

# Modifications de la biomécanique cornéenne induites par la chirurgie réfractive

**RÉSUMÉ :** L'appréciation de la biomécanique cornéenne est un paramètre important à prendre en compte avant la réalisation d'une chirurgie réfractive. L'*Ocular Response Analyser (ORA)* est le premier appareil proposé au clinicien pour permettre cette évaluation de manière non invasive.

Son utilisation, combinée à des critères topographiques et tomographiques, pourrait permettre de dépister de manière plus précoce et précise les kératocônes infracliniques débutants, qui contre-indiquent la chirurgie avec découpe stromale (Lasik).

## Intérêt de l'étude de la biomécanique cornéenne en chirurgie réfractive

Les techniques de chirurgie réfractive modernes que sont le Lasik et la photokératectomie réfractive (PKR) sont des méthodes soustractives entraînant des modifications du pouvoir réfractif de la cornée par remodelage de celle-ci. Dans ces techniques, la possible réaction biomécanique est négligée, alors qu'il a été démontré qu'une partie des effets "non prédits" par les profils d'ablation sont liés à des modifications de la géométrie du mur cornéen d'origine biomécanique [1].

Pour les techniques de kératotomie radiaire (KR), aujourd'hui abandonnées, la modification du pouvoir optique de la cornée reposait sur la modification de la structure biomécanique de la cornée. Les incisions radiaires profondes affaiblissaient la périphérie de la cornée, ce qui avait pour conséquence un bombement périphérique et un aplatissement central. Néanmoins, avec cette technique, la prédictibilité était faible et il existait des fluctuations réfractives, qui furent

attribuées à des variations inter et intra individuelles de paramètres influant sur l'état biomécanique de la cornée (pression intraoculaire, épaisseur et rigidité cornéennes variables d'un patient à l'autre, etc.).

L'ectasie cornéenne induite par le Lasik pourrait être principalement liée à la décompensation d'anomalies biomécaniques préexistantes (kératocône fruste, formes débutantes infracliniques de kératocône). Les techniques de dépistage fondées sur la topographie n'ont pas une sensibilité ni une spécificité absolue. En ajoutant de nouveaux paramètres issus de l'analyse préopératoire de l'état biomécanique de la cornée, on pourrait accroître la précision (meilleure sensibilité et spécificité) du dépistage des cornées à risque d'ectasie.

L'étude de la biomécanique cornéenne semble donc fondamentale en chirurgie réfractive. Alors qu'il existe de nombreux appareils permettant d'étudier les propriétés géométriques et optiques de la cornée (topographie cornéenne), le premier instrument permettant d'évaluer l'hystérésis cornéen de manière non invasive

→ E. GUILBERT, D. GATINEL  
Service du Dr. Gatinel  
Fondation Ophtalmologique Adolphe  
de Rothschild, PARIS

## REVUES GÉNÉRALES



FIG. 1: L'Ocular Response Analyser (ORA).

n'a été introduit en pratique clinique que relativement récemment. Il s'agit de l'Ocular Response Analyser (ORA), développé par Reichert (Buffalo, NY, États-Unis) (fig. 1). Cet outil a été utilisé dans de multiples études qui ont permis de mieux comprendre les modifications biomécaniques cornéennes entraînées par la réalisation d'une chirurgie réfractive. Il est également largement utilisé dans le glaucome et les hypertonies oculaires.

Un nouvel instrument fondé sur l'étude dynamique par caméra Sheimpflug de la déformation du dôme cornéen sous l'action d'un jet d'air (Corvis, Oculus, Allemagne) a été également mis récemment sur le marché; il n'existe pas encore de données publiées relatives à l'étude biomécanique préopératoire en chirurgie réfractive.

### Principe de l'ORA

L'instrument émet un jet d'air calibré continu dirigé vers le dôme cornéen, avec une pression croissante, qui est monitorée tout au long de l'examen. Une lumière infrarouge est émise par une diode et réfléchiée par la cornée, avant d'être captée par une caméra de manière à détecter l'aplanation. Celle-ci correspond à un pic d'intensité lumineuse réfléchiée, car à cet instant la surface cornéenne agit un peu comme un miroir plan. La pression à l'aplanation correspond à la pression mesurée lors du pic infrarouge. Deux pics d'aplanation sont ainsi détectés durant l'examen: le pre-

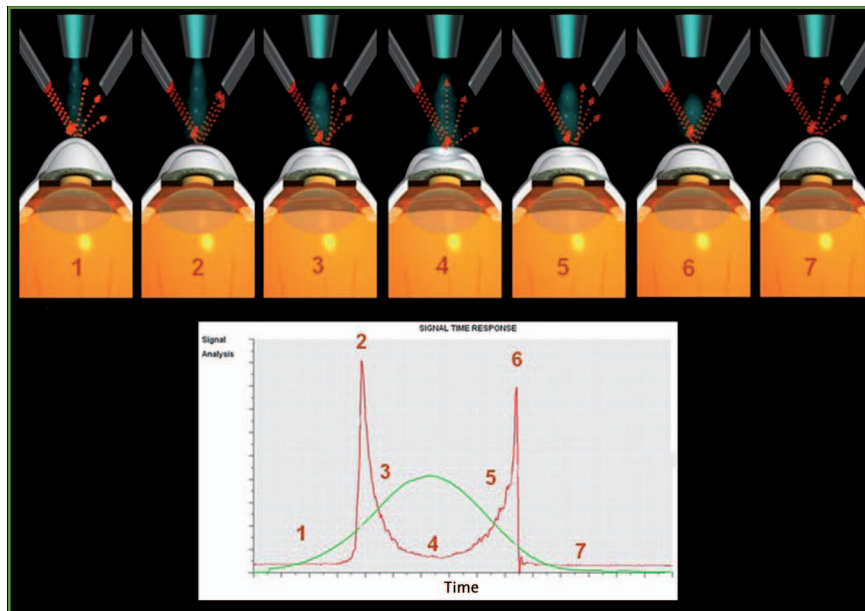


FIG. 2: Les différentes étapes lors d'une mesure par l'ORA. La courbe verte représente la pression du jet d'air dirigé vers le dôme cornéen, et la courbe rouge l'intensité de la lumière infrarouge réfléchiée par la cornée.

mier, lors de la déformation cornéenne initiale, et le deuxième, lors du retour de la cornée vers son état de forme initiale (qui correspondent respectivement aux pressions d'aplanation P1 et P2) (fig. 2).

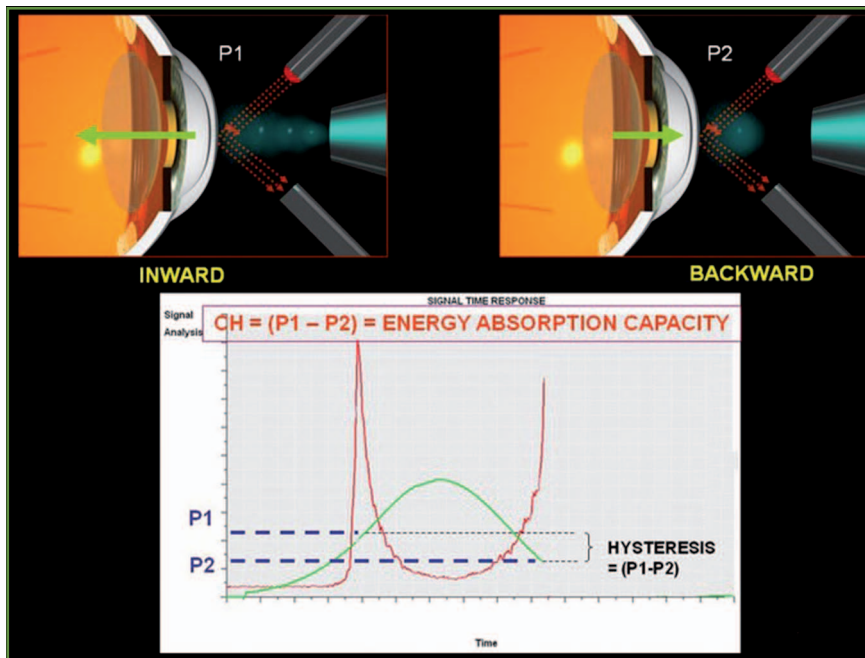
Du fait des propriétés viscoélastiques de la cornée, le retour à l'aplanation (2<sup>e</sup> pic) est plus lent et les pressions P1 et P2 sont donc différentes l'une de l'autre: la pression lors de l'aplanation retour (P2) est inférieure à la pression lors de l'aplanation aller. Plus le différentiel est accru, plus la capacité de la cornée à absorber l'énergie mécanique (la force du jet d'air) est importante. Cette énergie est dissipée sous forme de chaleur liée à la friction des lamelles collagènes du tissu cornéen. On conçoit intuitivement qu'une cornée épaisse et saine sur le plan histologique puisse dissiper de manière plus efficace l'énergie mécanique du jet d'air qu'une cornée fine et altérée. Les choses ne sont pas aussi simples; la résistance biomécanique d'une cornée épaissie par un œdème peut être amoindrie vis-à-vis de celle d'une cornée plus fine mais en état d'hydratation physiologique.

À partir des valeurs de P1 et P2, le logiciel de l'ORA propose différents index:

>>> **L'hystérèse** (CH pour *Corneal Hysteresis*) est égal à la différence entre P1 et P2 ( $CH = P1 - P2$ ). La valeur de l'hystérèse est positive, globalement proportionnelle au degré de viscosité de la cornée, et inversement proportionnel à son degré d'élasticité (fig. 3).

>>> **Le facteur de résistance cornéenne** (*Corneal Resistance Factor = CRF = P1 - 0,7 P2*). Le CRF est un paramètre qui a été calculé par régression linéaire, de manière à être moins corrélé à l'épaisseur cornéenne centrale: il accorde une moindre pondération à la valeur de P2.

>>> **La pression oculaire non compensée** ( $IOPg = (P1 + P2)/2$ ) et la pression oculaire compensée pour les propriétés viscoélastiques de la cornée ( $IOPcc = P2 - 0,43 P1$ ). L'étude des variations de ces index, après chirurgie réfractive cornéenne, permet de quantifier et de mieux comprendre les modifications biomécaniques induites par la chirurgie réfractive cornéenne.



**FIG. 3 :** Le CH (hystérèse) est égal à la différence entre P1 et P2 (P1-P2). P1 et P2 sont les pressions mesurées respectivement lors de la première et de la deuxième aplanation.

Une version légèrement modifiée de l'instrument (ORA II) est à présent disponible sur le marché ; elle bénéficie d'une optique améliorée permettant un recueil plus précis des faisceaux infrarouges réfléchis sur la cornée lors des mesures.

### Chirurgie réfractive et biomécanique cornéenne

Après PKR, les modifications de la biomécanique cornéenne sont liées à l'ablation de stroma cornéen superficiel par le laser excimer, après désépithélialisation. Lors d'une chirurgie par Lasik, la création d'un capot cornéen contribue également à affaiblir biomécaniquement la cornée.

Une récente étude *in vitro* sur 42 cornées humaines a permis d'étudier l'effet des différentes profondeurs de capot ainsi que la contribution relative de la découpe lamellaire et du *side-cut* effectués en utilisant un laser femtoseconde. Des profondeurs de découpe de 90 et 160  $\mu\text{m}$  et des *side-cut* verticaux et angulés ont été utilisés.

Après analyse de la résistance cornéenne par RSSPI (interférométrie de speckle à cisaillement), les auteurs retrouvent que la diminution de la résistance cornéenne est majoritairement due aux *side-cut* verticaux, plutôt qu'à la délamination qui n'affaiblirait que peu la cornée, quelle que soit sa profondeur. L'angulation du *side-cut* de manière à ce que le diamètre stromal du capot excède son diamètre épithélial permettrait de réduire cet effet [2]. Une autre étude sur des cornées de porc montre que le CRF et le CH sont diminués de manière plus importante lorsque le capot est plus épais [3].

Les modifications des propriétés biomécaniques de la cornée après Lasik sembleraient néanmoins être majoritairement liées à l'ablation au laser excimer. En effet, une étude dans laquelle les auteurs ont fait une mesure au moyen de l'ORA avant chirurgie, puis après création du capot cornéen au laser femtoseconde et, enfin, après photoablation au laser excimer, a retrouvé qu'il n'y avait pas de modification significative du CH et du

CRF après création du capot, alors que ces paramètres baissent significativement après la réalisation de la photoablation. L'amplitude du premier pic d'aplanation était, en revanche, diminuée dans les deux procédures [4]. L'étude de Hamilton, en 2008, allait dans le même sens puisqu'elle retrouvait que, s'il existait une baisse significative du CH et du CRF après PKR et après Lasik (en utilisant un laser femtoseconde ou un microkératome pour la création du capot), cette diminution était similaire dans les trois groupes. Il faut néanmoins noter que les valeurs préopératoires de pachymétrie centrale, de CH et de CRF, étaient plus basses en préopératoire dans le groupe PKR que dans les autres groupes dans cette étude rétrospective [5]. Une autre étude retrouvait également que si la réalisation d'un Lasik entraînait un affaiblissement biomécanique de la cornée, il n'y avait pas de différence entre les deux techniques de découpe du capot (microkératome et laser femtoseconde) [6].

D'autres auteurs ont retrouvé que les valeurs de CH et CRF étaient plus basses après chirurgie réfractive, que la technique employée soit un Lasik ou une PKR, avec une diminution des valeurs corrélée à la correction programmée [7]. Dans l'étude de Kamiya, la diminution du CH et du CRF était significativement plus importante après Lasik qu'après PKR, ce qui tendrait à montrer que la PKR est une technique moins invasive d'un point de vue biomécanique que le Lasik [8].

Enfin, il semble que les valeurs de CH et de CRF, si elles diminuent significativement après la chirurgie, restent en revanche relativement stables dans les mois qui suivent [9].

Il est probable qu'à volume d'ablation et à correction attendue équivalents, l'affaiblissement biomécanique de la cornée soit plus faible après Lasik hypermétrope que Lasik myopique. Une étude comparant le CH et le CRF avant et après chirurgie chez des patients ayant subi un

## REVUES GÉNÉRALES

## POINTS FORTS

- ➔ Certains effets “non prédits” par les profils d’ablation sont liés à des modifications de la géométrie du mur cornéen d’origine biomécanique.
- ➔ La principale cause de fragilisation biomécanique de la cornée après chirurgie réfractive est l’ablation de stroma au moyen du laser excimer.
- ➔ L’affaiblissement biomécanique de la cornée semble majoré par la réalisation d’un capot, notamment si celui-ci est épais.
- ➔ L’ORA n’a pas une sensibilité ni une spécificité suffisantes pour permettre de dépister à lui seul les cornées à risque d’ectasie, mais peut contribuer à ce dépistage, combiné aux examens topographiques.

Lasik hypermétropique ou myopique (les deux groupes ayant des épaisseurs cornéennes, un CH et un CRF préopératoires ainsi qu’une épaisseur de capot, une correction et un nombre d’impacts au laser excimer similaires) a retrouvé que la diminution du CH et du CRF était plus importante dans le groupe “Lasik myopique” que dans le groupe “Lasik hypermétropique” [10]. Cela peut s’expliquer par la différence entre les profils d’ablation, l’amincissement cornéen étant plus important au centre lors d’un Lasik myopique alors que la photoablation est majoritairement périphérique lors d’un Lasik hypermétropique (l’ectasie étant d’ailleurs plus rare dans ce dernier cas).

L’ectasie est une complication redoutée après chirurgie réfractive et peut être évitée dans la majorité des cas par une sélection soigneuse des patients permettant de contre-indiquer l’intervention aux sujets à risque. Si l’ORA ne permet pas, à lui seul, de détecter de manière certaine ces patients à risque, c’est un outil qui peut contribuer à cette sélection, notamment dans les cas où la topographie cornéenne est litigieuse. Dans une étude sur 504 yeux, il a été retrouvé que le CH et le CRF étaient significativement plus bas chez les patients avec un kératocône fruste que chez les patients normaux. Toutefois, il existe une dispersion importante des valeurs, ce qui fait que pour un seuil donné, il existe une proportion non

négligeable de faux positifs et de faux négatifs, ce qui amoindrit les valeurs de sensibilité et de spécificité d’un dépistage fondé sur ces seuls paramètres [11]. Notre expérience clinique suggère que la valeur de la pression intraoculaire affecte la valeur de ces paramètres, dont l’estimation est justement fondée sur un différentiel de mesure de pressions. La valeur du CRF semble en particulier être susceptible d’augmenter vis-à-vis de celle du CH en cas d’hypertonie oculaire. Ainsi, l’interprétation des valeurs respectives du CH et du CRF pour une cornée donnée doit se faire en fonction d’autres paramètres susceptibles d’affecter les valeurs de pressions mesurées lors des aplanations, tels que la pression régnant à l’intérieur du globe oculaire ainsi que l’épaisseur cornéenne [12].

### Conclusion

L’ORA est un instrument qui permet d’estimer en pratique clinique la biomécanique cornéenne, paramètre essentiel quant à la sécurité en chirurgie réfractive cornéenne. Cette première approche connaîtra certainement des évolutions dans les années qui viennent : une utilisation combinée avec des critères topographiques et tomographiques pourra peut-être permettre de dépister de manière plus précoce et précise les kératocônes infracliniques débutants.

### Bibliographie

1. DUPPS WJ, ROBERTS C. Effect of acute biomechanical changes on corneal curvature after photokeratectomy. *J Refract Surg*, 2001;17:658-669.
2. KNOX CARTWRIGHT NE, TYRER JR, JAYCOCK PD *et al*. Effects of variation in depth and side cut angulations in LASIK and thin-flap LASIK using a femtosecond laser: a biomechanical study. *J Refract Surg*, 2012;28:419-425.
3. MEDEIROS FW, SINHA-ROY A, ALVES MR *et al*. Biomechanical corneal changes induced by different flap thickness created by femtosecond laser. *Clinics (Sao Paulo)*, 2011;66:1067-1071.
4. UZBEK AK, KAMBUROGLU G, MAHMOUD AM *et al*. Change in biomechanical parameters after flap creation using the Intralase femtosecond laser and subsequent excimer laser ablation. *Curr Eye Res*, 2011;36:614-619.
5. HAMILTON DR, JOHNSON RD, LEE N *et al*. Differences in the corneal biomechanical effects of surface ablation compared with laser in situ keratomileusis using a microkeratome or femtosecond laser. *J Cataract Refract Surg*, 2008;34:2049-2056.
6. KOUASSI FX, BLAIZEAU M, BUESTEL C *et al*. Comparison of Lasik with femtosecond laser versus Lasik with mechanical microkeratome: predictability of flap depth, corneal biomechanical effects and optical aberrations. *J Fr Ophthalmol*, 2012;35:2-8.
7. CHEN MC, LEE N, BOURLA N *et al*. Corneal biomechanical measurements before and after laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*, 2008;34:1886-1891.
8. KAMIYA K, SHIMIZU K, OHMOTO F. Comparison of the changes in corneal biomechanical properties after photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis. *Cornea*, 2009;28:765-769.
9. KAMIYA K, SHIMIZU K, OHMOTO F. Time course of corneal biomechanical parameters after laser in situ keratomileusis. *Ophthalmic Res*, 2009;42:167-171.
10. DE MEDEIROS FW, SINHA-ROY A, ALVES MR *et al*. Differences in the early biomechanical effects of hyperopic and myopic laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*, 2010;36:947-953.
11. SAAD A, LTEF Y, AZAN E *et al*. Biomechanical properties of keratoconus suspect eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2010;51:2912-2916.
12. SCHWEITZER C, ROBERTS CJ, MAHMOUD AM *et al*. Screening of forme fruste keratoconus with the ocular response analyzer. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2010;51:2403-2410.

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