

LE DOSSIER Kératocône

Approche biomécanique du kératocône



→ **J. BULLET, L. LAROCHE**
CHNO des Quinze-Vingts,
PARIS.

Le kératocône : une faiblesse biomécanique ?

Le maintien de la forme de la cornée, de son épaisseur, et donc de ses propriétés optiques est la résultante d'une distribution harmonieuse des contraintes biomécaniques qui s'y appliquent.

L'amincissement stromal et la déformation, le plus souvent inférieure, sont deux caractéristiques essentielles de la dystrophie cornéenne ectasiant qui est le kératocône. La cause réelle en est inconnue. Il est toutefois séduisant de penser que ces anomalies sont le résultat d'une altération biomécanique du tissu cornéen. Cette hypothèse a été formulée très tôt [1]. Cependant, aucune démonstration formelle par un modèle

mécanique indiscutable n'a été proposée à ce jour.

Dans les cas d'ectasie post-Lasik, dont la forme topographique est très similaire au kératocône, il a été démontré qu'une faible épaisseur cornéenne préopératoire est un facteur de risque important [2], tout comme le jeune âge du patient, dont on connaît la rigidité cornéenne plus faible.

Or, on sait, depuis les travaux de H. Goldmann sur la tonométrie à aplation et ceux de J.I. Barraquer sur la kératomileusis, qu'à rigidité cornéenne identique, une cornée plus fine est plus déformable. L'ectasie post-Lasik serait donc favorisée, chez des sujets prédisposés, par l'affaiblissement mécanique créé par l'ablation stromale chirurgicale.

On pourrait donc penser, par analogie, qu'une faiblesse biomécanique cornéenne constitutionnelle pourrait être une cause essentielle du kératocône et une circonstance hautement favorisante de l'ectasie cornéenne après chirurgie réfractive.

La question que se pose le clinicien est de savoir comment évaluer la biomécanique cornéenne.

Apport de l'Ocular Response Analyser (ORA)

Cette machine, développée par Reichert depuis plusieurs années, fonctionne selon un principe similaire à celui des tonomètres à air que nous utilisons couramment en clinique : un capteur infra-

rouge mesure l'intensité d'une lumière réfléchie sur la cornée et projetée à 45° (fig. 1). En mesurant conjointement l'intensité lumineuse captée et la pression du jet d'air (fig. 2), on en déduit deux

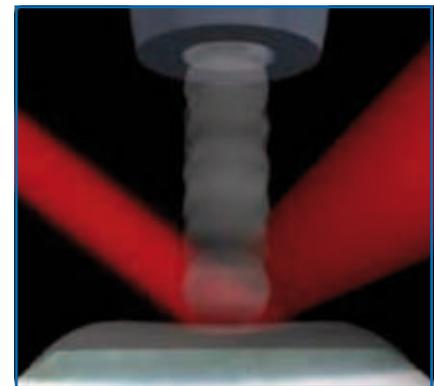


FIG. 1 : Principe de fonctionnement de l'Ocular Response Analyser. Une lumière infrarouge est émise à gauche à 45°, réfléchie sur la cornée qui est aplaniée par un jet d'air contrôlé et la réflexion est captée à droite à 45°. D'après Reichert.

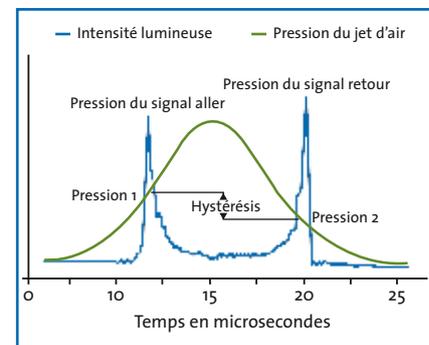


FIG. 2 : Courbes mesurées par l'ORA. La pression du jet d'air est en vert, l'intensité lumineuse captée en bleu. Les valeurs des pressions sont celles du jet d'air aux deux pics de lumière réfléchie. D'après Reichert, brochure commerciale de l'Ocular Response Analyser.

LE DOSSIER

Kératocône

pressions, une à chaque aplation de la cornée: lorsque le vertex cornéen s'enfonce vers le pôle postérieur (P1, premier maximum de réflexion) et lors du retour à l'équilibre en sens inverse (P2, second maximum de réflexion).

Ces pressions ne sont pas égales, ce qui traduit un retour à l'aplanation plus lent après l'inversion de la courbure cornéenne sous l'effet du jet d'air. Ce comportement n'est pas purement élastique, puisque le retour s'effectue dans des conditions différentes de l'aller. Il est lié aux propriétés mécaniques intrinsèques de la cornée qui est un matériau viscoélastique.

Deux paramètres sont mesurés par la machine:

- le coefficient d'hystérésis (CH) défini comme la différence entre les deux pressions P1 et P2 lors de l'aplanation ($CH = P1 - P2$);
- le facteur de résistance cornéenne (CRF) qui n'a pas de signification clinique directe mais est très corrélé à l'épaisseur cornéenne, paramètre biomécanique majeur ($CRF = P1 - 0,7 P2$).

Plusieurs études ont montré que le CH et le CRF sont diminués chez les yeux kératoconiques par rapport aux yeux normaux (**tableau I**). En effet, les courbes de mesure des cornées kératoconiques sont assez caractéristiques avec des pics d'aplanation peu prononcés et souvent bifides, ce qui rend la mesure des pressions d'aplanation moins précise puisque le maximum d'intensité est plus difficilement identifiable. On devine de ce fait l'intérêt clinique de cet appareil pour le diagnostic et le dépistage du kératocône.

Comme les valeurs de P1 et P2 sont plus proches, le coefficient d'hystérésis est plus faible, ce qui n'est pas évident à interpréter cliniquement. On peut néanmoins remarquer que la première pression d'aplanation est souvent moins élevée chez les cornées kératoconiques. L'aplanation est donc réalisée pour une pression du jet plus faible, ce qui plaide en faveur d'une moindre résistance mécanique de la cornée. Malgré les frottements visqueux intracornéens, la seconde aplation de retour s'effectue dans des conditions de pression plus proches de celles de la première aplation, d'où des valeurs de coefficient d'hystérésis et de coefficient de résistance cornéenne plus faibles.

Un intérêt clinique essentiel de l'ORA est d'aider au dépistage des kératocônes frustes [7 8], c'est-à-dire sans retentissement clinique mais qui pourraient se décompenser après chirurgie réfractive (notamment l'ectasie post-Lasik). Les renseignements fournis par l'ORA sont surtout pertinents en cas de cornée d'épaisseur normale ou fine, car la sensibilité et la spécificité de la méthode diminuent avec l'augmentation de la pachymétrie [8]. Associées aux autres méthodes et paramètres de dépistage du kératocône fruste, les mesures du CH et du CRF sont faites en routine, dans de nombreux centres de chirurgie réfractive, lors du bilan préopératoire. Il faut néanmoins souligner que l'étude biomécanique cornéenne préopératoire ne suffit pas à elle seule à valider ou récuser une candidature à la chirurgie réfractive. Elle peut contribuer utilement au faisceau d'arguments permettant la prise de décision.

Enfin, il faut mentionner que les techniques de cross-linking [9] et d'an-neaux intracornéens [10] utilisées pour le traitement du kératocône évolutif et avancé n'améliorent pas significativement les performances biomécaniques de la cornée telles que mesurées par le CH et le CRF.

La biomécanique du kératocône dans l'avenir

Le processus d'aplanation étant dynamique, il paraît dommage de restreindre l'analyse des courbes générées par l'ORA aux seules valeurs du CH et CRF. A titre d'exemple, l'expérience nous enseigne que la morphologie des courbes est importante. C'est pourquoi, avec l'apparition du *Wavefront Score* (WS), l'ORA propose désormais d'analyser plusieurs dizaines de paramètres déterminés à partir des courbes fournies par la machine. Le WS est un indice qui, pris seul, reflète la fiabilité de la mesure. Il semble qu'il soit plus faible dans le cas du kératocône. Pris ensemble, ces critères seraient plus pertinents pour dépister et évaluer l'importance du kératocône. Cependant, cette approche n'a pas encore fait l'objet d'une évaluation scientifique validée. Mais ces paramètres ne manqueront pas de susciter un grand intérêt chez les cliniciens qui prennent en charge la pathologie.

Le fabricant du Pentacam, la firme Oculus, propose depuis quelques mois un tonomètre à aplation couplé à une caméra Scheimpflug à vitesse de prise très rapide, selon un seul méridien cornéen, le Corvis. On peut ainsi observer, par l'image, la déformation de la cornée sous l'effet du jet d'air calibré. Il est probable que ce type d'approche biomécanique va connaître des développements utiles pour les patients, dans les années à venir.

Des méthodes d'approche du comportement biomécanique de la cornée

Auteur	CH population normale	CH kératocônes	CRF population normale	CRF kératocônes
Shah et al. [3]	10,7 ± 2 mmHg	9,6 ± 2,2 mmHg	n/a	n/a
Ortiz et al. [4]	10,8 mmHg ± 1,5	7,5 ± 1,2 mmHg	11,0 ± 1,6	6,2 ± 1,9
Fontes et al. [5]	10,17 ± 1,79	8,50 ± 1,36	10,13 ± 2,0	7,85 ± 1,49
Johnson et al. [6]	11,0 ± 1,4 mmHg	7,9 ± 1,3 mmHg	11,1 ± 1,6 mmHg	7,3 ± 1,4 mmHg

TABLEAU I.

basées sur l'élastométrie dynamique ou l'interférométrie sont utilisées dans les laboratoires de recherche, mais n'ont pas encore d'application clinique.

Enfin, des modèles mathématiques de simulation informatique (à base d'éléments finis) du comportement biomécanique de la cornée doivent être développés. Cette démarche est usuelle pour les études biomécaniques dans d'autres disciplines.

Toutes ces approches auront pour but d'optimiser le diagnostic et la prévention des complications liées à cette pathologie cornéenne ectasique, moins rare qu'il n'y paraît cliniquement.

Bibliographie

1. FOSTER CS, YAMAMOTO GK. Ocular rigidity in keratoconus. *Am J Ophthalmol*, 1978; 86: 802-806.
2. RANDLEMAN JB. Post-laser in-situ keratomileusis ectasia: current understanding and future directions. *Curr Opin Ophthalmol*, 2006; 17: 406-412.
3. SHAH S, LAIQUZZAMAN M, BHOJWANI R *et al*. Assessment of the biomechanical properties of the cornea with the ocular response analyzer in normal and keratoconic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2007; 48: 3026-3031.
4. ORTIZ D, PINERO D, SHABAYEK MH *et al*. Corneal biomechanical properties in normal, post-laser in situ keratomileusis, and keratoconic eyes. *J Cataract Refract Surg*, 2007; 33: 1371-1375.
5. FONTES BM, AMBRÓSIO R JR, JARDIM D *et al*. Corneal biomechanical metrics and anterior segment parameters in mild keratoconus. *Ophthalmology*, 2010; 117: 673-679.
6. JOHNSON RD, NGUYEN MT, LEE N *et al*. Corneal biomechanical properties in normal, forme fruste keratoconus, and manifest keratoconus after statistical correction for potentially confounding factors. *Cornea*, 2011; 30: 516-523.
7. SAAD A, LTEIF Y, AZAN E *et al*. Biomechanical properties of keratoconus suspect eyes. *Invest. Ophthalmol Vis Sci*, 2010; 51: 2912-2916.
8. 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.
9. GOLDICH Y, BARKANA Y, MORAD Y *et al*. Can we measure corneal biomechanical changes after collagen cross-linking in eyes with keratoconus? A pilot study. *Cornea*, 2009; 28: 498-502.
10. DAUWE C, TOUBOUL D, ROBERTS CJ *et al*. Biomechanical and morphological corneal response to placement of intrastromal corneal ring segments for keratoconus. *J Cataract Refract Surg*, 2009; 35: 1761-1767.

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