L'année ophtalmologique

Chirurgie réfractive et IA : bilan annuel et perspectives d'avenir

D. GATINEL
Hôpital Fondation Adolphe de Rothschild, PARIS.

À l'occasion de ce bilan annuel pour le numéro spécial de *Réalités Ophtalmologiques*, l'intelligence artificielle (IA) apparaît comme un levier de transformation progressive de la chirurgie réfractive, rehaussant les standards de précision diagnostique, d'analyse prédictive et d'optimisation du parcours patient. Présente à toutes les étapes du processus opératoire, elle permet une personnalisation inédite des traitements et une détection plus précoce des anomalies. Toutefois, son adoption clinique demeure partielle, rappelant que l'innovation, aussi prometteuse soit-elle, ne produit ses effets qu'en s'intégrant harmonieusement à la pratique.

L'intelligence artificielle (IA) connaît un essor spectaculaire, transformant de multiples secteurs, dont celui de la santé. En ophtalmologie, elle a d'abord été mise à contribution pour le diagnostic, *via* des techniques d'apprentissage profond (*deep learning*, DL) permettant l'analyse des images médicales et l'établissement de scores diagnostiques [1, 2]. Les avancées récentes ont élargi son champ d'application à l'IA générative, aujourd'hui utilisée pour la formation des professionnels de santé, l'information des patients et le suivi clinique, témoignant de la diversité de ses usages dans cette spécialité [3]. Ces derniers mois, l'intérêt pour l'IA en chirurgie réfractive s'est intensifié, ouvrant de nouvelles perspectives pour améliorer les pratiques chirurgicales.

Les algorithmes d'IA recouvrent un large spectre, depuis l'apprentissage automatique (*machine learning*, ML) et le DL, jusqu'à l'apprentissage automatique automatisé (auto-ML) [4]. L'avènement de l'IA générative représente une avancée de premier plan, autorisant la création de contenus originaux à partir des requêtes des utilisateurs. Chacune de ces approches, avec ses promesses et ses limites, modèle les grandes tendances actuelles de la recherche et des publications récentes [5, 6].

L'intelligence artificielle appliquée à l'analyse d'images

Les progrès les plus marquants dans le domaine de l'analyse d'images reposent sur les techniques d'apprentissage profond, avec un intérêt particulier pour la chirurgie du segment antérieur.

>>> Phase préopératoire

Dans certains cas cliniques, l'orientation vers une chirurgie cornéenne ou une implantation pseudophake dépend d'une évaluation minutieuse, notamment lorsque la cataracte est à un stade débutant. L'estimation du degré d'opacification cristallinienne reste cependant subjective et parfois complexe. L'intelligence artificielle apporte ici un atout majeur en affinant le dépistage et le diagnostic. Entraînés sur de larges ensembles de données, les algorithmes d'apprentissage automatique détectent et quantifient objectivement l'opacification cristallinienne à partir d'images de lampe à fente, de scans OCT et de photographies du fond d'œil. Ils offrent ainsi une détection plus précise et précoce, facilitant une prise en charge adaptée.

Nous avons mis au point un modèle d'apprentissage profond pour détecter les cataractes sur des images AS-OCT [6]. Ce modèle permet d'étudier différentes couches au sein de la lentille cristallinienne (***fig. 1***). Par ailleurs, un système automatisé de classification des stades de la cataracte, fondé sur l'analyse de vidéos du segment antérieur enregistrées à la lampe à fente, a montré des performances comparables à celles d'examinateurs humains [7]. Les mêmes approches se sont étendues à l'évaluation de la sécheresse oculaire, dont la sévérité peut désormais être quantifiée automatiquement grâce à ces outils d'IA [8].

>>> L'intelligence artificielle appliquée aux scores diagnostiques

En chirurgie du segment antérieur, la majorité des scores diagnostiques basés sur l'IA s'intéressent à la détection précoce du kératocône [9]. Le kératocône non dépisté constitue un facteur de risque essentiel de kératectasie iatrogène après chirurgie réfractive au laser. Des outils de dépistage ont été conçus récemment à partir de déformations cornéennes dynamiques par Scheimpflug [10, 11] et d'images topographiques [12]. L'un des

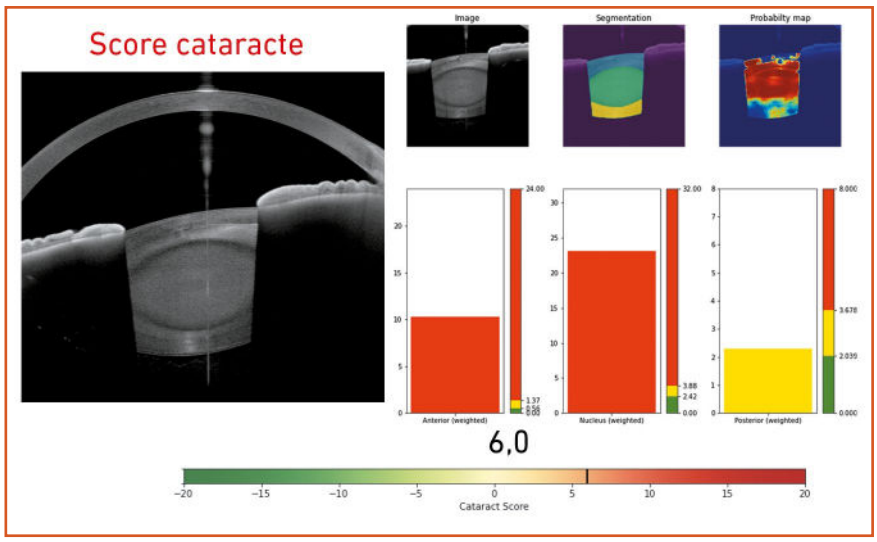

Fig. 1 : Score global de cataracte, à partir du recueil d'une imagerie OCT à haute résolution du segment antérieur (instrument Anterion). (Panthier C, Zeboulon P, Rouger H *et al.* CATALYZE: a *deep learning* approach for cataract assessment and grading on SS-OCT images. *J Cataract Refract Surg*, 2025;51:222-228).

avantages majeurs de l'IA réside dans sa capacité à établir des scores multimodaux combinant les résultats de multiples examens. Les données topographiques issues d'OCT à domaine spectral et/ou de tomographie Scheimpflug ont ainsi été associées à des paramètres biomécaniques cornéens pour générer des scores composites [13, 14]. L'utilisation de cartes épithéliales, associées à des indices biomécaniques et à des paramètres tomographiques fondés sur l'IA, pourrait également optimiser le diagnostic du kératocône [15].

Le recours à l'apprentissage automatique pour sélectionner la chirurgie la mieux adaptée au patient pourrait accroître considérablement l'efficacité clinique. Une étude portant sur 7 081 patients ayant bénéficié d'une chirurgie réfractive cornéenne à Pékin a montré des taux de concordance élevés avec les experts [16]. À l'inverse, une autre étude a conçu un modèle prédictif reposant sur l'IA et les dossiers d'inscription des patients pour estimer la probabilité d'acceptation d'une chirurgie réfractive [17]. Par ailleurs, la probabilité de régression myopique postopératoire, calculée à partir des données préopératoires et de photographies du fond d'œil, pourrait aider à cibler et conseiller les patients [18].

De nombreuses études récentes se concentrent également sur le choix de la taille (*sizing*) des lentilles collamères implantables (ICL) et la prédiction de leur voûte sur la cristalloïde antérieure (*vaulting*). L'utilisation d'ICL a augmenté de façon notable ces dernières années. Il est indispensable d'atteindre un *vaulting* adéquat (idéalement entre 250 et 750 microns) pour réduire le risque d'hypertonie intraoculaire, de dispersion pigmentaire et de glaucome (si le *vaulting* est excessif), ou de cataracte sous-capsulaire antérieure (si le *vaulting* est insuffisant). Les algorithmes récemment développés reposent sur des méthodes de régression par apprentissage automatique, à partir de données numériques continues (mesures préopératoires) [19, 20]. Nasser *et al.* ont exploité 3 059 images d'échographie de 221 patients pour entraîner un algorithme prédictif de la voûte et de la taille des ICL, avec une précision élevée, renforçant leur sécurité [21]. Russo *et al.* ont démontré que l'AS-OCT, combiné à l'apprentissage automatique, permettait une excellente prédiction du *vaulting* dans la pratique courante [22].

Enfin, l'une des applications historiques de l'IA en ophtalmologie porte sur le calcul de la puissance des lentilles intraoculaires (LIO) en chirurgie de la cataracte. Grâce à l'exploitation des mégadonnées, les formules basées sur l'IA améliorent la précision de la puissance implantaire et gagnent en popularité, conduisant de plus en plus de chirurgiens à délaisser les formules SRK/T au profit d'options plus avancées. Alors que la chirurgie de la cataracte s'inscrit dans une approche de plus en plus réfractive, la recherche évolue : une version adaptée de la formule PEARL-DGS a ainsi été proposée chez les patients ayant précédemment subi une chirurgie réfractive [23].

Les outils d'IA générative (GenAI) en chirurgie réfractive

Les modèles d'IA générative ne se limitent pas à un usage étroitement défini. Puisant dans une base de connaissances très étendue, ils reposent sur de multiples couches et nœuds leur permettant de traiter d'importants volumes de contenus textuels. Ainsi, ils peuvent comprendre et répondre à un large éventail d'instructions et de questions, dont les limites ne sont pas encore pleinement explorées. Leur force réside dans cette polyvalence quasi universelle, qui les rend aptes à soutenir aussi bien l'analyse de données cliniques ou de recherche qu'à participer, par exemple, à l'écriture d'algorithmes. De la même manière, ils peuvent être destinés au grand public, aux professionnels de santé ou au personnel paramédical.

Ces modèles d'IA générative évoluent rapidement. Après Chat GPT (OpenAI), DeepSeek et Grok 3 (xAI) se sont récemment imposés parmi les plus performants. De premières applications en chirurgie réfractive émergent, notamment pour la planification préopératoire et l'évaluation des résultats. En combinant les données de topographie cornéenne, de biométrie oculaire et les antécédents du patient, ces algorithmes

L'année ophtalmologique

génèrent des scénarios virtuels de correction visuelle, aidant à orienter le choix d'interventions comme le LASIK, la PKR ou la SMILE. Par ailleurs, la génération de données synthétiques de haute qualité permet d'augmenter artificiellement la taille des ensembles d'entraînement, renforçant la robustesse des systèmes de diagnostic assistés par IA et ouvrant la voie à des prévisions postopératoires plus personnalisées et précises.

Une étude a évalué la capacité de l'IA à générer des vidéos pédagogiques pour les patients sur différentes chirurgies réfractives cornéennes. Trois plateformes d'IA (InVideo, ClipTalk et EasyVid) ont été utilisées pour créer des vidéos dédiées au LASIK, à la PRK et à la SMILE, puis comparées aux vidéos de référence de l'American Academy of Ophthalmology et de Zeiss. Quatre critères ont été retenus pour l'évaluation : précision des images, précision du script, clarté des images et adéquation du script. Les vidéos de référence se sont révélées supérieures pour la précision des images ($p < 0,005$), mais les plateformes d'IA ont obtenu des scores comparables concernant la précision et l'alignement du script, ainsi que la clarté des images. Ces générateurs permettent donc une narration correcte et des images de bonne qualité, mais restent perfectibles sur le plan de la fiabilité médicale pour un usage grand public. Des améliorations sont en cours pour affiner leur pertinence à destination des patients [24].

Les résultats de ces modèles doivent néanmoins être analysés avec prudence. Une étude a évalué la capacité décisionnelle de six modèles d'IA en comparant leurs recommandations face au risque de formation de chéloïdes chez un patient hypothétique, selon trois niveaux croissants de myopie (–3,50, –5,00 et –7,00 D) [25]. Les modèles (Claude-2, GPT-4, GPT-3,5, Gemini 1,0, Microsoft Copilot et Google-PaLM) ont été interrogés à trois reprises pour déterminer la technique chirurgicale la plus adaptée (LASIK ou PRK) en tenant compte de la présence de chéloïdes. Leurs préconisations ont été confrontées à l'avis de six ophtalmologistes, et il leur a été demandé de citer les références scientifiques sur lesquelles elles s'appuyaient. Alors que tous les experts optaient pour le LASIK, les modèles d'IA recommandaient initialement la PRK. Sur les 42 références citées, 55 % étaient fictives et 45 % authentiques. Seul un modèle a modifié son conseil vers le LASIK avec l'augmentation de la myopie.

Ces résultats mettent en évidence les lacunes actuelles des modèles d'IA dans l'évaluation du risque clinique, en particulier concernant le haze cornéen après une PRK chez des patients sujets aux chéloïdes et présentant une forte myopie. À plus long terme, l'IA générative pourrait automatiser certaines étapes du flux clinique, en prédisant notamment la réaction individuelle de la cornée au remodelage optique et en limitant les complications.

Les versions avancées de l'IA générative pourraient également soutenir la recherche ophtalmologique en traitant de vastes ensembles de littérature médicale, en produisant des synthèses pertinentes et en facilitant la création d'outils diagnostiques sophistiqués [26], tout en proposant un corpus de connaissances dynamique et interactif.

Des outils générateurs de contenu synthétique, comme Dora, sont déjà utilisés pour assurer le suivi postopératoire de patients opérés de la cataracte sans complication, dès le lendemain et durant la première semaine suivant l'intervention. Cette solution a obtenu une excellente acceptation auprès des patients [27] et fait actuellement l'objet d'une évaluation au Canada.

Surveillance des frottements oculaires par IA

Si l'on considère que le frottement oculaire peut constituer un facteur déterminant dans l'apparition d'un kératocône, on peut également penser qu'il contribue à la survenue d'ectasie iatrogène post-LASIK. Il importe donc d'alerter les patients sur les risques liés aux frottements. En cas de sécheresse oculaire, l'irritation locale provoque un prurit et une envie de se frotter parfois incontrôlable. Une nouvelle approche d'apprentissage automatique basée sur un réseau de neurones de type transformer a été mise au point pour détecter le frottement des yeux *via* une montre connectée, dans des conditions de vie courante. L'objectif est d'identifier et de prévenir ce geste, souvent associé à l'apparition ou à l'aggravation du kératocône, afin de réduire le risque de cécité.

Cette méthode exploite la performance des transformers, développés à l'origine pour le traitement du langage naturel. L'algorithme a été évalué sur une base de données inédite constituée d'enregistrements de capteurs de *smart watch* durant des contacts main-visage. Ses résultats ont montré une précision de détection supérieure à 80 % après seulement 20 min d'apprentissage, pouvant atteindre 97 % après 3 h d'ajustement spécifique. Cette étude ouvre la voie à une surveillance plus large des contacts main-visage et préfigure de nouvelles pistes pour l'éducation des patients et la prévention du kératocône *via* des dispositifs portables [28].

Conclusion : entre promesses et prudence pour une intégration raisonnée de l'IA en chirurgie réfractive

Les modèles conventionnels peuvent fonctionner sur des ordinateurs personnels, mais les grands modèles génératifs nécessitent des infrastructures beaucoup plus lourdes. De surcroît, l'IA générative actuelle ne fournit pas systématiquement les données les plus récentes, génère des erreurs fréquentes et est capable d'inventer des références d'apparence crédible, ce qui peut s'avérer préjudiciable en ophtalmologie. Malgré cela, l'intégration de l'IA dans cette spécialité conduit à des avancées notables en termes de précision

diagnostique, d'éducation du patient et d'efficience clinique.

Néanmoins, en dépit des progrès permis par les développements rapides de l'IA générative, il reste nécessaire de faire preuve de prudence : en dehors des domaines liés au calcul biométrique et à la détection du kératocône, peu d'outils basés sur l'IA se sont réellement imposés dans la pratique quotidienne. Les avancées les plus concrètes concernent les usages où l'IA réduit le temps médical en automatisant des tâches peu critiques. La généralisation des performances d'un algorithme hors de son contexte d'entraînement est complexe. Les prochaines années montreront les applications concrètes des recherches en cours.

BIBLIOGRAPHIE

1. Xu Z, Xu J, Shi C *et al.* Artificial Intelligence for Anterior Segment Diseases: A Review of Potential Developments and Clinical Applications. *Ophthalmol Ther*, 2023; 12:1439-1455.
2. Rampat R, Deshmukh R, Chen X *et al.* Artificial Intelligence in Cornea, Refractive Surgery, and Cataract: Basic Principles, Clinical Applications, and Future Directions. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila),* 2021;10:268-281.
3. Hubbard DC, Cox P, Redd TK. Assistive applications of artificial intelligence in ophthalmology. *Curr Opin Ophthalmol*, 2023;34:261-266.
4. Hemanth JD. *Computational Methods and Deep learning for Ophthalmology*, Elsevier, 2023, 252 p.
5. Waisberg E, Ong J, Kamran SA *et al.* Generative artificial intelligence in ophthalmology. *Surv Ophthalmol* [Internet]. 2024; Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.survophthal.2024.04.009
6. Panthier C, Zeboulon P, Rouger H *et al.* CATALYZE: a *deep learning* approach for cataract assessment and grading on SS-OCT images. *J Cataract Refract Surg*, 2025;51:222-228.
7. Shimizu E, Tanji M, Nakayama S *et al.* AI-based diagnosis of nuclear cataract from slit-lamp videos. *Sci Rep*, 2023;13:22046.
8. Kim S, Park D, Shin Y *et al.* Deep learning-based fully automated grading system for dry eye disease severity. *PLoS One*, 2024;19:e0299776.
9. Kundu G, Shetty R, Khamar P *et al.* Universal architecture of corneal segmental tomography biomarkers for artificial intelligence-driven diagnosis of early keratoconus. *Br J Ophthalmol*, 2023;107:635-643.
10. Abdelmotaal H, Hazarbassanov RM, Salouti R *et al.* Keratoconus Detection-based on Dynamic Corneal Deformation Videos Using Deep learning. *Ophthalmol Sci*, 2024;4:100380.
11. Tan Z, Chen X, Li K *et al.* Artificial Intelligence-Based Diagnostic Model for Detecting Keratoconus Using Videos of Corneal Force Deformation. *Transl Vis Sci Technol*, 2022;11:32.
12. Tan Z, Chen X, Li K *et al.* Artificial Intelligence-Based Diagnostic Model for Detecting Keratoconus Using Videos of Corneal Force Deformation. *Transl Vis Sci Technol*, 2022;11:32.
13. Lu NJ, Koppen C, Hafezi F *et al.* Combinations of Scheimpflug tomography, ocular coherence tomography and air-puff tonometry improve the detection of keratoconus. *Cont Lens Anterior Eye*, 2023;46:101840.
14. Ambrósio R Jr, Machado AP, Leão E *et al.* Optimized Artificial Intelligence for Enhanced Ectasia Detection Using Scheimpflug-Based Corneal Tomography and Biomechanical Data. *Am J Ophthalmol*, 2023;251:126-142.
15. Kenia VP, Kenia RV, Maru S *et al.* Role of corneal epithelial *mapping*, Corvis biomechanical index, and artificial intelligence-based tomographic biomechanical index in diagnosing spectrum of keratoconus. *Oman J Ophthalmol*, 2023;16:276-280.
16. MC Li J, Dai Y, Mu Z *et al.* Choice of refractive surgery types for myopia assisted by *machine learning* based on doctors' surgical selection data. *BMed Inform Decis Mak*, 2024;24:41.
17. Kundu G, Virani I, Shetty R *et al.* Role of artificial intelligence in determining factors impacting patients' refractive surgery decisions. *Indian J Ophthalmol*, 2023 Mar;71:810-817.
18. Kim J, Ryu IH, Kim JK *et al. Machine learning* predicting myopic regression after corneal refractive surgery using preoperative data and fundus photography. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2022;260:3701-3710.
19. Zhu J, Li FF, Li GX *et al.* Enhancing Vault Prediction and ICL Sizing Through Advanced *Machine learning* Models. *J Refract Surg*, 2024;40:e126-32.
20. Di Y, Fang H, Luo Y *et al.* Predicting Implantable Collamer Lens Vault Using *Machine learning* Based on Various Preoperative Biometric Factors. *Transl Vis Sci Technol*, 2024;13:8.
21. Nasser T, Hirabayashi M, Virdi G *et al.* VAULT: vault accuracy using deep learning technology: new image-based artificial intelligence model for predicting implantable collamer lens postoperative vault. *J Cataract Refract Surg*, 2024;50:448-52.22.
22. tRusso A, Filini O, Savini G *et al.* Predictability of the vault after implantable collamer lens implantation using OCT and artificial intelligence in White patient eyes. *J Cataract Refract Surg*, 2023;49:724-731.
23. Debellemanière G, Mechleb N, Bernier T *et al.* The Development of a Thick-Lens Post-Myopic Laser Vision Correction Intraocular Lens Calculation Formula. *Am J Ophthalmol*, 2023;262:40-47.
24. H. Han KD, Jaafar MA, Moin KA *et al.* Assessing the Role of Artificial Intelligence in the Creation of Patient Educational Videos for Corneal Refractive Surgery. *Cureus*. 2024;16:e71447.
25. Moshirfar M, Moin KA, Omidvarnia S *et al.* LASIK Versus PRK Based on Increased Risk of Corneal Haze: Assessing Current Decision-Making Capabilities of Six Artificial Intelligence Models in Refractive Surgery. *J Refract Surg*, 2024;40:e533-e538.
26. Antaki F, Milad D, Chia MA *et al.* Capabilities of GPT-4 in ophthalmology: an analysis of model entropy and progress towards human-level *med*ical question answering. *Br J Ophthalmol*, 2024;1081371-1378.
27. Hatamnejad A, Higham A, Somani S *et al.* Feasibility of an artificial intelligence phone call for postoperative care following cataract surgery in a diverse population: two phase prospective study protocol. *BMJ Open Ophthalmol* [Internet]. 2024 Jan 10;9(1). Available from: http://dx.doi.org/10.1136/bmjophth-2023-001475
28. Elahi S, Mery T, Panthier C *et al.* Eye-Rubbing Detection Using a Smartwatch: A Feasibility Study Demonstrated High Accuracy With *Machine learning*. *Transl Vis Sci Technol*. 2024 Sep 3;13(9):1. doi: 10.1167/tvst.13.9.1. PMID: 39226066; PMCID: PMC11373705.

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