

# Une nouvelle classification du kératocône basée sur l'OCT

Emilio A. Torres-Netto<sup>1</sup>, MD, PhD FWCRS; Farhad Hafezi<sup>1</sup>, MD PhD FARVO; Nan-Ji Lu<sup>2</sup>, MD, PhD, MSc  
<sup>1</sup> ELZA Institute AG, Zürich/Zürich, Schweiz; <sup>2</sup> Abteilung für Augenheilkunde, West China Hospital Sichuan University, Chengdu, China

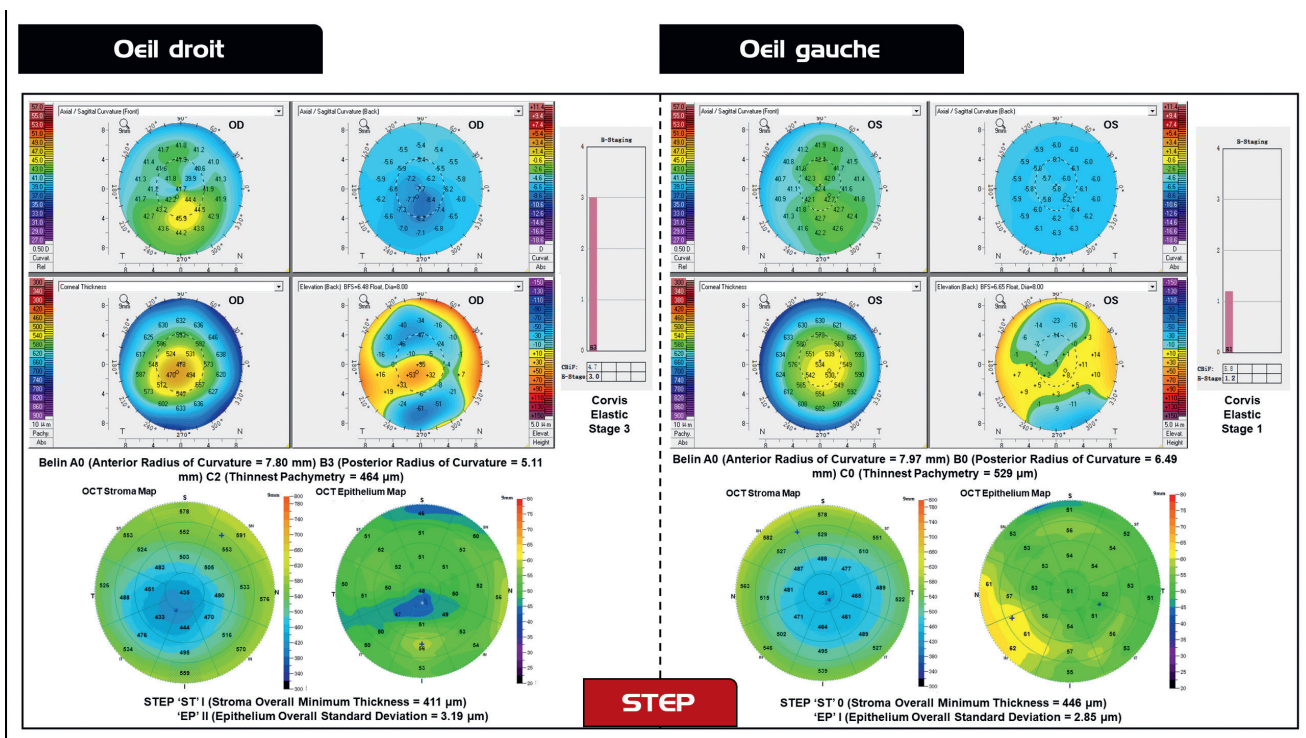
Le kératocône (KC) est une affection ectasique de la cornée qui touche les deux yeux et se caractérise par une déficience biomécanique localement limitée, ainsi qu'un amincissement et un bombement vers l'avant de la cornée<sup>1</sup>. On peut alors observer l'apparition d'une myopie progressive, d'un astigmatisme irrégulier, de cicatrices sur la cornée et d'une perte d'acuité visuelle<sup>2</sup>. Les résultats des recherches les plus récentes suggèrent qu'un diagnostic précoce associé à une réticulation de la cornée (corneal cross-linking, CXL) réalisée à temps peut ralentir efficacement voire stopper la progression du KC<sup>3</sup>. En outre, un diagnostic précoce contribue aussi de manière déterminante à lutter contre l'utilisation de traitements réfractifs au laser inadaptés, en particulier dans les cas infra-cliniques.

L'examen conventionnel de l'astigmatisme à l'aide de la topographie Placido permet d'identifier les signes d'un KC. L'imagerie

Scheimpflug va plus loin. En intégrant l'astigmatisme et des paramètres plus complexes, elle améliore le diagnostic et la classification du KC. L'introduction de nouveaux algorithmes et d'analyses automatisées offre un potentiel considérable pour l'amélioration significative de notre capacité à effectuer des diagnostics précis et efficaces du KC aux stades précoces<sup>4</sup>. Par le passé, la kératométrie maximale ( $K_{max}$ ) était considérée comme un index simple et utile pour l'évaluation du degré de sévérité du KC, et nombreux sont ceux qui l'utilisent encore pour la surveillance de la progression<sup>5</sup>. Cependant, la  $K_{max}$  n'est qu'une mesure en un point, avec une faible reproductibilité en cas de KC avancé<sup>6,7</sup>. Le système de classification ABCD de Belin a été introduit afin d'offrir, à l'aide de la technologie Scheimpflug, une méthode plus fiable pour l'évaluation de la progression et du stade du KC<sup>5</sup>.

Malgré leur efficacité dans le diagnostic du kératocône, les procédures tomographiques ignorent souvent un aspect décisif, à savoir les modifications de la biomécanique de la cornée. Pour remédier à cette limite, l'intégration d'un tonomètre à air pulsé avec imagerie Scheimpflug à haute vitesse (Corvis, Oculus Optikgeräte, Wetzlar, Allemagne) permet de mesurer des paramètres dynamiques de la réaction cornéenne. Le Corvis Biomechanical Index (CBI) qui en est dérivé a été proposé en tant que complément utile pour l'amélioration du diagnostic précoce du KC<sup>8,9</sup>. La structure linéaire du CBI a été utilisée récemment pour le développement d'une classification « Elastic »<sup>10-12</sup>, qui a été intégrée au système de classification ABCD de Belin<sup>11</sup>.

La technologie de la tomographie en cohérence optique (OCT) a fondamentalement amélioré l'évaluation de la cornée en cas de kératocône. Par comparaison avec la



**Fig. 1** Exemple de cas 1 : Pour ce patient, l'œil droit se trouve au stade précoce (early, EKC) et l'œil gauche se trouve au stade avancé (AKC) du kératocône. Le protocole de Dresden devrait peut-être être repensé pour l'œil gauche, car le paramètre «ST» du système STEP se trouve au stade II.

technologie Scheimpflug, la tomographie en cohérence optique du segment antérieur (OCT-SA) offre une résolution d'image encore meilleure. L'OCT-SA se caractérise par le fait qu'elle est en mesure de différencier l'épithélium cornéen et d'autres couches de la cornée avec une précision bien supérieure à celle de la technologie Scheimpflug<sup>13</sup>. Bien que le profil épithélial de la cornée ait été, à l'origine, mesuré et décrit à l'aide de l'échographie haute fréquence<sup>14</sup>, une procédure peu répandue en pratique clinique, des études ont montré que l'OCT-SA contribue à l'amélioration de l'identification précoce du kératocône<sup>15-18</sup>.

Dans l'idéal, un système de classification pour les maladies doit présenter certaines caractéristiques, dont les suivantes :

- (1) la capacité à poser un diagnostic précoce pour faciliter un accompagnement du patient en temps opportun ;
- (2) des paramètres numériques objectifs, qui mettent en évidence les modifications linéaires dans l'évolution de la maladie et permettent une évaluation de la sévérité ;
- (3) des paramètres minimums pour l'évaluation de la maladie en plusieurs dimensions, avec une utilisation clinique facile ;
- (4) une absence de dépendance à une

plateforme (compatibilité avec différents appareils et algorithmes).

Il est intéressant de noter que, jusqu'à présent, aucun système de classification du kératocône faisant appel à des données n'a complètement intégré la couche épithéliale de la cornée et la couche stromale située en dessous. Pour cela, nous avons développé un système basé sur l'OCT, en réalisant des analyses ROC et en menant des discussions entre experts pour obtenir un consensus en petit comité. Ce système de classification du kératocône basé sur l'OCT, nous l'avons appelé « STEP », car il repose sur deux paramètres : l'épaisseur totale minimale du stroma (ST) et l'écart-type de l'épaisseur totale de l'épithélium (EP)<sup>19</sup>.

Le STEP est la première approche à intégrer des informations relatives à la zone épithéliale ainsi qu'à la zone stromale dans un système de classification du kératocône. L'utilisation clinique du paramètre «ST» du système STEP pourrait par exemple faciliter le processus de décision pour les protocoles de CXL. Pour les cas de KC avancés, le protocole de Dresden classique est souvent inadapté lorsque l'épaisseur du stroma est inférieure à 400 µm (STEP «ST» > stade I). Dans de tels cas, des protocoles de CXL alternatifs, tels que le Sub400 ou d'autres, pourraient être indiqués<sup>20</sup>. Pour

le paramètre «EP» du système STEP, on constate qu'au cours de la progression du KC, une asymétrie croissante de l'épithélium entraîne un aplatissement de la surface stromale irrégulière. Le paramètre «EP» du système STEP augmente donc en conséquence, car il reflète ce remodelage, et donne également des indications sur l'étendue de la redistribution épithéliale. En outre, le paramètre «EP» du système STEP pourrait aussi être adapté à l'évaluation de l'efficacité du CXL et à son suivi, car les différences dans la répartition de l'épaisseur épithéliale se réduisent en cas de d'ectasies post-CXL stables et chez les patients atteints de KC<sup>21,22</sup>.

Sandali et al. ont développé dans un premier temps un système de classification structurel basé sur l'OCT, qui repose sur la description d'images en coupe avec différents stades de remodelage de la structure cornéenne<sup>23</sup>. Cependant, l'absence de repères numériques dans leur système le prédisposait à des divergences potentielles dans la pratique clinique. À l'inverse, le système STEP remédie à cette limite. Néanmoins, la classification structurelle de Sandali reste utile et pourrait compléter le système STEP avec des informations visuelles.

En ce qui concerne l'évaluation de la concordance entre le système STEP et →

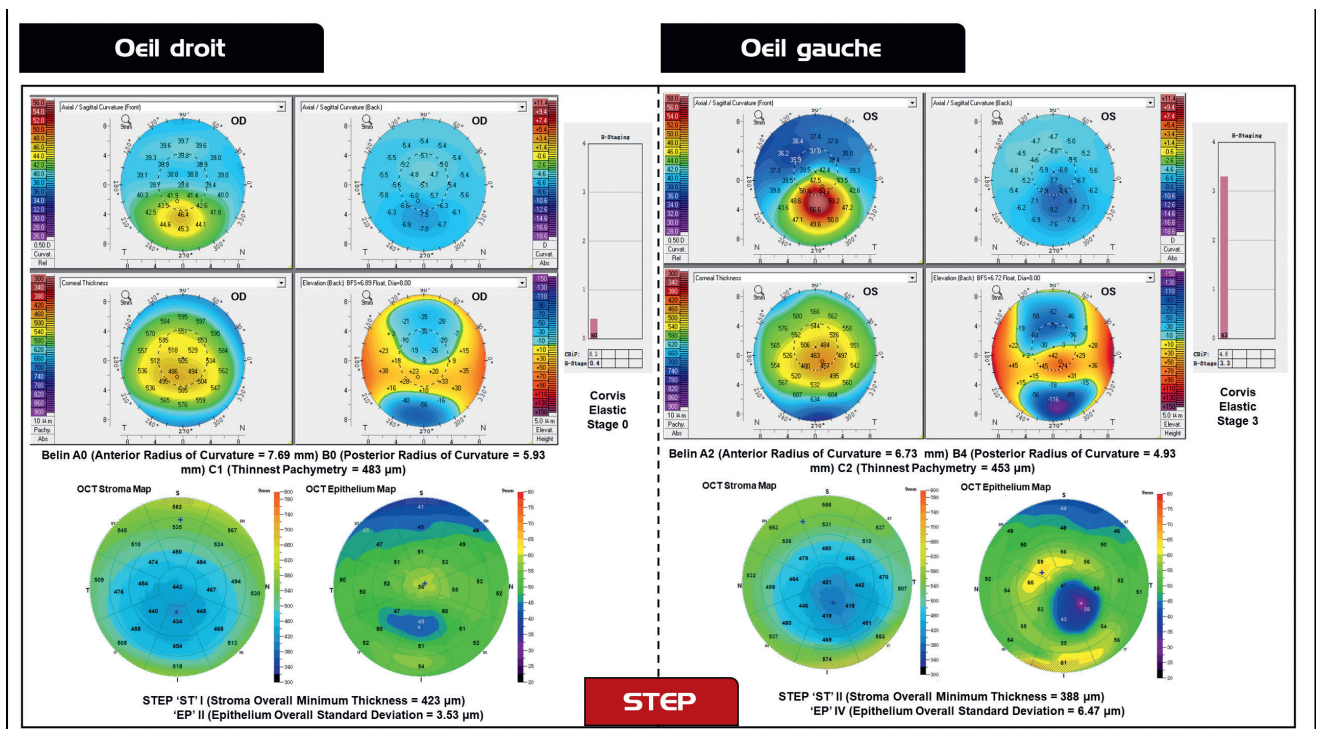


Fig. 2 Exemple de cas 2 : Chez ce patient, l'œil droit souffre d'un AKC et l'œil gauche d'un FFKC.

la classification ABCD de Belin, l'étude de validation originale a mis en évidence des résultats comparables comme l'ensemble de données original qui a été utilisé pour le développement du système STEP. Par comparaison avec la classification ABCD de Belin, le paramètre «ST» du système STEP a montré une forte concordance avec le paramètre «C» du système de Belin, en raison de descriptions similaires. En revanche, le paramètre «EP» du système STEP a montré une concordance plus faible, en particulier avec les paramètres «A» et «B» du système de Belin au sein du groupe kératocône (KC), la différence avec le premier étant particulièrement flagrante. Cette divergence peut s'expliquer par le fait que le remodelage épithélial précède les modifications de l'astigmatisme<sup>24</sup>.

Un système efficace de classification d'une maladie doit habituellement classer la plupart des patients normaux dans le stade 0 ou 1, et les patients atteints dans les stades supérieurs. Cela correspond au modèle observé dans le système de classification STEP. La tomographie en cohérence optique du segment antérieur (OCT-SA) montre une acquisition simultanée précise des astigmatismes antérieurs et postérieurs, aussi bien chez les patients sains que chez les patients atteints de KC<sup>25</sup>. Ainsi, la classification STEP offre l'avantage potentiel de pouvoir s'intégrer au système de classification ABCD de Belin ou de le considérer comme une référence concomitante (Fig. 1).

Puisque le système de classification STEP est basé sur des paramètres obtenus par ordinateur, il pourrait, en théorie, être facilement utilisable sur différents systèmes d'OCT-SA disponibles dans le commerce. Une étude de validation est prévue. Nous utiliserons le système STEP également chez les patients atteints de KC avant et après le traitement par CXL, afin de confirmer sa capacité à être utilisé pour l'évaluation du statut du KC, y compris de la stabilité et de la progression.

En résumé, nous encourageons nos collègues à utiliser à l'avenir la classification STEP, ce qui pourrait faciliter la pratique clinique, notamment la prise de décision concernant le traitement par CXL et certainement de potentielles nouvelles études. •

No conflicts of interest

## Références

1. Krachmer JH, Feder RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol* 1984; 28: 293-322.
2. Rabinowitz YS. Keratoconus. *Surv Ophthalmol* 1998; 42: 297-319.
3. Wollensak G, Spoerl E, Seiler T. Riboflavin/ultraviolet-a-induced collagen crosslinking for the treatment of keratoconus. *Am J Ophthalmol* 2003; 135: 620-627.
4. Lopes BT, Ramos IC, Salomão MQ, et al. Enhanced Tomographic Assessment to Detect Corneal Ectasia Based on Artificial Intelligence. *Am J Ophthalmol* 2018; 195: 223-232.
5. Vinciguerra R, Belin MW, Borgia A, et al. Evaluating keratoconus progression prior to crosslinking: maximum keratometry vs the ABCD grading system. *J Cataract Refract Surg* 2021; 47: 33-39.
6. Asroui L, Mehanna CJ, Salloum A, et al. Repeatability of Zone Averages Compared to Single-Point Measurements of Maximal Curvature in Keratoconus. *Am J Ophthalmol* 2021; 221: 226-234.
7. Jiménez-García M, Krepis EO, S ND, et al. Determining the Most Suitable Tomography-Based Parameters to Describe Progression in Keratoconus. The Retrospective Digital Computer Analysis of Keratoconus Evolution Project. *Eye Contact Lens* 2021; 47: 486-493.
8. Vinciguerra R, Ambrósio R, Jr., Roberts CJ, et al. Biomechanical Characterization of Subclinical Keratoconus Without Topographic or Tomographic Abnormalities. *J Refract Surg* 2017; 33: 399-407.
9. Vinciguerra R, Ambrósio R, Elsheikh A, et al. Detection of Keratoconus With a New Biomechanical Index. *Journal of Refractive Surgery* 2016; 32: 803-810.
10. Koh S, Inoue R, Ambrósio RJ, et al. Correlation Between Corneal Biomechanical Indices and the Severity of Keratoconus. *Cornea* 2020; 39: 215-221.
11. Flockerzi E, Vinciguerra R, Belin MW, et al. Combined biomechanical and tomographic keratoconus staging: Adding a biomechanical parameter to the ABCD keratoconus staging system. *Acta Ophthalmol* 2021.
12. Flockerzi E, Vinciguerra R, Belin MW, et al. Correlation of the Corvis Biomechanical Factor with tomographic parameters in keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 2022; 48: 215-221.
13. Li Y, Tan O, Brass R, et al. Corneal epithelial thickness mapping by Fourier-domain optical coherence tomography in normal and keratoconic eyes. *Ophthalmology* 2012; 119: 2425-2433.
14. Reinstein DZ, Silverman RH, Trokel SL, Coleman DJ. Corneal pachymetric topography. *Ophthalmology* 1994; 101: 432-438.
15. Reinstein DZ, Archer TJ, Gobbe M. Corneal epithelial thickness profile in the diagnosis of keratoconus. *J Refract Surg* 2009; 25: 604-610.
16. Temstet C, Sandali O, Bouheraoua N, et al. Corneal epithelial thickness mapping using Fourier-domain optical coherence tomography for detection of forme fruste keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 2015; 41: 812-820.
17. Li Y, Chamberlain W, Tan O, et al. Subclinical keratoconus detection by pattern analysis of corneal and epithelial thickness maps with optical coherence tomography. *J Cataract Refract Surg* 2016; 42: 284-295.
18. Pavlatos E, Chen S, Yang Y, et al. A Coincident Thinning Index for Keratoconus Identification Using OCT Pachymetry and Epithelial Thickness Maps. *Journal of Refractive Surgery* 2020; 36: 757-765.
19. Lu NJ, Hafezi F, Koppen C, et al. New keratoconus staging system based on OCT. *J Cataract Refract Surg* 2023; 49: 1098-1105.
20. Hafezi F, Kling S, Gilardoni F, et al. Individualized Corneal Cross-linking With Riboflavin and UV-A in Ultrathin Corneas: The Sub400 Protocol. *Am J Ophthalmol* 2021; 224: 133-142.
21. Reinstein D, Gobbe M, Archer T, Couch D. Epithelial Thickness Profile as a Method to Evaluate the Effectiveness of Collagen Cross-Linking Treatment After Corneal Ectasia. *Journal of refractive surgery (Thornfare, NJ : 1995)* 2010; 27: 356-363.
22. Rocha KM, Perez-Straziota CE, Stulting RD, Randleman JB. Epithelial and stromal remodeling after corneal collagen cross-linking evaluated by spectral-domain OCT. *J Refract Surg* 2014; 30: 122-127.
23. Sandali O, El Sanharawi M, Temstet C, et al. Fourier-domain optical coherence tomography imaging in keratoconus: a corneal structural classification. *Ophthalmology* 2013; 120: 2403-2412.
24. Reinstein DZ, Archer TJ, Urs R, et al. Detection of Keratoconus in Clinically and Algorithmically Topographically Normal Fellow Eyes Using Epithelial Thickness Analysis. *J Refract Surg* 2015; 31: 736-744.
25. Tang M, Chen A, Li Y, Huang D. Corneal power measurement with Fourier-domain optical coherence tomography. *Journal of cataract and refractive surgery* 2010; 36: 2115-2122.



## Correspondance

Dr Dr méd. (B) Emilio Torres  
ELZA Institute  
Weberstrasse 2, CH-8953 Dietikon/ZH  
emilioatorres@me.com