autrement dit, quand la pupille est dilatée et que la lumière incidente sur la rétine a été réfractée par les zones cornéennes éloignées de l'apex).

Le profil cornéen physiologique est caractérisé par l'existence d'une cambrure centrale légèrement supérieure à la cambrure périphérique, et n'est donc pas superposable à celui d'une sphère. Cette distinction est importante en chirurgie réfractive moderne si l'on s'intéresse à la qualité de vision et si l'on veut comprendre l'origine des aberrations optiques induites par la chirurgie réfractive cornéenne. Le profil cornéen physiologique est ainsi qualifié d'asphérique prolata, par analogie à celui du sommet pointu d'une ellipse, où la cambrure décroît du sommet vers les bords [7]. Cette propriété per-

met à la cornée de réduire le taux d'aberrations sphériques positives; l'aplatissement cornéen périphérique permet aux rayons lumineux périphériques d'être moins convergents que si la cornée était purement sphérique. Le cristallin se comporte également dans l'œil comme une lentille asphérique prolata, ce qui permet de réduire encore le taux d'aberration sphérique positive. L'aberration sphérique résiduelle physiologique est positive et ne dépasse pas en général 0,25 D ou 0,3 micron de RMS pour une pupille de 6 mm chez l'ensemble des sujets non opérés. Une augmentation de l'aberration sphérique positive peut se traduire par l'apparition d'une variation myopique significative de la réfraction quand la pupille se dilate (vision scotopique): elle est fréquemment observée après chirurgie de la myopie (kératotomie radiaire, PKR, LASIK).

Après chirurgie de l'hypermétropie au laser Excimer, on observe en général une accentuation marquée de l'asphéricité prolata de la cornée centrale (*fig. 2*) [8]. Elle est induite par la conjonction de phénomènes biomécaniques et cicatriciels secondaires à la réalisation de la photoablation annulaire et de l'aplatissement périphérique nécessaire à la réalisation de la zone de transition. Elle ne correspond pas directement à l'effet prédit par le modèle à l'origine du profil d'ablation [9-11]. Rappelons à ce sujet que ce modèle assimile les surfaces cornéennes pré- et postopératoire à des

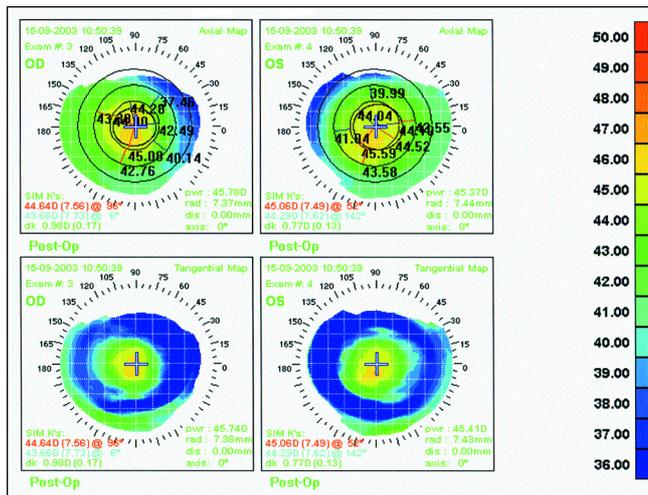


**Fig. 2 :** Représentation en mode Holladay Diagnosis Summary (HDS) de la topographie spéculaire (Eyesys) d'une cornée 3 mois après Lasik hypermétrope sans incident. Noter la valeur calculée très prolata de l'asphéricité cornéenne centrale (Asph Q = -0.39). La puissance cornéenne calculée en tenant compte des variations d'incidence des rayons lumineux issus d'un point fixe (refractive map) est globalement supérieure au niveau de la cornée centrale qu'au niveau de la cornée périphérique, et est corrélée à la réduction des aberrations sphériques positives.

sphères de courbure reliée à la kératométrie moyenne centrale, et ne prend pas en compte l'asphéricité (qui correspond aux variations de courbures entre l'apex et la périphérie de la cornée), ni les effets optiques de la jonction avec la périphérie non ablatée (zone de transition). Toutefois, l'induction d'une cambrure centrale accentuée (zone optique) et d'une cambrure périphérique diminuée (zone de transition) rend logique l'observation d'une exagération de l'asphéricité de type prolate après remodelage cicatriciel.

Il existe ainsi un important gradient kératométrique décroissant du centre vers et les bords de la cornée après photoablation hypermétropique. De cette multifocalité découlent des conséquences bénéfiques (pseudo-accommodation) ou néfastes (induction d'un taux élevé d'aberrations optiques), selon le contexte clinique, la qualité du centrage vis-à-vis de la pupille irienne et le traitement cérébral postopératoire de l'information visuelle du patient (fig. 2 et 3).

Un astigmatisme induit irrégulier est fréquemment observé après photoablation hypermétropique. Ses conséquences optiques sont variables en fonction des rapports entre la cornée et la pupille d'entrée. Il ne semble pas exister de différences entre LASIK et PKR quant à la magnitude de cet astigmatisme induit, selon une étude récente (hypermétropie sphérique inférieure ou égale à 4 D) [12]. Rappelons que la



**Fig. 3 :** Topographie spéculaire (Eyesys) effectuée 3 mois après LASIK hypermétropique (réfraction traitée: +3 ODG, laser Nidek EC 5000, zone optique programmée de 5,5 mm de diamètre). Le centrage (mieux étudié en mode tangential) est satisfaisant, et il existe une symétrie importante entre les yeux droit et gauche. Noter l'aplatissement important au niveau de la zone de transition, qui associé à l'augmentation de la cambrure centrale confère un aspect très prolate à la face antérieure de la cornée. Parmi les aberrations optiques de haut degré engendrées par la chirurgie, les aberrations paires de degré 4 (aberrations sphériques) dominent chez ce patient.

POINTS FORTS

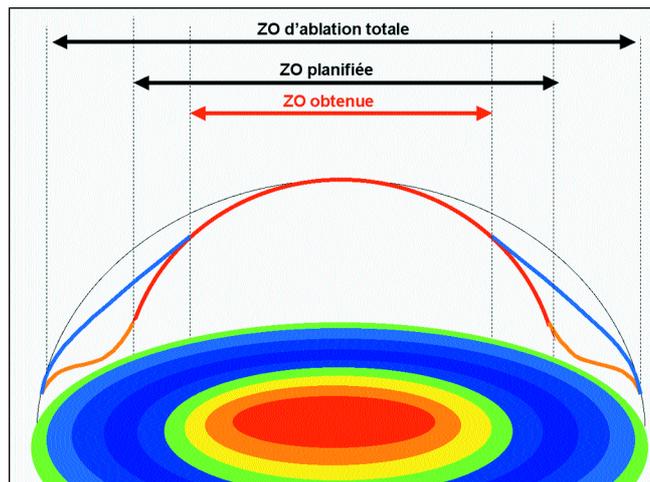
- Le profil cornéen est très remanié après chirurgie photoablatrice pour hypermétropie.
- L'accentuation de l'asphéricité prolate confère à la cornée une réfraction multifocale avec réduction des aberrations sphériques positives, voire induction d'aberrations sphériques négatives. L'induction d'aberrations impaires de haut degré (coma) est liée à un décentrement du traitement relatif à la pupille, et contribue à la diminution de la sensibilité aux contrastes avec gêne possible en vision scotopique.
- Une grande zone optique favorise la stabilité du traitement et limite les effets de la régression cicatricielle, au détriment de la multifocalité (pseudo-accommodation).
- Les caractéristiques optimales de la zone de transition restent à définir.

topographie cornéenne spéculaire est centrée sur l'apex cornéen, alors que la photoablation doit l'être sur la pupille d'entrée. Une image de décentrement topographique n'est ainsi pas forcément corrélée à l'induction marquée de phénomènes optiques indésirables. Inversement, un traitement parfaitement centré sur le plan topographique peut s'accompagner d'une élévation des aberrations optiques impaires si le centre de la pupille d'entrée est particulièrement décalé par rapport au centre topographique.

PARTICULARITES OPTIQUES  
DU TRAITEMENT PHOTOABLATIF DE L'HYPERMETROPIE

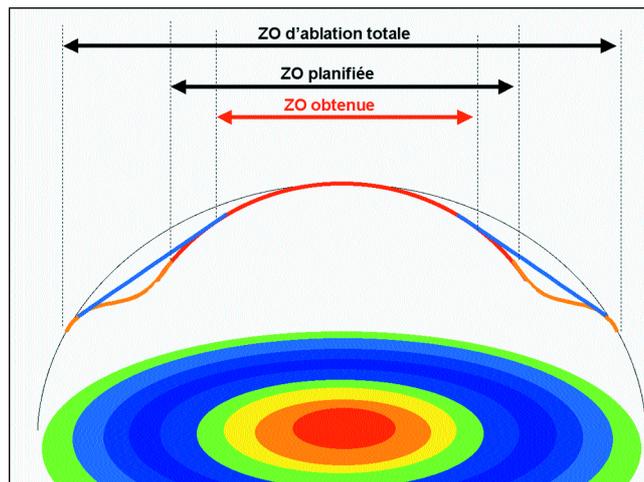
Le recours à la topographie cornéenne et à l'aberromètre est utile pour objectiver les conséquences optiques du remodelage cornéen [13, 14]. La carte topographique en mode réfractif (carte située en haut à gauche dans le mode "Holladay Diagnosis Summary" de l'Eye Sys) permet de visualiser les conséquences fonctionnelles de l'augmentation de l'asphéricité prolate de la face antérieure de la cornée: la puissance réfractive décroît du centre vers la périphérie de la zone optique (inversion du signe de l'aberration sphérique) en cas d'asphéricité prolate marquée. L'analyse du front d'onde permet d'identifier les variations qualitatives et quantitatives du taux d'aberrations optiques en fonction du diamètre pupillaire.

En raison de la multifocalité cornéenne et de la vision de l'hypermétrope, la tolérance à l'imprécision réfractive est nettement supérieure à celle de la PKR ou du LASIK myopique. Cependant, si l'induction d'une sous-corrrection est en



**Fig. 4a:** Photoablation hypermétropique avec zone optique programmée large: **en haut**, représentation théorique schématique du profil cornéen pré-opératoire (en gris), postopératoire avant régression (en rouge) et postopératoire après régression (en bleu). **En bas**, les zones colorées concentriques correspondent à la représentation de la courbure extrapolée à partir du profil cornéen postopératoire final (après régression). En raison du diamètre plus large de la zone optique, la multifocalité centrale est, à pupille égale, moindre que sur la **figure 4b**. Une meilleure tolérance au décentrement est en général obtenue avec la programmation d'une large zone optique.

(Photo: D. Gatinel)



**Fig. 4b:** Photoablation hypermétropique avec zone optique programmée étroite: **en haut**, représentation théorique schématique du profil cornéen préopératoire (en gris), postopératoire avant régression (en rouge) et postopératoire après régression (en bleu). **En bas**, les zones colorées concentriques correspondent à la représentation de la courbure extrapolée à partir du profil cornéen postopératoire final (après régression). En raison du diamètre plus étroit de la zone optique, la multifocalité centrale est, à pupille égale, plus marquée que sur la **figure 4a** et laisse augurer d'un effet pseudo accommodatif plus marqué.

(Photo: D. Gatinel)

général bien accueillie par les patients, l'apparition d'une surcorrection (myopisation) persistante est en revanche plus difficile à accepter, en particulier chez les sujets jeunes.

La récupération d'une acuité visuelle de près sans correction chez les sujets hypermétropes presbytes est en général liée à la surcorrection initiale, mais elle peut persister et pourrait alors être en rapport avec une multifocalité cornéenne avec pseudo-accommodation secondaire aux importantes variations de la puissance cornéenne de l'apex vers la périphérie. Chez les sujets presbytes au-delà de la cinquantaine, la réduction du diamètre de la zone optique favoriserait aussi l'induction d'une multifocalité cornéenne bénéfique à la vision de près. Le choix d'un diamètre de zone optique plus large pourrait être associé à une moindre régression de l'effet réfractif, mais également à une diminution de la multifocalité cornéenne (**fig. 4a et b**).

Même si l'obtention d'une pseudo-accommodation est en général observée chez les patients presbytes après LASIK hypermétropique, son intensité est variable et il est difficile d'en prédire l'importance. Les paramètres susceptibles d'influer sur l'importance de l'effet pseudo-accommodatif sont:

- le degré de multifocalité cornéenne antérieure, qui dépend en retour de la magnitude de la correction, de l'asphéricité cornéenne initiale,

- les rapports entre les différentes zones réfractives cornéennes induites par le traitement et le diamètre pupillaire, en particulier en situation de fixation rapprochée. La situation généralement nasale de la pupille dans cette situation a conduit certains auteurs à proposer un traitement réfractif additif décentré en nasal chez les patients presbytes,
  - l'importance des phénomènes de régression cicatricielle, qui peuvent réduire progressivement la pseudoaccommodation sur plusieurs mois,
- la plasticité cérébrale du patient et le traitement de l'information par les voies visuelles.

L'aplatissement important au niveau de la jonction zone optique-zone de transition (cornée hyperprolate) et un décentrement même léger du traitement sont responsables d'une augmentation du taux d'aberrations optiques de haut degré supérieure à celle mesurée après PKR ou LASIK myopique.

Schématiquement:

- l'élévation du taux des aberrations impaires de type coma primaire et secondaire est inversement proportionnelle à la qualité du centrage vis-à-vis de la pupille. Cette élévation peut également être favorisée par la dilatation asymétrique de la pupille (déplacement marqué du centre pupillaire avec la dilatation), le traitement délivré étant centré en per-opératoire sur la pupille non dilatée. Une régression cicatricielle



asymétrique peut également aboutir à l'augmentation secondaire de ce type d'aberration, alors que le centrage initial était satisfaisant,

– la variation du taux d'aberration sphérique semble proportionnelle aux variations d'asphéricité de la face antérieure de la cornée. Celle-ci devenant hyperprolate, elle contribue certainement à la diminution du taux d'aberration sphérique positive, voire à l'inversion fréquemment observée du signe de cette aberration qui devient négative (les rayons marginaux étant focalisés par la périphérie de la zone optique – où la cambrure diminue fortement – en arrière des rayons réfractés par la région centrale de la pupille).

De l'importance des taux respectifs de ces aberrations de haut degré et des facteurs énumérés plus haut dépend la qualité de vision postopératoire du patient. Une diminution de la meilleure acuité visuelle corrigée et de la sensibilité aux contrastes est en général retrouvée après LASIK hypermétropique. La perception de halos, l'apparition d'une diplopie monoculaire en postopératoire sont les corollaires de l'induction d'un taux significativement élevé d'aberrations optiques de haut degré.

## CONCLUSION

Les avancées récentes accomplies dans le domaine des systèmes de délivrance et d'asservissement aux poursuites oculaires ont permis d'accomplir des progrès certains dans la chirurgie photoablatrice cornéenne de l'hypermétropie. Les cartes fournies par les topographes cornéens et les aberromètres permettent de mieux comprendre les conséquences optiques de techniques comme la PKR ou le LASIK hypermétropique. La confrontation de ces données objectives combinée à l'étude des effets prédits par les modèles d'ablation sera certainement indispensable pour améliorer encore

la qualité de cette procédure et permettre d'atteindre un compromis idéal entre emmétropisation, pseudo-accommodation et préservation de la qualité de vision. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- MUNNERLYN C.R., KOONS S.J., MARSHALL J. Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery. *J. Cataract. Refract. Surg.*, 1988; 14: 46-52.
- DAUSCH D., KLEIN R., SCHRÖDER E. Excimer laser photorefractive keratectomy for hyperopia. *Refract. Corneal Surg.*, 1993; 9: 20-28.
- DIERICK H.G., MISSOTTEN L. Corneal ablation profiles for correction of hyperopia with the excimer laser. *J. Refract. Surg.*, 1996; 12: 767-73.
- GATINEL D. Profils d'ablation sphériques purs. In "Le LASIK, de la théorie à la pratique", Gatinel D., Hoang-Xuan T., 2003, pp. 100-102, Elsevier, Paris, France.
- GATINEL D. Corneal surface profile after hyperopia surgery. In "Hyperopia and presbyopia", Azar D.T., Koch D.D., 2003, pp.141-150, Marcel Dekker, New-York, USA.
- DIERICK H.G., VAN MELLAERT C.E., MISSOTTEN L. Histology of rabbit corneas after 10-diopter photorefractive keratectomy for hyperopia. *J. Refract. Surg.*, 1999; 15: 459-68.
- GATINEL D., HOANG-XUAN T., AZAR D. Determination of corneal asphericity after myopic surgery with the excimer laser: a mathematical model. *Invest. Ophthalmic Vis. Sci.*, 2001; 42: 1736-42.
- CHEN C.C., IZADSHENAS A., RANA A.A., AZAR D.T. Corneal asphericity following hyperopic laser in situ keratomileusis. *J. Cataract. Refract. Surg.*, 2002, in press.
- ROBERTS C., MAHMOUD A., HERDERICK E.E., CHAN G. Characterization of corneal curvature changes inside and outside the ablation zone in LASIK. *Abstract. Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 2000; 41: S677.
- ROBERTS C. The cornea is not a piece of plastic. *J. Refract. Surg.*, 2000; 16: 407-13.
- HUANG D., TANG M., SHEKKAR R. Mathematical model of corneal surface smoothing after laser refractive surgery. *Am. J. Ophthalmol.*, 2003; 135: 267-78.
- SCISCIO A., HULL C.C., STEPHENSON C.G. et al. Fourier analysis of induced irregular astigmatism: photorefractive keratectomy versus laser in situ keratomileusis in a bilateral cohort of hyperopic patients. *J. Cataract. Refract. Surg.*, 2003; 29: 1709-17.
- OLIVER K.M., O'BRART D.P.S., STEPHENSON C.G., HEMENGER R.P., APPLE-GATE R.A., TOMLINSON A., MARSHALL J. Anterior corneal optical aberrations induced by photorefractive keratectomy. *J. Refract. Surg.*, 2001; 17: 406-13.
- WANG L., KOCH D.D. Anterior corneal optical aberrations induced by laser in situ keratomileusis for hyperopia. *J. Cataract. Refract. Surg.*, 2003; 29: 1702-8.