



L'intelligence artificielle en ophtalmologie Artificial intelligence in ophthalmology

H. Moutei, A. Bennis, F. Chraïbi, M. Abdellaoui, I. Benatiya

Faculté de médecine et de pharmacie
Université Mohammed benabdellah de Fès

Correspondance : Hassan Moutei ; email : mouteihassan@yahoo.fr

DOI: <https://doi.org/10.48400/IMIST.PRSM/JSO/22550>

Abstract :

Although Artificial intelligence (AI) has wide application in many medical fields. Ophthalmology is the medical specialty that is making greater use of artificial intelligence and continues to be a pioneer in the use of artificial intelligence to detect, diagnose and treat various ocular pathologies such as glaucoma, age-related macular degeneration and diabetic retinopathy, which can improve patient access to care and potentially alleviate problems in the healthcare system.

It is important for physicians to become familiar with future advances in AI and the new uncharted territory that the world of medicine is heading into. The goal should be to find a beneficial balance between the effective use of AI and the human judgment. It should not be seen as a magic wand for everything, pushing our own clinical skills into the background, leading to the atrophy of our skills.

Keywords : Artificial intelligence; ophthalmology; software

Résumé:

Bien que l'IA ait une large application dans de nombreux domaines médicaux. L'ophtalmologie est la spécialité médicale qui utilise d'avantage l'intelligence artificielle, elle continue d'être une pionnière dans l'utilisation de cette intelligence pour détecter, diagnostiquer et traiter différentes pathologies oculaires telles que le glaucome, la dégénérescence maculaire liée à l'âge et la rétinopathie diabétique, ce qui peut faciliter au patient l'accès aux soins et potentiellement soulager les problèmes du système de santé.

Il est important que les médecins de premier recours se familiarisent avec les futures avancées de l'IA et le nouveau territoire inconnu vers lequel le monde de la médecine se dirige. L'objectif devrait être de trouver un équilibre bénéfique entre l'utilisation efficace de l'IA et le jugement humains des médecins de soins primaires. Elle ne doit pas être considérée comme une baguette magique pour tout et poussant nos propres compétences cliniques à l'arrière-plan, conduisant à l'atrophie de nos compétences.

Mots-clés : L'intelligence artificielle ; ophtalmologie ; logiciels

Introduction

L'intelligence artificielle (IA) est une filière de l'informatique qui cherche à simuler l'intelligence humaine. Elle est généralement définie comme un groupe de capacités telles que la compréhension, l'apprentissage et le raisonnement pour prendre des décisions et résoudre des problèmes. C'est essentiellement la capacité d'un système informatisé à montrer des capacités cognitives.

Bien que l'IA ait une large application dans de nombreux domaines médicaux. L'ophtalmologie est la spécialité médicale qui utilise d'avantage l'intelligence artificielle, elle continue d'être une pionnière dans l'utilisation de cette intelligence pour détecter, diagnostiquer et traiter différentes pathologies oculaires telles que le glaucome, la dégénérescence maculaire liée à l'âge et la rétinopathie diabétique, ce qui peut faciliter au patient l'accès aux soins et potentiellement soulager les problèmes du système de santé.

Cependant, étant donné que l'IA a été principalement conduite comme une science informatique, ses concepts et sa terminologie ne sont pas familiers à de nombreux professionnels de la santé. Cet article présente un aperçu sur l'IA et sur les nouveaux développements en ophtalmologie.

L'histoire de l'intelligence artificielle

Le terme intelligence artificielle (IA) a été inventé par John McCarthy en 1956 lors d'une conférence tenue à ce sujet. Cependant, la possibilité que les machines peuvent être capables de simuler le comportement humain a été évoquée plus tôt par Alan Turing (1950) qui a développé le test de Turing afin de différencier les humains des machines. Les années 1980 et 1990 ont vu une montée en flèche de l'intérêt pour l'IA. En 2016, la plus grande partie des investissements dans la recherche sur l'IA a été dans les applications de soins de santé par rapport à d'autres secteurs (1).

Aujourd'hui, l'IA est intégrée dans notre vie quotidienne sous de nombreuses formes, telles que les assistants personnels (Siri, Alexa, assistant Google, etc.), l'aviation et les jeux informatiques. Plus récemment, l'IA a également commencé à être incorporée à la médecine pour améliorer les soins offerts aux patients en accélérant les processus et en obtenant une plus grande précision, ouvrant la voie à de meilleurs soins de santé en général.

Le principe de l'intelligence artificielle

La base de la médecine factuelle est d'établir des corrélations cliniques et des connaissances via le développement des associations et des modèles à partir de la base de données existante. Traditionnellement, nous utilisons des méthodes statistiques pour établir ces modèles et ces associations. Les ordinateurs apprennent l'art de diagnostiquer un patient via deux techniques en générale : les organigrammes et l'approche par des bases de données :

L'approche basée sur un organigramme consiste à traduire les données recueillies de l'histoire de la maladie, c'est-à-dire un médecin pose une série des questions pour arriver à un diagnostic probable en combinant le complexe des symptômes présentés. Cela nécessite d'introduire une grande quantité de données dans des réseaux cloud basés sur des machines, compte tenu de la large gamme des symptômes et des processus pathologiques rencontrés dans la pratique médicale de routine. Les résultats de cette approche sont limités car les machines ne sont pas en mesure d'observer et de recueillir des indices qui ne peuvent être observés par un médecin que lors de la rencontre avec le patient. Au contraire, l'approche par des bases de données utilise le principe de l'apprentissage en profondeur ou de la reconnaissance des formes qui implique d'enseigner à un ordinateur via des algorithmes répétitifs pour reconnaître à quoi ressemblent certains groupes des symptômes ou certaines images cliniques / radiologiques. Un exemple de cette approche est le projet sur le cerveau artificiel de Google lancé en 2012. Ce système s'est entraîné à reconnaître les chats sur la base de 10 millions des vidéos YouTube avec une efficacité améliorée en examinant de plus en plus des images. Après 3 jours d'apprentissage, il pourrait prédire une image d'un chat avec une précision de 75%.

Tout comme l'apprentissage chez l'homme, les systèmes d'IA doivent être exposés à une base de données qui leur permet d'abord « d'apprendre » des cibles simples en ce qui concerne une découverte ou une maladie dédiée. Les algorithmes automatisés et l'énorme quantité de données (Big Data) qui permettent la lecture, la gestion et l'analyse des systèmes d'intelligence artificielle constituent le principal avantage de l'utilisation de cette technologie. Cependant, l'IA est bien plus qu'une simple énorme base de données. Après les premières étapes de l'apprentissage, le système ou la machine apprend ensuite à « s'améliorer », c'est-à-dire à évoluer lors de son apprentissage initial pour devenir plus précis et plus efficace (2). Cet apprentissage est encore amélioré par l'utilisation d'équations mathématiques complexes permettant au système de comprendre les relations non linéaires entre différentes variables par le biais d'un flux d'informations appelé « réseaux de neurones ».

Le dépistage médical et le diagnostic assistés par l'IA basés sur des images évoluent actuellement (3). L'application de cette technologie en ophtalmologie se concentre actuellement sur les maladies à incidence élevée, telles que la rétinopathie diabétique (RD), la dégénérescence maculaire liée à l'âge. (DMLA), le glaucome, la rétinopathie de prématurité (RP), la

cataracte liée à l'âge ou congénitale, et l'occlusion veineuse rétinienne. Cependant, avec autant des rapports actuels, il est rare que l'on réalise une précision et une sensibilité de 100%. C'est-à-dire que toutes les images ne peuvent pas être identifiées avec précision. Cela dépend non seulement de la technique informatique, mais aussi de la qualité des images d'entrée (4).

La place de L'intelligence artificielle en ophtalmologie

La rétinopathie diabétique

La RD est une maladie oculaire connue par ses complications visuelles. Elle est la principale cause de cécité chez les personnes au cours de leurs premières années de vie productives (5). Le fardeau sanitaire est accentué par l'énorme coût par habitant. Cela a encore augmenté depuis l'introduction d'agents anti-VEGF. Très souvent, la maladie ne présente pas des symptômes manifestes avant d'avoir atteint un stade avancé. Cependant, si elle est détectée tôt, la déficience visuelle peut être évitée par une intervention précoce qui est également l'option la plus rentable. Compte tenu de l'augmentation alarmante du nombre des personnes atteintes de diabète et du manque des spécialistes rétinien, une analyse informatisée des images du fond d'œil par une approche automatisée allège le fardeau du système de santé dans le dépistage de la RD et offre un système presque idéal pour sa gestion (6). Par conséquent, le dépistage sera utile à tout stade de la maladie et sera également utile pour éviter la cécité chez 90% des patients (7).

L'engouement dans le domaine de l'intelligence artificielle a conduit à plusieurs études utilisant des images rétinien pour tester les performances de l'IA pour détecter la RD. Historiquement, le Wisconsin Fundus Photograph Reading Center (FPRC) a été la référence pour les essais scientifiques de l'évaluation de la sévérité de la RD, y compris le Diabetes Control and Complications Trial (DCCT), et Diabetic Retinopathy Clinical Research Network (DRCR.net). L'utilisation de l'IA pour évaluer les images rétinien est séduisante car elle s'inscrit dans la tendance actuelle de la télé-ophtalmologie et de la télémédecine. Les patients sélectionnés qui ont une RD menaçant la vue doivent être orientés vers un médecin spécialiste. L'orientation urgente de ces patients est essentielle, car la RD affecte les personnes au cours de leurs premières années de vie productives.

IDx-DR est le premier algorithme d'IA approuvé par la Food and Drug Administration (FDA) pour la détection de la RD. Après un apprentissage initial fondé sur une base de données française (Messidor-2), l'appareil est associé à une caméra rétinienne non mydriatique et les images capturées sont envoyées à un serveur cloud. Le serveur utilise ensuite le logiciel IDx-DR et un algorithme « d'apprentissage en profondeur » pour détecter les signes d'une RD basés sur une comparaison autonome avec un ensemble des données de références, compte tenu de la sensibilité et de la spécificité de l'appareil inférieures à 90% (8). Donc, ce n'est pas absolument sûr. Ain-



si, il est crucial pour les patients et les médecins de savoir que les appareils de la génération actuelle ne sont pas fiables à 100%. Un faux résultat négatif peut fournir un pseudo sentiment de sécurité sur le statut de la rétinopathie. Pour le moment, un examen complet du fond d'œil reste le gold standard pour le dépistage et ne peut pas être remplacé par cet appareil jusqu'à preuve du contraire.

Alors, Google, via sa branche Deep Mind a développé un algorithme de détection de la RD avec une sensibilité de 96,1% et une spécificité de 93,9%. Enfin, OphtAI, branche de la société française Evolucare, dispose, elle aussi, d'un algorithme très performant de détection automatique de la RD (sensibilité 99%, spécificité 87% en 3 secondes) (9). Il possède le marquage CE et est intégré à une plateforme prometteuse pour le dépistage de la RD par télémedecine (Figure 1).

En outre, il y a quelques études avec des données multimodales pour confirmer une maladie plus précisément ; par exemple, la combinaison de la tomographie par cohérence optique maculaire (OCT) avec l'image du fond d'œil pour identifier l'œdème maculaire diabétique. La grande variété des techniques dans les différentes études nous indique que nous sommes à l'aube d'un développement massif de l'IA dans les soins de santé. Alors que les nouveaux systèmes d'IA commencent à mieux fonctionner que les ophtalmologistes humains, une crainte pourrait surgir que les machines prennent notre travail, mais les experts nous assurent que l'IA ne ferait qu'augmenter notre arsenal clinique. Attendons de voir quelles merveilleuses technologies nous réserve l'avenir.

DMLA

La DMLA est une maladie maculaire chronique et irréversible et l'une des principales causes de perte de vision centrale chez les personnes âgées de plus de 50 ans (10). Avec la demande d'un dépistage régulier dans une telle condition, un outil de diagnostic automatique de la DMLA peut clairement réduire la charge de travail des cliniciens (11).

De nombreuses études ont rendu compte de leurs résultats préliminaires. La plupart d'entre elles utilisent des images du fond d'œil comme matériaux originaux d'entrée et extraient les caractéristiques de la DMLA précoce, intermédiaire et tardive pour les distinguer des images saines (11). Ces outils permettent d'obtenir une sensibilité allant de 87% à 100%, avec une précision relativement élevée (12). On pense que prendre une photo du fond d'œil comme entrée est moins cher que l'examen par tomographie à cohérence optique (OCT). Mais il existe également des recherches combinant l'OCT avec un apprentissage approfondi de la DMLA.

Comme nous le savons tous, l'injection intravitréenne des médicaments anti-VEGF est le traitement de première intention pour la DMLA exsudative et le suivi est également très important. Bogunovic et al (13) utilisent un algorithme pour observer les répondeurs au traitement à l'aide des images d'OCT. Certains chercheurs combinent l'apprentissage automatique avec des images d'OCT pour observer et prédire la possibilité d'un retraitement (14).



Figure 1: l'application OphtAI, branche de la société française Evolucare, pour la détection automatique de la RD (26)



L'utilisation grandissante des smartphones et des tablettes connectés chez les seniors permet d'envisager l'évaluation personnalisée de l'acuité visuelle (AV) et son suivi à domicile. ForeseeHome représente une avancée dans la surveillance à domicile de la DMLA humide. L'appareil permet de réaliser quotidiennement un test simple pour vérifier les changements minimes dans la vision. Il est fondé sur le principe de la détection précoce des distorsions. Les rapports mensuels sont envoyés directement chez le médecin qui est alors alerté. Selon Querques et al., ForeseeHome a été plus sensible aux changements de la DMLA que les méthodes de tests à domicile plus anciennes telle la grille d'Amsler (15). Le système bénéficie maintenant d'un agrément de la Food and Drug Administration (FDA) et se déploie aux États-Unis (Figure 2).

Dans le même esprit, l'application Odysight, de Tilak, a été lancée en 2019 pour le suivi des maculopathies : détecter pré-

cocement l'évolution de la maladie en générant une alerte de baisse d'AV pour anticiper la réponse thérapeutique. L'application bénéficiant d'un marquage CE est probablement à ce jour la plus aboutie dans ce domaine (Figure 3).

Ophtalmologie pédiatrique

Malgré les résultats impressionnants des applications récentes de l'intelligence artificielle en ophtalmologie, En ophtalmologie pédiatrique moins de progrès ont été réalisés vers la résolution des problèmes en utilisant des techniques similaires. La Rétinopathie du prématuré (ROP) est une des principales causes de cécité infantile traitable lorsqu'elle est diagnostiquée en temps opportun (16). Cette maladie nécessite un suivi et un dépistage répétés, ce qui est très fastidieux et exigeant. Ainsi, l'application de l'IA dans le dépistage ROP peut améliorer l'efficacité des soins. Des résultats prometteurs ont été obtenus à partir de diverses études (17) (18).

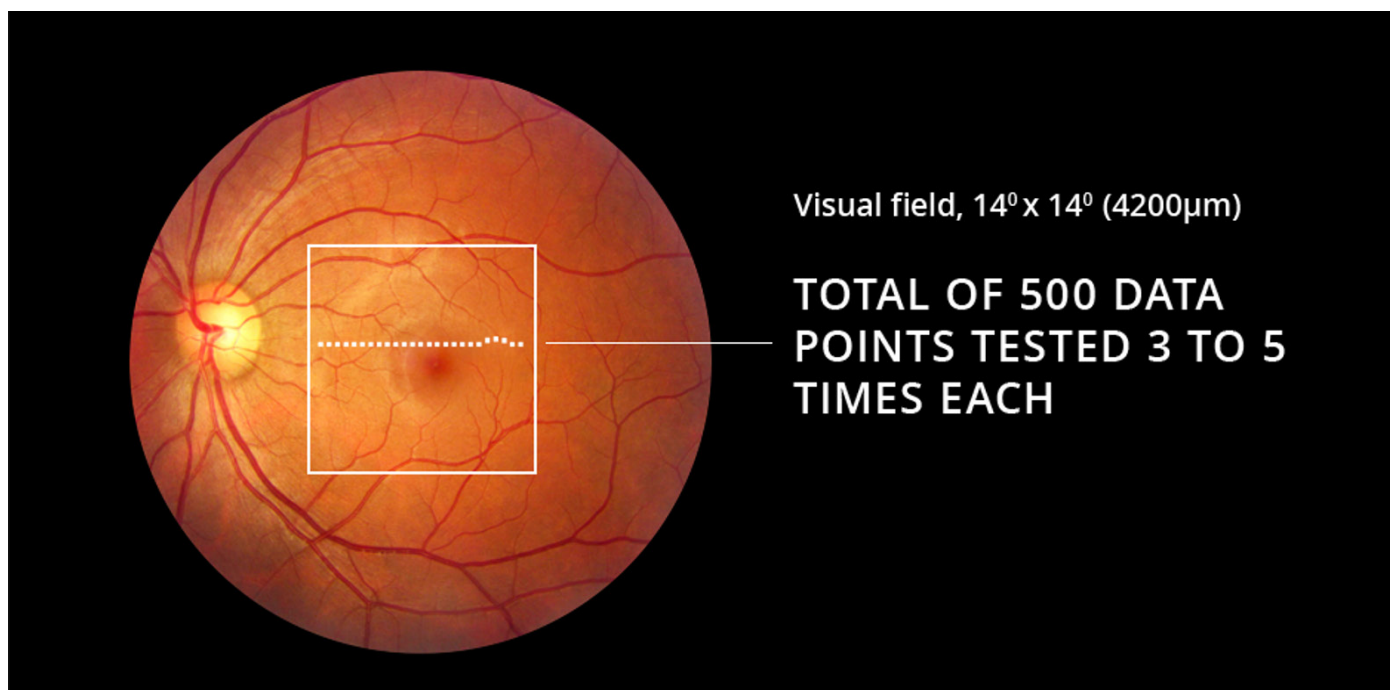


Figure 2: l'application ForeseeHome est un test simple et quotidien qui peut aider à détecter la DMLA précocement (27).

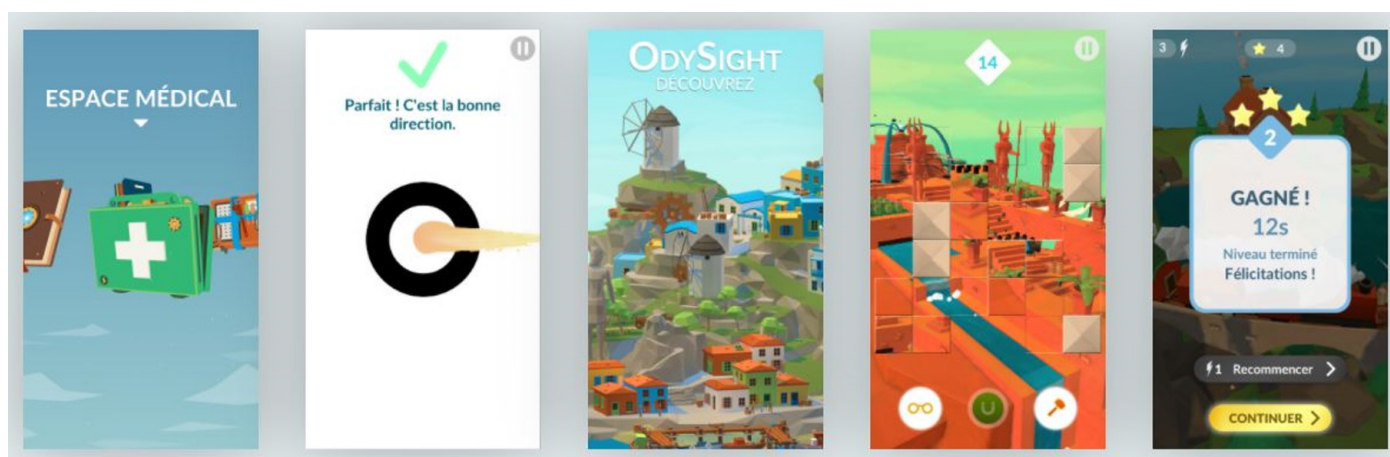


Figure 3: l'application Odysight est conçu pour surveiller les paramètres visuels de pertinence clinique pour les patients atteints de maladies de la rétine. (28)



De nombreuses études ont tenté d'identifier automatiquement la rétinopathie du prématuré (18). Elles ont obtenu un résultat prometteur avec une précision de 95%, ce qui est comparable au diagnostic des experts, beaucoup plus précis que les non-experts (19). Les avancées les plus importantes concernent la détection automatisée de la rétinopathie du prématuré, produisant des résultats qui rivalisent avec les experts. L'apprentissage automatique a également été appliqué à la classification des cataractes pédiatriques, à la prédiction des complications postopératoires après une chirurgie de la cataracte, à la détection du strabisme, des erreurs réfractives, et au diagnostic des troubles de la lecture. De plus, des techniques d'apprentissage automatique ont été utilisées pour l'étude du développement visuel, la segmentation des vaisseaux dans les images de fond d'œil et la synthèse des images ophtalmiques.

Maladies du segment antérieur

Les maladies du segment antérieur comprennent principalement la cataracte (20) et le glaucome qui sont des pathologies très répandues dans les soins de santé communautaires.

La cataracte

Peut-être que la cataracte et le glaucome sont des maladies très courantes en ophtalmologie. Il n'est pas surprenant qu'il existe certains rapports sur l'application de l'apprentissage automatique dans les maladies du segment antérieur. Les cataractes sont une opacification du cristallin et la principale cause de cécité dans le monde. La reconnaissance automatique sera rentable.

Gao et al (21) ont rapporté qu'ils proposaient un système qui classe automatiquement la gravité des cataractes nucléaires à partir des images de lampes à fente. Leur système a atteint une similitude de plus de 70% par rapport au classement clinique. D'autres chercheurs comme Liu et al (22), se concentrent principalement sur l'identification des cataractes pédiatriques. Ils atteignent une précision et une sensibilité exceptionnelles dans la classification et la densité du cristallin.

Le glaucome

Le glaucome est une maladie qui endommage principalement le nerf optique, ce qui peut provoquer une cécité irréversible. Ainsi, la détection précoce du glaucome est hautement nécessaire. Elle dépend principalement de la pression intraoculaire, de l'épaisseur des fibres nerveuses rétiniennes du nerf optique et de l'examen du champ visuel.

Des articles récents ont montré une performance élevée des algorithmes d'IA pour détecter et reconnaître ou classer des anomalies du champ visuel, de la papille optique et des examens d'OCT papillaire et maculaire. Ces algorithmes permettent à la fois de diagnostiquer un glaucome et de déterminer son stade.

Une équipe coréenne a ainsi évalué la performance d'un algorithme d'apprentissage profond pour l'analyse globale des images issues des rétinographes non mydriatiques (23). Cet algorithme a été développé de façon à rechercher des signes

d'une rétinopathie diabétique, d'une DMLA (drusen et hémorragies maculaires), des modifications de la papille évocatrices d'un glaucome, et de déficits de la couche des fibres optiques. Cette étude montre qu'un algorithme d'apprentissage profond possède une aptitude au moins égale à celle d'un œil humain expert pour l'analyse complète de toutes les anomalies pouvant être rencontrées lors de l'observation d'un cliché du fond d'œil.

L'IA pourrait également avoir un intérêt pour le suivi des glaucomes et l'aide aux décisions thérapeutiques. Une équipe américaine a ainsi développé un algorithme permettant, à partir des données périmétriques et tonométriques, de prédire de façon individuelle le risque d'évolution en fonction des valeurs futures de la pression intra-oculaire (PIO) (24). Ce travail montre la possibilité de réaliser des prévisions individualisées de la vitesse d'évolution, ainsi que l'intérêt de l'IA pour déterminer les valeurs de la PIO devant être atteintes chez un patient donné, et donc pour guider le choix du traitement. Couplée à des algorithmes de traitement et à des données sur l'efficacité des différentes options thérapeutiques disponibles, une telle analyse permettrait de générer automatiquement une proposition de traitement à chaque stade de la maladie et lors du suivi d'un patient.

D'autres utilisations de l'intelligence artificielle

La radiologie est la spécialité qui a été la plus ouverte et la plus accueillante à l'utilisation des nouvelles technologies. L'IA pourrait apporter une aide substantielle en radiologie non seulement en étiquetant les examens anormaux, mais aussi en identifiant les examens négatifs rapidement dans les tomodensitométries, les imageries par résonance magnétique, en particulier dans les hôpitaux disposant de moins des ressources humaines disponibles. Le système chirurgical robotisé Da Vinci développé par Intuitive Surgical a révolutionné le domaine de la chirurgie, en particulier les chirurgies urologiques et gynécologiques. Les bras robotiques du système imitent les mouvements de la main d'un chirurgien avec une meilleure précision et disposent d'une vue en 3D et des options de grossissement qui permettent au chirurgien d'effectuer des incisions minutieuses.

Fitbit, Apple et d'autres trackers de santé peuvent surveiller la fréquence cardiaque, les niveaux d'activité, les niveaux de sommeil, et certains ont même lancé des tracés ECG en tant qu'une nouvelle fonctionnalité. Toutes ces nouvelles avancées peuvent alerter l'utilisateur de toute variation et permettre au médecin d'avoir une meilleure idée de l'état du patient. Les Pays-Bas utilisent l'IA pour analyser leur système de santé - détecter les erreurs de traitement, les inefficacités du flux de travail pour éviter les hospitalisations inutiles.

Hormis les inventions qui existent déjà, il y a certaines avancées dans différentes phases de développement, qui aideront les médecins à être plus performant. L'Université de Stanford prépare un programme des soins assistés par IA (SAA). Le Partnership in AI-Assisted Care (PAC) a un système intelligent



de soutien qui détectera tout changement de comportement chez les personnes âgées vivant seules et les patients en unité de soins intensive (25) respectivement, via l'utilisation de plusieurs capteurs. Cependant, Molly est une infirmière virtuelle qui est en cours de développement pour fournir un suivi aux patients, permettant aux médecins de se concentrer sur les cas les plus urgents.

Aspects juridiques de l'IA

L'IA a un énorme potentiel pour remodeler les soins de santé. Mais les problèmes juridiques liés au développement et à la mise en œuvre des algorithmes d'IA sont considérables. La réglementation, les causes juridiques telles que la faute médicale, la propriété intellectuelle et la vie privée des patients ont toutes des implications réelles sur la façon dont l'IA est développée et déployée.

En ce qui concerne l'IA et l'apprentissage automatique, il y a actuellement plus de questions juridiques que de réponses. Comment les systèmes d'IA peuvent-ils garantir le consentement ? Comment les questions de responsabilité seront-elles traitées ? Comment l'IA s'intègre-t-elle dans les cadres éthiques existants ? Comment garantir la sécurité et la précision des solutions d'IA, en particulier dans le secteur de la santé, car des vies individuelles peuvent être en jeu et des données hautement sensibles sont traitées ? Ce sont quelques questions auxquelles il reste à répondre. Cependant, nous ne pouvons pas blâmer l'IA seule, car c'est le développeur qui doit mieux enseigner la machine.

Les perspectives

L'utilisation de l'IA dans le diagnostic médical, en particulier en ophtalmologie, annonce une nouvelle ère. Si elle s'avère suffisamment sensible et spécifique, cette technologie peut totalement changer la façon dont nous envisageons les programmes de dépistage et les programmes communautaires d'ophtalmologie. La plupart des systèmes actuels utilisent des images conventionnelles du fond d'oeil de 30 à 50°. Peut-être que les applications basées sur l'imagerie grand champ et l'analyse vasculaire basée sur l'OCT-angiographie pourraient donner des résultats encore plus cohérents. Cependant, le coût élevé de l'imagerie grand champ et de l'angiographie OCT peut être un facteur limitant pour le moment. De nombreux travaux sont également en cours pour identifier des biomarqueurs sériques pour la détection précoce et la surveillance de maladies comme la rétinopathie diabétique. Ainsi, une analyse complète de l'imagerie oculaire, du profil des paramètres systémiques et d'autres biomarqueurs sériques utilisant l'IA pourrait fournir de meilleures informations.

Enfin, RetinAI travaille également sur des solutions de diagnostic à distance, via smartphone. L'idéal pour briser les barrières technologiques et géographiques séparant les patients des soins de la vue : Ceux-ci pourront utiliser un dispositif médical relié à l'appareil photo de leur smartphone et prendre une photo de l'intérieur de leurs yeux. Cet outil, qui leur sera vendu à très bas prix, permettra de transmettre

simplement les informations requises à un ophtalmologiste. De plus, à l'avenir, le smartphone pourrait devenir une sorte de dossier médical électronique pour le patient, qui portera sur lui toutes les informations relatives à sa santé, y compris l'autosurveillance qu'il a effectué au fil du temps.

Le potentiel de l'IA peut être utilisé à des fins de formation pédagogique, de surveillance des étudiants, et même d'évaluation des scripts de réponse dans les collèges et les facultés de médecine. Ainsi, les enseignants auront suffisamment de temps pour enseigner aux étudiants les valeurs humaines, l'empathie, l'éthique, les compétences cliniques et de communication, tandis que l'IA fera la partie la plus mécanique du travail, entraînant un changement de paradigme dans le fonctionnement même des collèges et instituts de médecine.

Conclusion

L'IA se développe dans le secteur de la santé publique et aura un impact majeur sur tous les aspects des soins primaires. Les applications informatiques compatibles avec l'IA aideront les médecins de soins primaires à mieux identifier les patients qui nécessitent une attention particulière et à fournir des protocoles personnalisés pour chaque individu.

Il est important que les médecins de premier recours se familiarisent avec les futures avancées de l'IA et le nouveau territoire inconnu vers lequel le monde de la médecine se dirige. L'objectif devrait être de trouver un équilibre bénéfique entre l'utilisation efficace de l'IA et le jugement humains des médecins. Elle ne doit pas être considérée comme une baguette magique pour tout et poussant nos propres compétences cliniques à l'arrière-plan, conduisant à l'atrophie de nos compétences.

Références :

1. Warwick K, Shah H. *Passing the Turing Test Does Not Mean the End of Humanity. Cognit Comput.* 2016;8:409-19.
2. Jiang F, Jiang Y, Zhi H, Dong Y, Li H, Ma S, et al. *Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. Stroke Vasc Neurol.* 21 juin 2017;2(4):230-43.
3. Doi K. *Computer-Aided Diagnosis in Medical Imaging: Historical Review, Current Status and Future Potential. Comput Med Imaging Graph.* 2007;31(4-5):198-211.
4. Paulus J, Meier J, Bock R, Hornegger J, Michelson G. *Automated quality assessment of retinal fundus photos. Int J Comput Assist Radiol Surg.* nov 2010;5(6):557-64.
5. Kocur I, Resnikoff S. *Visual impairment and blindness in Europe and their prevention. Br J Ophthalmol.* juill 2002;86(7):716-22.
6. Abràmoff MD, Niemeijer M, Suttorp-Schulten MSA, Viergever MA, Russell SR, van Ginneken B. *Evaluation of a System for Automatic Detection of Diabetic Retinopathy From Color Fundus Photographs in a Large Population of Patients With Diabetes. Diabetes Care.* août 2008;31(8):e64.
7. Vashist P, Singh S, Gupta N, Saxena R. *Role of Early Screening for Diabetic Retinopathy in Patients with Diabetes Mellitus: An Overview. Indian J Community Med.* 2011; 36(4):247-52.



8. Commissioner O of the. FDA permits marketing of artificial intelligence-based device to detect certain diabetes-related eye problems [Internet]. FDA. FDA; 2020 [cité 13 août 2020]. Disponible sur: <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-permits-marketing-artificial-intelligence-based-device-detect-certain-diabetes-related-eye>.
9. Schlegl T, Waldstein SM, Bogunovic H, Endstraßer F, Sadeghipour A, Philip A-M, et al. Fully Automated Detection and Quantification of Macular Fluid in OCT Using Deep Learning. *Ophthalmology*. 2018;125(4):549-58.
10. Ferris FL, Wilkinson CP, Bird A, Chakravarthy U, Chew E, Csaky K, et al. Clinical classification of age-related macular degeneration. *Ophthalmology*. avr 2013;120(4):844-51.
11. Mookiah MRK, Acharya UR, Fujita H, Koh JEW, Tan JH, Noronha K, et al. Local configuration pattern features for age-related macular degeneration characterization and classification. *Comput Biol Med*. août 2015;63:208-18.
12. Burlina P, Pacheco KD, Joshi N, Freund DE, Bressler NM. Comparing Humans and Deep Learning Performance for Grading AMD: A Study in Using Universal Deep Features and Transfer Learning for Automated AMD Analysis. *Comput Biol Med*. 1 mars 2017;82:80-6.
13. Bogunovic H, Waldstein SM, Schlegl T, Langs G, Sadeghipour A, Liu X, et al. Prediction of Anti-VEGF Treatment Requirements in Neovascular AMD Using a Machine Learning Approach. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 01 2017;58(7):3240-8.
14. Kvannli L, Krohn J. Switching from pro re nata to treat-and-extend regimen improves visual acuity in patients with neovascular age-related macular degeneration. *Acta Ophthalmol*. nov 2017;95(7):678-82.
15. Querques G, Querques L, Rafaele O, Canoui-Poitrine F, Bandello F, Souied EH. Preferential hyperacuity perimeter as a functional tool for monitoring exudative age-related macular degeneration in patients treated by intravitreal ranibizumab. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1 sept 2011;52(9):7012-8.
16. Gilbert C, Fielder A, Gordillo L, Quinn G, Semiglia R, Visintin P, et al. Characteristics of infants with severe retinopathy of prematurity in countries with low, moderate, and high levels of development: implications for screening programs. *Pediatrics*. mai 2005;115(5):e518-525.
17. Gensure RH, Chiang MF, Campbell JP. Artificial intelligence for retinopathy of prematurity. *Curr Opin Ophthalmol*. sept 2020;31(5):312-7.
18. Ataer-Cansizoglu E, Kalpathy-Cramer J, You S, Keck K, Erdogmus D, Chiang MF. Analysis of underlying causes of inter-expert disagreement in retinopathy of prematurity diagnosis. Application of machine learning principles. *Methods Inf Med*. 2015;54(1):93-102.
19. Gelman R, Jiang L, Du YE, Martinez-Perez ME, Flynn JT, Chiang MF. Plus Disease in Retinopathy of Prematurity: Pilot Study of Computer-Based and Expert Diagnosis. *J AAPOS*. déc 2007;11(6):532-40.
20. Ataer-Cansizoglu E, Bolon-Canedo V, Campbell JP, Bozkurt A, Erdogmus D, Kalpathy-Cramer J, et al. Computer-Based Image Analysis for Plus Disease Diagnosis in Retinopathy of Prematurity: Performance of the "i-ROP" System and Image Features Associated With Expert Diagnosis. *Transl Vis Sci Technol* [Internet]. 30 nov 2015 [cité 13 août 2020];4(6). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4669635/>
21. Gao X, Lin S, Wong TY. Automatic Feature Learning to Grade Nuclear Cataracts Based on Deep Learning. *IEEE Trans Biomed Eng*. nov 2015;62(11):2693-701.
22. Liu X, Jiang J, Zhang K, Long E, Cui J, Zhu M, et al. Localization and diagnosis framework for pediatric cataracts based on slit-lamp images using deep features of a convolutional neural network. *PLoS One* [Internet]. 17 mars 2017 [cité 13 août 2020];12(3). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5356999/>
23. Son J, Shin JY, Kim HD, Jung K-H, Park KH, Park SJ. Development and Validation of Deep Learning Models for Screening Multiple Abnormal Findings in Retinal Fundus Images. *Ophthalmology*. 1 janv 2020;127(1):85-94.
24. Kazemian P, Lavieri MS, Van Oyen MP, Andrews C, Stein JD. Personalized Prediction of Glaucoma Progression Under Different Target Intraocular Pressure Levels Using Filtered Forecasting Methods. *Ophthalmology*. 2018;125(4):569-77.
25. Partnership in AI-Assisted Care (PAC) [Internet]. Clinical Excellence Research Center. [cité 13 août 2020]. Disponible sur: <https://med.stanford.edu/cerc/research/new-pac.html>
26. Solution pour le dépistage des maladies ophtalmologiques [Internet]. Ophtai. [cité 13 août 2020]. Disponible sur: <https://www.ophtai.com/fr/solution-depistage-maladie-oeil/>
27. ForeseeHome® | Notal Vision [Internet]. [cité 13 août 2020]. Disponible sur: <https://notalvision.com/technology/foreseehome>
28. Odysight - Tilak Healthcare [Internet]. [cité 13 août 2020]. Disponible sur: <https://www.tilakhealthcare.com/products/odysight/>

DÉCLARATIONS DES CONFLITS D'INTÉRÊTS :

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

