

# Anatomie de la cornée

C. Allouch-Nahmias, P. Goldschmit, V. Borderie, O. Touzeau, T. Gaujoux, L. Laroche, I. Goemaere, J. Rault

*La cornée, enchâssée dans la sclérotique, représente la face antérieure du globe oculaire. Elle est composée de cinq couches tissulaires différentes : l'épithélium, la couche de Bowman, le stroma, la membrane de Descemet et l'endothélium. L'épithélium, indissociable du film lacrymal, assure le rôle de barrière protectrice de l'œil. L'agencement des fibres de collagènes du stroma est responsable de la transparence cornéenne. Les propriétés biomécaniques de la cornée sont essentiellement dues aux propriétés de la couche de Bowman et du stroma. L'endothélium régule l'hydratation cornéenne, sa transparence, son épaisseur. Grâce à une puissance dioptrique + 43,5 D, la cornée assure les deux tiers du pouvoir réfractif de l'œil.*

© 2011 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

**Mots clés :** Réfraction ; Transparence ; Collagène ; Endothélium ; Surface oculaire

## Plan

■ Introduction	1
■ Forme	2
■ Fonctionnalité de la cornée	2
Diffusion	3
Réflexion	3
Réfraction	3
Aberration de sphéricité	4
Aberrations chromatiques	4
■ Film lacrymal	4
■ Épithélium cornéen	4
Cellules superficielles	5
Cellules intermédiaires	6
Cellules basales	7
Membrane basale de l'épithélium	7
■ Limbe	7
Structure	7
Ultrastructure	7
Fonction	8
■ Couche de Bowman	9
Ultrastructure	9
■ Stroma	9
Lamelles de collagène	10
Substance fondamentale	10
Kératocytes ou fibrocytes	12
■ Membrane de Descemet	12
Ultrastructure	12
■ Endothélium	12
Ultrastructure	13
■ Innervation de la cornée	14
■ Nutrition de la cornée	15
■ Conclusion	15

## ■ Introduction

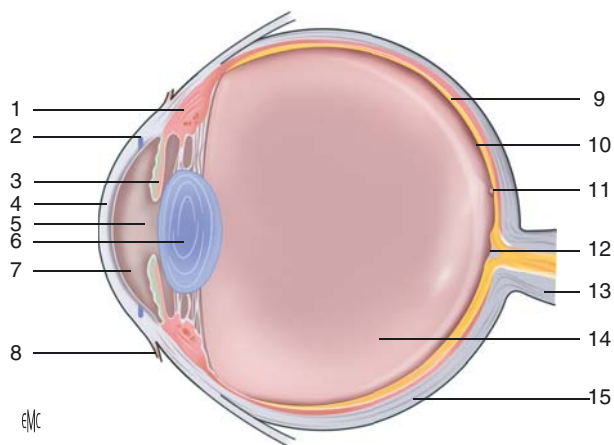
La cornée est une structure transparente, avasculaire, formée de plusieurs types cellulaires d'origine embryologique différente. Elle est enchâssée comme un verre de montre, dont elle rappelle la forme, dans la *partie antérieure* de la sclérotique. Elle constitue la partie antérieure du globe oculaire. Sa face antérieure est lisse et convexe, elle est exposée à l'environnement externe par l'intermédiaire du film lacrymal. Elle est protégée par les paupières qui la recouvrent partiellement ou totalement. Sa face postérieure concave est baignée par l'humeur aqueuse et forme la *paroi antérieure* de la chambre antérieure de l'œil. En périphérie se trouve le limbe, tissu très vascularisé, réservoir en cellules à haute capacité proliférative.

La cornée se compose d'avant en arrière de cinq couches successives :

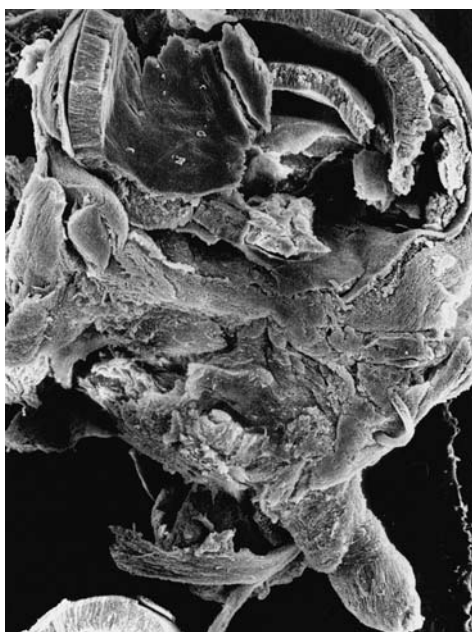
- l'épithélium associé au film lacrymal ;
- la *couche de Bowman* ;
- le stroma ;
- la membrane de Descemet ;
- l'endothélium.

L'œil est un capteur externe qui recueille à lui seul 80 % des informations qui nous parviennent du monde extérieur (Fig. 1 à 3). La cornée, traversée par les rayons lumineux qui convergent sur la rétine, représente les deux tiers du pouvoir réfractif de l'œil. Ses propriétés optiques dépendent de son anatomie à savoir sa forme, sa courbure (puissance), son épaisseur (transparence), de la régularité de la surface oculaire, et de la composition de chaque couche. La lumière est transformée en énergie chimique et électrique au niveau de la rétine puis transmise au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique. L'information est analysée et interprétée dans le cortex visuel.

L'épithélium cornéen joue entre autres un rôle de protection et de défense, il agit comme une barrière mécanique grâce à des jonctions intercellulaires très solides (*gap junctions* et desmosomes). Grâce aux sécrétions de la conjonctive et du film lacrymal, la cornée est protégée contre des agents potentiellement pathogènes.



**Figure 1.** Localisation de la cornée dans l'œil. 1. Corps ciliaire ; 2. canal de Schlemm ; 3. iris ; 4. cornée ; 5. papille ; 6. cristallin ; 7. chambre antérieure ; 8. conjonctive bulbaire ; 9. choroïde ; 10. rétine ; 11. fovéa ; 12. pupille ; 13. nerf optique ; 14. vitré ; 15. sclérotique.



**Figure 2.** Photographie en microscopie électronique : embryon de 10,5 semaines ; pôle postérieur 1/4 avec vue du nerf optique. Vue générale x 60.

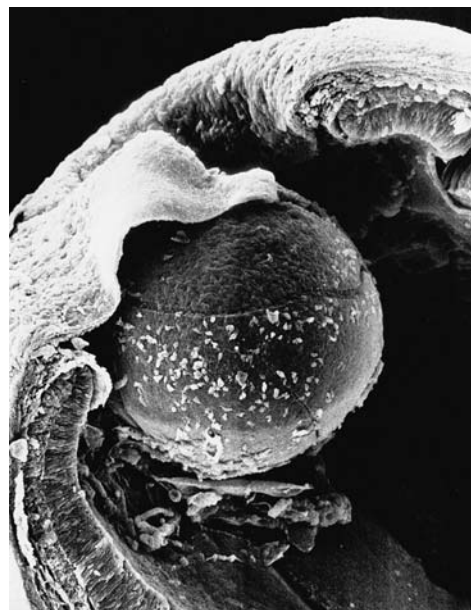
C'est le collagène qui donne à la cornée sa consistance et maintient la structure de ces composants plus profonds. L'agencement régulier des fibres de collagène au niveau du stroma assure la transparence cornéenne.

Celle-ci est maintenue constante par un taux d'hydratation cornéen stable, réglé en permanence par une pompe endothéliale. Une légère augmentation de l'épaisseur cornéenne s'accompagne d'une perte de la transparence et donc d'une diminution de la qualité visuelle (Fig. 4).

## ■ Forme

La cornée est *convexe et irrégulièrement asphérique*. Elle apparaît ovoïde, à grand axe horizontal et mesure 11 mm à 12 mm horizontalement et 9 mm à 10 mm verticalement. Son diamètre est variable selon les individus, le sexe (plus grand chez l'homme) et l'âge (taille définitive atteinte vers 6 ans).

La courbure de la cornée, définie par son rayon de courbure, varie : 7,8 mm horizontalement, 7,7 mm verticalement à la face antérieure de la cornée, alors qu'au niveau interne, elle est de 6,6 mm en vertical et de 6,2 en horizontal.



**Figure 3.** Photographie en microscopie électronique : embryon de 8 semaines ; demi-globe, pôle antérieur. Vue générale x 200.

Sa forme est *prolate* : le rayon de courbure de la surface cornéenne antérieure n'est pas constant, il est inférieur au centre par rapport à la périphérie (plus bombé au centre qu'à la périphérie).

La variation du rayon de courbure de la surface cornéenne antérieure est différente selon les différents héli-méridiens. La *topographie cornéenne* permet d'étudier ces spécificités (*toricité cornéenne*). La cornée est asymétriquement asphérique : *asphérotorique*. La portion nasale étant plus plate que la portion temporale [1].

Dans la zone des 3 mm centraux, le rayon de courbure varie entre 7,5 mm et 8 mm. À cet endroit, la courbure est presque sphérique.

L'épaisseur de la cornée varie de 550 µm environ en son centre pour augmenter en périphérie jusqu'au maximum de 700 µm. Elle est mesurée par la *pachymétrie* (optique ou ultrasonique). C'est un bon indicateur indirect de la transparence cornéenne et donc de la fonction de la pompe endothéliale.

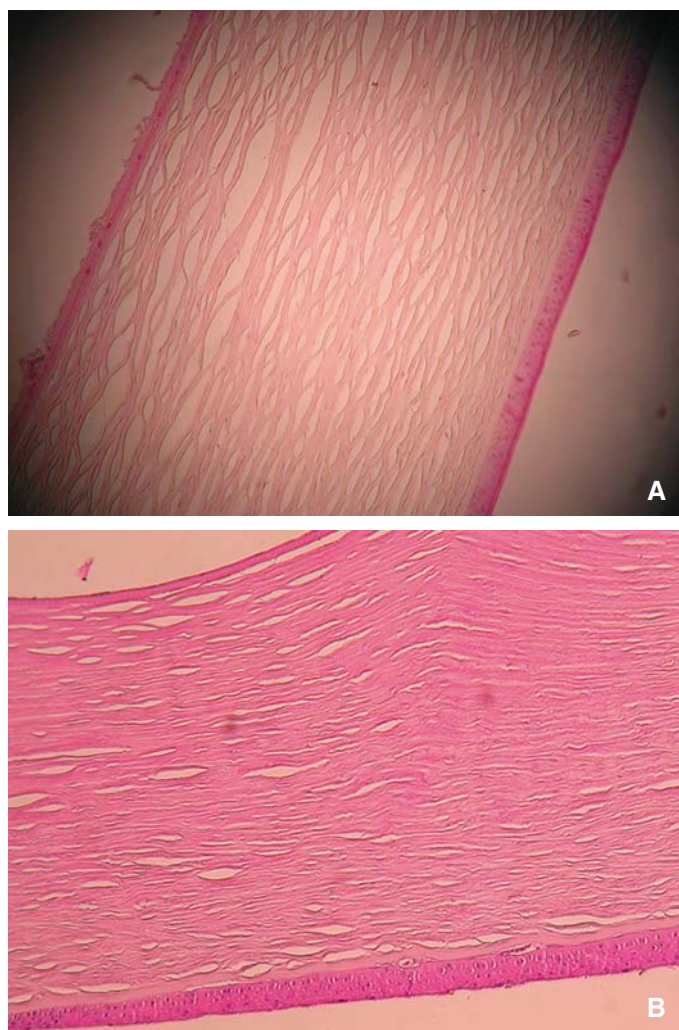
## ■ Fonctionnalité de la cornée

La cornée transmet la lumière dans les longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 650 nm [2] (Fig. 5). Dans un milieu transparent et homogène, un rayon lumineux se propage en ligne droite, sous la forme d'une onde électromagnétique caractérisée par son amplitude ou intensité lumineuse, et par sa longueur d'onde. Dans sa propagation, le rayon lumineux traverse plusieurs dioptries : la cornée, l'humeur aqueuse de la chambre antérieure, le cristallin et le vitré. Le système optique de l'œil peut être assimilé à un ensemble de quatre dioptries sphériques centrés sur un même axe de révolution [3] (Fig. 6).

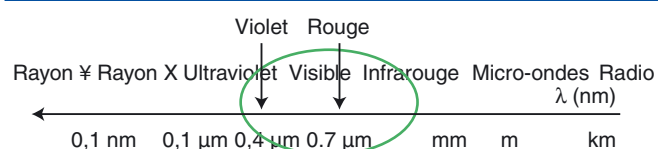
Un dioptré sphérique définit un ensemble de deux milieux transparents homogènes d'indices  $n_1$ ,  $n_2$ , séparés par une surface sphérique de rayon  $R$ . La puissance du dioptré est égale à la différence des indices de réfraction divisés par le rayon de courbure exprimé en mètres :  $D = (n_2 - n_1)/R$ . La cornée représente, à elle seule, les deux tiers du pouvoir réfractif de l'œil. Elle a une puissance dioptrique de 43 dioptries (D). Elle se décompose en un dioptré cornéen antérieur de 49 D et un dioptré cornéen postérieur de - 6 D. La puissance du cristallin étant de 22 D au repos (Fig. 7).

En passant d'un milieu à un autre, la trajectoire du faisceau lumineux se dévie selon les lois de Descartes [4] (Fig. 8).

Le déplacement du faisceau lumineux entraîne différents phénomènes : la diffusion, la réflexion et la réfraction.



**Figure 4.** Photographie en microscopie optique coloration hématoxyline, éosine, safran : cornée entière (A, B).



UV	Violet	Indigo	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge	IR
nm	400	430	480	540	580	600	650	> 650

EMC

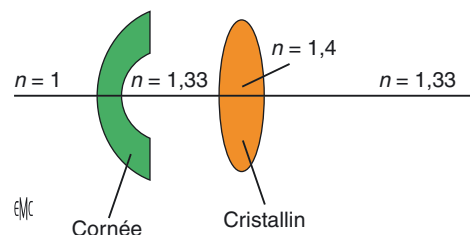
**Figure 5.** Spectre du visible (échelle arbitraire). IR : infrarouge.

## Diffusion

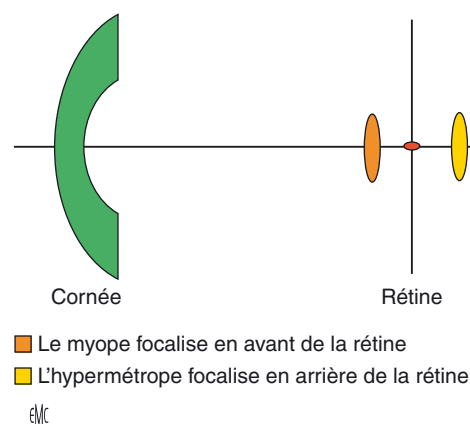
C'est l'interaction des rayons avec la matière. Négligeable dans des conditions physiologiques, elle augmente en cas d'œdème cornéen, de cicatrisation imparfaite (haze), etc. Une cornée humaine desséchée transmet 88,5 % de la lumière incidente, la perte d'une partie de la lumière transmise est principalement due au phénomène de diffusion. Celui-ci est négligeable dans une cornée normale.

## Réflexion

La lumière incidente est renvoyée symétriquement par rapport à la cornée (rayon réfléchi). L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.



**Figure 6.** Système optique de l'œil qui est assimilé à 4 dioptries sphériques centrés sur le même axe de révolution (Y. Legrand). Le *dioptré cornéen antérieur*, 7,8 mm de rayon, est placé entre l'air et un milieu d'indice 1,33 (film lacrymal en avant de la cornée). C'est un dioptré convergent qui assure la part la plus importante de la réfraction de l'œil (42 D). Les deux interfaces air/film lacrymal et film lacrymal/cornée sont souvent confondus dans le dioptré cornéen antérieur. Le *dioptré cornéen postérieur* est négligeable, car il sépare deux milieux d'indices très voisins : la cornée et l'humeur aqueuse. Le *dioptré cristallinien antérieur* est situé à 3,6 mm du précédent, il a un rayon de 10,2 mm au repos (c'est-à-dire quand le sujet regarde à l'infini). Il est placé entre l'humeur aqueuse et la substance cristallinienne d'indice moyen de 1,4. Le *dioptré cristallinien postérieur* est situé à 4 mm du précédent, il est de 6 mm de rayon à l'état de repos. Il sépare le cristallin du vitré, de même indice que la cornée et l'humeur aqueuse. La puissance du dioptré cristallinien est de 22 D. Elle est variable en fonction de l'accommodation.



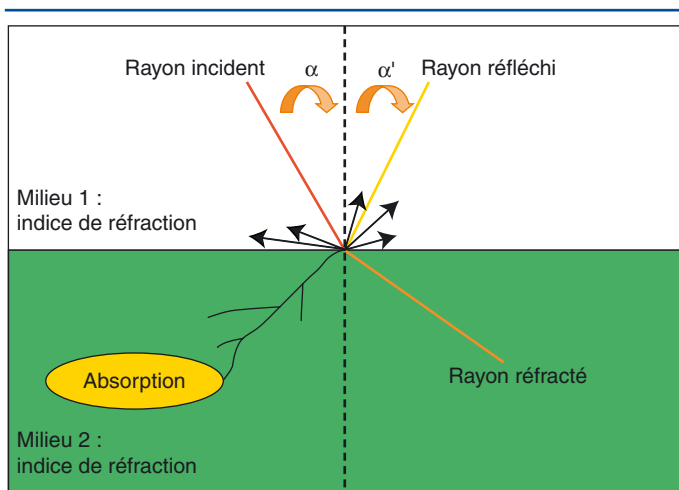
**Figure 7.** Emmétropie (système stigmat), myopie et hypermétropie.

La qualité de la réflexion est surtout liée à la régularité de la surface et à la qualité du film lacrymal.

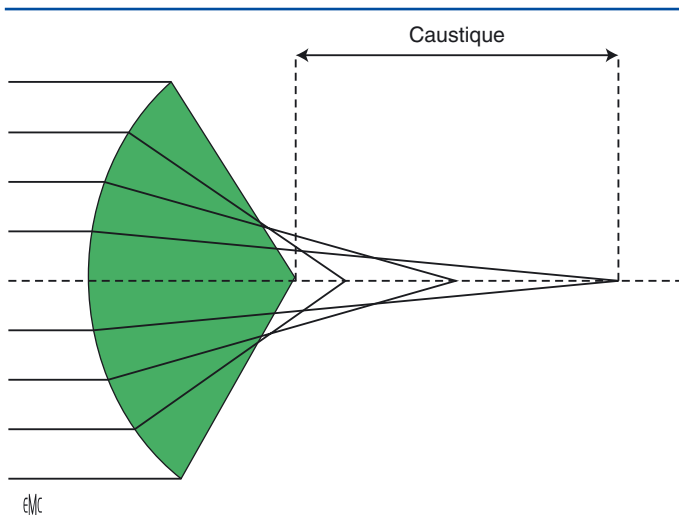
## Réfraction

La réfraction est observée quand les rayons lumineux traversent un milieu vers un autre. Les ondes qui se propagent en traversant un système sont ralenties en fonction de la nature du milieu. L'indice de réfraction  $n$  caractérise ce ralentissement. L'indice relatif de réfraction  $n$  d'un milieu réfringent est le rapport de la vitesse de propagation de la lumière dans l'air, sur la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu. À titre d'exemple, l'indice relatif de l'eau est de 1,33, celui de l'humeur aqueuse de 1,336 et celui du verre minéral courant est de 1,52. La vitesse de la lumière varie également suivant la longueur d'onde, plus faible en lumière bleue et plus élevée en lumière rouge.

La transparence des structures cornéennes s'explique par la régularité des cellules, le parallélisme des fibres de collagène, l'absence de vaisseaux et un état d'hydratation stable (épaisseur stable). Selon la théorie de Maurice [5], la disposition régulière du collagène, séparée par des intervalles constants de 450 Å, bien inférieures à la longueur d'onde de la lumière, permet la traversée de cette dernière sans interaction. En effet, la lumière ne subit pas d'interférence à travers une fente inférieure à la moitié de la longueur d'onde.



**Figure 8.** Lois de Descartes. Réflexion : le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale appartiennent au même plan : le plan d'incidence. L'angle de réflexion  $\alpha'$  est égal à l'angle d'incidence  $\alpha$ . Réfraction : le rayon incident, le rayon réfracté et la normale appartiennent au même plan : le plan d'incidence. Il y a un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction.  $\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_2 / n_1$  ;  $n_2$  (1 étant l'indice relatif du milieu 2 par rapport au milieu 1). C'est-à-dire  $n \sin \alpha = \text{constante}$ , c'est l'invariant de Descartes.



**Figure 9.** Aberration de sphéricité (effet caustique).

Dans un système optique parfait, à chaque point objet correspond un point image : le système est stigmat. Lorsque les rayons incidents ne sont plus parallèles à l'axe optique (au-delà des 3 mm centraux), des aberrations géométriques apparaissent.

## Aberration de sphéricité

Le pouvoir de réfraction est plus grand en périphérie d'une lentille sphérique. Le foyer image des régions périphériques est plus proche de la lentille que l'image des rayons centraux. L'ensemble dessine une figure appelée caustique (Fig. 9). À 2 mm de l'axe optique, la puissance augmente de 1,5 D. L'aplatissement périphérique de la cornée, le diaphragme entre autres permettent de limiter les effets des aberrations de sphéricité.

## Aberrations chromatiques

Les rayons d'une lumière polychromatique sont ralentis lors de la traversée d'un milieu réfringent et ils sont déviés de

façons différentes selon leur longueur d'onde. Les courtes longueurs d'onde : violet, bleu, vert, du spectre visible sont plus réfrangibles que les longueurs d'ondes élevées. Chez l'emmétrope, le jaune coïncide avec la rétine, le rouge est en arrière. Cette décomposition de la lumière est à la base du test duochrome qui permet de vérifier la sphère qui corrige la réfraction subjective d'un sujet. Le sujet myope lira mieux sur un fond d'écran rouge alors que l'hypermétrope lira mieux sur du vert.

## Film lacrymal

La surface cornéenne est recouverte par un film lacrymal qui protège la cornée de la déshydratation et maintient la régularité de la surface épithéliale. Le film lacrymal participe au pouvoir réfractif de l'œil en formant une première interface traversée par les rayons lumineux : l'interface air/film lacrymal [3].

Il a une épaisseur de 7  $\mu\text{m}$ , son volume est de  $6,5 \pm 0,3 \mu\text{l}$ .

Plus de 98 % du volume du film lacrymal est représenté par l'eau, cependant, le film lacrymal renferme de nombreuses molécules biologiques comme des électrolytes, du glucose, des immunoglobulines, de la lactoferrine, des lysozymes, de l'albumine, et surtout de l'oxygène. Il renferme aussi des substances actives comme l'histamine, les prostaglandines, des facteurs de croissance et des cytokines. Le film lacrymal a donc un rôle lubrifiant et stabilisateur de la cornée. Il est source directe de nutriments et de facteurs régulant la migration et la prolifération des cellules épithéliales. Il contribue à la défense et à la protection de l'œil grâce à son effet antimicrobien et bactériostatique.

Lors de traumatismes, d'agressions cornéennes par des virus ou des bactéries (kératoconjunctivites, etc.), le film lacrymal est le vecteur des cellules inflammatoires issues des paupières ou de la conjonctive bulbaire.

Il est composé de trois couches (Tableau 1) :

- une *couche lipidique*, superficielle qui est en contact avec l'air (0,1  $\mu\text{m}$ ). Elle est sécrétée par les glandes de Zeiss et de Mébomius présentes au niveau de la marge palpébrale. Elle a pour fonction de limiter l'évaporation des larmes, de favoriser l'étalement du film lacrymal en assurant sa stabilité, de lisser le dioptre cornéen pour une bonne qualité visuelle et pour protéger et lubrifier la cornée ;
- une *couche intermédiaire aqueuse*, sécrétée par les glandes lacrymales. C'est la couche la plus épaisse du film lacrymal. Elle est constituée d'eau (98 %) de mucines, d'électrolytes, de facteurs de croissance, de protéine anti-inflammatoire et d'immunoglobulines. Elle assure des fonctions de protection et de nutrition de la cornée ;
- une *couche profonde mucineuse*, riche en mucus sécrétée par les cellules caliciformes conjonctivales. Elle rend hydrophile la surface oculaire, permet l'adhésion du film lacrymal et participe à sa stabilité.

Les cellules apicales de l'épithélium conjonctival sont en relation avec le mucus par l'intermédiaire du glycocalyx (Fig. 10).

Le syndrome de « l'œil sec » inclut des cas de déficit en film lacrymal par déficience de l'une de ces trois couches constitutives. Le test de Schirmer mesure la sécrétion de larmes, le *break up time* (BUT) (temps de rupture du film lacrymal) mesure la stabilité du film lacrymal sur la cornée. Lorsque le film lacrymal est défaillant, une kératite peut apparaître, elle est alors mise en évidence grâce au test de la fluorescéine ou à des colorants vitaux (rose Bengale, vert de lissamine).

En microscopie confocale, le film lacrymal apparaît sous forme de franges arciformes hyperreflectives ou de moindre réflectivité. Ces images correspondent aux interférences entre les lipides et les protéines constituant du film lacrymal.

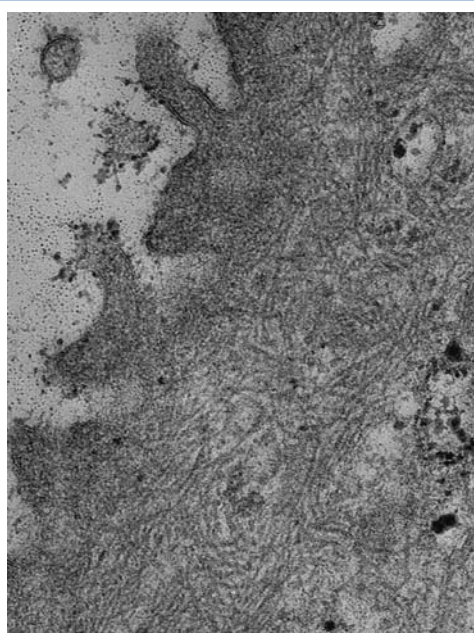
## Épithélium cornéen

L'épithélium cornéen est une structure tissulaire en continuité avec l'épithélium conjonctival. Il est indissociable du film

**Tableau 1.**

Origine, composition et rôle du film lacrymal.

Film lacrymal	Origine	Composition	Fonction
Couche lipidique	Glandes de Meibomius Glandes de Zeiss	Cholestérol	Lubrification Prévention de l'évaporation Stabilisation
Couche aqueuse	Glande de Meibomius Glandes de Zeiss	Eau, électrolytes Protéines Cytokines Facteurs de croissance Glucose et vitamine	Lubrification Antimicrobien Bactériostatique Supplémentation en oxygène, en nutriments Nettoyage mécanique Régulation des fonctions cellulaires
Couche mucineuse	Cellules caliciformes conjonctivales Cellules épithéliales cornéennes	Sulfomucine Cyalomucine	Diminution de la tension de surface Stabilisation de la couche aqueuse

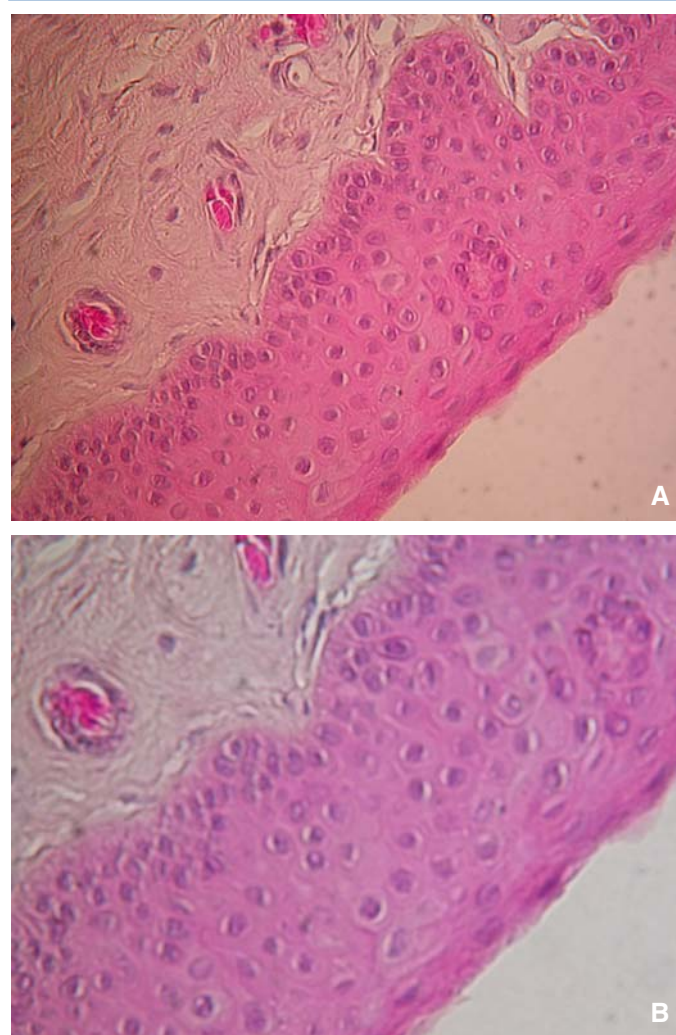
**Figure 10.** Photographie en microscopie électronique : glycocalyx et épithélium cornéen × 200.

lacrymal, il partage avec celui-ci son rôle optique et métabolique. Son épaisseur est de 30 µm à 50 µm, soit 10 % de l'épaisseur cornéenne totale [6-8].

L'épithélium cornéen a un renouvellement plus rapide que l'épiderme. Il est régulé par divers facteurs :

- l'âge, qui le diminue ;
- le nycthémère (le turnover est maximal pendant la nuit) ;
- le clignement palpébral (l'augmente) ;
- l'innervation épithéliale (rôle trophique) ;
- les facteurs de croissance : le facteur de croissance des cellules épithéliales (*epithelial growth factor* – EGF), le facteur de croissance des fibroblastes b (*fibroblast growth factor* – bFGF) augmente la prolifération épithéliale, le *transforming growth factor* (TGF) b1 la diminue. Ces facteurs sont sécrétés par les kératocytes, l'épithélium et la glande lacrymale. Il existe donc une régulation autocrine, paracrine et régionale de la prolifération épithéliale [9].

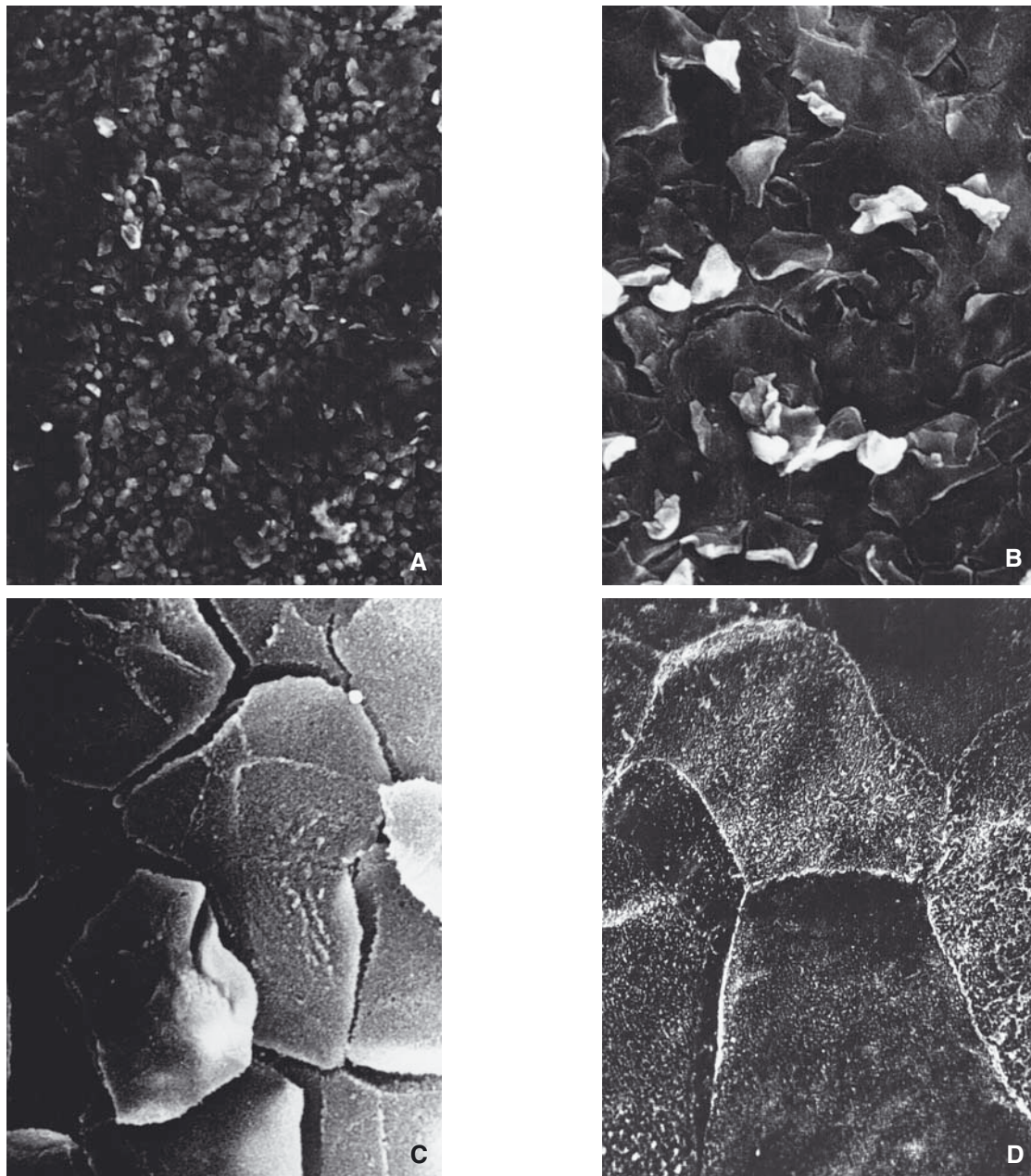
L'épithélium est pavimenteux stratifié, non kératinisé. Il comprend cinq à sept assises de cellules dans sa partie centrale et huit à dix dans sa partie périphérique. Il existe trois types de cellules épithéliales : les cellules superficielles, les cellules intermédiaires et les cellules basales. Les cellules basales reposent sur la membrane basale [10] (Fig. 11).

**Figure 11.** Photographie en microscopie optique coloration hématoxyline, éosine, safran : épithélium cornéen (A, B).

## Cellules superficielles

Les cellules superficielles sont les plus différenciées, polygonales aplaties, elles sont de tailles inégales et forment une mosaïque irrégulière.

Elles se répartissent en deux ou trois couches. Leur noyau très allongé, devient, dans les couches superficielles, un amas de mottes chromatiniennes, les mitochondries sont rares. Ces cellules sont destinées à desquamer [11]. Les cellules superficielles sont unies entre elles par des complexes jonctionnels, destinés



**Figure 12.** Photographie en microscopie électronique : cellules de l'épithélium cornéen.

**A.**  $\times 50$ .

**B.**  $\times 220$ .

**C.**  $\times 1\,300$ .

**D.**  $\times 2\,400$ .

à disparaître pour permettre la desquamation. Les *desmosomes* assurent une bonne cohésion entre les cellules, elles se situent sur les membranes latérales et basales. Les *tight junctions* assurent la cohésion cellulaire, elles sont étanches et rendent le passage des différentes molécules impossible alors que les *gap junctions* facilitent les échanges intercellulaires, elles se situent aussi bien sur les membranes basales et latérales (Fig. 12, 13).

### Ultrastructure

Le cytoplasme de ces cellules comprend trois structures caractéristiques : des protéines contractiles, des granules de glycogène et un appareil de Golgi très développé avec de grandes vésicules qui fusionnent avec la membrane cytoplasmique pour libérer leur contenu dans l'espace intercellulaire. La membrane cytoplasmique est hérissée de nombreuses microvillosités dont la hauteur est très variable. Ce sont elles qui assurent l'ancrage du film lacrymal et les échanges avec celui-ci.

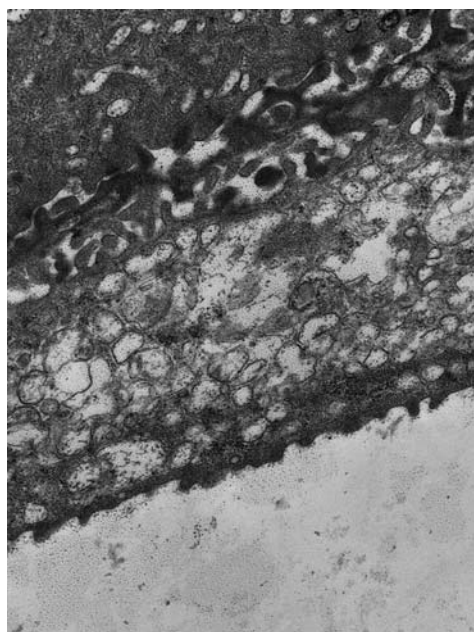
### Cellules intermédiaires

Les cellules intermédiaires de l'épithélium cornéen sont des cellules de transition entre les cellules superficielles et basales. Elles se disposent en deux ou trois assises cellulaires au centre de la cornée et cinq à six en périphérie.

Elles sont polygonales avec une face antérieure convexe et une face postérieure concave, leur noyau est allongé dans le sens de la cellule.

### Ultrastructure

Ces cellules contiennent de nombreuses vésicules, un appareil de Golgi très développé, leur cytoplasme est riche en microtubules et en filaments de kératine : les tonofilaments. Ceux-ci sont connectés aux desmosomes. Les *desmosomes* unissent les cellules intermédiaires entre elles ou les cellules intermédiaires aux cellules basales ou superficielles. Il existe aussi des *gap junctions* sur les faces latérales des cellules intermédiaires.



**Figure 13.** Photographie en microscopie électronique : coupe de la cornée ; épithélium cornéen  $\times 10\,000$ .

## Cellules basales

Les cellules basales de l'épithélium forment une unique couche, elles reposent directement sur la membrane basale. C'est la couche germinative de l'épithélium. Les cellules « filles » se différencient et migrent vers la surface épithéliale.

Les cellules sont cylindriques régulières, font  $18\,\mu\text{m}$  de haut pour  $10\,\mu\text{m}$  de large et ont un aspect turgescent à pôle apical globuleux à cytoplasme clair chromophobe. Leur noyau ovale est perpendiculaire à la membrane basale, il est pauvre en chromatine, très volumineux, marqué d'encoches qui lui donnent un aspect crénelé [12, 13]. Ces cellules sont si hautes que cette couche unicellulaire représente plus du tiers de l'épaisseur de l'épithélium.

## Ultrastructure

Leur cytoplasme est riche en glycogène et en organites cellulaires. Les mitochondries sont petites, irrégulières et se disposent tout autour du noyau et dans la partie inférieure de la cellule. L'appareil de Golgi, situé au-dessus du noyau est parfois en contact avec le réticulum endoplasmique. Le cytoplasme est riche en filament d'actine impliqué dans la migration cellulaire. Il contient aussi des microtubules et des filaments de kératine qui sont connectés entre eux par l'intermédiaire des *desmosomes* et des *hémi-desmosomes*. Les kératines 3 et 12 sont caractéristiques de l'épithélium cornéen et sont de bons marqueurs de la différenciation épithéliale de la cornée.

Au sein de l'épithélium cornéen se trouvent aussi des lymphocytes, des cellules de Langherans présentatrices d'antigènes et des mélanocytes. Ces cellules non épithéliales sont essentiellement présentes à la périphérie de l'épithélium, dans la région limbique.

## Membrane basale de l'épithélium

La membrane basale de l'épithélium est synthétisée par les cellules épithéliales et sépare la *couche de Bowman* de l'épithélium.

C'est une membrane semi-perméable qui participe au transfert des informations et au maintien de l'architecture cornéenne.

Elle mesure environ  $80\,\text{\AA}$  et peut être plus épaisse en cas de vieillissement ou de pathologies diverses (diabète, dystrophies, etc.).

## Ultrastructure

Cette membrane est composée de la lamina lucida, au contact des cellules épithéliales et de la lamina densa dirigée vers le stroma.

Elle est constituée de collagène IV et de protéoglycanes à héparanes sulfates associés à des protéines. Celles-ci comprennent la lamina et la fibronectine.

## Microscopie confocale

L'épithélium est composé de cellules polygonales aplaties, avec juxtaposition irrégulière de cellules brillantes ou sombres. Les cellules épithéliales basales très régulières, en « nid-d'abeilles », sont de taille, de forme et de réflectivité homogène [13-15] (Fig. 14, 15).

## ■ Limbe

### Structure

Le limbe est un anneau qui fait la jonction entre la périphérie cornéenne transparente et la sclère opaque. Il représente la zone charnière de plusieurs tissus : l'uvée, la conjonctive, la sclérotique et la cornée périphérique. Il a la forme d'un anneau elliptique à grand axe horizontal avec une tranche de section sagittale qui est quadrangulaire et des côtés répondant aux faces interne, externe et aux bords antérieur et postérieur du limbe [14].

La *face antérieure* est recouverte par l'épithélium conjonctival qui se continue en avant par l'épithélium cornéen. L'expansion antérieure de la capsule de Tenon fusionne avec la conjonctive sur une largeur de  $1\,\text{mm}$  à  $2\,\text{mm}$ , approximativement à  $2\,\text{mm}$  en arrière de l'insertion de la conjonctive sur la cornée.

La *face interne* est limitée par l'éperon scléral en arrière et la ligne de Schwalbe en avant. Elle possède les éléments du système excrétoire de l'humeur aqueuse, le trabéculum et le canal de Schlemm.

Le *bord postérieur* répond à la ligne perpendiculaire à la surface du globe qui passe par l'éperon scléral.

Le *bord antérieur* du limbe marque la séparation entre la cornée et la sclérotique. Les limites sont différentes selon qu'elles sont définies par les anatomistes ou les chirurgiens.

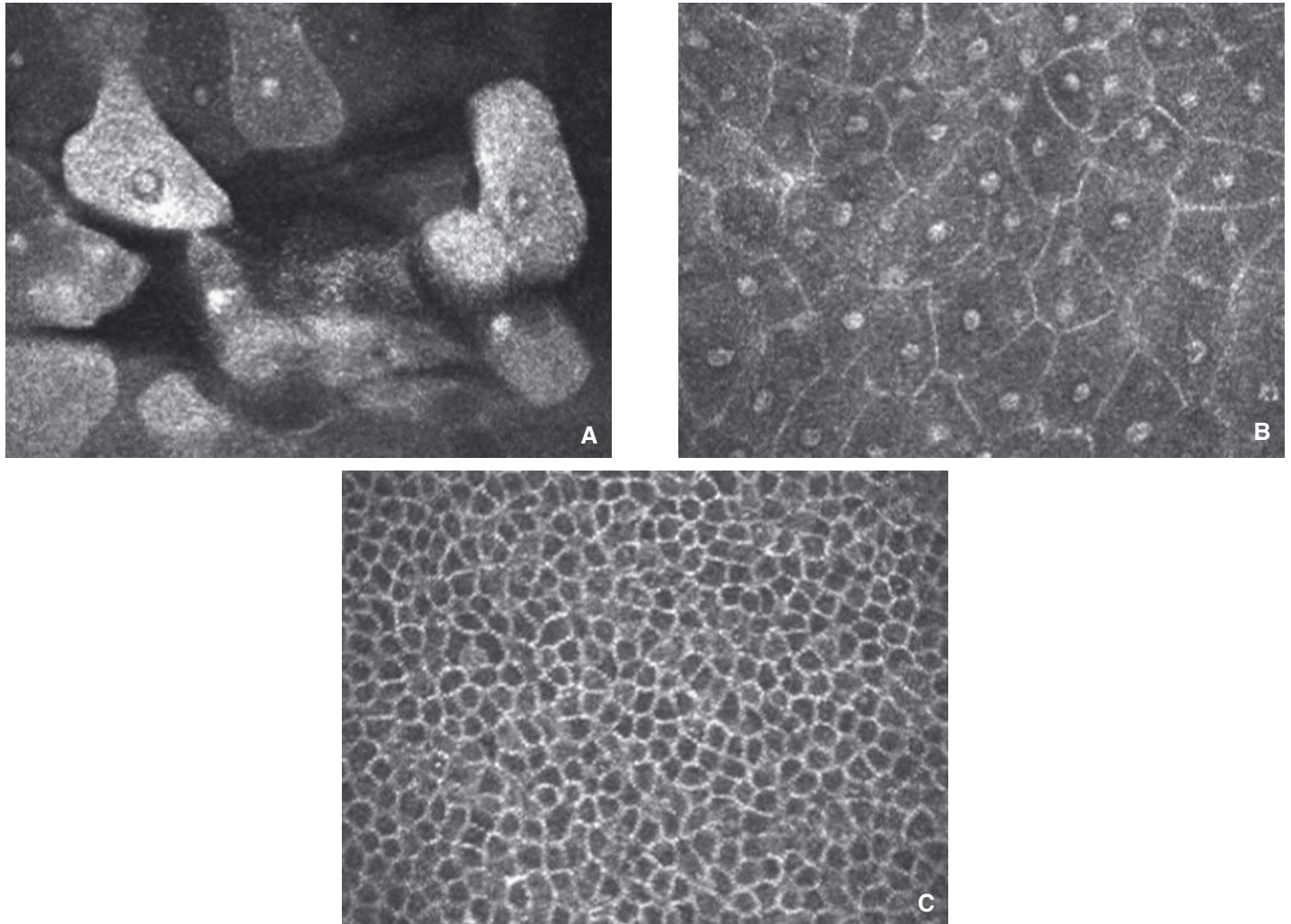
Pour les chirurgiens, le limbe représente la zone d'incision de la chirurgie de la cataracte et du glaucome. Ce *limbe chirurgical* est représenté par la limite antérieure de l'espace décollable entre la sclère et la conjonctive alors que le *limbe anatomique* est délimité par la réunion de la terminaison de la membrane de Descemet et la *couche de Bowman* en avant et l'éperon scléral en arrière. Le limbe chirurgical se situe en arrière (environ  $0,5\,\text{mm}$ ) de la limite antérieure du limbe anatomique.

## Ultrastructure

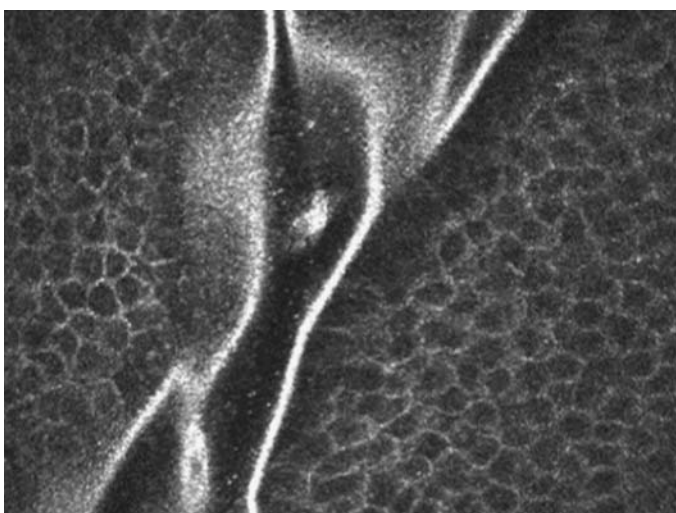
Au niveau du limbe, une lente transition entre l'épithélium cornéen pavimenteux pluristratifié et l'épithélium conjonctival de type cylindrique à deux assises est observée. Cette transition se fait en assurant la continuité des membranes basales et présente donc une irrégularité de l'épaisseur, ce qui explique l'aspect vallonné visible sur les coupes histologiques.

Les cellules basales de la périphérie cornéenne, du limbe et de la conjonctive présentent de nombreuses analogies fonctionnelles. Cependant, au niveau du limbe, leur taille diminue, le nombre de mitochondries augmente et leur surface basale voit leur nombre de digitations augmenter pour accroître leur pouvoir adhésif et leur pouvoir d'échange.

Le plan sous-épithélial n'existe que dans les deux tiers externes du limbe. Il est formé par la fusion d'éléments conjonctifs provenant du chorion conjonctival, de la capsule de tenon et de l'épisclère.



**Figure 14.** Photographie en Heidelberg Retina Tomograph (HRT) : épithélium cornéen.  
**A.** Cellules superficielles qui desquament (2  $\mu$ m).  
**B, C.** Cellules épithéliales.



**Figure 15.** Photographie en Heidelberg Retina Tomograph (HRT) : dystrophie de Cogan avec érosion cornéenne (déchirure de l'épithélium cornéen à 17  $\mu$ m).

Plus en profondeur, la transition entre le stroma cornéen bien organisé et un tissu scléral plus déstructuré est observée. À ce niveau, les fibres de collagène changent d'orientation et perdent leurs caractéristiques particulières au stroma : orientation,

uniformité de calibre et d'espacement. Le nombre de cellules augmente : fibroblastes, macrophages lymphocytes, plasmocytes, mélanocytes, cellules de Langerhans [16].

La membrane de Descemet disparaît, l'endothélium à cellules aplaties du trabéculum scléral fait suite aux cellules de l'endothélium cornéen.

Dans la couche basale de l'épithélium limbique se situent les cellules souches limbiques qui constituent la seule source de régénération de l'épithélium cornéen. Les cellules filles provenant de ces cellules prolifératrices se déplacent de façon centripète à partir du limbe, adoptant les caractéristiques de cellules amplificatrices transitoires. Quand, après plusieurs cycles de division cellulaire, leur contact diminue avec la membrane basale, elles se dirigent en surface, perdent leur capacité de prolifération et se différencient, amorçant l'expression des kératines K3 et K12 avant de desquamer. L'existence des cellules prolifératrices limbiques a été démontrée par l'absence d'expression de la paire de cytokératines K3/K12 (cytokératines caractéristiques de l'épithélium cornéen), la sécrétion de sous-types de collagène IV (a1 et a2) différents de ceux sécrétés par les cellules basales épithéliales cornéennes (a3, a4, a5 et a6), une réponse mitotique beaucoup plus importante dans la couche basale épithéliale limbique que dans la couche basale épithéliale cornéenne et un cycle cellulaire lent.

## Fonction

Tout dysfonctionnement du limbe retentit sur l'homéostasie oculaire.

En effet, le limbe contient tous les éléments cellulaires et humoraux de l'inflammation et est ainsi le site de prédilection des pathologies immunologiques oculaires. Il est le réservoir de polynucléaires neutrophiles et éosinophiles, de lymphocytes, de mastocytes. Il est riche en médiateurs, en immunoglobulines A, G et M et en constituants des voies principales et alternes du complément. Il contient des cellules de Langerhans (cellules dendritiques) possédant à leur surface des antigènes d'histocompatibilité de classe II, Ia/HLA-DR, et dont le rôle de présentation de l'antigène est essentiel.

Les cellules prolifératrices précurseurs des cellules épithéliales cornéennes au niveau de la conjonctive limbique ont la capacité de réparer la surface épithéliale cornéenne. En cas de destruction de ces cellules, par brûlure oculaire par exemple, on observe un syndrome d'insuffisance en cellules souches limbique caractérisé par un envahissement de la surface cornéenne par un épithélium à différenciation conjonctivale (contenant des cellules caliciformes). La migration des cellules conjonctivales vers la cornée est suivie d'une invasion vasculaire, d'un pannus et d'une perte de la transparence cornéenne. Ces altérations dégradent l'acuité visuelle et peuvent être traitées en remplaçant ces cellules par des cellules limbiques provenant soit de l'œil controlatéral sain (autogreffe), soit de celui d'un donneur apparenté ou étranger (allogreffe) [17-20].

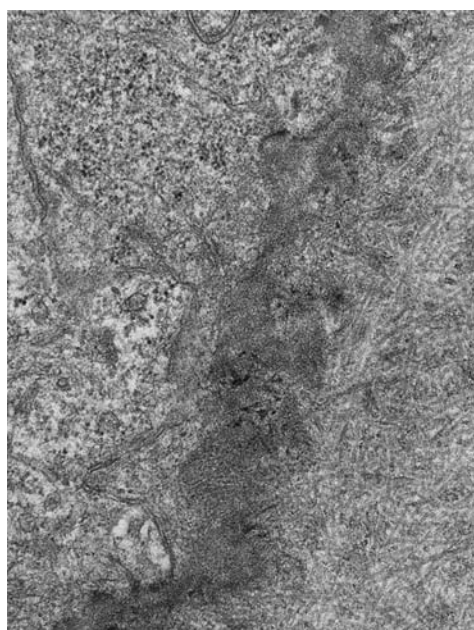
Enfin, le limbe est le lieu de la résorption de l'humeur aqueuse, il est au cœur de la régulation de la pression intraoculaire.

## ■ Couche de Bowman

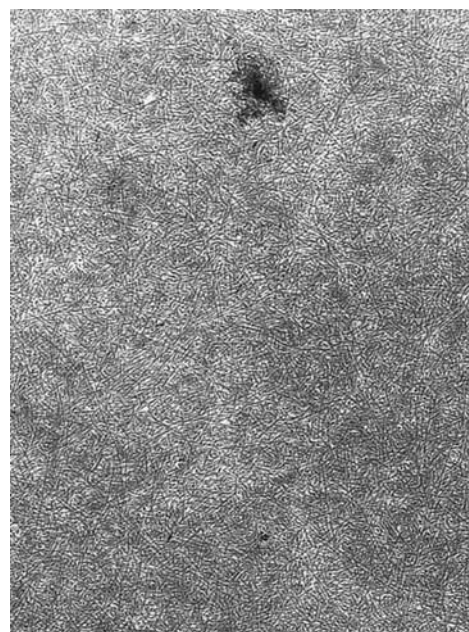
C'est une couche composée de fibres de collagènes réparties dans la substance fondamentale. Elle mesure de 8  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur et est située entre la membrane basale de l'épithélium et le stroma. Elle est acellulaire, excepté quelques expansions des cellules de Schwann entourant des terminaisons nerveuses qui rejoignent l'épithélium (Fig. 16, 17).

### Ultrastructure

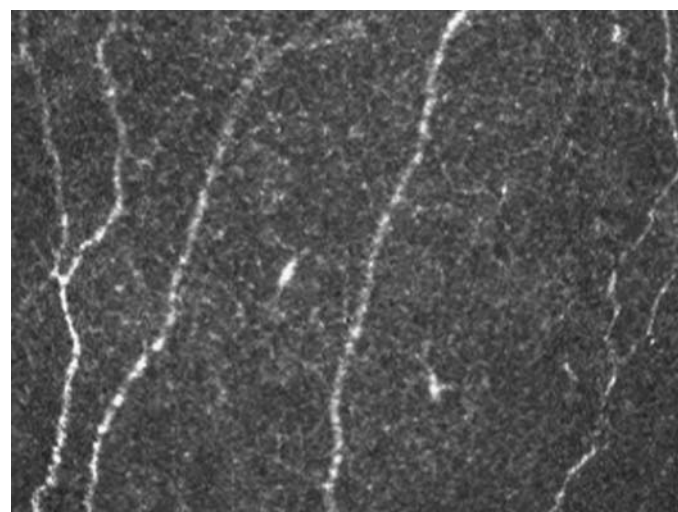
La substance fondamentale est constituée de mucoprotéines. Les fibres sont des fibres de collagène de type I, V, VI, III, VII qui ont une striation transversale et mesurent de 20 nm à 30 nm de diamètre et 240 nm à 270 nm de long. La périodicité n'est pas bien nette [8].



**Figure 16.** Photographie en microscopie électronique : jonction entre l'épithélium cornéen et la couche de Bowman  $\times 10\,000$ .



**Figure 17.** Photographie en microscopie électronique : membrane de Bowman  $\times 10\,000$ .



**Figure 18.** Photographie en Heidelberg Retina Tomograph (HRT). Nerfs.

La surface de cette couche est régulière, sa face postérieure est moins bien définie et se confond avec la partie antérieure du stroma. Cette couche est synthétisée par les cellules basales de l'épithélium au cours de la vie embryonnaire et n'est pas régénérée au cours de la vie. Toute blessure de celle-ci est définitive et entraîne des opacités.

Des ruptures de la *couche de Bowman* peuvent se observer dans le kératocône et se traduisent par des opacités linéaires.

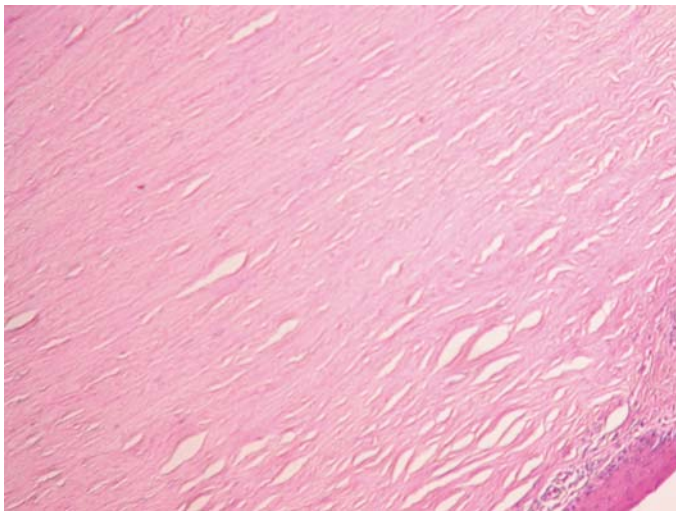
La destruction de la *couche de Bowman* lors de la photokératectomie réfractive de surface peut participer à l'apparition d'un voile sous-épithélial encore appelé haze cornéen.

En microscopie confocale, cette membrane est acellulaire, de densité moyenne sur l'échelle des gris, immédiatement sous-jacente à la couche épithéliale basale [21].

Des images linéaires hyperréfléctives peuvent être observées, ce sont les plexus nerveux sous-épithéliaux (Fig. 18).

## ■ Stroma

Le stroma mesure environ 500  $\mu\text{m}$  d'épaisseur et constitue à lui seul environ 90 % de l'épaisseur cornéenne. Il est composé



**Figure 19.** Photographie en microscopie optique coloration hématoxyline, éosine, safran : stroma cornéen.

de lamelles de collagène entre lesquelles s'intercalent des fibrocytes cornéens (ou kératocytes ou stromacytes), et de la substance fondamentale. On retrouve également des cellules de Schwann, des lymphocytes B et T, des cellules mononuclées et des cellules de Langerhans. Il est avasculaire [22-26].

La majorité des caractéristiques de la cornée comme sa solidité, la stabilité de sa forme et sa transparence sont largement attribuables aux propriétés anatomiques, biochimiques et biomécaniques du stroma cornéen (Fig. 19 à 21).

## Lamelles de collagène

Le stroma cornéen est composé d'environ 200 à 250 lamelles de collagène empilées les unes sur les autres. Les lamelles de collagène sont parallèles entre elles, et parallèles à la surface cornéenne. Chaque lamelle mesure 2 µm d'épaisseur et 9 µm à 260 µm de largeur, toujours plus importante au centre qu'en périphérie. Les lamelles sont parallèles les unes aux autres et parallèles à la surface de la cornée. L'organisation lamellaire du stroma produit une force de tension uniforme résistant à la

pression intraoculaire et maintenant une courbure cornéenne appropriée aux fonctions optiques et biomécanique de l'œil.

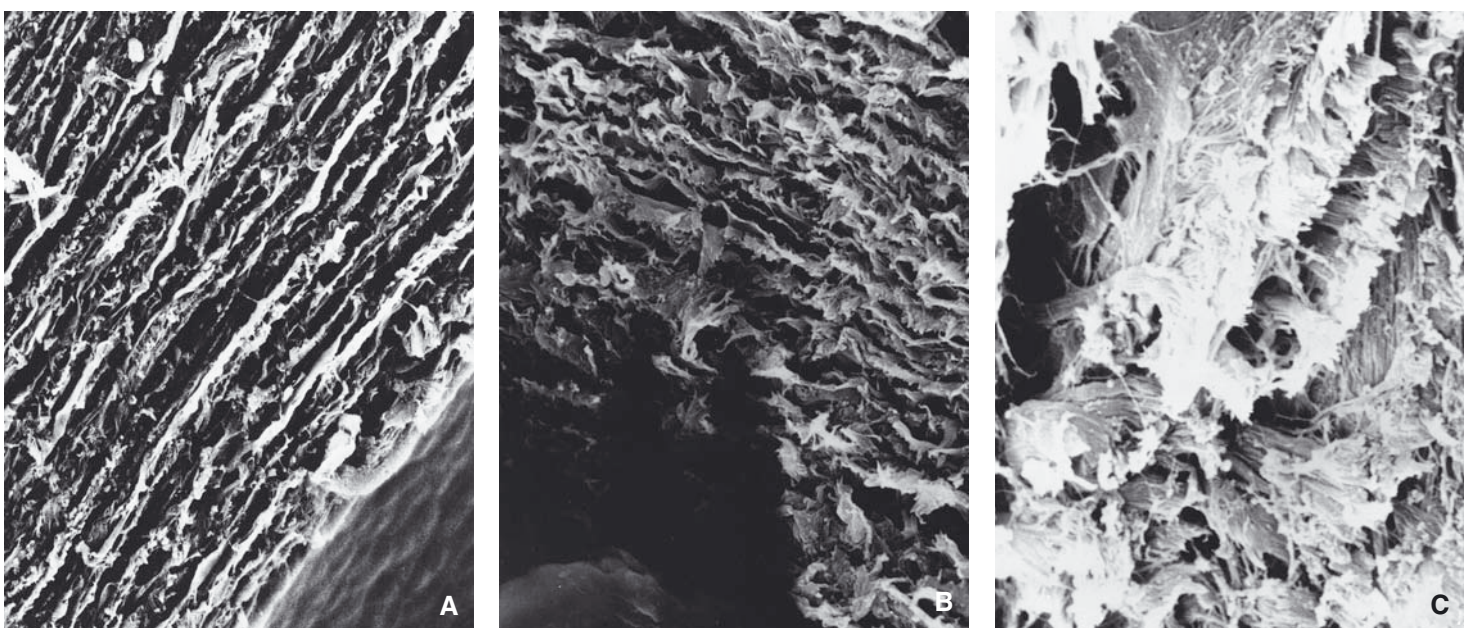
Chaque lamelle est elle-même composée de fibrilles de collagène. Celles-ci sont donc toujours dans un même plan et ne semblent pas changer de direction sauf au niveau du tiers antérieur du stroma. Les faisceaux conjonctifs demeurent néanmoins indépendants et leur direction variable conduit à des entrecroisements typiques, réalisant un véritable cannage. Certains faisceaux iraient de limbe à limbe, d'autres se disposeraient de façon radiaire, angulaire, bifurqueraient ou trifurqueraient [26-28].

Chacune de ces fibrilles de collagène est l'élément de base unitaire du stroma cornéen. Elles résultent de l'assemblage de protofibrilles parallèles entre elles et surtout parfaitement équidistantes entre elles, assurant la transparence de la cornée. En effet, Les kératocytes synthétisent une chaîne pro-α du collagène, trois molécules sont hydroxylées, glycosylées et assemblées pour former la structure en triple hélice du procollagène. Les molécules de procollagène sont sécrétées dans le milieu extracellulaire puis les propeptides sont clivés pour former les molécules de collagène matures. Les molécules de collagène sont assemblées en fibrilles d'un diamètre de 27 nm à 35 nm, mais quelques fibrilles peuvent mesurer 60 nm à 70 nm. Ces fibrilles sont ensuite assemblées en fibres de collagène parfaitement équidistantes. L'agencement en quinconce crée en microscopie électronique l'aspect de macropériodicité de 64 nm. Cette périodicité transversale est caractéristique. Elles sont principalement constituées de collagène de type I. Les collagènes de type III, V et VI sont également présents dans le stroma en plus petite quantité [27] (Fig. 22).

## Substance fondamentale

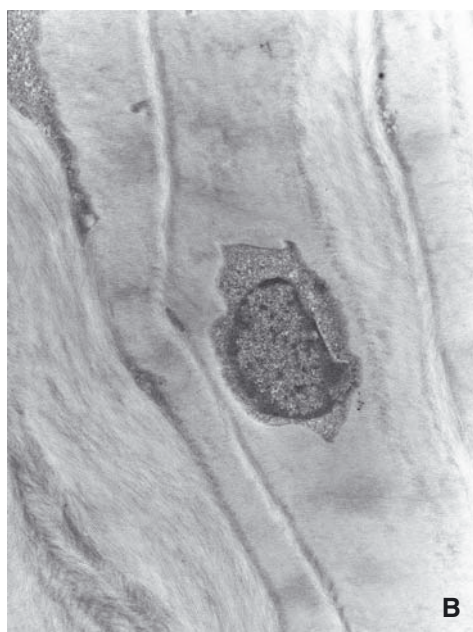
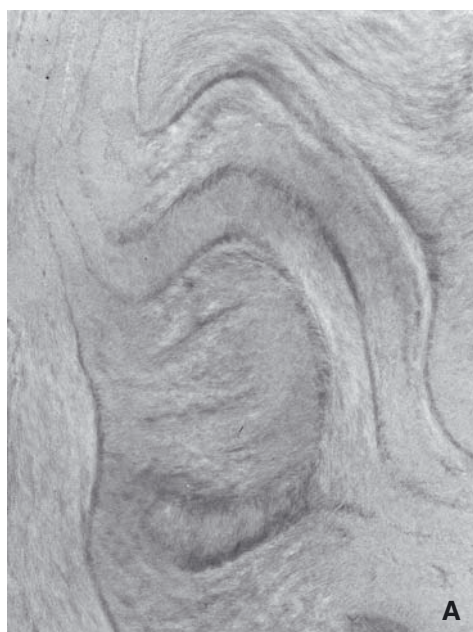
La substance fondamentale occupe tout l'espace compris entre les fibres de collagène. Elle assure la cohésion des fibres de collagène et est responsable de leur espacement strictement ordonné, ce qui joue un rôle fondamental dans la transparence cornéenne.

Elle est riche en mucopolysaccharides et en eau. La plupart des chaînes polysaccharidiques sont liées à des protéines formant alors une unité fonctionnelle appelée protéoglycane. Les principaux protéoglycanes cornéens sont constitués de



**Figure 20.** Photographie en microscopie électronique : stroma cornéen, embryon de 15 semaines.

**A.** × 720.  
**B.** × 1600 (en bas de la photographie on aperçoit l'endothélium).  
**C.** × 2 000.

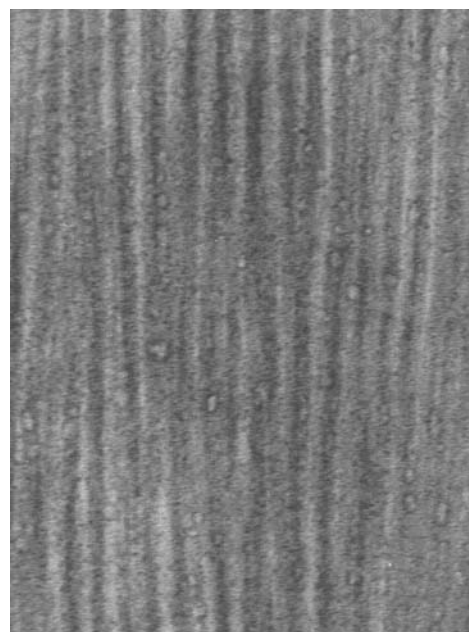


**Figure 21.** Photographie en microscopie électronique : stroma.  
**A.**  $\times 2\,000$ .  
**B.**  $\times 4\,000$  avec un stromocyte visible.

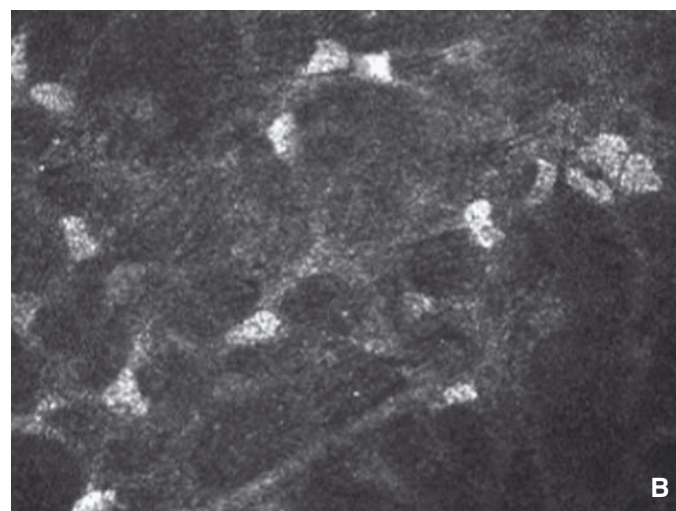
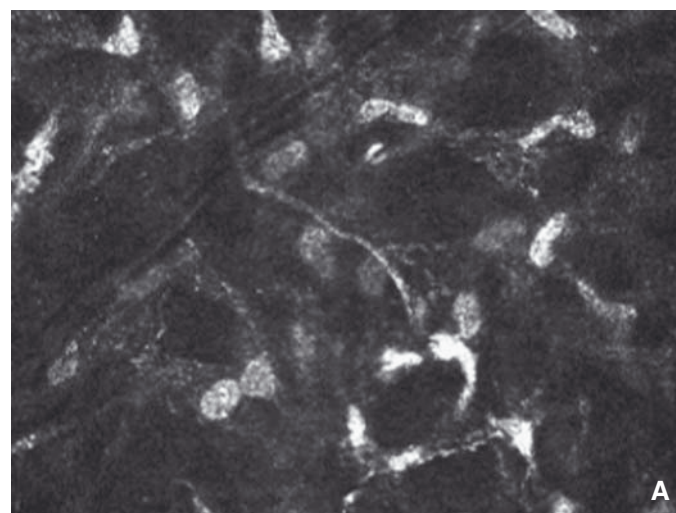
glycosaminoglycanes (GAG). Chez l'homme, approximativement 60 % des GAG sont des kératanes sulfates et les 40 % restant sont les chondroïtine-4-sulfates et les chondroïtine-6-sulfates. Les GAG joueraient un rôle dans la transparence cornéenne par la régulation de la structure du collagène, de la fibrillogenèse et de l'hydratation stromale. Les GAG joueraient également un rôle dans la réponse inflammatoire par la modulation de la migration cellulaire.

En microscopie confocale, le stroma antérieur est identifié grâce à la présence de noyaux cellulaires des kératocytes qui sont hyper-réfléctifs, allongés (800 cellules par  $\text{mm}^2$ ). Le stroma moyen contient aussi des kératocytes brillants, en densité plus faible, et de forme plus arrondie. Le stroma postérieur comporte des kératocytes dont la forme devient fusiforme [21, 28-30] (Fig. 23).

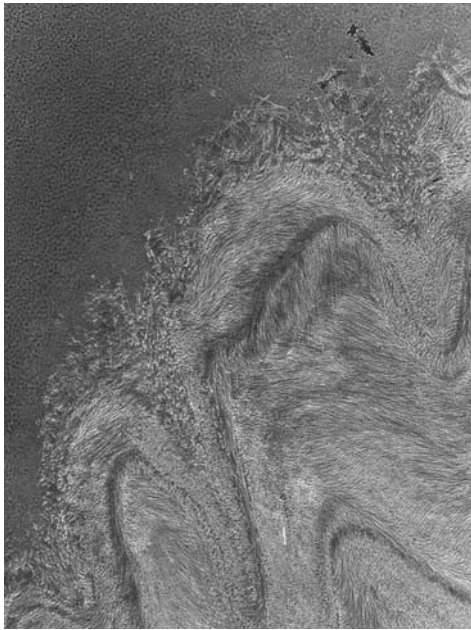
Dans le kératocône, les propriétés biomécaniques de la cornée sont modifiées. Elles peuvent être étudiées grâce à l'*ocular response analyzer* (ORA) (*corneal hysteresis* [CH] et *corneal resistance factor* [CRF] d'autant plus diminuées que le kératocône est évolué : asymétrie entre les deux yeux, CRF inférieur au CH) [31].



**Figure 22.** Photographie en microscopie électronique : fibres de collagène  $\times 50\,000$ .



**Figure 23.** Photographie en Heidelberg Retina Tomograph (HRT) : stroma.  
**A.** Superficiel 121  $\mu\text{m}$ .  
**B.** Profond 191  $\mu\text{m}$ .



**Figure 24.** Photographie en microscopie électronique : jonction entre le stroma et la membrane de Descemet.

Dans certaines formes de kératocône on propose un *crosslinking* cornéen pour stopper l'évolution de la déformation de la cornée et augmenter sa rigidité. Cette technique consiste à photopolymériser la cornée par des rayons ultraviolets potentialisés par un catalyseur : la riboflavine (vitamine B<sub>12</sub>). On crée ainsi des liaisons supplémentaires entre les fibres de collagène de manière à augmenter la force mécanique des tissus.

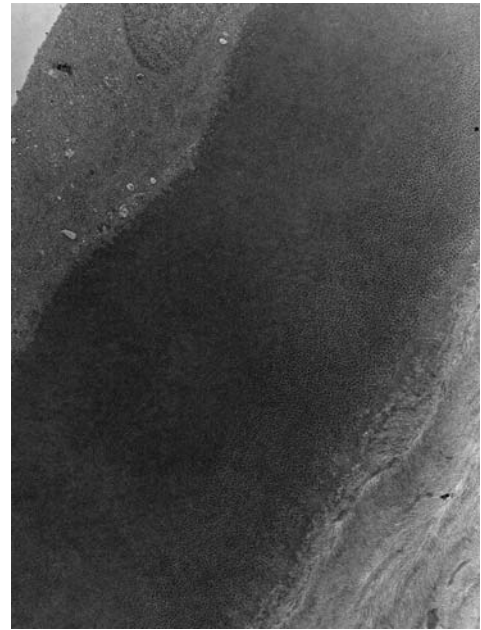
## Kératocytes ou fibrocytes

Les kératocytes occupent environ 2 % à 3 % du volume stromal total (Fig. 21B). Il s'agit de cellules de type conjonctif. Ce sont des cellules plates étoilées, disposées parallèlement à la surface de la cornée et aux lamelles de collagène. Elles possèdent un noyau aplati, allongé qui occupe la plus grande partie du cytoplasme. Le cytoplasme granuleux est assez pauvre en réticulum endoplasmique, en appareil de Golgi et en mitochondries. Les kératocytes possèdent de longues expansions cytoplasmiques irradiant dans de multiples directions et entrant en contact avec les expansions des kératocytes adjacents par l'intermédiaire de jonctions *gap* et *tight*.

La forme et la fonction des kératocytes sont régulées par le milieu extracellulaire. Leurs propriétés fondamentales sont la biosynthèse de la matrice extracellulaire (des mucopolysaccharides et du collagène) qui est détaillée ci-dessous. Lors de traumatismes, les kératocytes s'activent, ont la faculté de migrer, ils peuvent alors se transformer en fibroblastes et sont responsables des phénomènes de cicatrisation [11, 25, 26].

## ■ Membrane de Descemet

C'est une membrane très résistante, amorphe, élastique, elle sépare le stroma de l'endothélium cornéen (Fig. 24 à 26). Elle est perméable à l'eau. Elle mesure environ 10 µm, son épaisseur augmente avec l'âge et dans certaines pathologies. La membrane de Descemet est une membrane collagénique acellulaire entre le stroma postérieur et la monocouche endothéliale. Elle est formée de collagènes IV et VIII et contient de la fibronectine, de la laminine type 1 et des protéoglycanes héparane, dermatane et kératane sulfates. Elle est sécrétée par l'endothélium. Elle est peu extensible, elle se colore avec les colorants du collagène comme le stroma cornéen, elle ne prend pas les colorants du tissu élastique, en revanche, elle est fortement *periodic acid Schiff* (PAS) positive [32, 33].



**Figure 25.** Photographie en microscopie électronique : coupe passant par stroma puis Descemet puis endothélium × 3 000.

## Ultrastructure

On peut la diviser en deux feuillets, l'un antérieur et l'autre postérieur :

- le feuillet antérieur est au contact du stroma, il mesure à peu près 3 µm d'épaisseur. Son épaisseur est fixe tout au long de la vie ; il correspond à la portion sécrétée par les cellules embryonnaires à partir du 4<sup>e</sup> mois de la gestation [32]. Il est constitué majoritairement de collagène de type VIII ;
- le feuillet postérieur, sous-endothélial, granuleux, est sécrété par les cellules endothéliales après la naissance, ce qui explique l'augmentation de son épaisseur avec l'âge. Il est constitué majoritairement de collagène de type IV.

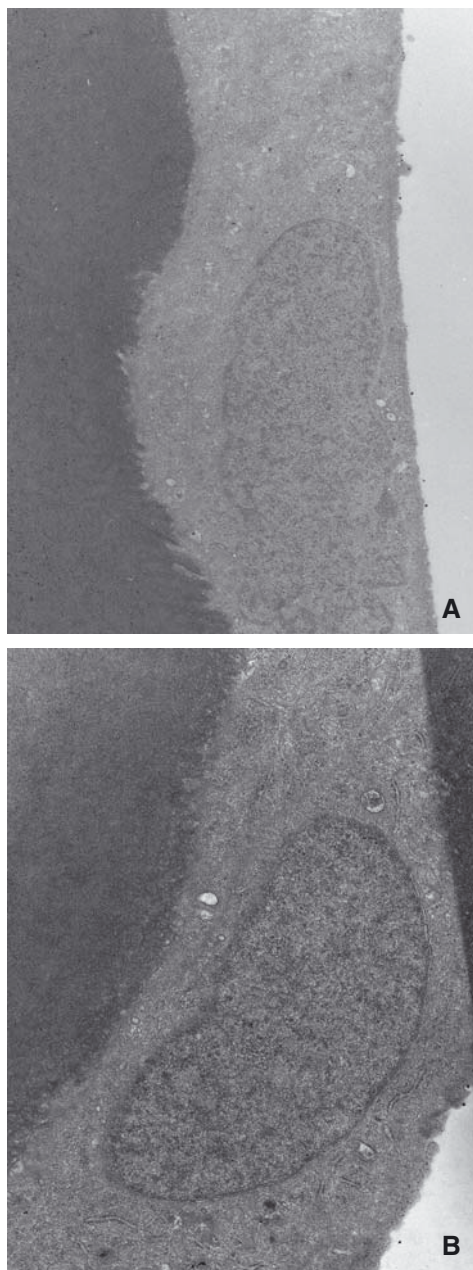
En microscopie électronique, le feuillet antérieur a une structure en bande verticales. Les fibrilles de collagène sont organisées en lamelles compactes et baignent dans une matrice glycoprotéique. Dans une lamelle, les fibrilles s'entrecroisent et l'alignement vertical de ces croisements crée une striation sur les coupes verticales. Ces croisements sont reliés entre eux par des microfilaments de collagène. L'espace entre chaque striation est de 100 µm à 110 µm. Les fibres de cette partie de la membrane de Descemet s'entrecroisent avec les fibres de la partie profonde du stroma (Fig. 25).

Le feuillet postérieur contient aussi des fibrilles plus irrégulières et plus petites qui donnent un aspect granuleux et sans périodicité. Il n'y a pas de véritable structure d'ancrage de cette partie à l'endothélium, ce qui explique que l'endothélium soit facilement détachable du stroma.

Les *verrucosités hyalines de Hassale-Henle* sont décrites chez les personnes âgées de plus de 20 ans à la périphérie de la cornée. Elles augmentent avec l'âge, elles font saillie en chambre antérieure. Elles sont constituées d'un matériel granulaire rappelant la membrane de Descemet et parcourues par des structures striées à longue périodicité de 100 Å, évoquant du collagène [8].

## ■ Endothélium

Il s'agit de la couche la plus postérieure de la cornée ; elle est en contact avec l'humeur aqueuse en arrière et la membrane de Descemet en avant (Fig. 26, 27).

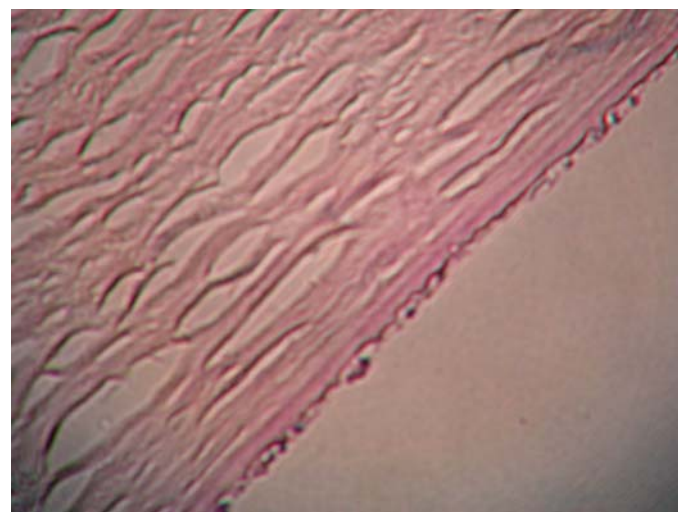


**Figure 26.** Photographie en microscopie électronique : jonction entre l'endothélium et la Descemet (une cellule endothéliale) (A, B).

À l'état normal, la cornée maintient une épaisseur relativement constante et demeure transparente ; elle doit lutter en permanence contre l'imbibition hydrique, c'est l'état de déturgescence [33, 34].

L'action de l'épithélium dans la déturgescence est minime, il réduit l'évaporation et diminue l'absorption des fluides à partir des larmes. L'endothélium, en revanche, joue un rôle très important. Après destruction de l'endothélium cornéen et de la membrane de Descemet, l'épaisseur de la cornée peut être multipliée par cinq. L'endothélium fonctionne comme une pompe active grâce à la pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ATPase. Cette dernière expulse le  $\text{Na}^+$  dans l'humeur aqueuse et libère le  $\text{K}^+$  dans la cellule endothéliale, ce qui crée un gradient osmotique assurant la déturgescence du stroma puisque l'eau suit les mouvements de l'ion sodium.

Les mouvements ioniques génèrent aussi une différence de potentiel d'environ 500 mV entre les milieux intra- et extracellulaire endothélial. Les mouvements de l'ion bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) sont responsables de la polarisation négative de la face postérieure de l'endothélium, ce qui intervient aussi dans le phénomène de déturgescence.



**Figure 27.** Photographie en microscopie optique coloration hématoxyline, éosine, safran : endothélium.

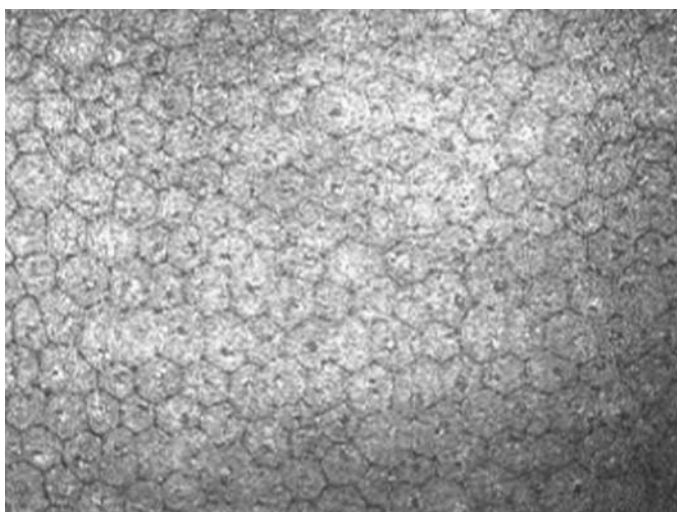


**Figure 28.** Photographie en microscopie électronique : endothélium (cadavre)  $\times 200$ .

L'endothélium est formé d'une monocouche de cellules uniformes hexagonales plates, régulières. Cette régularité en « nid-d'abeilles » est caractéristique. Les cellules mesurent environ 5  $\mu\text{m}$  à 6  $\mu\text{m}$  de hauteur et 15  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$  de largeur. Il existe de nombreuses interdigitations vers la membrane de Descemet, elles assurent la cohésion intercellulaire. La densité cellulaire normale chez un jeune est de 3 500 cellules/ $\text{mm}^2$ . Elle est facile à déterminer grâce à la microscopie spéculaire. Une diminution du nombre de cellules est irréversible [12, 34] (Fig. 28, 29).

### Ultrastucture

Ces cellules se composent d'un volumineux noyau, ovale, centrocellulaire de 5  $\mu\text{m}$  environ, occupant la plus grande partie de la cellule. Le noyau comporte de nombreux pores dans la membrane nucléaire. En périphérie et au niveau des corpuscules de Hassale-Henlé, les cellules deviennent plus irrégulières et plus plates et le noyau est déjeté en arrière et fait alors saillie dans la chambre antérieure.



**Figure 29.** Photographie en Heidelberg Retina Tomograph (HRT). Endothélium cornéen.

Le cytoplasme clair comprend de nombreuses vacuoles et de fins granules. Il occupe la partie apicale de la cellule, ou « terminal web ». Il est parcouru d'une fine structure filamenteuse en rapport avec les moyens d'union intercellulaires. Ces cellules sont responsables d'une forte activité métabolique comme en témoigne un cytoplasme riche en organites cellulaires, un grand nombre de mitochondries, un appareil de Golgi volumineux, la présence d'un réticulum endoplasmique lisse et granuleux ainsi que de nombreux ribosomes.

Les études histo-immunochimiques mettent en évidence les principaux GAG cornéens (chondroïtine-6-sulfate et chondroïtine-4-sulfate, dermatane sulfate, et héparane sulfate) au sein du cytoplasme. On retrouve également quelques pigments et de l'acide hyaluronique.

La membrane plasmique comprend une face basale en rapport avec la membrane de Descemet, une face apicale en rapport avec l'humeur aqueuse et une face latérale où siègent les mécanismes jonctionnels intercellulaires.

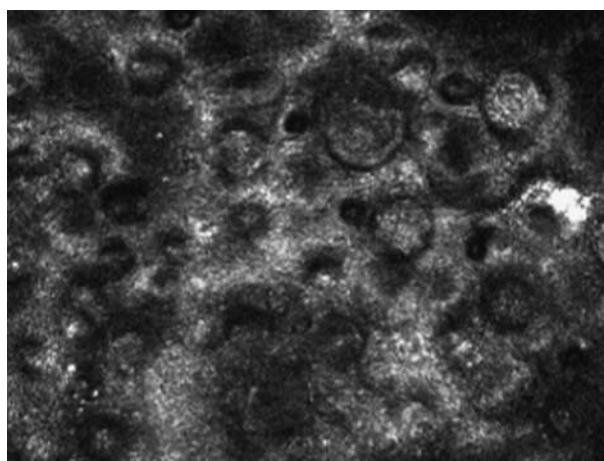
La face basale est le siège de nombreux phénomènes de pinocytose. Les cellules ont un contour très sinueux pour augmenter leur surface d'échange avec les cellules adjacentes.

La face apicale est en contact avec l'humeur aqueuse, elle présente de 20 à 30 microvillosités par cellules qui augmentent la surface de contact avec celle-ci. Il existe des prolongements marginaux intriqués avec les microvillosités qui viennent oblitérer les espaces intercellulaires. Ces cellules présentent des jonctions intercellulaires apicales situées sous les prolongements marginaux, elles créent une barrière discontinue permettant le passage de petites molécules de la chambre antérieure vers les espaces intercellulaires. Ces jonctions sont en rapport avec la structure filamenteuse du « terminal web ». Enfin, elles présentent des structures ciliées qui s'associent aux éléments précédents.

La face latérale est le lieu de résidence de la majorité des jonctions intercellulaires (zonulae occludens ou *tight junction* et maculae occludens ou *gap junction*).

Les cellules endothéliales présentent de nombreuses interdigitation et contiennent de nombreuses jonctions complexes : des « zonae occludens, macula occludens, et macula adherens ». Les *gap junctions* permettent le transfert de petites molécules et d'électrolytes d'une cellule endothéliale à l'autre. Ces cellules interconnectées se comportent comme une *barrière* face à l'humeur aqueuse.

La *dystrophie de Fuchs* est une dystrophie cornéenne due à la perte progressive de cellules endothéliales dont le premier signe clinique est la « cornea guttata » décrite par Vogt. À la lampe à



**Figure 30.** Photographie en Heidelberg Retina Tomograph (HRT). Cornea guttata.

fente à fort grossissement, on observe de fines opacités arrondies sombres dans l'endothélium. Ces anomalies sont des gouttelettes mieux vues en *microscopie spéculaire* et en HRT (Fig. 30). Elles correspondent à des excroissances de la membrane de Descemet, avec accumulation de fibres de collagène. On observe aussi une augmentation du coefficient de variabilité ainsi qu'une variation de la forme de ces cellules (polymégatisme).

La décompensation cornéenne survient en dessous de 300 à 500 cellules/mm<sup>2</sup>, elle se manifeste par un œdème stromal postérieur au début puis total et diffus. Très rapidement, le patient souffre d'ulcérations récidivantes. On peut proposer une greffe de membrane amniotique le temps de sursoir à une greffe transfixiante ou au mieux une greffe lamellaire postérieure.

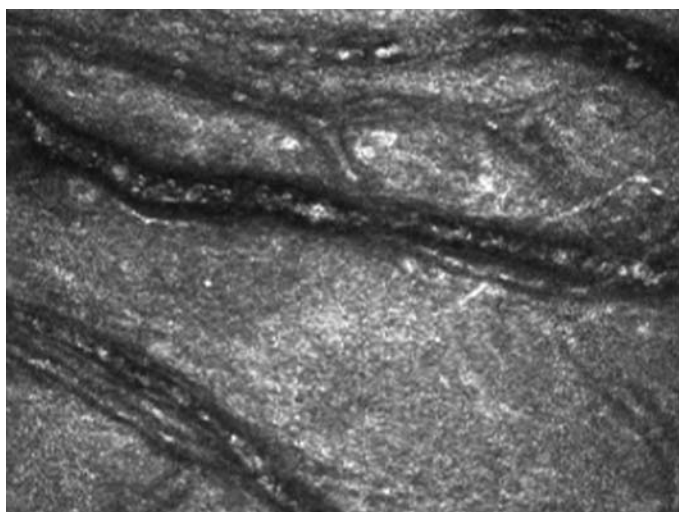
La mesure de l'épaisseur cornéenne par *pachymétrie* est un indicateur précieux de l'intégrité physiologique de l'endothélium.

En *microscopie confocale*, l'endothélium apparaît comme un réseau régulier de cellules hexagonales de densité homogène sur l'échelle des gris. Lorsqu'il y a une cornea guttata, on peut observer des images rondes hyporéfléctives correspondant aux gouttes en microscopie spéculaire (Fig. 28, 29).

## ■ Innervation de la cornée

La cornée est très richement innervée, elle représente un des tissus les plus sensibles de l'organisme. Elle est 40 fois plus innervée que la pulpe dentaire. Le stroma antérieur, la membrane de Descemet et l'endothélium sont dénués de toute innervation sensitive.

L'innervation sensitive de la cornée dépend de la branche ophtalmique afférente du ganglion trigéminal par l'intermédiaire des nerfs ciliaires longs et courts. Ceux-ci pénètrent la sclérotique au niveau du pôle postérieur. Ils gagnent le plexus ciliaire dans la suprachoroïde. De ce plexus partent des rameaux qui pénètrent dans la sclérotique un peu en arrière du limbe et se dirigent, d'arrière en avant, à l'union de son tiers postérieur et de ces deux tiers antérieurs. Ces nerfs sont renforcés par quelques rameaux venus de l'épiscière et de la conjonctive, ce sont les nerfs ciliaires antérieurs de Boucheron. Au niveau du limbe, il existe environ 80 nerfs cornéens anastomosés entre eux par des rameaux horizontaux, qui réalisent un plexus péricornéen. Ainsi, chaque nerf cornéen est en rapport avec plusieurs nerfs ciliaires. Au niveau des lames, chaque filet nerveux se subdivise en une multitude de filaments très fins (moins de 1 µm) qui s'insinuent entre les lamelles et perdent leur gaine de Schwann. Un réseau de fibres nerveuses est condensé sous la couche de Bowman, où se constitue un véritable plexus. Il est à l'origine des rameaux à direction verticale qui perforent la



**Figure 31.** Photographie en Heidelberg Retina Tomograph (HRT). Vaisseaux conjonctivaux.

*couche de Bowman.* Les rameaux qui en sont issus perdent leur gaine de Schwann et s'insinuent entre les cellules épithéliales. À côté de ce réseau principal existe un réseau accessoire né des nerfs conjonctivaux et épiscléraux. Ces rameaux pénètrent au niveau du limbe et accompagnent les vaisseaux. Ils forment, à la périphérie de la cornée, un plexus annulaire large siégeant sous la couche de Bowman : le plexus de Ranvier. Ce plexus échange des rameaux avec les nerfs cornéens profonds et envoie des branches à l'épithélium.

L'innervation sympathique dépend du ganglion cervical supérieur. Il existerait aussi des fibres parasympathiques au niveau des nerfs ciliaires courts prenant le relais, au niveau du ganglion ciliaire, des fibres préganglionnaires du nerf III.

## ■ Nutrition de la cornée

La cornée est *avascularie*, elle reçoit son apport nutritif du limbe, des larmes et de l'humeur aqueuse. La vascularisation limbique assure la nutrition de la périphérie de la cornée. Les échanges se font avec les larmes à travers les cellules épithéliales qui réalisent une barrière imperméable aux substances hydrosolubles, perméable aux substances liposolubles. La voie transendothéliale assure le passage des éléments à partir de l'humeur aqueuse selon un mode passif (sans d'énergie) ou selon un mode actif qui lutte contre le gradient osmotique (utilisant de l'énergie). Ce mode actif est surtout utilisé pour apporter du glucose à la cornée.

La *vascularisation du limbe* dessert la périphérie de la cornée, l'épisclère et la sclère limbique, la conjonctive, et l'extrémité antérieure de l'uvée. Elle dépend des artères ciliaires antérieures qui émergent de la sclère au niveau des insertions des muscles droits horizontaux. De ces artères naissent des artéioles cornéennes périphériques terminales, des artéioles récurrentes conjonctivales et un plexus artériel anastomotique épiscléral circulaire d'où partent des artéioles perforantes pour le muscle ciliaire et l'uvée. Le système veineux limbique comprend des veinules conjonctivales, ténoniennes, cornéennes et épisclérales périphériques et des plexus intrascléraux. Ce sang se déverse dans le système veineux orbitaire. Les canaux collecteurs, drainant le canal de Schlemm, s'abouchent individuellement à la surface de l'épisclère ou fusionnent avec les veines épisclérales. Les vaisseaux lymphatiques s'organisent aussi en plexus limbiques qui se déversent dans les lymphatiques palpébraux avant de gagner les aires ganglionnaires régionales et les organes réticuloendothéliaux centraux (Fig. 31).

## ■ Conclusion

La cornée est un tissu complexe formé de cinq couches tissulaires différentes. Elle est unique par son architecture complexe (forme, épaisseur), sa transparence et ses propriétés biomécaniques et de défense contre les agents pathogènes extérieurs. Ses propriétés lui confèrent sa fonctionnalité essentielle : la vision.

*Remerciements :* je remercie les docteurs S. Liotet, Y. Meslier et madame J. Rault pour les photos en microscopie électronique.



## ■ Références

- [1] Chiambaretta F, Pilon F, Rigal D, Gerard M. Cornée : méthodes d'examen et sémiologie. *EMC* (Elsevier Masson SAS, Paris), Ophtalmologie, 21-200-A-10, 2000.
- [2] Saraux H, Biais B. *Physiologie oculaire*. Paris: Masson; 1983.
- [3] Le Grand Y. *Optique physiologique*. Paris: Édition de la revue d'optique; 1956.
- [4] Corbé C. *Optique clinique et exploration fonctionnelle de la vision après chirurgie réfractive. Rapport de la Société française d'ophtalmologie*. Paris: Masson; 2001 (p. 112-3).
- [5] Maurice D. The structure and transparency of the cornea. *J Physiol* 1957;**136**:263-86.
- [6] Raynaud C, Bonicel P, Rigal D. Anatomie de la cornée. *EMC* (Elsevier Masson SAS, Paris), Ophtalmologie, 21-003-A-10, 2006.
- [7] Rigal D. *L'épithélium cornéen*. Paris: Masson; 1993.
- [8] Saraux H, Lemasson C, Offret H, Renard G. *Anatomie et histologie de l'œil*. Paris: Masson; 1985 (p. 101-15).
- [9] Aitken D, Friend J, Thoft RA, Lee WR. An ultrastructural study of rabbit ocular surface transdifferentiation. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1988;**29**:224-31.
- [10] Calmettes I, Deodati F, Planel H, Bec P. Étude histologique et histochimique de l'épithélium antérieur de la cornée et de ces basales. *Arch Ophthalmol (Paris)* 1966;**16**:481-506.
- [11] Hamada R. Aspect ultrastructural des cellules et du conjonctif cornéen normal. *Arch Ophthalmol* 1975;**35**:23-6.
- [12] Hogan MJ, Alvarado JA, Weddel JE. *The cornea In histologie of the human eye*. Philadelphia: WB Saunders; 1971 (p. 111-7).
- [13] Jakus M. *The fine structure of the human cornea. The structure of the eye*. New York: Academic press; 1961.
- [14] Dighiero P, Elies P, Renard G, Trong T. *Atlas en Ophtalmologie*. Paris: Elsevier Masson; 2009.
- [15] Li HF, Petroll WM, Moller-Pedersen T, Maurer JK, Cavanagh HD, Jester JV. Epithelial and corneal thickness measurements by in vivo confocal microscopy through focusing. *Curr Eye Res* 1997;**16**:214-21.
- [16] Van Trappen L, Geboes K, Missotten L. Lymphocytes and langerhans cells in the normal human cornea. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1985;**26**:220-5.
- [17] Borderie V, Moldovan M, Touzeau O, Bourcier T, Laroche L. Greffes de limbe et de membrane amniotique. *EMC* (Elsevier Masson SAS, Paris), Ophtalmologie, 21-200-A-05, 2005.
- [18] Dua HS, Azuara-Blanco A. Allo-limbal transplantation in patients with limbal stem-cell deficiency. *Br J Ophthalmol* 1999;**83**:414-9.
- [19] Kenyon KR, Tseng SC. Limbal autograft transplantation for ocular surface disorders. *Ophthalmology* 1989;**96**:709-23.
- [20] Moldovan SM, Borderie V, Baudrimont M, Laroche L. Traitement du syndrome d'insuffisance en cellules souches limbiques unilatéral par autogreffe de limbe. *J Fr Ophtalmol* 1999;**22**:302-9.
- [21] Werner LP, Werner L, Dighiero P, Legeais JM, Renard G. Confocal microscopy in Bowman and stromal corneal dystrophies. *Ophthalmology* 1999;**106**:1697-704.
- [22] Cintron C. The molecular structure of the corneal stroma in health and disease. In: Chandler JW, Sugar J, Edelhauser HF, editors. *External diseases: cornea, conjunctiva, sclera, cyclids, lacrimal system*. London: CV Mosby; 1994.
- [23] Merlyn M, Rodrigues GO, Waring III, Hackett J, Donohoo P. Fundamentals, diagnosis, and management. In: *Cornea*. Mannis: Krachmer; 1980. p. 153.
- [24] Klyce St D, Beverman RW. Structure and function of the cornea. In: Kaufman HE, Barron BA, McDonald MB, Waltma St R, editors. *The cornea*. London: Churchill Livingstone; 1988. p. 3-54.

- [25] Heathcote JG. Collagen and its disorders. In: Garner A, Klintworth GK, editors. *Pathology of ocular disease. A dynamic approach*. New York: Marcel Dekker; 1994. p. 1033-84.
- [26] Marshall GE, Konstas AG, Lee WR. Collagens in ocular tissue. *Br J Ophthalmol* 1993;**77**:515-24.
- [27] Payrau P, Pouliquen Y, Faure JP, Offret G. *La transparence de la cornée*. Paris: Masson; 1989.
- [28] Gipson IK, Spurr-Michaud SJ, Tisdale AS. Anchoring fibrils form a complex network in human and rabbit cornea. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1987;**28**:212-20.
- [29] Petroll WM, Cavanagh HD, Jester JV. Clinical confocal microscopy. *Curr Opin Ophthalmol* 1998;**9**:59-65.
- [30] Prydal JI, Dilly PN. In vivo confocal microscopy of the cornea and tear film. *Scanning* 1995;**17**:133-5.
- [31] Feenney L, Garron L. *Descemet's membrane in the human peripheral cornea. The structure of the eye*. New York: Academic Press; 1961.
- [32] Pouliquen Y. *Atlas d'histologie et d'ultrastructure du globe oculaire*. Paris: Masson; 1969.
- [33] Oritz D. Corneal biomechanical properties in normal, post laser in situ keratomileusis, and keratoconic eyes. *J Cataract Refract Surg* 2007;**33**:371-5.
- [34] Hirsh H. Structure fine et fonction s de l'endothélium de la cornée. *J Fr Ophthalmol* 1978;**1**:61-72.

C. Allouch-Nahmias, MD, PhD (allouch@quinze-vingts.fr).

Service du Pr Laroche, Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, 28, rue de Charenton, 75012 Paris, France.

P. Goldschmit, MD, PhD.

Service du Dr Chaumeil, Laboratoire du Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, 28, rue de Charenton, 75012 Paris, France.

V. Borderie, MD, PhD.

O. Touzeau, MD, PhD.

T. Gaujoux, MD.

L. Laroche, MD, Chef de service.

I. Goemaere, Orthoptiste.

Service du Pr Laroche, Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, 28, rue de Charenton, 75012 Paris, France.

J. Rault, Technicienne de laboratoire.

Service du Dr Chaumeil, Laboratoire du Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, 28, rue de Charenton, 75012 Paris, France.

Toute référence à cet article doit porter la mention : Allouch-Nahmias C., Goldschmit P., Borderie V., Touzeau O., Gaujoux T., Laroche L., Goemaere I., Rault J. Anatomie de la cornée. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Ophtalmologie, 21-003-A-10, 2011.

Disponibles sur [www.em-consulte.com](http://www.em-consulte.com)



Arbres  
décisionnels



Iconographies  
supplémentaires



Vidéos /  
Animations



Documents  
légaux



Information  
au patient



Informations  
supplémentaires



Auto-  
évaluations



Cas  
clinique

**Cet article comporte également le contenu multimédia suivant, accessible en ligne sur [em-consulte.com](http://em-consulte.com) et [em-premium.com](http://em-premium.com) :**

### **1 autoévaluation**

*[Cliquez ici](#)*