

Biomécanique de la cornée : généralités

D. TOUBOUL

I Définition

La biomécanique se définit comme la science qui étudie les propriétés de déformation d'un corps biologique soumis à une contrainte d'ordre mécanique. Cette contrainte physique peut être une compression, une extension ou un cisaillement. Les grandeurs physiques et les dispositifs de mesures de la biomécanique cornéenne seront décrits dans le [chapitre 22](#).

Importance de la biomécanique cornéenne pour l'ophtalmologiste

La cornée est un tissu complexe dont l'homéostasie est capitale au maintien de la fonction visuelle. Le dioptre cornéen représente deux tiers de la puissance réfractive totale d'un œil emmétrope. Il s'agit d'une coupole assimilable à une lentille convexe-concave d'une vergence optique de puissance positive proche des 40 dioptries (D). La face avant est au contact du film lacrymal qui retrace parfaitement le contour de l'épithélium ; il est en contact avec l'air, définissant ainsi la principale interface optique de l'œil. La face arrière est globalement parallèle à la face avant et directement en contact par son endothélium avec l'humeur aqueuse, réduisant d'environ 10 % le pouvoir convergent de la face avant de la cornée. Ainsi, la cornée doit conserver, d'une part, sa transparence et, d'autre part, sa forme tridimensionnelle afin d'assurer la stabilité réfractive attendue dans le temps, grâce au maintien de ses caractéristiques biomécaniques.

Une autre notion importante, reposant sur l'étude de la biomécanique cornéenne, est la mesure de la pression intra-oculaire (PIO) qui est habituellement réalisée par l'indentation mécanique de la cornée.

Enfin, la connaissance des propriétés biomécaniques de la cornée est d'une importance majeure pour toute pratique de chirurgie cornéenne, qu'elle soit additive, soustractive, photoréfractive ou incisionnelle ([tableau 10-1](#)).

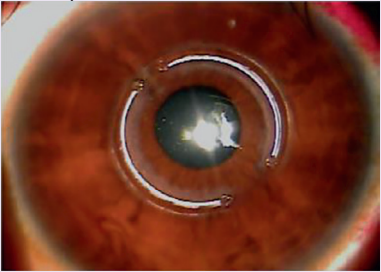
Notion d'équilibre biomécanique

L'équilibre biomécanique est indispensable au maintien de la fonction cornéenne. Il pourrait se définir comme la capacité de la cornée à conserver ses propriétés de forme malgré les variations des contraintes mécaniques exercées par l'environnement extérieur [1]. Il y a diverses contraintes rencontrées quotidiennement par la cornée. Citons les variations de la pression atmosphérique et celles de la PIO ainsi que les forces de cisaillement engendrées perpétuellement par le jeu du clignement palpébral et des muscles oculomoteurs. Parfois, la pression digitale ou la compression des globes oculaires doit permettre une restitution *ad integrum* de la forme cornéenne une fois la contrainte levée. Le tissu cornéen se comporte comme tout tissu biologique, avec une signature biomécanique propre intégrant des modules de viscosité et d'élasticité intrinsèques.

Architecture biomécanique de la cornée

Le tissu épithélial se renouvelle rapidement, en moins de 3 semaines, et il n'a pas vraiment de fonction biomécanique ; il protège le tissu conjonctif sous-jacent communément appelé stroma cornéen. La structure biomécanique de la cornée repose sur l'interaction entre les lamelles de collagène et le substrat fondamental de ce stroma. Ce dernier est limité en avant par la

Tableau 10-1 – Champs d'applications de la biomécanique cornéenne.

Champs d'applications	Problématiques	Réponses actuelles	Perspectives
Kératocône 	Dépistage précoce de la maladie Évolutivité de la maladie	Topo- et tomographies Photoréticulation du collagène cornéen	Carte d'élasticité Mesure de l'anisotropie élastique OCT élastographie, microscopie Brillouin
Cornéoplasties 	Prédiction du remodelage cornéen	Nomogrammes Laser excimer Anneaux intracornéens Incisions stromales Addition lenticulaire Procédures moins invasives (laser femtoseconde)	Procédures guidées par élastographie
Glaucome 	Mesure de pression intraoculaire (PIO) corrigée par les variations d'élasticités Impact de la PIO sur le nerf optique	Pachymétrie corrigée Tonomètre à contour Hystérésis de l'ORA® ou du Corvis ST®	Hystérésis sur un cycle d'hystérèse complet

couche de Bowman et en arrière par la membrane de Descemet. La couche endothéliale n'a pas non plus de fonction directement biomécanique mais, indirectement, c'est elle qui régule le taux d'hydratation du stroma et elle contribue donc également à la gestion de son intégrité biomécanique. En ce sens, l'intégrité de la barrière épithéliale peut aussi moduler le taux d'hydratation du stroma cornéen et avoir le même rôle.

Le stroma est composé pour 78 % d'eau et, pour le reste, d'un substrat associant des macromolécules de collagène (15 %) et des molécules matricielles (5 %). La densité cellulaire est très faible (2 %) dans ce tissu destiné à une fonction essentiellement optique. Celui-ci est totalement dépourvu de vascularisation et de réseau lymphatique. Cohabitent ainsi en son sein un réseau tridimensionnel de cellules nerveuses et kératocytaires, associant également quelques cellules des défenses immunitaires. Les interactions physiques entre ces cellules ont une valeur biomécanique assez négligeable par rapport à celle du tissu matriciel intercellulaire. L'organisation structurale de la cornée repose ainsi essentiellement sur un réseau tridimensionnel de lamelles de collagène orientées spécifiquement pour guider la dispersion de la lumière (entre 300 et 400 unités, majoritairement de type 1). La stabilité de la forme topographique et tomographique de la cornée est un point clé dans la stabilité de la fonction visuelle, ce qui explique en partie le faible taux de renouvellement du stroma cornéen, souvent estimé en décennies.

La nature des fibrilles de collagène dans la matrice a été définie au [chapitre 2](#), mais il faut souligner ici l'organisation singulière des lamelles de collagène entre elles et leur rôle biomécanique. En effet, le maillage entre le collagène et la matrice du stroma est très spécifique et non isotrope dans la

cornée. Autrement dit, il y a un gradient biomécanique entre la surface et la profondeur, mais aussi entre le centre et la périphérie de la cornée. Les liens entre les lamelles sont plus forts dans le tiers antérieur de la cornée, avec des lamelles quatre fois plus enchevêtrées en zone stromale antérieure que postérieure. L'ancrage des lamelles antérieures est particulièrement dense au niveau de la couche de Bowman, beaucoup moins proche de la membrane de Descemet. Les radiations de ces lamelles sont également plus denses dans les axes horizontaux et verticaux en regard de l'insertion des muscles droits, et il existe une grande faiblesse relative de la structure dans la zone paracentrale inférotemporale, en lien avec sa localisation dans l'aire de la fente palpébrale [2–5] ([fig. 10-1](#)). La cornée est également plus fine et plus déformable au centre qu'en périphérie, zone où elle devient plus épaisse et est renforcée par les radiations circulaires périlimbiques; on parle de gradient pachymétrique du centre à la périphérie [6].

Variations dans le temps

L'architecture cornéenne présente une forte stabilité dans le temps. Pour un tissu dont l'épaisseur centrale n'est que d'environ 0,5 mm, la variation au long de la vie est remarquablement faible. Une fois la croissance de l'œil terminée, vers l'âge de 3 ans, la cornée ne subit plus que quelques discrètes variations de formes, en rapport avec le vieillissement. On

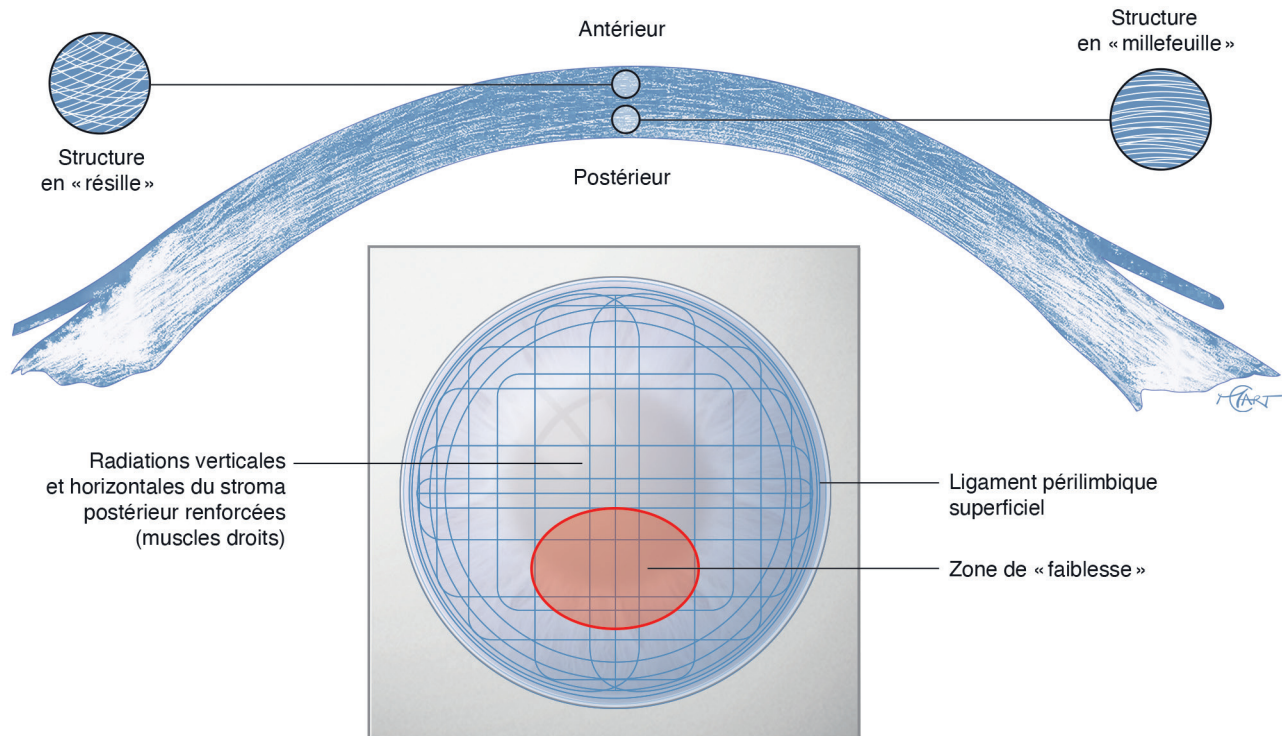


Fig. 10-1 Maillage biomécanique de la cornée.

Source : dessin de Cyrille Martinet.

note ainsi une tendance au changement de puissance de l'astigmatisme kératométrique sans grande variation de la puissance cornéenne moyenne. La tension palpébrale diminuant avec l'âge, l'axe initialement direct de l'astigmatisme (le plus souvent inférieur à 1 D) a tendance à s'inverser très lentement avec le temps.

Exemples de troubles de la biomécanique cornéenne

En cas de défaillance biomécanique de la cornée, celle-ci va passer d'un régime dit « viscoélastique » à un régime dit « plastique », c'est-à-dire impliquant une déformation définitive et non réversible de sa structure. Cette déformation est généralement en relation avec un trouble du métabolisme cornéen ou avec une contrainte mécanique excessive. L'exemple le plus connu est celui des ectasies cornéennes. Dans ce cas, il s'agit de dilatation anévrysmale du tissu cornéen en réponse à une altération acquise de l'anisotropie élastique naturelle de la cornée [7]. Celle-ci s'amincit progressivement et bombe vers l'avant jusqu'à stabilisation dans un nouvel équilibre.

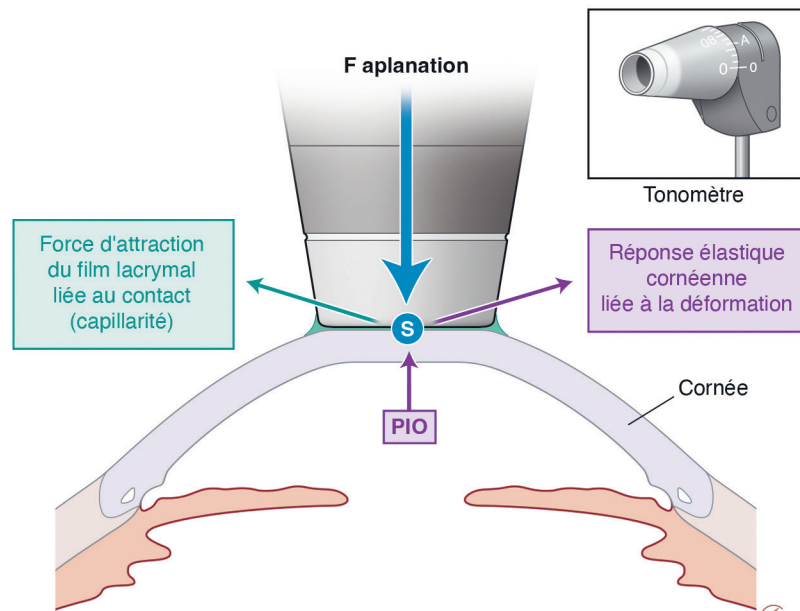
La rupture de la paroi postérieure cornéenne est parfois observée dans les « hydrops cornéens ». Il existe différentes causes à cette perturbation pathologique de l'anisotropie élastique : les microtraumatismes oculaires répétés typiques du kératocône, les modifications liées à une photoablation tissu-

laire excessive par laser à excimer, ou « ectasies post-laser », une kératolyse du stroma cornéen antérieure aboutissant à un bombement du stroma postérieur (maladie de Terrien, desce-métocèles inflammatoires). Le kératoglobe est à mentionner, car il constitue également une ectasie diffuse et idiopathique très rare de la cornée, sans que son mécanisme soit bien élucidé. Les mutations du gène du collagène, comme dans le syndrome d'Ehlers-Danlos, peuvent aboutir plus facilement à une ectasie cornéenne. Le glaucome congénital induisant une mégalocornée par excès de PIO dans les premières années de la vie est également une forme de déviation de la forme cornéenne vers un nouvel équilibre biomécanique relié à un état pathologique ; ici, l'hypertonie intraoculaire est précoce, chronique et sévère.

Certaines variations anatomiques de la cornée entraînent une estimation erronée de la PIO qui reste fortement dépendante des propriétés biomécaniques de la cornée [8] (fig. 10-2). L'exemple le plus typique est la différence de l'épaisseur de la cornée naturellement observée entre les différentes ethnies, induisant une sous-estimation de la PIO par aplanation dans les cornées fines ($< 500 \mu\text{m}$) et une surestimation de celle-ci dans les cornées épaisses ($> 600 \mu\text{m}$).

Le glaucome dit à pression normale pourrait être en rapport avec un trouble structurel de la biomécanique cornéenne altérant les propriétés d'hystérèse du stroma cornéen et possiblement aussi celles de la lame criblée dans la tête nerf optique [9].

Enfin, une estimation erronée de la PIO peut survenir par altération pathologique acquise du métabolisme cornéen. Citons pour exemples les décompensations endothéliales qui entraînent une sous-estimation de la PIO et les maladies de surcharge ou les cicatrices cornéennes qui, à l'inverse, induisent une surestimation.



Goldmann estime l'équation d'Imbert et de Fick exacte lorsque :
 La force d'attraction du film lacrymal est compensée par la réponse élastique
 Est vrai pour : cornées normales $P_{mc} = 520 \mu m$, prolate, peu astigmatique
 et surface du cône d'aplanation $S = 7,35 mm^2$

Fig. 10-2 Principe de l'estimation de la pression intraoculaire (PIO) par tonométrie à aplanation de type Goldmann [10].
 Source : dessin de Cyrille Martinet.

Points forts

- La biomécanique cornéenne est liée à une architecture tissulaire très complexe et particulièrement stable dans le temps.
- Les altérations de la biomécanique cornéennes aboutissent à des implications cliniques fortes dans les domaines des maladies ectasiantes, des chirurgies cornéennes, des estimations de la pression intraoculaire.
- L'épaisseur de la cornée est variable d'un sujet à l'autre, dépendant de facteurs génétiques et du taux d'hydratation de la cornée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Müller LJ, Pels E, Vremsen GF. The specific architecture of the anterior stroma accounts for maintenance of corneal curvature. *Br J Ophthalmol* 2001;85(4):437-43.
- [2] Winkler M, Chai D, Kriling S, et al. Nonlinear optical macroscopic assessment of 3-D corneal collagen organization and axial biomechanics. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2011;52(12):8818-27.
- [3] Lee D, Wilson G. Non-uniform swelling properties of the corneal stroma. *Current Eye Research* 1981;1(8):457-61.
- [4] Komai Y, Ushiki T. The three-dimensional organization of collagen fibrils in the human cornea and sclera. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1991;32(8):2244-58.
- [5] Boote C, Dennis S, Huang Y, et al. Lamellar orientation in human cornea in relation to mechanical properties. *J Struct Biol* 2005;149(1):1-6.
- [6] Abahussin M, Hayes S, Knox Cartwright NE, et al. 3D collagen orientation study of the human cornea using X-ray diffraction and femtosecond laser technology. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2009;50(11):5159-64.
- [7] Meek KM, Tuft SJ, Huang Y, et al. Changes in collagen orientation and distribution in keratoconus corneas. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2005;46(6):1948-56.
- [8] Liu J, Roberts CJ. Influence of corneal biomechanical properties on intraocular pressure measurement : quantitative analysis. *J Cataract Refract Surg* 2005;31(1):146-55.
- [9] Mansouri K, Leite MT, Weinreb RN, et al. Association between corneal biomechanical properties and glaucoma severity. *Am J Ophthalmol* 2012;153(3):419-27.
- [10] Moses RA. The Goldmann applanation tonometer. *Am J Ophthalmology* 1958;46:865-9.