UNIVERSITÉ DE LILLE

FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG

Année : 2021

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

L'intelligence artificielle perçue par les ophtalmologistes

Présentée et soutenue publiquement le 4 juin à 16h00
au Pôle Recherche
par Aurélien CAUDRON

JURY
Président :
Monsieur le Professeur Jean-François ROULAND
Assesseurs :
Monsieur le Professeur Pierre LABALETTE
Monsieur le Professeur Jean-Pierre PRUVO
Monsieur le Docteur Valentin BACHET
Directeur de thèse :
Monsieur le Professeur Jean-François ROULAND

AVERTISSEMENT

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

LISTES DES ABREVIATIONS

IA : Intelligence artificielle

RD : Rétinopathie diabétique

ROP : Rétinopathie des prématurés

DMLA : Dégénérescence maculaire liée à l'âge

ML : Machine Learning

DL : Deep Learning

CNOM : Conseil National de l'Ordre des Médecins

CCNE : Comité Consultatif National d'Éthique

CNIL : Comission Nationale de l'Informatique et des Libertés

RGPD : Règlement Général sur la Protection des Données

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

SNOF : Syndicat National des Ophtalmologistes de France

IMC : Indice de Masse Corporelle

OCT : Tomographie par Cohérence Optique

FDA : Food and Drug Administration

LASIK : Laser in Situ Kératomileusis

Table des matières

I. RESUME : 6

II. INTRODUCTION 7

A. CONTEXTE 7
1. AIDE A LA PERFORMANCE 8
2. REPONSE A UNE PENURIE DE MEDECINS 8
B. DEFINITIONS 10
1. L'INTELLIGENCE 10
2. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE 10
C. HISTORIQUE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE 11
1. DE 1940 A 1970 : LES ORIGINES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE 11
2. DE 1970 A 1980 : LA PERIODE DE CRISE, APPELEE « HIVER DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE » 13
3. DE 1980 A 2000 : LA RENAISSANCE DE L'IA 14
4. 2000- 2020 : EN ROUTE VERS UNE NOUVELLE REVOLUTION TECHNOLOGIQUE 14
D. ASPECT TECHNIQUES 16
1. LES DEUX TYPES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE 16
2. L'INFORMATIQUE 16
3. L'ALGORITHME 17
4. LES « BIG DATA » OU « DONNEES MASSIVES » 17
5. APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE (« MACHINE LEARNING ») 18
6. APPRENTISSAGE SUPERVISE (« SUPERVISED LEARNING ») 20
7. APPRENTISSAGE NON SUPERVISE (« UNSUPERVIDED LEARNING ») 22
8. APPRENTISSAGE SEMI-SUPERVISE (« SEMI SUPERVISED LEARNING ») 23
9. APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT (« REINFORCEMENT LEARNING ») 23
10. APPRENTISSAGE PROFOND (« DEEP LEARNING ») 24
11. APPRENTISSAGE PAR TRANSFERT (« TRANSFER LEARNING ») 29
12. DIFFERENCE ENTRE APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE « TRADITIONNEL » ET APPRENTISSAGE PROFOND 29
13. L'IMPORTANCE DE LA QUALITE DES DONNEES POUR L'APPRENTISSAGE DE L'ALGORITHME. 34
14. ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'ALGORITHME 34
15. LES ETAPES NECESSAIRES A LA CONSTRUCTION D'UN ALGORITHME ROBUSTE D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : 36
E. APPLICATION EN OPHTALMOLOGIE 37
1. GENERALITES 37
2. LA RETINOPATHIE DIABETIQUE 40
3. DEGENERESCENCE MACULAIRE LIEE A L'AGE 45
4. GLAUCOME 51
5. CATARACTE 61
6. RETINOPATHIE DES PREMATURES 66
7. KERATOCONE ET CHIRURGIE REFRACTIVE 68
8. AUTRES PATHOLOGIES RETINIENNES 69
9. QUAND L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE VA ENCORE PLUS LOIN : EN ROUTE VERS LE FUTUR ? 74
10. LA VISION ARTIFICIELLE 79
11. LES DIFFICULTES TECHNIQUES RENCONTREES A L'HEURE ACTUELLE 79
F. ETHIQUE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE 84
1. QU'EST-CE QUE L'ETHIQUE ? 84
2. L'IMPORTANCE D'UNE ETHIQUE MEDICALE 84
3. QUELS SONT LES RISQUES LIES A L'UTILISATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN MEDECINE ? 86

III. MATERIELS ET METHODES 94

A. COMMENT CE TRAVAIL EST-IL NE ? POURQUOI UN QUESTIONNAIRE ? 94
B. QUESTIONNAIRE 96

IV. RESULTATS & DISCUSSION 100

A. DESCRIPTION DE LA POPULATION 100
B. UN INTERET PRESQUE UNANIME POUR CETTE NOUVELLE TECHNOLOGIE 101
C. DES CONNAISSANCES HETEROGENES 103
D. LES OPHTALMOLOGISTES CONSCIENTS DE L'ARRIVEE DE L'IA 107
E. LES BENEFICES ESPERES 108
1. AMELIORER NOS CONDITIONS DE TRAVAIL 108
2. GAIN DE PERFORMANCE 109
3. REDUIRE LES INEGALITES SOCIO-DEMOGRAPHIQUES 110
4. LA RECHERCHE « INVERSEE » 111
F. LES RISQUES ENCOURUS 113
1. DESHUMANISATION DE LA PROFESSION 113
2. RISQUE D'ACCORDER TROP DE CONFIANCE A CET OUTIL « MYSTERIEUX » ? 115
3. PERTE DE LA REFLEXION INTELLECTUELLE 118
4. DES DERIVES FINANCIERES 121
5. LES RISQUES LIES AUX « BIG DATA ». 121
G. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EST-ELLE CRAINTE ? 123
1. QUELLE EST LA NATURE DE CETTE MENACE ? 123
2. UN SENTIMENT DE MENACE INVERSEMENT PROPORTIONNEL A L'AGE 125
3. UNE PEUR DE L'INCONNU QUI N'EXPLIQUE PAS TOUT 126
4. UNE MEFIANCE RELAYEE AU SECOND PLAN 126
H. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PEUT-ELLE NOUS REMPLACER ? 127
1. DIMINUTION DU BESOIN EN OPHTALMOLOGISTES 127
2. LA DIMENSION HUMAINE 129
3. LA COMPLEXITE DE NOTRE EXPERTISE 130
I. QUELLE ATTITUDE ADOPTER FACE A L'IA ? 131
1. FAIRE EVOLUER LA FORMATION MEDICALE 131
2. LA PLACE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS NOTRE PRATIQUE FUTURE 132
J. LIMITES DE L'ETUDE 135
1. BIAIS DE SELECTION : DES SOUS-GROUPES HETEROGENES 135
2. BIAIS DE CONFUSION : LA DESIRABILITE SOCIALE 135
3. LES QUESTIONS FERMEES 135
4. QUEL CREDIT APPORTER AUX REPONSES DE MEDECINS NON INFORMES ? 136

V. CONCLUSION 137

VI. ANNEXES 138

A. RÉPONSES AUX QUESTIONS OUVERTES 138

VII. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 145

I. Résumé :

Contexte : L'intelligence artificielle est une technologie en plein essor dont les compétences pointues ont déjà été établies par de multiples études et concernent de nombreux domaines de l'ophtalmologie. On peut s'attendre à ce qu'elle modifie notre pratique dans un futur proche.

Méthode : Un questionnaire en ligne comprenant 20 questions fermées et 2 ouvertes a été soumis à des internes, des ophtalmologistes libéraux et hospitaliers de toute la France. 137 médecins ont participé à cette étude dont le but est de faire le point sur leurs connaissances, leurs attentes et leurs appréhensions concernant l'IA.

Résultats : L'intérêt pour l'IA est unanime mais les médecins sont encore peu documentés à son sujet. La majorité des participants perçoit en l'IA une possibilité d'améliorer les conditions de travail, d'augmenter les performances globales des soins et de diminuer les inégalités démographiques.
A l'inverse, beaucoup craignent que cet outil affaiblisse notre légitimé ou déshumanise notre profession. Le risque d'utilisation de l'IA par des non-médecins à visée lucrative a souvent été mentionné.
Même si la moitié des ophtalmologistes perçoit cette technologie comme une menace, 90% d'entre eux se disent prêts à l'utiliser dans leur pratique quotidienne.
Nos résultats sont cependant à nuancer puisque la moitié de l'effectif est constitué d'internes, encore inexpérimentés.

Conclusion :
Les ophtalmologistes apparaissent ouverts à l'utilisation de l'IA. Tout en ayant conscience des risques encourus, ils voient en elle des perspectives intéressantes à condition qu'elle soit supervisée. Pour préparer l'avenir, il convient d'adapter la formation des jeunes médecins afin d'exploiter au mieux cet outil et de l'intégrer sans crainte à leur pratique.

II. INTRODUCTION

A. Contexte

Reconnaissance faciale et vocale sur smartphone, recommandation de contenus personnalisés ou encore traduction automatique : l'intelligence artificielle fait déjà partie intégrante de notre quotidien. Elle est associée à la modernisation de la société et a su se rendre indispensable dans de nombreux domaines. Il semble donc naturel qu'elle s'impose aussi dans le milieu médical.

En effet, la médecine du XXIème est une médecine de performance et de précision. Celle fantasmée est quant à elle infaillible.

C'est dans ce contexte où les attentes des patients mais aussi des médecins eux-mêmes croissent de façon exponentielle que l'intelligence artificielle, devenue le symbole de la transformation numérique, trouve toute sa place.

L'arrivée de l'IA en médecine est volontiers associée à des images caricaturales de robot-chirurgien ou de machine prescriptrice. Pourtant, nous l'utilisons déjà et ce dans des situations très vastes allant du domaine administratif (logiciel de prise de rendez-vous) au domaine médical pur (alerte d'interactions médicamenteuses lors de prescriptions informatisées) (1).

Concernant l'utilisation à venir d'algorithmes à des fins diagnostiques, les spécialités les plus concernées sont bien évidemment celles où l'imagerie a un rôle capital : la radiologie, la dermatologie avec les photographies de lésions cutanées, et l'ophtalmologie avec les rétinophotographies, les topographies, ou encore les tomographies par cohérence optique.

En ophtalmologie, on peut considérer que l'IA aura deux utilités majeures : augmenter nos performances de soins et combler un besoin démographique.

1. Aide à la performance

Si l'IA était seulement d'utilité démographique, elle ne serait certainement pas l'objet de ce travail.
Ce qui divise parmi les professionnels de santé, c'est bien la perception plus ou moins claire de l'IA et de ses capacités. Celles-ci, parce qu'elles sont prodigieuses, suscitent un mélange de fascination et de crainte, dans des proportions très variables.
Nous le verrons en effet dans le chapitre « application en ophtalmologie », les compétences actuelles des algorithmes intelligents dans le domaine médical sont impressionnantes. Qui aurait pensé qu'on puisse déterminer l'IMC ou le statut de fumeur d'un patient à partir d'une rétinophotographie ?

L'IA permettrait non seulement de nous aider à pallier le manque de médecins, mais elle aurait un potentiel en apparence supérieur à celui d'un humain dans un domaine précis. Elle est plus qu'une aide puisqu'elle peut obtenir un diagnostic ou aiguiller une prise en charge de façon autonome et rapidement.

La comparaison avec l'humain est donc tentante et même inévitable. En cela elle peut constituer une menace pour notre profession (et notre moral !) : un outil rapide, aux performances indiscutables, que demander de plus pour un patient ?

Face à ces algorithmes surentraînés, techniquement supérieurs et infatigables, les ophtalmologistes ont-ils vocation à rester maitres du système de consultation et de délivrance des ordonnances en ophtalmologie ?

2. Réponse à une pénurie de médecins

L'IA pourrait répondre à une demande démographique que la densité d'ophtalmologues actuels, et le nombre d'ophtalmologues formés ne peuvent pas satisfaire. En effet, selon l'OMS, la pénurie d'ophtalmologues dans le monde s'élèverait à 1 million. En France, selon le SNOF, on compte 250 départs à la retraite chaque année contre seulement 150 médecins formés (2).

Ce déficit est donc entretenu et ne cessera de croître (puisque chaque année cette différence numérique entre retraités et formés s'additionnera.)

Par ailleurs, l'ophtalmologie est la spécialité médicale qui arrive en tête des délais d'attente pour obtenir une consultation. Selon une enquête menée entre 2016 et 2017 par le Ministère des Solidarités et de la Santé (DREES), le délai d'attente moyen avant de pouvoir consulter un ophtalmologiste en France est de 80 jours. La médiane est de 52 jours (3).

Parallèlement à la diminution du nombre d'ophtalmologues formés, on assiste à une augmentation des besoins liée au vieillissement de la population.
Rappelons que la rétinopathie diabétique, première cause de cécité chez les moins de 50 ans, concernerait 1 million de personnes en France. On compte autant de malades atteints de DMLA, première cause de cécité chez les plus de 50 ans.
Enfin, 500 000 personnes seraient traitées pour un glaucome chronique, mais on sait que ce chiffre est justement sous-estimé en raison d'un manque de dépistage adéquat.

L'IA permettrait aussi de réduire la disparité démographique des ophtalmologues sur le territoire français : le délai médian d'obtention d'un rendez-vous dans un cabinet est de 29 jours en région parisienne, alors qu'il est de 97 jours dans certaines zones rurales (3).
Ces chiffres sont à nuancer car une enquête publiée par le SNOF montre que les délais pour un rendez-vous chez l'ophtalmologiste ont diminué d'un tiers en 3 ans (2)

La suite de ce travail abordera les compétences actuelles de l'IA, celles attendues, et bien sûr la valeur ajoutée que nous, ophtalmologues, apportons dans la prise en charge globale de nos patients.

B. Définitions

1. L'intelligence

On ne peut pas parler de l'intelligence en général, ou alors à un très haut niveau d'abstraction, par opposition à l'instinct (l'inné) et l'habitude (l'acquis). Sur ce plan très large, qui relève de la biologie, l'intelligence est une fonction animale, essentielle, une forme très particulière d'adaptation au milieu. Il s'agit de ruser (par exemple de s'éloigner d'abord de la nourriture pour pouvoir l'atteindre, s'il y a un grillage à franchir...). C'est aussi une fonction d'ajustement. Pour atteindre tel but, il faut envisager tels moyens.

Sur un plan tout aussi général, important pour comprendre les apprentissages, c'est la capacité de résoudre un problème neuf : définition de Wechsler, créateur du « WISC », un test pour enfants (4). L'intelligence s'oppose à la copie, à l'application mécanique d'un procédé. L'intelligence peut être logique, mathématique, expérimentale aussi, avec la formulation d'hypothèses qui sont testées. Faire preuve d'intelligence, c'est alors utiliser des stratégies, donc faire des choix, au lieu d'appliquer tout de suite une procédure déjà connue, ou qui paraîtrait la seule possible, faute d'imagination et de raisonnement.

Mais l'intelligence est aussi technicienne et créatrice. Elle fabrique des outils, envisage des possibles, sort du champ clos de ce qui existe déjà. C'est d'une manière très générale l'intelligence dont fait preuve l'humanité pour progresser.

2. L'intelligence artificielle

Selon Marvin Lee Minsky, l'un des fondateurs de l'IA et des chercheurs les plus influents dans le domaine de l'intelligence artificielle (prix Turing de 1969), on peut définir l'IA comme « la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique » (5).

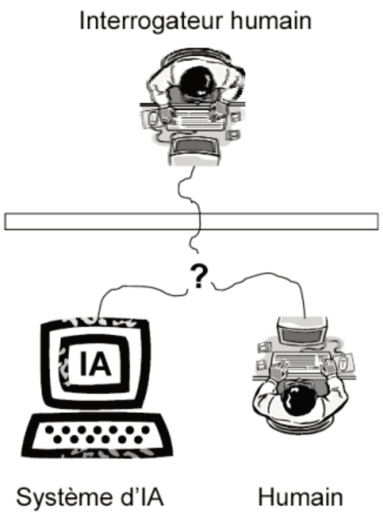
En termes plus simples, c'est une discipline scientifique dont le but est de faire réaliser par des machines des tâches que l'homme pourrait accomplir en utilisant son intelligence.

C. Historique de l'intelligence artificielle

1. De 1940 à 1970 : les origines de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle n'est pas une science d'aujourd'hui.
Sa naissance coïncide avec l'apparition des premiers ordinateurs, dans les années 1940.
Le pionnier de la naissance de l'IA est Alan Turing, célèbre mathématicien britannique, connu pour avoir décrypté la machine à coder allemande « Enigma ». Ce travail a permis aux Alliés d'être informés des projets militaires nazis. Des historiens affirment que le décryptage a permis d'écourter la Seconde Guerre mondiale de deux ans.

En octobre 1950, Alan Turing publie "*Computing Machinery and Intelligence ».* (6) Ce manuscrit aborde pour la première fois le thème de l'intelligence artificielle. Selon lui, la question *: «* les machines peuvent elle penser ? » n'a pas d'intérêt. En revanche, il s'intéresse aux capacités d'un ordinateur à entretenir une conversation avec un humain sans que celui-ci s'en aperçoive.
En ce sens, il propose un test appelé « Imitation Game », connu aujourd'hui sous le nom « Test de Turing ». Son principe est le suivant : une personne entretient deux conversations distinctes mais simultanées avec un autre être humain et avec une machine. Au bout de cinq minutes, elle doit déterminer qui se cache derrière chaque conversation.
Le test est positif dès que 30% des interlocuteurs ont pris l'ordinateur pour l'être humain (6).



C'est en 1956, lors de la conférence de Dartmouth aux États-Unis, que l'intelligence artificielle devient une discipline scientifique à part entière (7,8).

On doit d'ailleurs le terme « intelligence artificielle » à John Mc Carthy (9), un des protagonistes majeurs de la conférence.

Pour Mc. Carthy, « toute activité intellectuelle peut être décrite avec suffisamment de précision pour être simulée par une machine » et « l'obstacle majeur n'est pas le manque de capacité de la machine, mais notre incapacité à créer des programmes automatiques ».

Lors de cette conférence, les scientifiques abordent plusieurs pistes, telles que les réseaux de neurones et l'apprentissage machine, qui aboutiront quelques années plus tard.

On doit le tout premier algorithme d'intelligence artificielle à l'américain Frank Rosenblatt. Il conçoit en 1957 un réseau de neurones artificiels à une seule couche, appelé le Perceptron (10).

Au début des années 1960, de nombreuses équipes travaillent sur les réseaux de neurones, cherchant à les former à la reconnaissance d'images, mais les échecs répétés entraînent l'abandon des travaux.

En 1965, Joseph Weizeubaum lance le programme informatique ELIZA. Ce logiciel a été conçu pour remplacer le psychothérapeute lors des entretiens psychologiques. C'est le premier logiciel informatique à réussir le test de Turing. Néanmoins, il n'est pas capable de mener un entretien sans être démasqué (11).

Dans la même année, le questionnement éthique sur l'intelligence artificielle apparait. Le philosophe Américain Hubert Dreyfus publie dans *Alchemy and Artificial Intelligence* une première critique des recherches sur l'intelligence artificielle. Il met notamment l'accent sur l'importance des émotions dans le cerveau humain (12).

2. De 1970 à 1980 : la période de crise, appelée « hiver de l'intelligence artificielle »

C'est dans cette décennie qu'apparaissent les « systèmes experts » : ordinateurs capables de se comporter comme un humain, dans un domaine de compétence bien précis, comme par exemple l'aide au diagnostic médical.
Un logiciel appelé « MYCIN » a été créé pour identifier les bactéries à partir d'un questionnaire rempli par le médecin, et pour proposer ensuite une antibiothérapie adaptée (13).

Cependant, le domaine médical s'est avéré trop complexe pour permettre la poursuite des recherches à l'époque.

De façon générale, tous les projets sur l'IA ont été confrontés au manque de puissance de calcul des ordinateurs et au manque de données. Ainsi, les financements se réduisent de manière drastique pendant cette décennie et les recherches stagnent (14).

3. De 1980 à 2000 : la renaissance de l'IA

La recherche et les investissements autour de l'IA repartent à la hausse avec l'amélioration des systèmes experts.
Ce succès relance les projets de recherche et laisse place à une nouvelle branche de l'IA qui apparait dans les années 1990, c'est l'apprentissage automatique. Son mode de fonctionnement est tout à fait inédit puisque les algorithmes apprennent directement à partir d'un ensemble de données servant d'exemple, sans encodage manuel. Nous y reviendrons dans le prochain chapitre.

Au début des années 1990, Yann Lecun, célèbre chercheur français (qui a reçu le prix Turing 2019) travaille sur la reconnaissance d'image et développe un algorithme d'apprentissage utilisant un réseau de neurones artificiels capable de reconnaître le montant écrit à la main sur chèques. C'est la naissance de l'apprentissage profond ou « deep learning » (15).
Mais encore une fois, malgré des résultats prometteurs, les limites liées au manque de données et à la puissance des machines encore trop juste contraignent la communauté scientifique à se détourner de l'IA et la recherche stagne encore.

Le 11 mai 1997 marque un tournant symbolique lorsque le programme Deep blue (système expert d'IBM) remporte la partie d'échecs, après plusieurs tentatives, face au champion du monde Garry Kasparov (16).

4. 2000- 2020 : en route vers une nouvelle révolution technologique

L'intelligence artificielle, notamment à travers le deep learning, franchit une étape supplémentaire grâce à 3 évènements synergiques (17).

- Des processeurs informatiques de plus en plus puissants ;
- Des bases de données massives rapidement accessibles depuis l'avènement d'internet permettant l'apprentissage pour les algorithmes (les « big data ») ;
- Des réseaux de neurones artificiels de plus en plus performants ;

En 2015, la revue *Scientific American* a donc classé l'IA parmi les « dix grandes avancées qui vont améliorer la vie, transformer l'informatique et peut-être même sauver la planète » (18).

En 2016, le programme Alpha go de Google Deepmind bat l'un des meilleurs joueurs mondiaux du jeu de go, Lee Sedol (ce jeu d'origine chinoise comprend bien plus de combinaisons que les échecs) (19).

En 2017, un robot nommé « Xiaoyi » (ce qui signifie « le petit docteur ») développé par le leader chinois de l'IA, iFlytek, obtient le concours de médecine. Il termine l'épreuve en seulement 60 minutes, alors que dix heures sont accordées aux candidats.
Le robot obtient également une note supérieure à la moyenne nationale.
Pour parvenir à ce résultat, Xiaoyi a parcouru et compilé environ un million d'images, 53 ouvrages et deux millions de dossiers médicaux.
Il a été placé dans plusieurs hôpitaux de la province de l'Anhui où il établit des pré-diagnostics pour les patients (20).

En 2018, aux États-Unis, « IDX-DR » est le tout premier algorithme d'intelligence artificielle commercialisé par la Food Drug Administration (FDA) pour le dépistage de la rétinopathie diabétique (21,22).

En mars 2018, lors d'un congrès à Paris sur l'intelligence artificielle, le président de la République Emmanuel Macron présente un projet pour lequel l'État prévoyait de consacrer 1,5 milliard d'euros à l'intelligence artificielle d'ici la fin du quinquennat (23).

D. Aspect techniques

Nous avons tous entendu parler un jour « d'intelligence artificielle », de « machine learning », de « deep learning » sans vraiment connaitre leur signification précise, ce qui donne lieu à une confusion de ces termes (24).
Nous essaierons ici d'expliquer les grands principes de base sans rentrer dans les détails.

1. Les deux types d'intelligence artificielle

a) L'intelligence artificielle « faible »

Toutes les intelligences artificielles que nous croisons aujourd'hui sont des IA faibles. C'est un programme qui se concentre uniquement sur la tâche précise pour laquelle il a été conçu.

b) Intelligence artificielle « forte » ou « singularité technologique »

Le concept d'intelligence artificielle forte fait référence à une machine qui serait capable d'égaler ou de dépasser l'homme dans toutes les tâches qu'il entreprend, mais qui aurait également une conscience**.** Elle pourrait alors être capable d'avoir une éthique, une représentation du monde ainsi qu'une compréhension de ses propres raisonnements.

Cette forme d'IA reste aujourd'hui encore du domaine de la science-fiction.

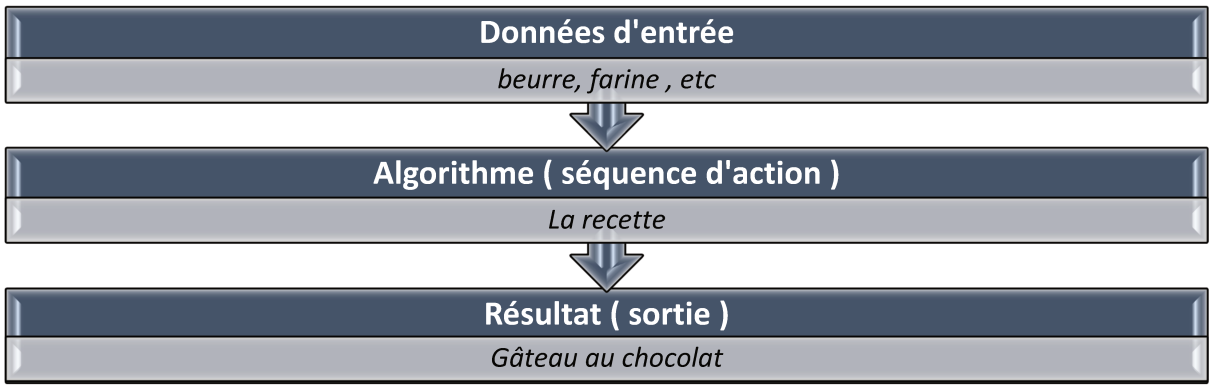
2. L'informatique

C'est le traitement de l'information de manière automatique.
L'informatique s'appuie sur des machines capables de traiter des données grâce à des algorithmes.

3. L'algorithme

C'est une suite finie d'étapes permettant à partir de données d'entrée d'obtenir un résultat de manière automatique.

Exemple de la recette de cuisine



4. Les « Big data » ou « données massives »

Il n'existe à ce jour aucune définition universelle du « Big data ».

Ce terme sert à désigner la disponibilité et le stockage d'un nombre illimité d'informations sur une plateforme numérique, que seules les nouvelles technologies (algorithmes et puissance de calcul des ordinateurs) permettent de traiter efficacement (25).

C'est l'essor des « Big data » qui a permis le développement des algorithmes d'intelligence artificielle. En effet, pour développer un modèle d'intelligence artificielle robuste, son entrainement nécessite une multitude de données.

De plus, la qualité de prédiction d'un algorithme s'améliore avec l'expérience. Plus nous lui fournissons des données, meilleur il deviendra.

Ainsi, les « Big data » et l'intelligence artificielle sont deux concepts indissociables.

Nous reviendrons plus largement sur la notion de donnée en santé dans le chapitre sur l'éthique.

5. Apprentissage automatique (« Machine learning »)

Nous avons souvent tendance à confondre les termes « intelligence artificielle », « algorithmes », « machine learning », « deep learning ».
L'apprentissage automatique (« machine learning ») est un sous-domaine de l'intelligence artificielle (26).

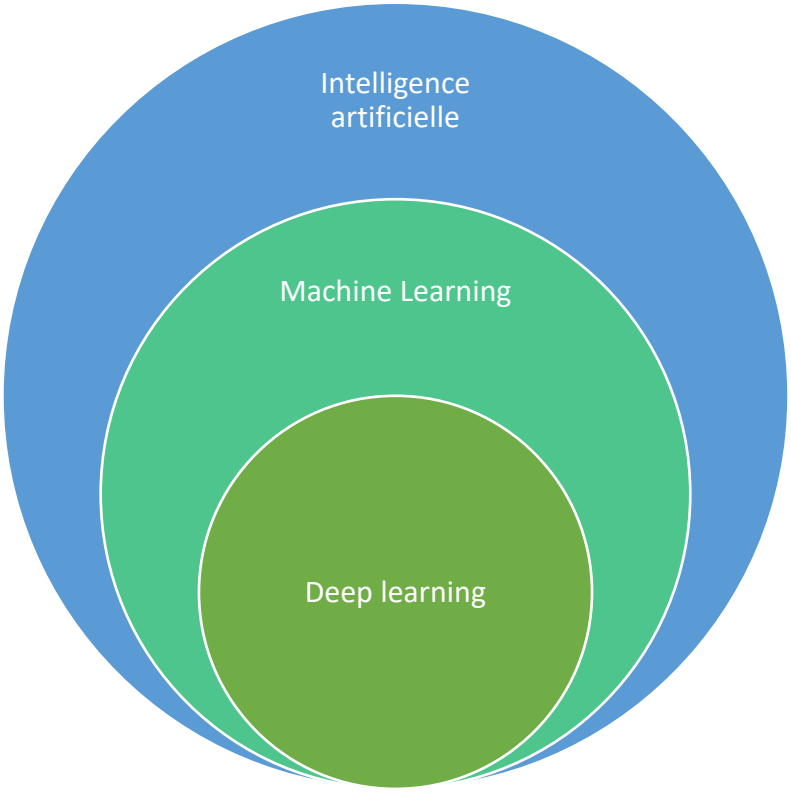


Illustration de la relation entre l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique (« machine learning ») et l'apprentissage en profondeur (« deep learning ») (27).

a) *Définition*

Arthur Samuel a défini l'apprentissage automatique comme une « discipline qui donne aux ordinateurs la capacité d'apprendre sans être explicitement programmé » (24,28).

b) *Une rupture avec les algorithmes classiques*

Le « machine learning » est donc un « algorithme apprenant » qui constitue une rupture par rapport à l'algorithmique classique : en effet, leurs critères de fonctionnement sont explicitement définis par les programmateurs (29).

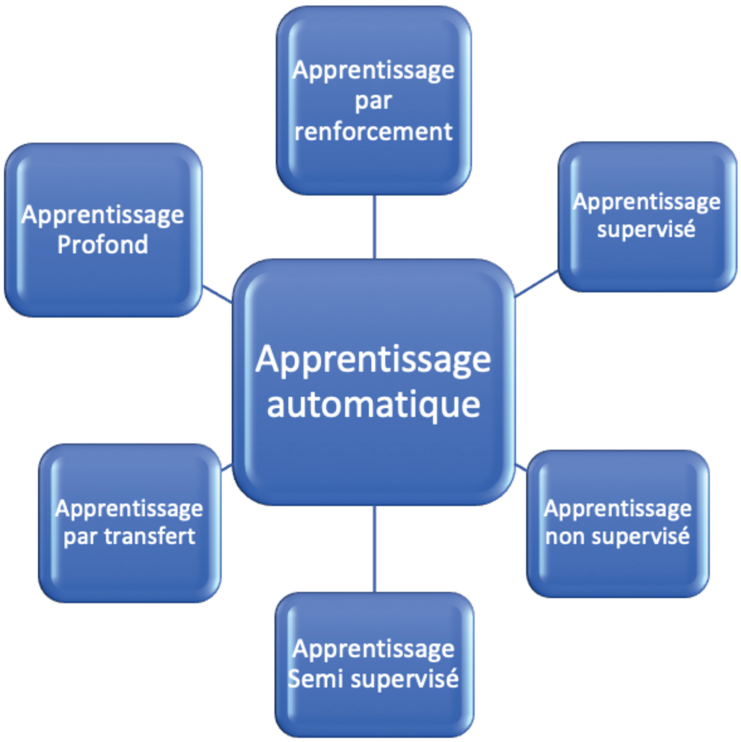
- <u>L'exemple de la reconnaissance d'image</u>

Pour simplifier la compréhension des différentes techniques, nous utiliserons l'exemple de la reconnaissance des chats et des chiens par une machine tout au long du chapitre.

Si l'on souhaitait atteindre cet objectif avec un « algorithme classique », il faudrait pouvoir retranscrire à la machine par langage de programmation l'ensemble des étapes qu'un humain utilise inconsciemment pour parvenir à reconnaitre un chat ou un chien, ce qui s'avère être une tâche excessivement complexe voire impossible. C'est donc ici qu'intervient la technique du « Machine Learning ».

c) *Les plusieurs sous-groupes d'apprentissage automatique*

Le « Machine Learning » est une grande famille qui regroupe plusieurs types d'algorithmes apprenant qui ne s'excluent pas et peuvent parfois se confondre (exemple : l'apprentissage profond est un modèle supervisé).



Tout d'abord, les algorithmes de « Machine Learning » apprennent à faire des prédictions à partir des données qui ont été introduites pour la phase de formation, en utilisant une approche supervisée ou non supervisée.

6. Apprentissage supervisé (« Supervised learning »)

C'est le modèle algorithmique le plus souvent utilisé en médecine.
Il consiste à entraîner un algorithme à partir d'un échantillon déjà classifié par l'humain, afin qu'il puisse apprendre à prédire des résultats sur des futures données qui seront cette fois non étiquetées (26,30).

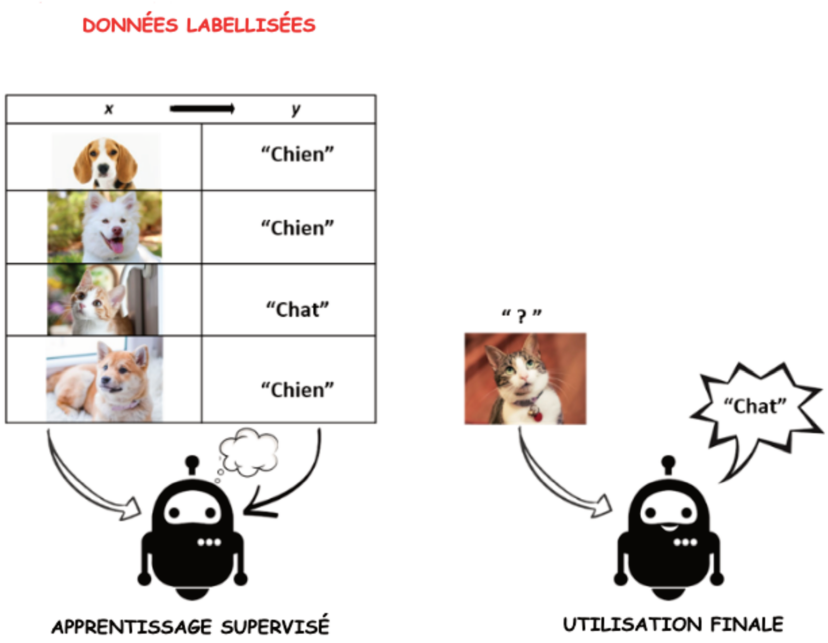
L'exemple de la reconnaissance d'image :

Imaginons que nous voulons construire un système qui puisse classer des images de façon binaire : chat ou chien.

- Lors de la phase d'apprentissage, un ensemble de données d'images est envoyé à l'algorithme, chacune ayant été labélisée par les humains dans une catégorie (d'où le terme supervisé) : chat ou chien.
- Une fois entraîné, l'algorithme est alors capable de classer lui-même de nouvelles images à partir de données cette fois non labélisées.

L'idée à retenir dans ce modèle, c'est l'apprentissage réalisé grâce à l'homme : c'est bien lui qui fournit à la machine des milliers de photographies qu'il a préalablement identifiées comme représentant des chats ou des chiens.

- On peut également choisir de lui apprendre les caractéristiques utilisées pour la reconnaissance (exemple nez, yeux, bouche) : c'est le « Machine Learning » supervisé dit « traditionnel ».
- A l'inverse, certains modèles supervisés n'ont quant à eux pas besoin des caractéristiques. L'algorithme les détermine par lui-même via des réseaux de neurones artificiels : c'est le « deep learning » (apprentissage profond).
  Nous reviendrons sur cette différence plus tard.



Par ailleurs, si le réseau est entraîné uniquement à reconnaitre des chats et des chiens, il ne sera pas en mesure d'étiqueter correctement l'image d'un autre animal qu'on lui présentera. Par exemple, si on présente à l'algorithme l'image d'une souris, ce dernier sortira deux probabilités, chacune exprimant le niveau de confiance avec lequel l'image appartient aux classes « chat » ou « chien ».

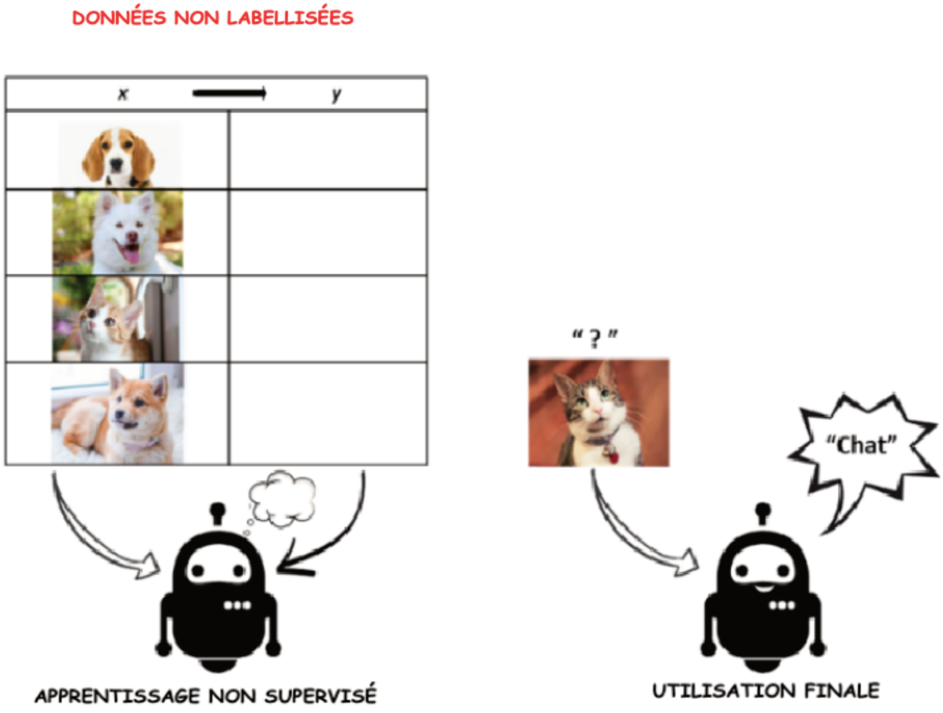
Ainsi, pour que l'algorithme intelligent reconnaisse également des images de souris, il faudra d'abord obtenir un grand nombre d'images de cet animal, puis ré-entraîner le modèle.

7. Apprentissage non supervisé (« Unsupervided learning »)

Dans ce modèle, l'apprentissage par la machine se fait de façon totalement autonome. Elle reçoit des données à interpréter qui n'ont pas été labélisées au préalable par les humains. (26,31)

L'exemple de la reconnaissance d'image :

- Lors de la phase d'apprentissage, les données brutes (chat ou chien) sont envoyées à la machine sans avoir été étiquetées en chat ou chien ;
- L'algorithme va donc devoir lui-même repérer les similitudes entre certaines données pour parvenir à les classer.

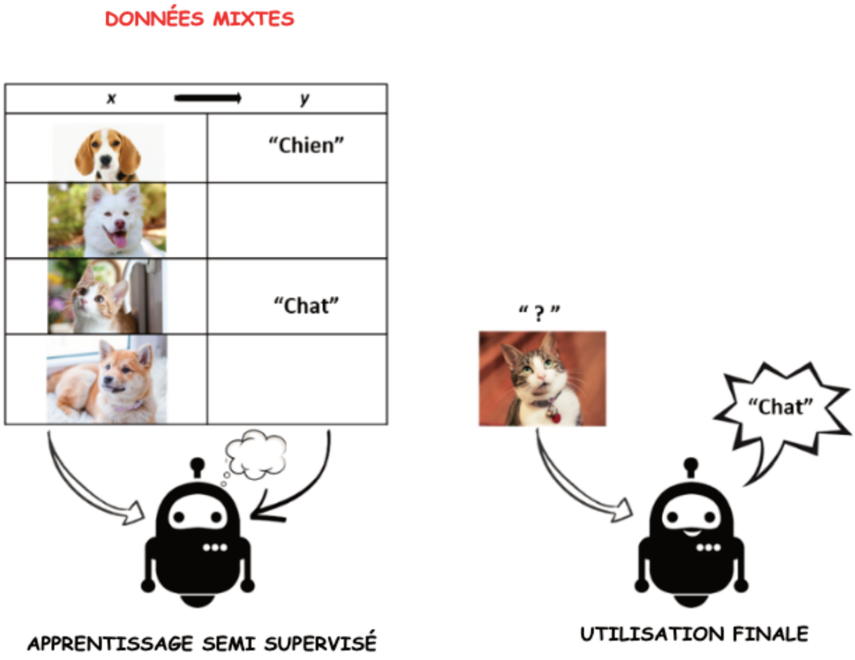


Exemple d'apprentissage non supervisé :

La recommandation de film sur Netflix, la recommandation de produits sur Amazon…

8. Apprentissage semi-supervisé (« Semi supervised learning »)

Ce modèle utilise des petites quantités de données étiquetées conjointement à une masse importante de données non-étiquetées.



9. Apprentissage par renforcement (« Reinforcement learning »)

Cette méthode d'apprentissage s'apparente à celle de l'être humain qui apprend de ses erreurs (quand on apprend à faire du vélo, on fait de l'apprentissage par renforcement).

Dans son apprentissage, la machine prend d'abord des décisions totalement aléatoires. Si elle échoue, elle est pénalisée. Si elle réussit, elle est récompensée.

Les règles qui déterminent si l'IA est punie ou récompensée sont définies par le développeur. Au fur et à mesure des récompenses, l'algorithme s'améliore.

Ce modèle présente l'avantage de laisser la machine interagir avec son environnement (19).

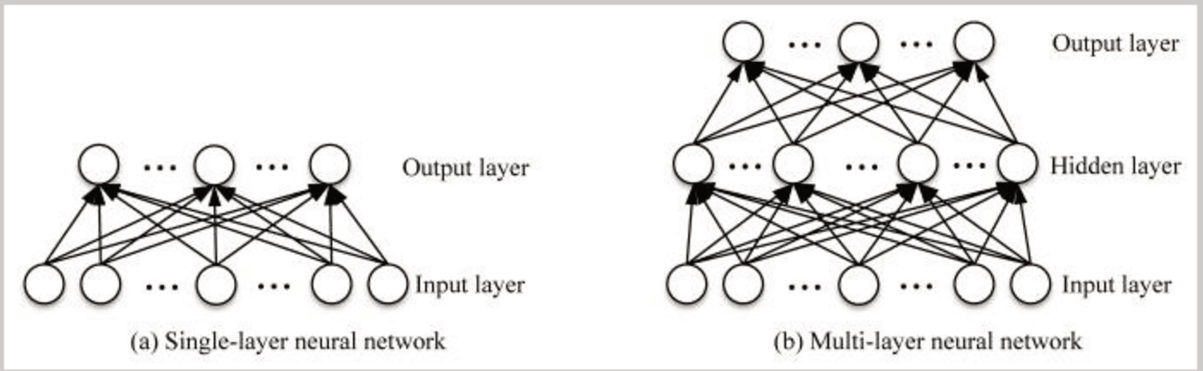
Exemple : jeu d'échec, jeu de go, poker…

10. Apprentissage profond (« Deep learning »)

L'apprentissage profond ou « deep learning » est un sous-domaine de l'apprentissage automatique (« machine learning ») qui utilise un modèle supervisé.

Il utilise un réseau de neurones artificiels. Ce modèle de calcul s'inspire de la structure des neurones du cortex visuel, où chaque neurone analysera une région spécifique de l'image, à l'instar des champs récepteurs de notre cortex (32).

L'utilisation du terme « profond » fait référence à l'architecture multicouches du réseau de neurones, qui contient plusieurs couches intermédiaires dites « couches cachées » (24).



Architectures de réseaux de neurones simple couche (a) et multi-couches (b) (33)

a) *Les réseaux de neurones artificiels*

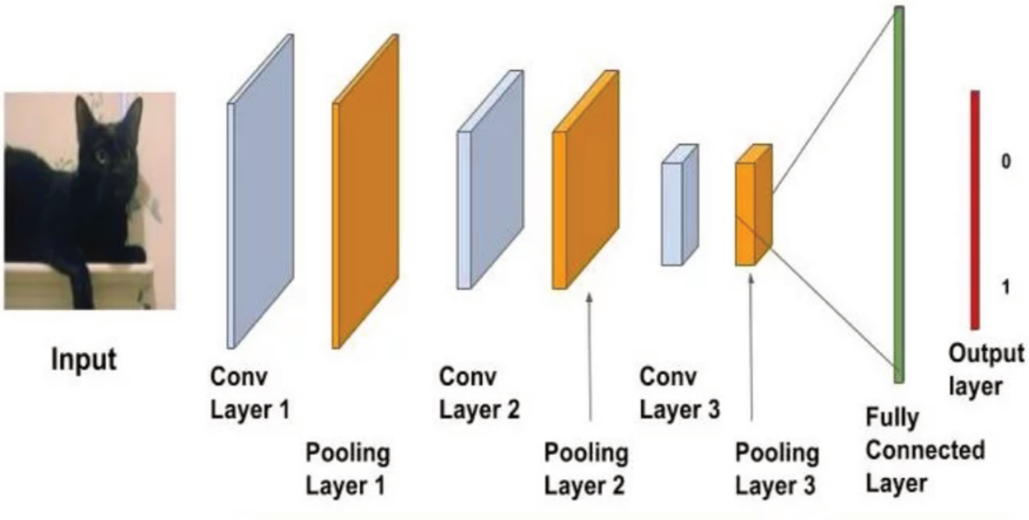
Les réseaux de neurones artificiels sont constitués de milliers de neurones capables d'effectuer des tâches complexes, c'est le modèle actuellement le plus efficace pour la reconnaissance d'image (34). C'est donc le principal modèle utilisé en ophtalmologie.

Un réseau peut être divisé en plusieurs couches, chaque couche successive du réseau utilise la sortie de la couche précédente comme entrée, la couche finale révélant le diagnostic (24).

(1) **Couche d'entrée** : l'image à analyser.

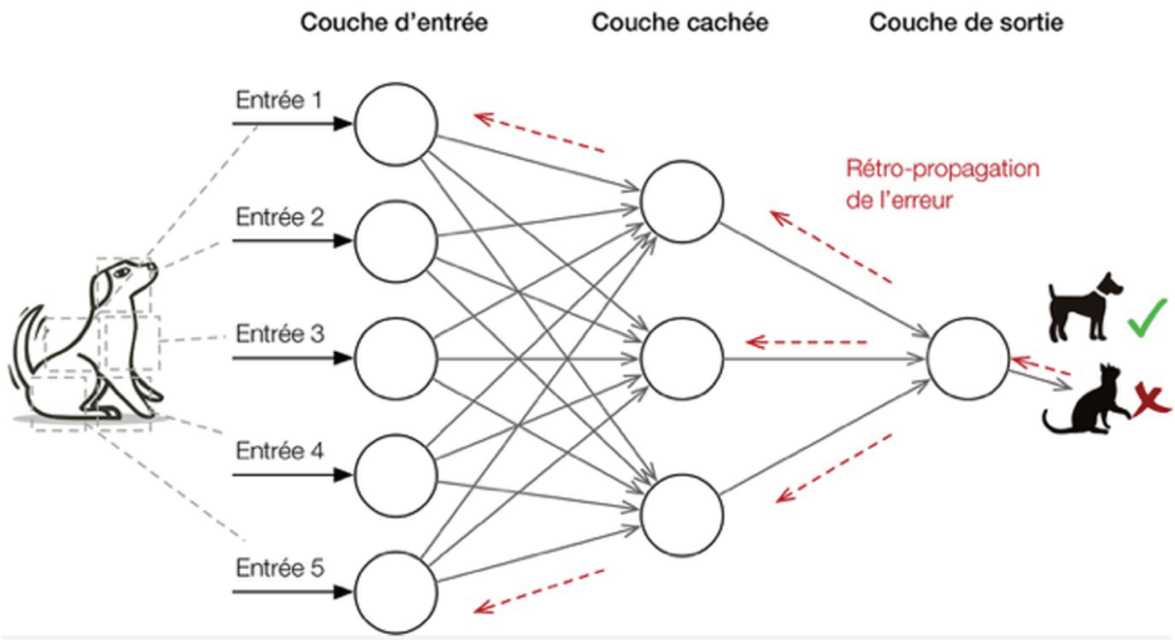
(2) **Couches intermédiaires** dites cachées, appelées ainsi car elles ne donnent pas une sortie visible, mais servent à extraire des caractéristiques utiles. Elles sont composées de 3 types de couches (35).

- ***La couche « convolutive*** » qui sert à extraire des caractéristiques de l'image grâce à une succession de filtres, utile pour permettre la future prédiction. Les premières couches vont détecter des caractéristiques simples (trait, courbe…). Les couches suivantes vont détecter des caractéristiques plus complexes en combinant les caractéristiques simples détectées par les premières couches (36).
- ***La couche de regroupement*** (« pooling layer »), conserve les caractéristiques trouvées par la couche convolutive, tout en réduisant la taille de l'image à analyser, permettant ainsi d'élargir le champ de vision du réseau et d'obtenir une relation spatiale entre les caractéristiques détectées au préalable. De plus, en réduisant l'image, le nombre de données traitées diminue et donc le temps de calcul sera lui aussi réduit.
- ***La couche multiconnectée***. Elle relie les neurones d'une couche à celle d'une autre.

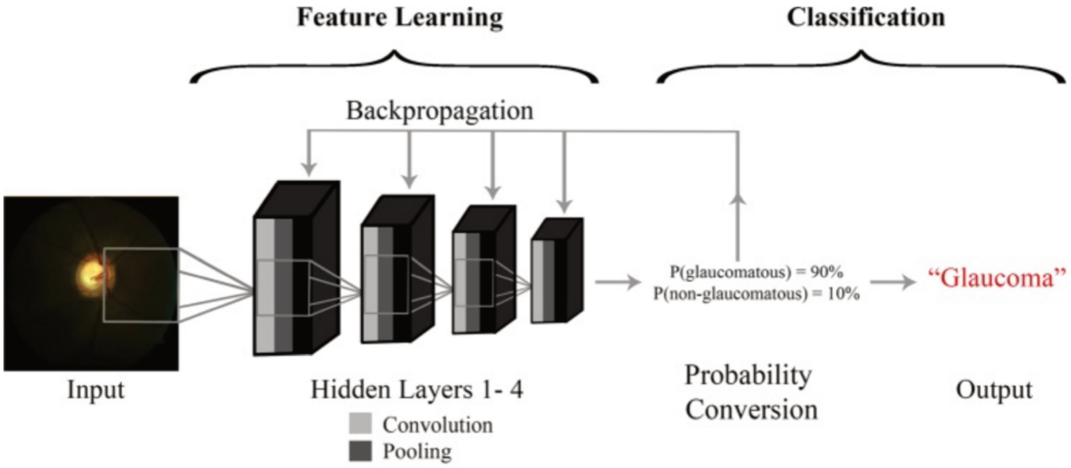


Architecture des couches cachées (37)

(3) Couche de sortie : c'est celle qui contient l'étiquette finale (exemple : chat ou chien)



Architecture d'un réseau de neurones artificiels appliqué à notre exemple chat / chien



Architecture d'un réseau de neurones artificiels appliqué au dépistage d'une papille suspecte de glaucome (27)

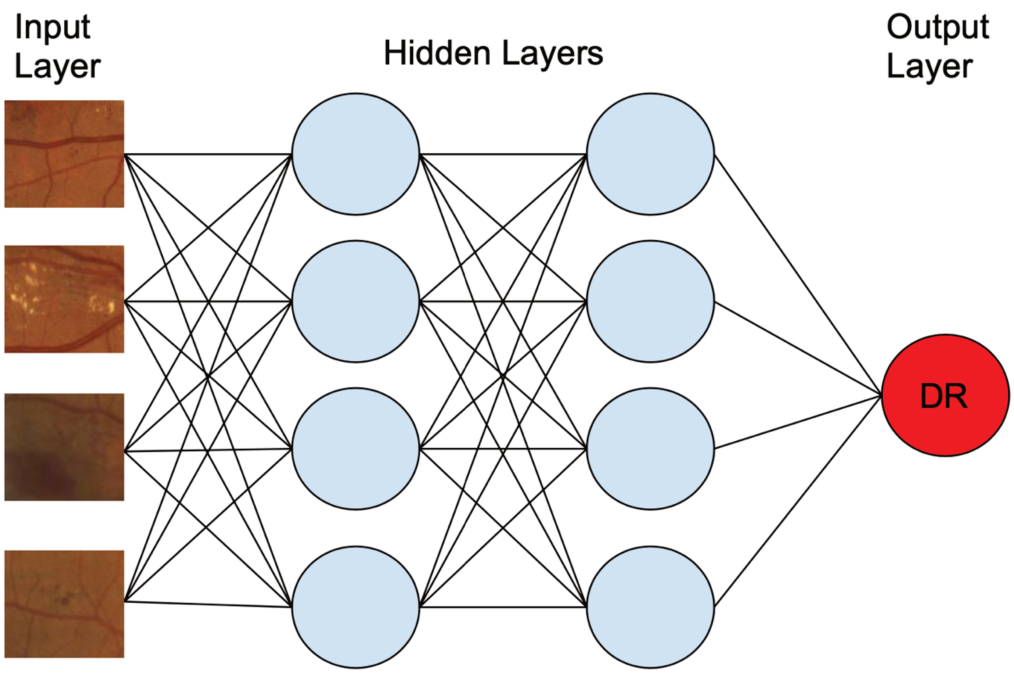
L'avantage de l'apprentissage automatique en profondeur, par rapport à l'apprentissage automatique traditionnel est que les couches profondes ne sont pas conçues par les ingénieurs humains. L'extraction des caractéristiques se fait donc de manière totalement indépendante (17,38,39).

Lors de la phase d'apprentissage, les paramètres sont progressivement ajustés par un processus d'optimisation appelés « descente de gradient » ou « rétropropagation », qui compare la prédiction de l'algorithme avec celle attendue réellement, pour évaluer le taux d'erreur. Ce processus est répété jusqu'à ce que le résultat du diagnostic soit finalement en accord avec une norme de référence (celle que les experts humains ont attribuée) (27,40).

b) Exemples d'algorithmes de deep learning en ophtalmologie

(1) Dépistage de la rétinopathie diabétique

L'humain doit envoyer dans une base de données des photographies étiquetées (rétinopathie diabétique / absence de rétinopathie diabétique) mais sans lui apprendre les caractéristiques d'une rétinopathie diabétique (hémorragies, exsudats, nodule cotonneux).
Les photographies traversent les différentes couches de réseaux de neurones artificiels, et l'algorithme finira par trouver lui-même les différentes caractéristiques qui vont lui permettre de classifier la photographie.



Graphique représentant la structure d'un réseau de neurones artificiels appliqué au dépistage de la rétinopathie diabétique à partir d'une photographie de fond d'œil (41).

(2) Dépistage du statut fumeur / non-fumeur

A partir d'une rétinophotographie, on aimerait savoir si le patient est fumeur ou non-fumeur. On envoie donc dans une base de données une multitude de rétinophotographies en précisant le statut du patient (fumeur ou non-fumeur).

Le deep learning crée ensuite un algorithme en utilisant des caractéristiques (inconnues par l'humain) qui vont lui permettre de tirer des conclusions sur des nouvelles photographies.

Actuellement les réseaux de neurones convolutifs utilisés dans le domaine de la reconnaissance d'images médicales comprennent AlexNet (42) ,VGG (43), ResNet (44) et GoogleNet (45).

11. Apprentissage par transfert (« Transfer learning »)

Le principe du « transfer learning » est simple, c'est un processus de réutilisation d'un modèle déjà en place, pour d'autres applications (46).
On utilise donc un réseau de neurones déjà entraîné pour une tâche précise afin de le spécialiser dans une nouvelle tâche apparentée.
Par exemple, on veut créer une IA pour le dépistage de la neuropathie optique glaucomateuse à partir d'une rétinophotographie. Pour identifier une hémorragie péri-papillaire, on peut réutiliser une IA qualifiée dans le dépistage de la rétinopathie diabétique car le modèle a déjà appris à repérer une hémorragie sur une rétinophotographie.
Cette approche peut également être utilisée pour se servir uniquement de certaines couches d'un réseau : par exemple, on utilise seulement les premières couches « convolutives » d'un système, qui sont susceptibles d'être universellement applicables, et on modifie les couches suivantes, qui seront plus spécifiques au domaine.
L'apprentissage par transfert évite donc une phase d'apprentissage longue avec de multiples données à envoyer. (35)
Ce modèle est particulièrement intéressant à l'heure où grand nombre d'algorithmes d'intelligence artificielle se sont spécialisés uniquement dans une seule tâche précise.

12. Différence entre apprentissage automatique « traditionnel » et apprentissage profond

On oppose souvent machine learning et deep learning. Mais en réalité, comme nous l'avons vu plus haut, le deep learning est simplement une sous-famille du machine learning, utilisant les réseaux de neurones artificiels (30).

L'opposition concerne en fait les algorithmes de machine learning « traditionnel » et les algorithmes de deep learning (47).

a) *L'algorithme d'apprentissage automatique traditionnel*

Il nécessite que les caractéristiques des données soient étiquetées en amont par les humains, pour que la machine puisse comprendre les différences entre les images, étudier la classification, puis tirer une conclusion. Une fois entrainé, l'algorithme est prêt pour être utilisé sur des nouvelles données et obtenir des résultats.

b) *L'algorithme d'apprentissage automatique en profondeur*

Il ne nécessite pas que les caractéristiques soient fournies. En effet, elles vont être retrouvées de manière totalement indépendante par les couches profondes du réseau de neurones, qui rappelons-le, ne sont pas conçues par les ingénieurs humains.

L'un des principaux avantages des réseaux de neurones est que leurs performances s'améliorent continuellement au fur et à mesure que le volume des données d'entrainement augmente, contrairement aux performances des algorithmes d'apprentissage automatique traditionnel qui ont tendance à se saturer avec la quantité de données (46).

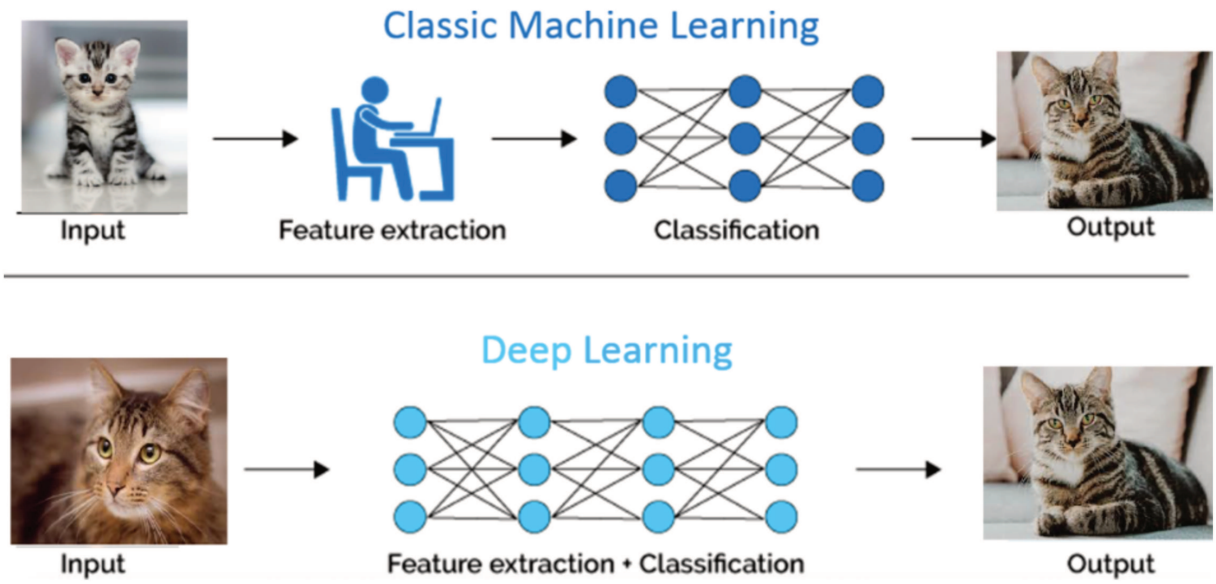
Par contre, les réseaux de neurones profonds fonctionnent de manière opaque, et il est parfois difficile pour l'expert humain de comprendre quelles caractéristiques a utilisées l'algorithme pour parvenir à ses conclusions : c'est le phénomène de la « boite noire ». En outre**,** bien qu'il soit tout à fait possible que l'algorithme utilise les mêmes caractéristiques cliniques que nous pour classer les pathologies, il est tout aussi probable qu'il développe sa propre méthode diagnostique, utilisant des caractéristiques encore non identifiées pour parvenir à des performances égales ou supérieures aux nôtres. Élucider et interpréter les moyens qu'utilise l'algorithme ouvre la porte à de nombreuses possibilités de recherches.

c) *Exemples :*

Pour mieux comprendre cette différence nous utiliserons les 3 exemples déjà sus-cités.

(1) Exemple pour la distinction chat / chien

	Machine learning « traditionnel »	Deep learning
Entrée = base de données avec des photos classées : chat ou chien.	OUI	
Enseignement des caractéristiques d'un chat ou d'un chien (oreilles, nez, bouche, yeux) au logiciel.	**OUI**	**NON : l'algorithme apprend lui-même les caractéristiques**
Sortie = **classification**	Chat ou chien	



(2) Exemple pour la rétinopathie diabétique

	Machine learning « traditionnel »	Deep learning
Entrée = base de données avec des photos classées : présence ou absence de rétinopathie diabétique.	OUI	
Enseignement des caractéristiques cliniques d'une rétinopathie diabétique (hémorragies, exsudats...) au logiciel.	**OUI**	**NON : l'algorithme apprend lui-même les caractéristiques**
Sortie = **classification.**	Présence ou absence de rétinopathie diabétique	

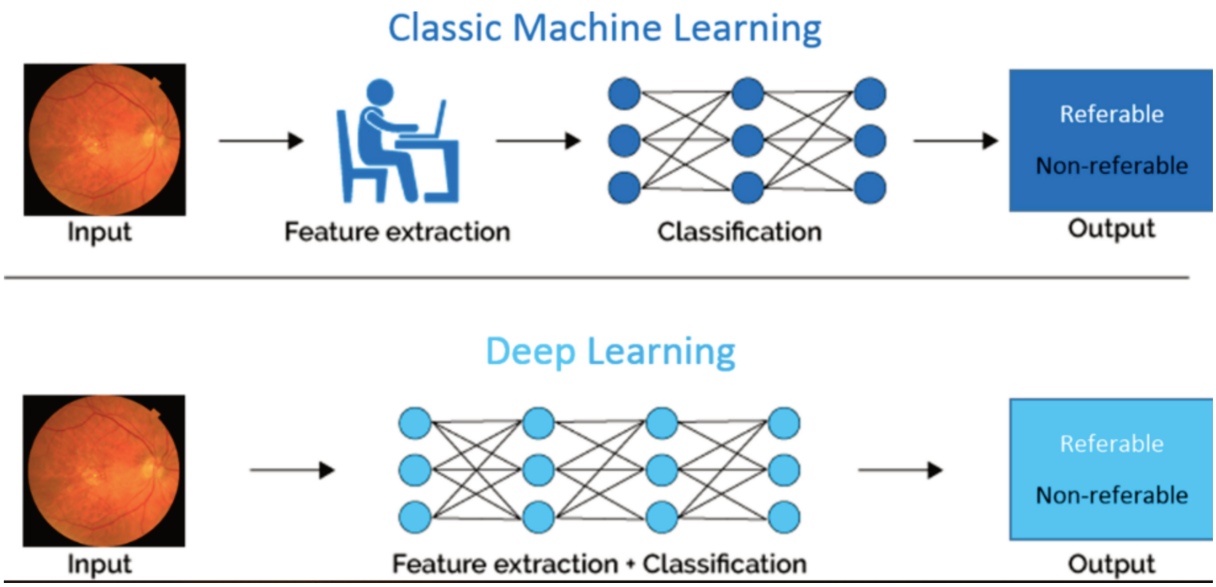


Illustration de la différence entre le machine learning classique et le deep learning (46)

(3) Exemple pour le statut fumeur

	Machine learning « traditionnel »	Deep learning
Entrée = base de données avec des photos classées : fumeur ou non-fumeur	OUI	
Enseignement des caractéristiques cliniques d'un fumeur au logiciel	IMPOSSIBLE CAR CARACTERISQUES INCONNUES DES HUMAINS	**INCONNUES mais l'algorithme apprend lui-même les caractéristiques**
Sortie = diagnostic	IMPOSSIBLE	Fumeur ou non-fumeur

Ce dernier exemple illustre bien les possibilités nouvelles que nous offre le deep learning. En effet, avec un modèle machine learning traditionnel, il aurait été impossible de procéder à une telle expertise, puisque l'ophtalmologiste ne connait pas les caractéristiques cliniques permettant de distinguer un fumeur d'un non-fumeur.

13. L'importance de la qualité des données pour l'apprentissage de l'algorithme.

Dans les algorithmes supervisés, si les données sont peu nombreuses ou de mauvaises qualités, les résultats le seront aussi.

Exemple :

Si on entraine un algorithme à reconnaitre des chats dans une image, si lors de la phase d'apprentissage on ne lui propose que des chats blancs, il ne pourra pas reconnaitre des chats noirs.

Si on entraine un algorithme à reconnaitre des moutons dans une image, il faut faire attention à bien encadrer le mouton dans celle-ci.

14. Évaluation de la performance de l'algorithme

a) La courbe ROC (« receiver operating characteristic ») (48).

Pour qu'un test soit fiable, la sensibilité (Se) et la spécificité (Sp) doivent être élevées.

Toutefois, ne rapporter la valeur de ces probabilités que pour un unique seuil risque de conduire à une interprétation qui n'est pas le reflet de la réalité, et pouvant être très loin de la performance réelle du test diagnostique. En effet, un test ne possède pas qu'une seule valeur de Se et de Sp.

L'analyse d'une courbe ROC fournit une image complète de la performance du test, examinée pour tout l'éventail des seuils de décisions possibles.

Elle trace le taux de vrais positifs (TVP) en fonction du taux de faux positifs (TFP)

Taux de vrais positifs = sensibilité = VP / (VP + FN)

Taux de faux positifs = 1-spécifité = FP / (FP + VN)

La figure ci-dessous représente une courbe ROC classique.

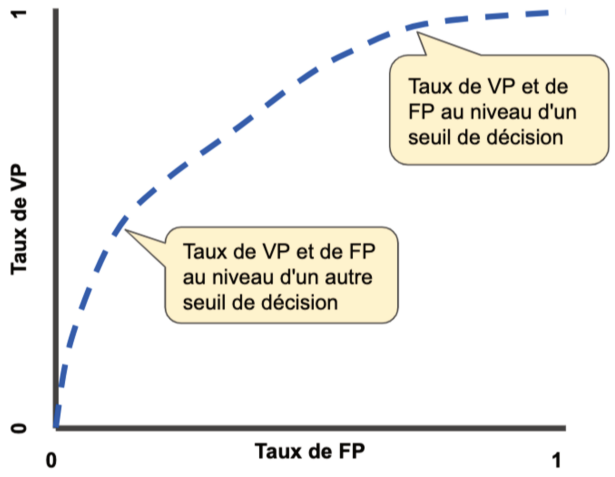


Figure 4 : Taux de VP et de FP pour différents seuils de classification

b) *Aire sous la courbe ROC (AUC) (48).*

L'aire sous la courbe est la mesure la plus utilisée pour l'évaluation d'un modèle répondant à une question binaire dans l'intelligence artificielle.
Elle traduit l'aptitude de l'algorithme à mettre en évidence les anomalies.
Les valeurs d'AUC sont comprises dans une plage de 0,5 à 1. Un modèle dont 100 % des prédictions sont erronées a un AUC de 0,5. A l'inverse, si toutes ses prédictions sont correctes, son AUC est de 1,0.

15. Les étapes nécessaires à la construction d'un algorithme robuste d'intelligence artificielle :

a) Identifier le besoin clinique.

b) Sélectionner une large base de données grâce aux « big data » pour l'apprentissage et la validation de l'algorithme. Il est indispensable de noter toutes les caractéristiques des patients (âge, ethnie, sexe…), et le matériel utilisé (exemple marque du rétinophotographe, taille du champ, l'utilisation ou non de mydriatique, etc).

c) Sélectionner l'indicateur de performance. Le plus utilisé est l'aire sous la courbe (Se/1-Sp). Il est nécessaire que la Se ou la Sp souhaitée soit définie au préalable, afin d'entraîner l'algorithme jusqu'à ce que ce seuil soit atteint. A ce moment-là, l'entrainement peut cesser.

d) Sélectionner le réseau de neurones convolutifs.

e) Utiliser la rétropropagation (« descente de gradient ») pour améliorer la performance du système.

f) Utiliser les cartographies thermiques afin de s'affranchir des « boîtes noires », cela permet aux cliniciens de comprendre comment l'algorithme fonctionne pour extraire les caractéristiques nécessaires à la prédiction finale.

g) Évaluer la performance de l'algorithme sur des données extérieures, indépendantes, multicentriques, avec une population multiethnique, des rétinophotographes différents, etc… afin de pouvoir valider son implication dans la « vraie vie » (34).

E. Application en ophtalmologie

1. Généralités

a) *Un engouement croissant*

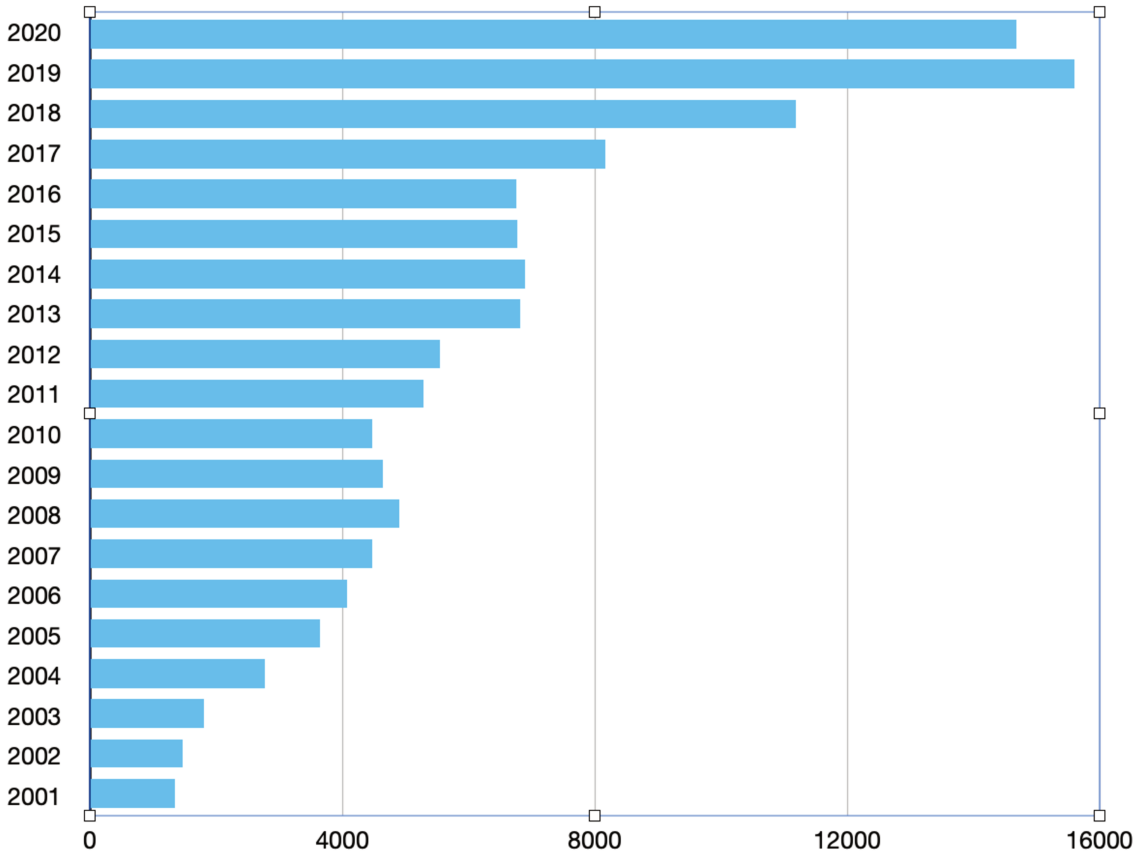
La médecine moderne repose énormément sur les apports de l'imagerie, qu'ils s'agissent d'examens purement radiologiques ou propres à chaque spécialité. Or, des études établissent la supériorité de l'IA face aux humains dans la reconnaissance d'image.

En radiologie par exemple, les algorithmes intelligents se révèlent efficaces pour détecter la tuberculose pulmonaire à partir de radiographies thoraciques (49). Concernant le dépistage du cancer du sein par mammographie, la précision diagnostique d'un système d'algorithmes d'apprentissage profond s'est révélée comparable à celle des radiologues expérimentés (50).

En dermatologie, des algorithmes ont été développés pour distinguer les signes de mélanome devant des photographies de lésions cutanées, avec une efficacité comparable à un groupe d'experts de 21 dermatologues (51).

En ophtalmologie, les études se sont majoritairement concentrées sur les trois principales causes de cécité dans le monde occidental que sont la rétinopathie diabétique, le glaucome chronique et la dégénérescence maculaire liée à l'âge. Le dépistage précoce de ces pathologies au départ asymptomatiques est donc un enjeu de santé publique.

L'IA suscite dès lors un engouement légitime au sein de la communauté scientifique qui se traduit par une croissance exponentielle des publications à ce sujet. Comme l'illustre le graphique ci-dessous, le nombre d'articles publiés par année concernant l'intelligence artificielle a été multiplié par 10 en 20 ans.



Graphique représentant le nombre de publications annuelles retrouvées sur Pubmed en utilisant comme mot-clé « artificial intelligence » (52).

b) Les applications de l'IA en médecine (36,53)

Le domaine de compétence de l'IA en médecine est très large, elle comprend entre autres :

- La prédiction d'une maladie et/ ou de son évolution
- La recommandation de traitement personnalisé
- L'aide à la décision diagnostique et thérapeutique
- La chirurgie assistée par ordinateur

The applications of AI techniques in the eye clinic

c) *Des algorithmes déjà commercialisés dans le monde (36).*

La Food Drug Administration (FDA) Américaine a déjà commercialisé des dispositifs utilisant l'IA. D'ailleurs, le premier fut IDX-XR en 2018, permettant le dépistage de la rétinopathie diabétique.

AI products	Production companies	Applications
Kardia App	Kardia Band, Alive Cor, United States	Clinical grade wearable electrocardiogram in Apple Watch
The WAVE Clinical Platform	Excel Medical Electronics, United States	Patient surveillance and predictive algorithm platform
Embrace Watch	Embrace, United States	The smartwatch that uses sensors to measure stress and predict seizures
Viz LVO	Viz.AI, United States	Automatic detection of large vessel occlusion in suspected stroke patients
Cognoa App	Cognoa, United States	An app based on ML that can help clinicians diagnose autism rapidly
Guardian Connect	Medtronic, United States	The continuous glucose monitoring system for people on multiple daily insulin injections
IDx-DR	IDx, United States	To automatic diagnose DR before it causes blindness
OsteoDetect	Imagen Technologies, United States	A type of computer-aided detection and diagnosis software designed to detect wrist fractures in patients
DreaMed Advisor Pro	DreaMed Diabetes, Petah Tikvah, Israel	Automated insulin pump setting adjustments in patients with type 1 diabetes
Viz CTP	Viz.AI, United States	A software package to perform image processing and analysis of CT perfusion scans of the brain

FDA = U.S. food and drug administration; *DR* = diabetic retinopathy; *CT* = computer tomographic; *ML* = machine learning

Dispositifs médicaux utilisant l'IA approuvés par la FDA (36)

2. La Rétinopathie diabétique

a) L'enjeu du dépistage

Le diabète est une pathologie chronique responsable d'une morbi-mortalité importante. En 2019, 415 millions de personnes dans le monde en souffraient, dont 170 millions présentaient une rétinopathie diabétique.
Cette année-là, les dépenses de santé mondiales pour cette pathologie étaient estimées à 760 milliards de dollars (51).
Ceci est d'autant plus préoccupant que d'ici 2045, le nombre de diabétiques dans le monde atteindrait 700 millions. (54).

La nécessité d'un dépistage précoce de la rétinopathie diabétique est bien entendu indiscutable, mais nous conviendrons qu'en raison du volume de patients concernés, rapporté au peu d'ophtalmologistes disponibles, celui-ci n'est pas toujours réalisé comme il le devrait.

Les programmes automatisés représentent une innovation prometteuse pour élargir l'offre de soins en soulageant les ophtalmologistes et en répartissant plus justement l'accès au dépistage.

b) Aux États-Unis

En 2016, Google via sa branche DeepMind a développé un algorithme intelligent pour dépister la rétinopathie diabétique à partir de rétinophotographies (55).
Pour son apprentissage, 128 175 photographies rétiniennes ont été utilisées, provenant des données de EYE PACS aux États-Unis et de 3 hôpitaux indiens. Elles ont été classées par 54 ophtalmologistes.
Pour sa validation, les auteurs ont utilisé des rétinophotographies provenant de deux bases de données différentes : EYE PACS (9963 images) et MESSIDOR 2 (1748 images).
Les résultats retrouvent une aire sous la courbe de 0,991, une sensibilité de 97,5 % et une spécificité de 93,4% pour EYE PACS. Pour MESSIDOR 2, l'aire sous la courbe est de 0,990, la sensibilité de 96,1 % et la spécificité de 93,9 %.

Les résultats sont tout à fait acceptables pour un test de dépistage puisque les auteurs concluent respectivement à une valeur prédictive négative (probabilité que la personne soit indemne si le test est négatif) de 99,8% et 99,6%.
A noter que la performance du test n'était pas modifiée par l'état de dilatation du patient.

Il est aussi intéressant de comprendre ici que cet algorithme est formaté pour réaliser une classification binaire, décidée en amont par les ophtalmologistes, avec formation de deux groupes. Il est donc possible de modifier cette classification pour rechercher un paramètre particulier.
Par exemple, cette étude classe initialement les photos en deux groupes selon la nécessité de voir un ophtalmologiste (RD modérée, sévère et œdème maculaire) ou pas (RD minime ou absente).
Il est possible de modifier les paramètres et de demander à l'algorithme de classifier par exemple : présence ou absence d'œdème maculaire. Ceci modifie la sensibilité et la spécificité du test à chaque fois.
Un élément à élucider reste la façon dont l'algorithme procède : l'homme ne lui apprend pas les signes cliniques directement (exemple micro-anévrismes, hémorragies, nodule cotonneux), il lui fournit simplement les résultats finaux lors de la phase d'apprentissage (absence de diabète, rétinopathie diabétique modérée, sévère, etc). Il est donc probable que la machine utilise des caractéristiques inconnues ou ignorées par l'humain pour arriver à ces résultats.

Ainsi, cette étude montre les performances très prometteuses des algorithmes intelligents pour le dépistage d'une pathologie, mais gardons en tête que ces modèles peuvent analyser uniquement les données fournies et apprises par l'homme. Dans notre exemple, l'IA pourra certes dépister une rétinopathie diabétique avec une grande précision, mais si elle n'a pas été programmée pour dépister des papilles pathologiques, elle classera « normale » une photo de patient indemne de rétinopathie diabétique mais avec une excavation papillaire à 0,9.
Nous verrons toutefois qu'il existe des algorithmes conçus pour dépister plusieurs pathologies à la fois.

Pour la toute première fois, en avril 2018, la Food and Drug Administration (FDA) a autorisé l'utilisation d'un logiciel d'intelligence artificielle sans supervision par un médecin (56).
Il s'agit d'IDx-DR, conçu par Abramoff et son équipe (21) pour le dépistage automatisé de la rétinopathie diabétique.
Les rétinophotographies sont envoyées vers une base de données qui contient un algorithme d'IA. Si le programme détecte une RD, il invite le patient à consulter l'ophtalmologiste. Si le résultat est négatif, il propose un contrôle à un an.
Le modèle a d'abord été entrainé avec 1 748 photographies rétiniennes issues de l'ensemble des données MESSIDOR-2. Il a ensuite été évalué à l'aide de 819 rétinophotographies issues de 10 sites différents, avec une sensibilité de 87,2% et une spécificité de 90,7%.
En Europe, l'Autriche et les Pays-Bas utilisent déjà le logiciel.

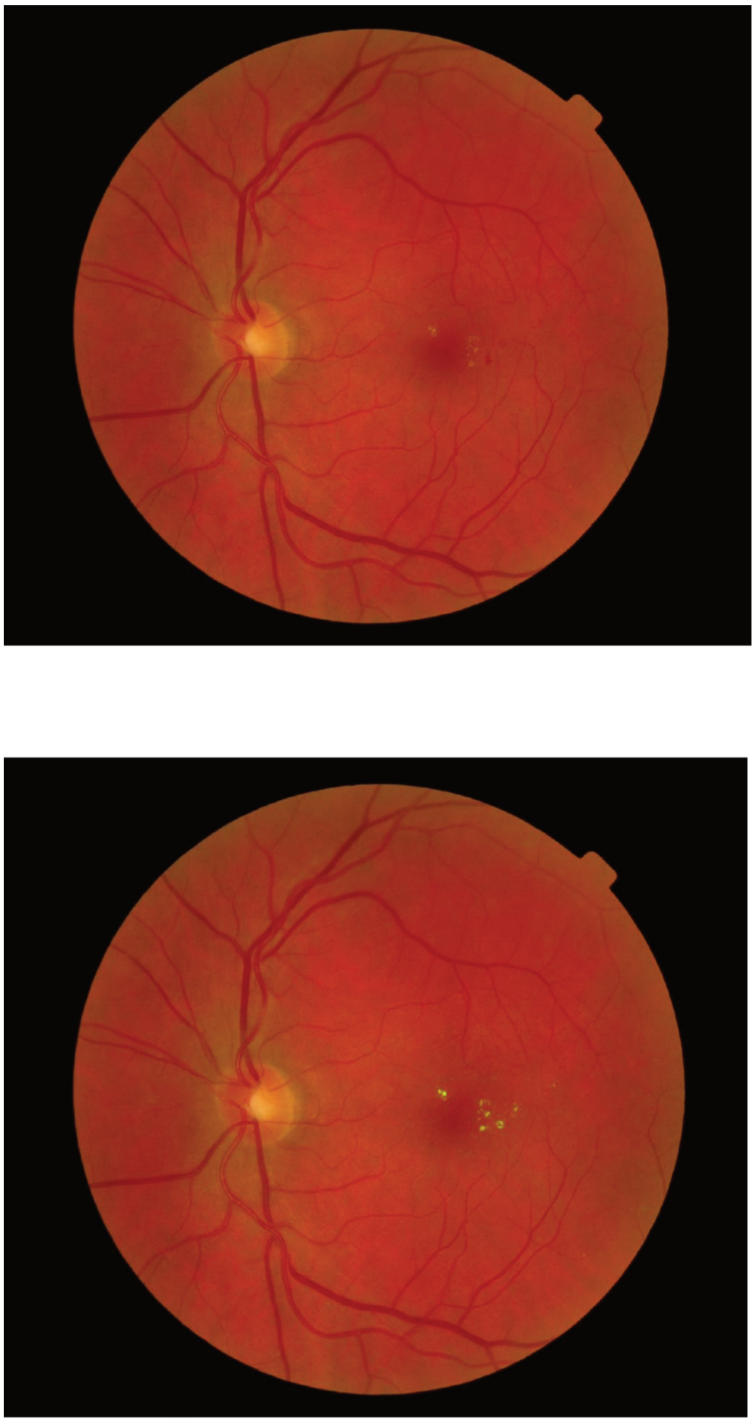
c) <u>En France</u>

OphtAI© (branche de la société française Evolucare) a mis au point un algorithme d'apprentissage profond pour le dépistage automatisé de la rétinopathie diabétique nécessitant une prise en charge par l'ophtalmologiste, définie dans l'étude dès le stade de RD non proliférante modérée (57).

Le système a été développé et validé à l'aide de 763 848 images provenant du programme de dépistage OPHDIAT. Les données publiques MESSIDOR-2 ont aussi été utilisées pour sa validation afin de comparer cet algorithme à IDx-DR.

OphtAI a obtenu une aire sous la courbe ROC de 0,989, supérieure à celle d'IDx-DR (0,980). Par ailleurs, pour une même spécificité, la sensibilité d'OphtAI s'est avérée meilleure.

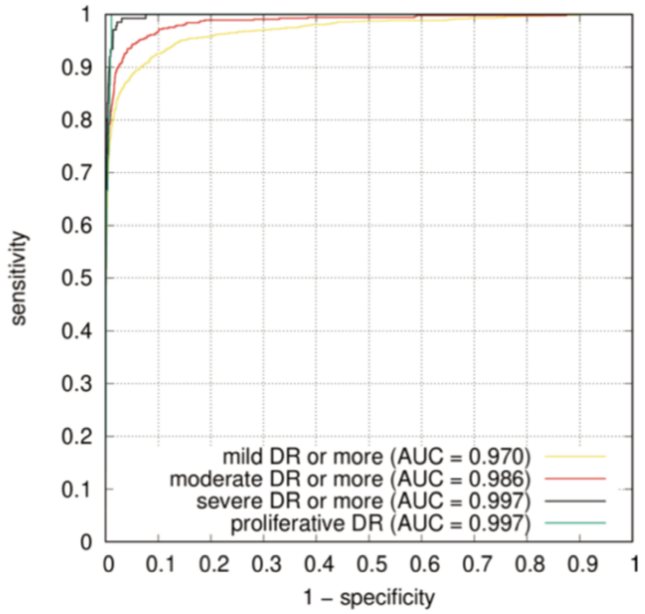
Le traitement de l'image prend moins de deux secondes et les résultats sont documentés par des cartes thermiques.



Exemple d'une cartographie thermique visualisant les anomalies dépistées par l'algorithme d'après (57)

Un autre avantage d'OphtAI© est qu'il classe la RD selon sa sévérité avec des résultats d'autant plus performants que la RD est sévère.

Fig. 4. *Receiver-operating characteristics for the DR severity assessment AI in the OPHDIAT© test set*



d) *Ailleurs dans le monde*

Un autre algorithme très intéressant est celui développé par l'équipe du docteur Ting à Singapour. Bien que celui-ci ait une AUC un peu moins bonne qu'OphtAI© (0,958), il présente les avantages de dépister plusieurs pathologies (glaucome et DMLA) et d'avoir été évalué dans une population multiethnique (58).

Une équipe indienne (59) a récemment conçu un outil intelligent pour le dépistage de la rétinopathie diabétique avec de très bons résultats. L'algorithme présente l'avantage d'avoir été entrainé sur une population multiethnique, et d'annoter les lésions qu'il détecte.

Rétinophotographie d'une rétinopathie diabétique avec annotation des lésions par l'algorithme (59)

3. Dégénérescence maculaire liée à l'âge

La dégénérescence maculaire liée à l'âge est la principale cause de malvoyance chez les sujets âgés dans les pays développés. Dans le monde en 2020, le nombre de personnes atteintes de cette maladie est estimé à 196 millions et devrait atteindre 288 millions d'ici 2040 (60).

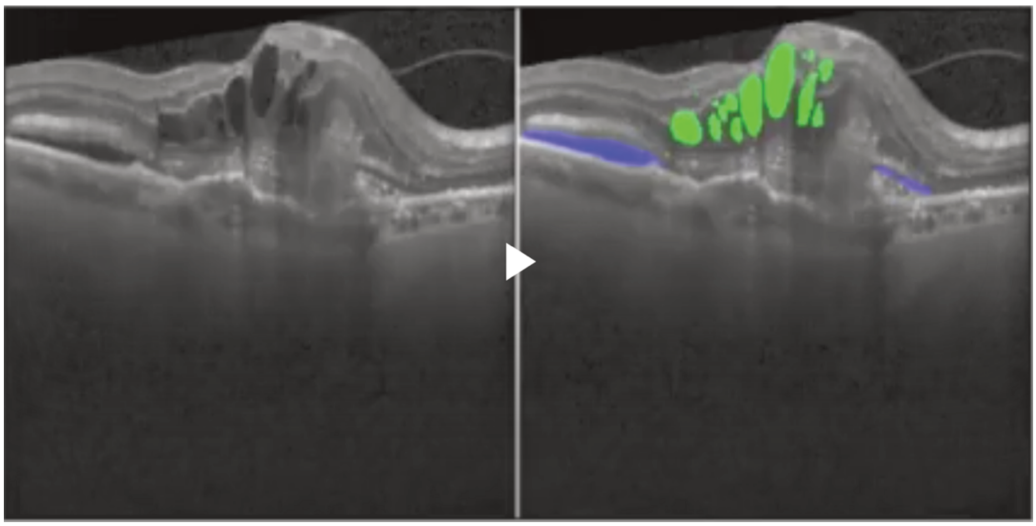
Cette augmentation attendue s'explique par le vieillissement de la population. Tout comme pour le diabète, elle risque de se confronter aux difficultés démographiques liées au manque d'ophtalmologistes.

En effet, dans les zones sous médicalisées, la néovascularisation choroidienne est diagnostiquée et donc traitée plus tardivement, entraînant une perte de chances pour les patients concernés.

Par ailleurs, cette pathologie chronique nécessite des contrôles réguliers. Les allers-retours récurrents en consultation ou en injection posent parfois un problème de logistique pour les patients et leur entourage avec un risque d'abandon de suivi.
Enfin, le coût de la prise en charge des transports de ces patients est tout à fait considérable.
Ainsi, l'utilisation des nouvelles technologies, comme la télémédecine associée aux algorithmes intelligents, pourrait soulager d'une part les médecins en allégeant les consultations et surtout les patients parfois grabataires à qui on éviterait un déplacement (61).

a) Identifier l'exsudation intra et sous-rétinienne

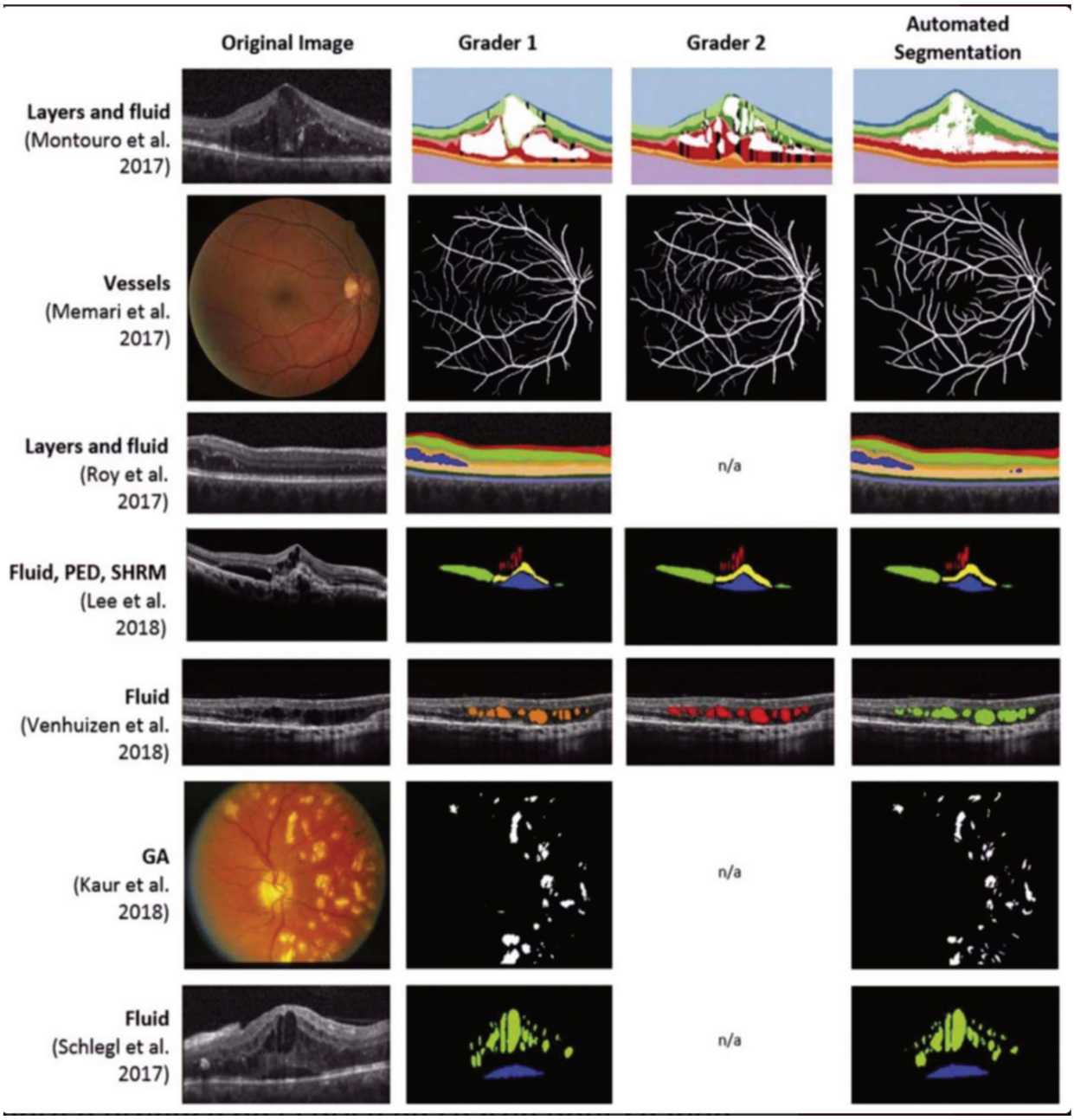
Une équipe a mis au point un algorithme intelligent capable de dépister, quantifier et segmenter les différents types de liquide intra-rétinien dans les pathologies maculaires exsudatives telles que l'occlusion veineuse rétinienne, l'œdème maculaire diabétique et la néovascularisation choroïdienne dans la DMLA (62).
Les résultats montrent une précision optimale pour les 3 pathologies maculaires dans la détection et la quantification des logettes cystoïdes avec une aire sous la courbe de 0,94 et de 0,92 pour le décollement sous rétinien.



A gauche : OCT d'un cas de néovaisseaux choroidiens de type 2 d'une DMLA (acquisition avec un dispositif Heidelberg Spectralis).
A droite : segmentations des fluides intra-rétiniens (vert) et sous-rétiniens (bleu) par l'intelligence artificielle (62).

Une équipe israélienne (63) a développé un logiciel automatisé appelé NOTAL, capable de repérer les signes d'activité des patients atteints de DMLA néovasculaire à partir d'images OCT.
L'algorithme a obtenu une valeur prédictive positive de 91% pour détecter les signes exsudatifs. En comparaison, 3 rétinologues ont analysé la même base de données et ont obtenu une valeur prédictive positive moyenne de 93%.
La société NOTAL a également reçu l'accord de la FDA pour commercialiser un appareil OCT portable permettant un suivi à domicile, qui, couplé à l'intelligence artificielle, permet de surveiller le patient et de l'adresser à son ophtalmologiste en cas de détection d'une exsudation.

L'équipe de Prahs (64) a formé un réseau de neurones artificiels, « GoogleNet » pour prédire l'indication du traitement par anti VEGF à partir d'images OCT. Son algorithme a obtenu une valeur prédictive positive de 95,5%, une sensibilité de 90,1% et une spécificité de 96,2% sur l'ensemble des données de validation.



Revue des progrès récents dans la segmentation des liquides intra et sous rétiniens en OCT, montrant des performances comparables entre les humains et les algorithmes d'apprentissage automatique (46)

b) *Prédire l'évolution de la DMLA avec l'intelligence artificielle*

Comprendre et prédire l'évolution d'une maculopathie liée à l'âge au stade asymptomatique vers une DMLA exsudative ou atrophique permettrait un suivi individualisé et de qualité.

L'étude AREDS (Age-Related Eye Disease Study) évalue le risque de développer une DMLA à 5 ans en fonction des anomalies du fond d'œil (drusens sereux > 125 um et migrations pigmentaires) avec un risque allant de 0,5% (stade 0) à 50% (stade 4) mais ce score s'avère peu utilisé au quotidien.

Les logiciels d'IA suscitent donc un intérêt particulier puisqu'ils pourraient nous permettre d'identifier les facteurs de risque avec plus de précision et ainsi d'améliorer la prise en charge des patients concernés.

Certaines équipes ont évalué le potentiel de l'IA dans cette indication à partir de rétinophotographies avec des résultats prometteurs (65,66).

Nous détaillerons ici l'étude menée par l'équipe de Waldstein (67) qui utilise cette fois les paramètres OCT pour évaluer l'évolution d'une MLA vers une DMLA atrophique ou exsudative en fonction de la distribution et de l'épaisseur des drusens et des foci hyper réflectifs (traduction OCT de la migration pigmentaire du fond d'œil).

Les auteurs ont utilisé comme base de données les yeux adelphes des 1097 patients constituant l'étude HARBOR (comparant les injections intra vitréenne mensuelles versus pro-renata de ranibizumab dans la DMLA néovasculaire sur 24 mois).
Cela a permis d'obtenir 518 yeux au stade de MLA dont les OCT ont été analysés et qui ont évolué de la façon suivante :
- groupe 1 : 135 yeux ayant évolué vers une DMLA néovasculaire ;
- groupe 2 : 50 yeux ayant évolué vers une DMLA atrophique ;
- groupe 3 : 333 yeux étant restés au stade initial de MLA.

L'algorithme intelligent a segmenté de façon automatisée les drusens et les foci hyper réflectifs, permettant un calcul de leur épaisseur, de leur volume total et de leur topographie.

- *Concernant leur épaisseur et leur localisation* :
  - Les résultats montrent que l'épaisseur des drusens au niveau fovéal était plus importante dans le groupe 1 (29,6um) que dans les 2 autres groupes (17,2 dans le groupe 2 et 17,1 dans le groupe 3) ;
  - L'épaisseur des FH au niveau fovéal était quant à elle plus importante dans le groupe 2 (0,23 um) que dans le premier (0,16 um) et le troisième groupe (0,08 um).

- *Concernant leur volume total :*
  - Dans les 3 groupes, le volume des drusens augmentait au cours du temps, mais de façon plus importante dans le groupe 1 (2,1 × 106 µm3 par mois) que le groupe 2 (0,7 × 106 µm3 par mois) ou 3 (0,6 × 106 µm3 par mois) ;
  - L'évolution du volume de FH n'était pas aussi marquée, mais elle semblait également plus importante dans le premier groupe.

Enfin, les auteurs ont comparé les aires sous les courbes ROC (AUC) des différents paramètres pour prédire l'évolution vers une forme ou l'autre.

- *Pour l'évolution vers une DMLA néovasculaire :*
  - L'AUC maximale obtenue était de 0,66 avec l'épaisseur des drusens dans la zone fovéale.
- *Pour l'évolution vers une DMLA atrophique :*
  - L'AUC maximale obtenue était de 0,73 avec l'épaisseur des FH dans la zone fovéale.

Les valeurs des AUC ne permettent pas une extrapolation à la pratique clinique mais l'étude a le mérite d'illustrer le potentiel que peut avoir l'IA dans le suivi et l'évolution des pathologies rétiniennes chroniques. Par ailleurs, si d'autres études obtiennent des résultats plus concluants, cela nous permettrait aussi de mieux comprendre l'évolution de cette pathologie vers l'une ou l'autre forme.

4. Glaucome

Le glaucome est une neuropathie optique chronique progressive de l'adulte potentiellement cécitante. On estime à 80 millions le nombre de sujets atteints en 2020 dans le monde (68). Ce chiffre devrait atteindre les 112 millions en 2040 (69).

Sa prise en charge présente des difficultés particulières puisque d'une part cette pathologie est asymptomatique jusqu'à un stade tardif, (27) et d'autre part les atteintes sont irréversibles. Etablir un diagnostic fiable mais précoce constitue tout l'enjeu de cette maladie pour les ophtalmologistes.

L'imagerie est devenue indispensable pour parvenir au diagnostic de glaucome et l'IA pourrait donc facilement trouver sa place dans cette indication à travers les analyses des photographies du fond d'œil, couplées ou non à celles des OCT.

a) Dépister une papille suspecte à partir d'une rétinophotographie

Bien que le diagnostic du glaucome soit basé sur un faisceau d'arguments cliniques et paracliniques, l'aspect de la tête du nerf optique est très informatif et constitue très souvent un des premiers signes amenant à réaliser un bilan complémentaire.
Ainsi, la détection automatisée de papille suspecte par un algorithme intelligent à partir de rétinophotographies pourrait constituer une forme de « dépistage de masse » et pallier un manque d'ophtalmologistes dans certaines régions dépeuplées.

Nous avons retenu deux études récentes qui ont évalué les capacités d'un algorithme d'apprentissage profond à dépister des papilles suspectes.

La première est une étude chinoise publiée en 2019 dans le JAMA (70).
241 032 images, préalablement classées en papilles suspectes ou saines par un groupe d'experts, ont permis l'apprentissage de la machine et 28 569 autres images ont servi à son évaluation. Les résultats concluent à une sensibilité de 96,2% et une spécificité de 97,7% contre respectivement 96 % et 97,9% pour les spécialistes.

Un point fort de l'étude était l'analyse des erreurs (les faux positifs et les faux négatifs).

Les faux négatifs concernaient des papilles pathologiques (par exemple une dysversion papillaire) et des papilles de myopes forts, avec des taux d'erreurs similaires à ceux des humains.
Les faux positifs concernaient des papilles de grande taille, avec cette fois un taux d'erreur plus important chez les humains.

Bien que la performance de l'algorithme semble très intéressante dans cette étude, ces résultats sont à nuancer.
En effet, sensibilités et spécificités diminuent lorsque les images proviennent d'autres centres que celui avec lequel l'algorithme a réalisé son apprentissage. Cette chute de performance se majore d'autant plus lors d'une analyse d'images « multiethniques ».

La seconde étude publiée par l'American Academy Of Ophtalmology en 2019 obtient aussi des résultats similaires (71).

L'algorithme a été entraîné grâce à 86 618 images de papilles considérées comme suspectes par 43 ophtalmologistes.
Sa performance a ensuite été évaluée à partir de trois bases de données regroupant 11 193 images, comprenant des papilles saines et glaucomateuses. La répartition entre les papilles saines ou suspectes a été réalisée par un groupe de glaucomatologues.
Les résultats de l'algorithme ont été comparés aux conclusions de 10 autres ophtalmologistes dont 3 glaucomatologues.
L'algorithme a montré une sensibilité significativement plus élevée que 7 des 10 ophtalmologistes (dont 2 glaucomatologues sur les 3).
Il a montré une spécificité plus élevée que 3 ophtalmologistes (dont 1 glaucomatologue), tout en restant comparable aux 7 autres.

La sensibilité des algorithmes, c'est-à-dire la probabilité qu'ils reconnaissent les papilles glaucomateuses comme suspectes, se révèle tout à fait satisfaisante dans ces deux études, comparable aux humains. Or dans une pathologie telle que le glaucome c'est surtout la sensibilité du test qui est intéressante afin que les malades soient dépistés et traités le plus tôt possible.

b) Quantifier la perte en fibres optiques à partir d'une rétinophotographie

L'épaisseur moyenne des fibres nerveuses péri-papillaires présente les meilleures performances diagnostiques pour discriminer les sujets glaucomateux des sujets sains, avec une détection de la maladie 4 à 13 ans avant les premiers déficits du champ visuel (72).

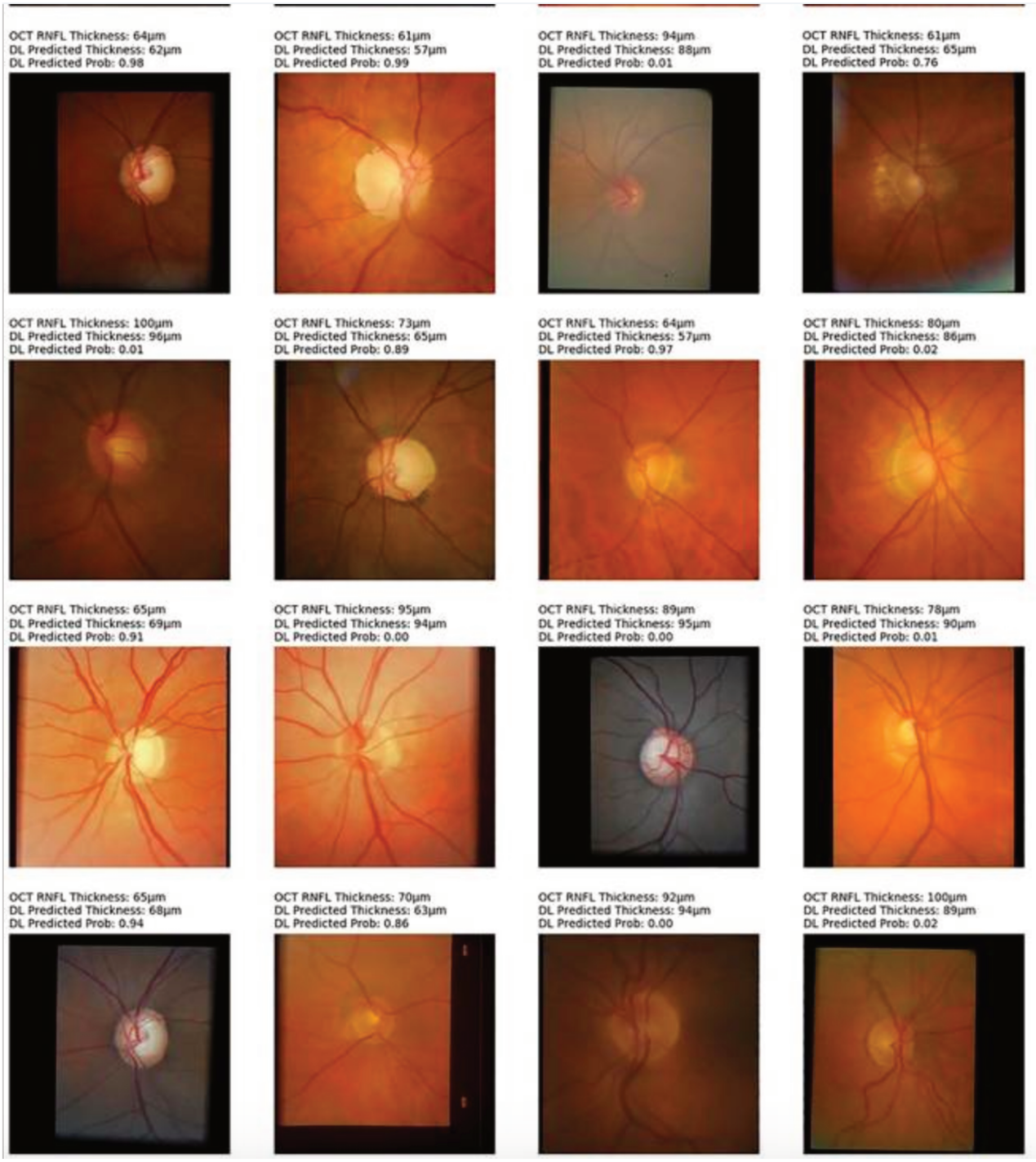
Une équipe a développé un réseau de neurones artificiels pour prédire l'épaisseur moyenne de la couche des fibres nerveuses rétiniennes (RNFL) à partir d'une rétinophotographie (73).

La particularité de ce modèle dans le processus d'entraînement est l'absence d'étiquetage humain pour les données de formation.
En effet, le système utilise des données OCT pour former l'algorithme à quantifier les dommages structurels sur des photographies de disques optiques.

32 820 paires de photographies de papilles, et 2312 examens d'OCT RNFL provenant de 1198 participants, ont permis cette étude.

Cet échantillon a été randomisé en deux groupes : un pour l'apprentissage de l'algorithme et un pour la phase test.

La prédiction de l'épaisseur moyenne des fibres optiques à partir des 6 292 photographies de nerf optique dans l'ensemble du test était de 83,3 ± 14,5 µm, tandis que l'épaisseur moyenne de l'OCT RNFL correspondant était de 82,5 ± 16,8 µm.



<u>Exemples de rétinophotographies du nerf optique</u>

Au-dessus de chaque photographie sont montrées :

- la mesure de l'épaisseur de la couche des fibres optiques sur l'OCT qui sert de référence ;

- la prédiction de l'épaisseur de la couche des fibres optiques par l'algorithme à partir de la rétinophotographie ;

- L'estimation de l'erreur par l'algorithme.

Par ailleurs, l'aire sous la courbe pour le dépistage du glaucome, à partir de la prédiction de l'épaisseur des fibres optiques par l'algorithme, était de 0,944.

Ces résultats sont encore une fois très satisfaisants. Et bien que l'objectif de l'article ne soit pas de détrôner l'OCT RNFL comme examen de référence pour la quantification des dommages structuraux dans le glaucome, force est de constater que l'évaluation de ceux-ci, à partir de photographies de papilles, peut présenter plusieurs avantages.

En premier lieu, l'analyse de l'épaisseur des fibres optiques semble plus fiable que le dépistage de papilles suspectes. En effet, les algorithmes de DL des études précédentes ont appris à classer les papilles en suspectes ou saines après intervention humaine. Or, il subsiste toujours un caractère subjectif dans l'analyse visuelle de papilles rendant cette classification peu reproductible.
Si l'algorithme est formé à l'aide de l'étiquetage humain, il reproduira les erreurs humaines et aura probablement de moins bonnes performances en tant qu'outil de dépistage.
Ainsi, utiliser les mesures d'épaisseur RNFL de l'OCT pour la phase d'apprentissage présente donc l'avantage d'être objectif et plus reproductible. De plus, cela évite la tâche fastidieuse d'étiquetage subjectif par des évaluateurs humains.

Par ailleurs, contrairement aux algorithmes précédents répondant à une question binaire (papille suspecte / non suspecte), celui-ci donne une information quantitative, ce qui pourrait permettre de l'utiliser également pour évaluer la progression des patients glaucomateux.

Enfin, utiliser des rétinophotographies plutôt que des OCT pour réaliser un dépistage du glaucome permet de réduire le coût de celui-ci et de le rendre plus aisé en termes de logistique (pas de nouvelle machine à installer).

c) Diagnostiquer un glaucome en utilisant une tomographie par cohérence optique (OCT) avec l'aide de l'apprentissage profond

L'OCT de la couche des fibres nerveuses rétiniennes (RNFL) et du complexe ganglionnaire (GCC) est devenu un examen indispensable dans la prise en charge des sujets glaucomateux. Certes, il fournit des arguments en faveur d'un glaucome pré-campimétrique ou débutant, mais il est également utile pour le suivi des glaucomes avérés.

Une équipe chinoise a développé un algorithme d'apprentissage profond pour dépister la neuropathie optique glaucomateuse à partir d'images OCT (74).
Un total de 6921 volumes d'OCT RNFL CIRRUS HD a été inclus rétrospectivement, et ils ont été répartis de la manière suivante :

- 4877 volumes ont servi à la formation et à la validation primaire, avec des données issues de l'Université chinoise de Hong Kong Eye Center et du Hong Kong Eye Hôpital ;
- 2044 volumes ont servi à la validation externe, avec des données provenant de 3 structures de soins différents.

L'algorithme étant supervisé, tous les volumes OCT ont été classés par des experts en 2 groupes :

- Présence d'un glaucome
- Absence d'un glaucome

S'il existait des divergences entre les experts, l'OCT était exclu de l'étude.
Les prédictions de l'algorithme ont ensuite été comparées à 2 glaucomatologues.

Pour la validation primaire, l'algorithme a obtenu une aire sous la courbe de 0,969, une sensibilité de 89%, une spécificité de 96% et une valeur prédictive positive de 91%. Les performances de l'algorithme sont similaires à celles des deux glaucomatologues.
Pour la validation externe, les performances de l'algorithme étaient légèrement moins bonnes, et les glaucomatologues ont obtenu de meilleurs résultats.

Un point fort du modèle est la réalisation d'une carte thermique pour comprendre les zones anatomiques qu'utilise l'algorithme pour faire ses prédictions.

Par exemple, les cartes générées par l'algorithme montrent que celui-ci utilise la lame criblée et la choroïde.

Fait intéressant, les auteurs mentionnent que le signal et l'origine ethnique n'ont pas eu d'influence sur la performance de la machine.

Ryo Asaoka et son équipe ont développé un modèle d'apprentissage en profondeur pour diagnostiquer un glaucome débutant à partir d'images OCT (75).

Le réseau de neurones a été formé et évalué à l'aide d'un ensemble de données, celles-ci comprenant des OCT de la couche des fibres nerveuses rétiniennes et du complexe ganglionnaire de sujets sains et de glaucomateux au stade précoce.

Le critère de jugement principal était l'aire sous la courbe qui a atteint 93,7%.

Ainsi, l'incorporation du deep learning dans l'OCT pour l'évaluation du glaucome pourrait rendre cet examen plus informatif.

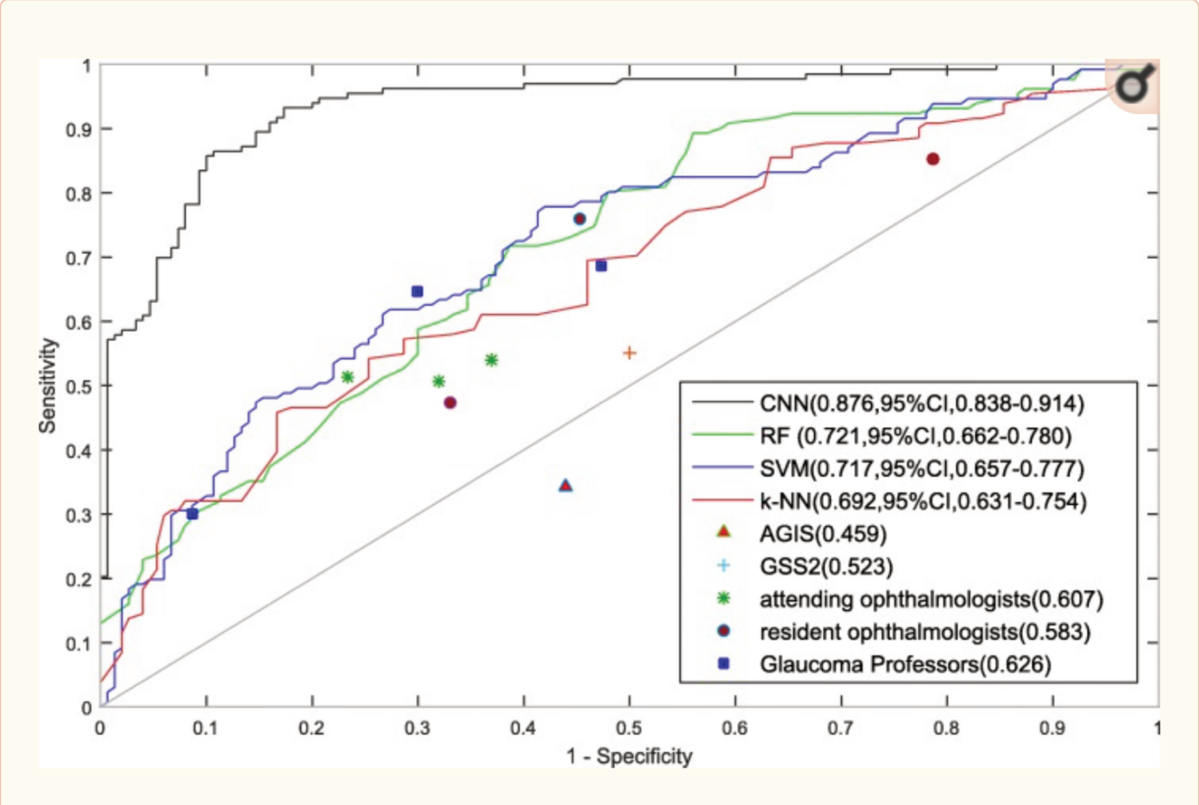
d) Différencier un champ visuel sain d'un champ visuel glaucomateux

Une équipe chinoise a conçu un réseau de neurones artificiels capable de différencier un champ visuel glaucomateux d'un champ visuel non glaucomateux (76). L'étude a également comparé l'algorithme à 9 ophtalmologistes (3 internes, 3 seniors et 3 glaucomatologues) et à d'autres logiciels de machine learning déjà conçus.

Au total, 4 012 champs visuels Humphrey 30–2 et 24–2 ont été collectés. Parmi eux, 3 712 ont servi pour la formation de l'algorithme et les 300 restants pour sa validation. Les champs visuels étaient exclus de l'étude si les pertes de fixation étaient supérieures à 2/13, et si les taux de faux positifs et de faux négatifs étaient supérieurs à 15%.

Sur l'ensemble des données de validation, le réseau de neurones artificiels a atteint une aire sous la courbe de 0,876, une sensibilité de 0,932 et une spécificité de 0,826.

En comparaison, les humains ont obtenu des AUC respectivement de 0,607, 0,585 et 0,626 pour les ophtalmologistes, les internes et les glaucomatologues.
Par ailleurs, les résultats de l'algorithme ont été plus performants que ceux obtenus par les logiciels utilisant l'apprentissage automatique « traditionnel ».



CNN = réseau de neurones artificiels

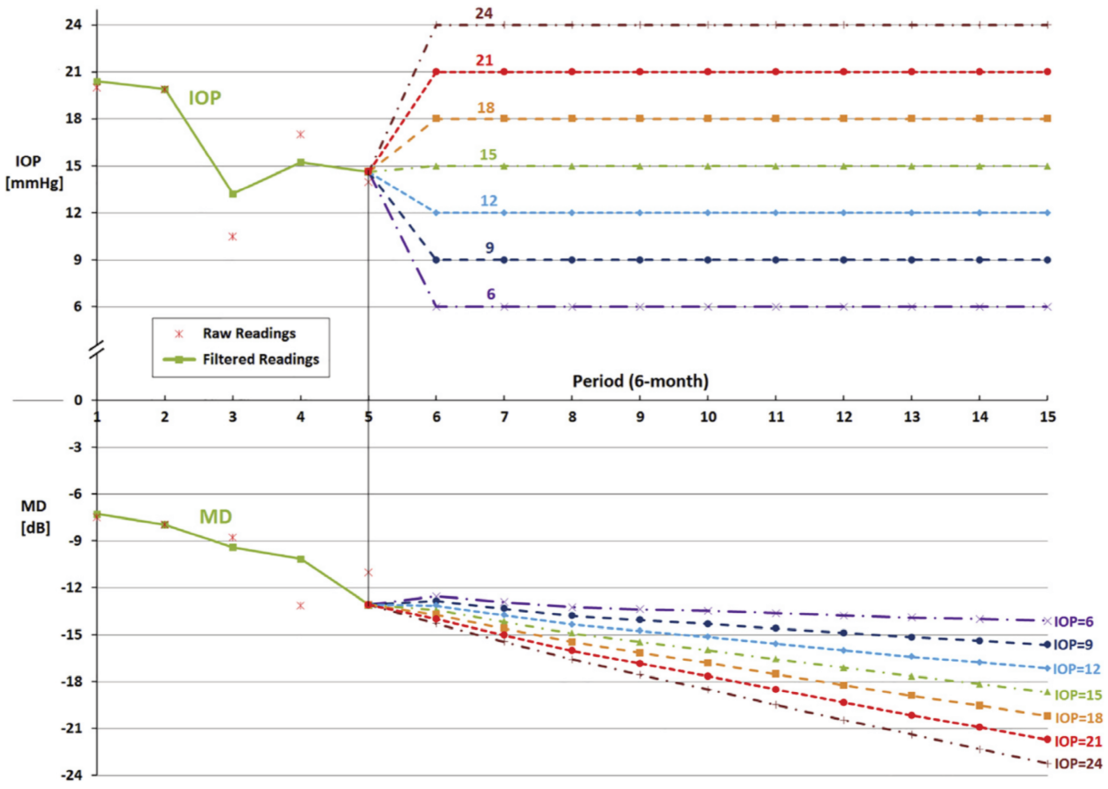
e) <u>*Suivi personnalisé des glaucomes et aide aux décisions thérapeutiques*</u>

Une équipe américaine a développé et validé un algorithme permettant de prédire individuellement le risque d'évolution du champ visuel en fonction des valeurs futures de la PIO (77).

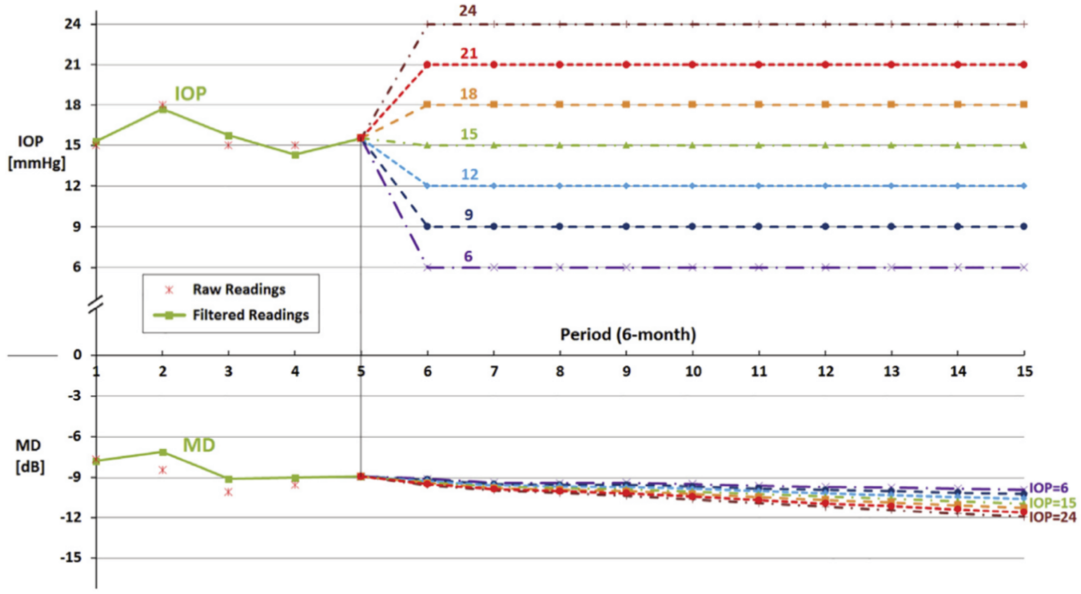
Pour former le programme, 571 patients - suivis dans les grandes études interventionnelles Advanced Glaucoma Intervention Study (AGIS) et Collaborative Initial Glaucoma Treatment Study (CIGTS) - ont été inclus.

Après une période d'observation de deux ans et demi, les patients ont été classés en patients à la progression lente, rapide ou nulle, afin que le modèle s'adapte à la dynamique du patient pour ses calculs. L'algorithme a prédit, pour chaque participant, l'évolution de la déviation moyenne en fonction de la PIO (6, 9, 12, 15, 18, 21 ou 24 mmHg) au cours des cinq prochaines années, en partant du postulat que cette pression intra-oculaire serait stable sur cette période.

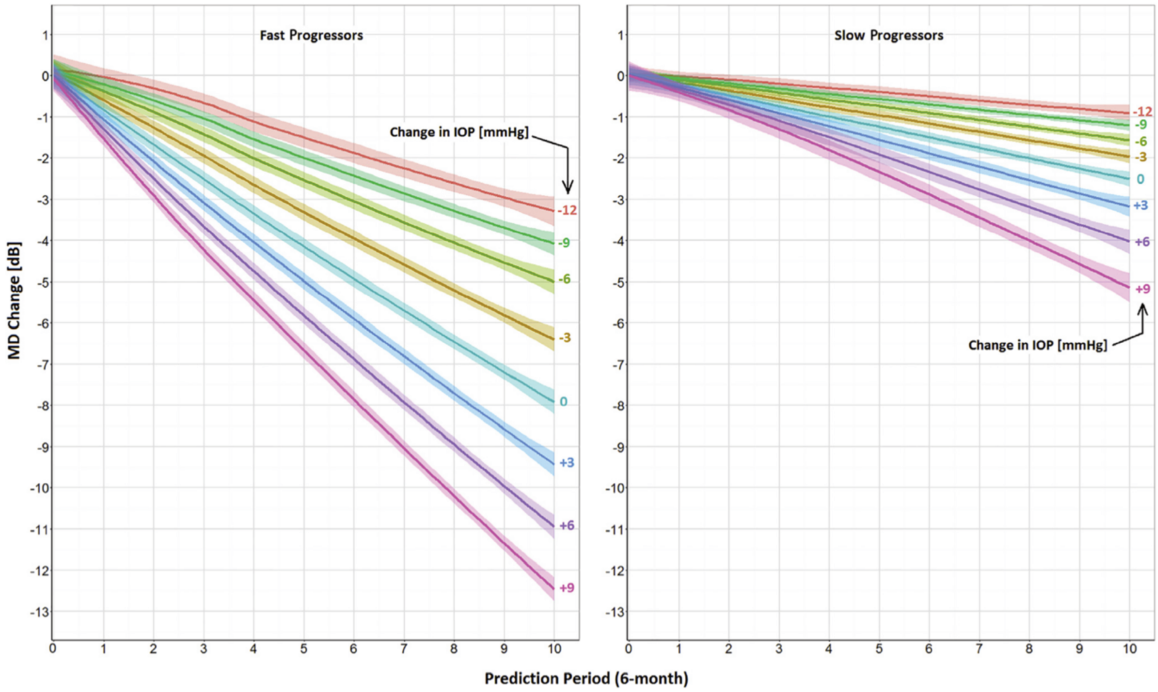
Selon l'algorithme, les patients progressant rapidement avec des PIO à 6, 15 et 24 mmHg perdraient respectivement 2,1, 6,7 et 11,2 décibels (dB) sur 5 ans. En revanche, ceux progressant lentement perdraient 0,8, 2,1 et 4,1 dB MD pour les mêmes PIO sur une période identique.



La figure illustre les prévisions de l'algorithme sur l'évolution du MD pour des PIO maintenues à 6, 9, 12, 15, 21 ou 24 mmHg sur une période de 5 ans (77).



Même exemple chez un patient progresseur lent (77).



Graphique schématisant l'impact des changements de PIO sur la déviation moyenne en fonction du temps (77).

La période de prédiction 0 correspond à 2 ans et demi après l'inclusion dans l'étude. Les lignes et leurs limites représentent respectivement la moyenne et l'intervalle de confiance à 95% de la pression intra-oculaire (PIO). Les MD de départ (c'est-à-dire à la période de prédiction 0) sont pour les « progresseurs » rapides et lents respectivement de 12,2 décibels et 6,8 dB. Les deux groupes ont des PIO de 17,5 mmHg dans la période de prédiction 0.

Ce travail illustre la possibilité de réaliser des prévisions individualisées de la vitesse d'évolution, ainsi que l'usage que nous pourrions faire 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.

5. Cataracte

a) Un problème de santé publique

L'opacification du cristallin est la première cause de cécité dans le monde. En effet, on estime que 70 millions de personnes sont aveugles en raison d'une cataracte (78).

Or, contrairement à la rétinopathie diabétique, la DMLA ou encore le glaucome, responsables des malvoyances dans les pays développés, la cataracte constitue une cause de cécité réversible.

Il est possible de restaurer une meilleure fonction visuelle après un geste opératoire unique. Il s'agit donc d'une chirurgie salvatrice pour les patients. Elle est par ailleurs relativement rapide, ne nécessite pas d'anesthésie générale ni de convalescence post-opératoire, ce qui la rend d'autant plus intéressante.

Les patients atteints de cataractes sont malheureusement sous-diagnostiqués dans beaucoup d'endroits du globe, en raison de la pénurie de médecins et de moyens, en particulier dans les pays en voie de développement ou les communautés rurales.

Plusieurs algorithmes d'IA ont été développés pour la détection et le classement automatisés de la cataracte, basés sur des photographies à la lampe à fente ou sur des photographies en couleur du fond d'œil.

b) Algorithme développé à partir de photographies de lampe à fente

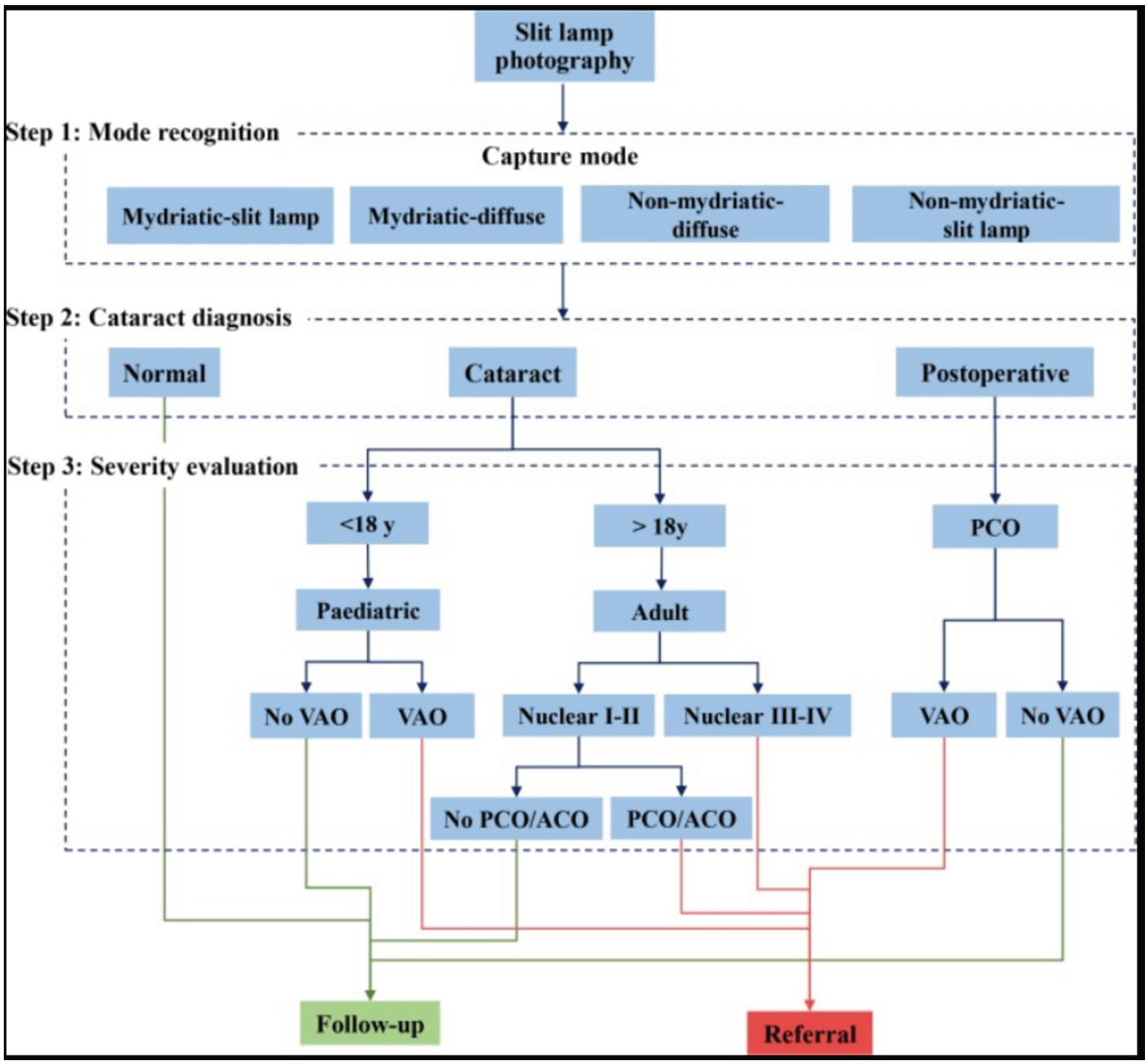
Dans une récente étude chinoise (79), les auteurs ont utilisé un réseau de neurones artificiels (ResNet) pour le dépistage des cataractes. Il fonctionne en trois étapes :

- Étape 1 : mode de capture de la photographie :
  - Différencier les images mydriatiques et non mydriatiques
  - Différencier les photographies en fente ou en rétro illumination

- Étape 2 : classification de la photographie en 3 groupes :
  - Cristallin clair
  - Cataracte
  - Implant

- Étape 3 : orientation du patient en cas de cataracte détectée
  - Évaluer son type (cataracte ou opacification capsulaire postérieure).
  - Évaluer sa gravité selon l'échelle du Lens Opacities Classification System II.

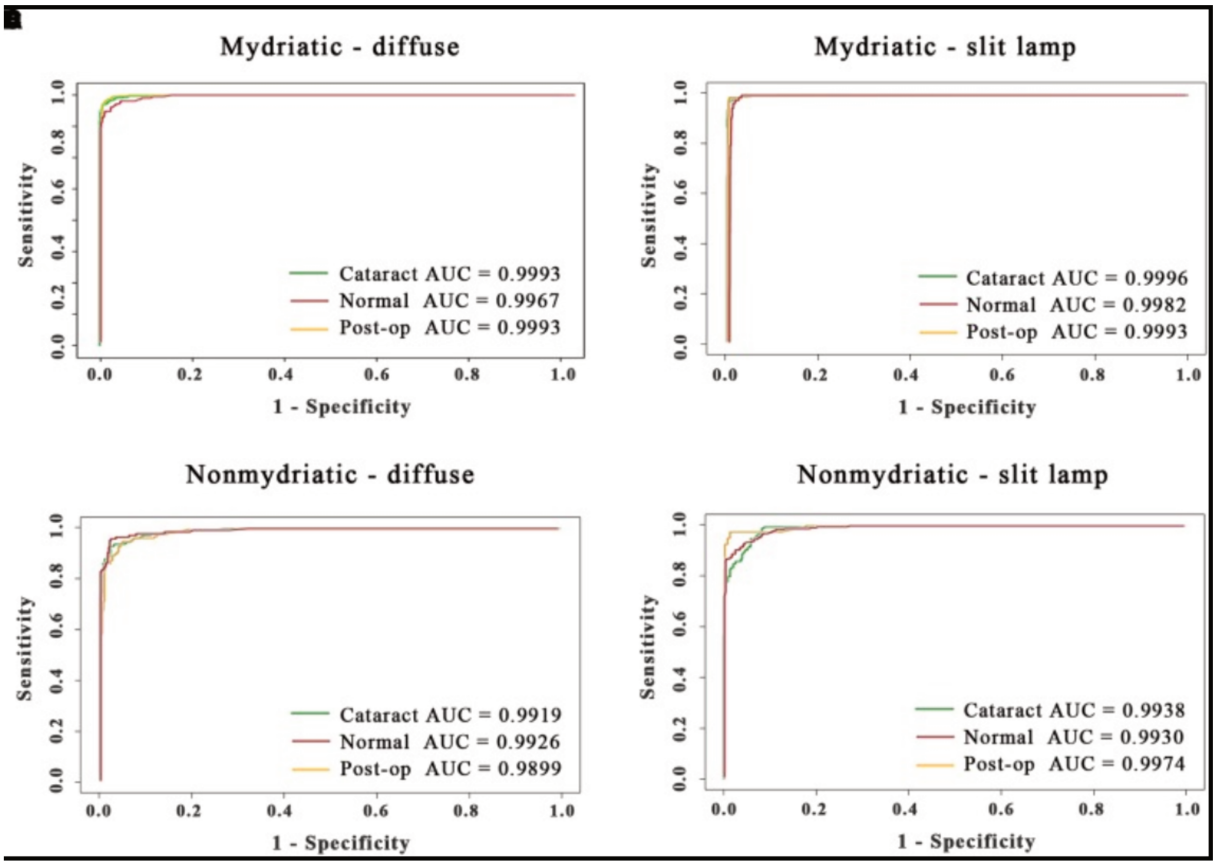
La décision d'orienter vers un ophtalmologiste dépend du résultat de cette classification.



Les différentes étapes de l'algorithme conçu pour le dépistage de la cataracte (79)

Nb : VAO = opacification dans l'axe visuel

Lors de la validation du système grâce à 37 638 photographies, l'algorithme a atteint une aire sous la courbe > 99% pour les étapes 1 et 2, à savoir : reconnaissance du mode de capture et détection d'une opacité cristallinienne.



Pour l'étape 3, l'AUC optimale (0,9996) a été obtenue en utilisant les photographies de patients dilatés et en fente. Cependant, sans dilatation en fente, l'AUC reste très satisfaisante (0,9938).

Cet algorithme d'IA a ensuite été mis à l'essai en Chine chez des patients symptomatiques, ayant décrit leurs signes fonctionnels sur une plateforme Web. En comparant avec le diagnostic final de l'ophtalmologiste, la sensibilité et la spécificité de l'algorithme pour la détection de la cataracte étaient respectivement de 92% et 84%.

c) *Algorithme développé à partir de rétinophotographies*

Plusieurs équipes ont cherché à construire des systèmes intelligents pour le dépistage de la cataracte à partir des rétinographies, basés sur la visibilité du fond d'œil.

L'équipe de Zhang (80) a développé un modèle d'apprentissage en profondeur à partir de 4 004 rétinophotographies, pour le dépistage de la cataracte et pour sa classification selon le degré d'opacification (cristallin clair / cataracte légère / cataracte modérée / cataracte sévère).

Le modèle a ensuite été testé sur un gold standard de 1 606 photos de fond d'oeil, initialement classées par des ophtalmologistes.
Le système a atteint une AUC de 93,52% pour la détection de la cataracte et de 86,69% pour le classement de gravité.

L'équipe de Li (78) a également développé un système basé sur l'apprentissage en profondeur en utilisant 7 030 images du fond d'œil, provenant de la même base de données que l'étude mentionnée ci-dessus (Beijing Tongren Eye Center).
L'objectif de l'algorithme était le même que celui de l'équipe de Zhang, à savoir dépister les cataractes et les classer en quatre grades.
Sur 1 000 images utilisées pour tester l'algorithme, le système a atteint une AUC de 97,2% pour la détection de la cataracte et de 87,7% pour le classement de gravité.

Cependant, la cataracte ne constitue pas la seule étiologie aux troubles des milieux, et se contenter du flou des rétinophotographies pour parvenir à ce diagnostic peut sembler insuffisant.

d) Quelle utilité en pratique courante ?

L'intérêt de ce type d'algorithme est donc d'orienter vers un ophtalmologiste les patients ayant des cataractes d'indication chirurgicale.

Cependant, les zones où les populations en tireraient le plus de bénéfices sont par définition des zones où l'accès au soin est difficile et inégal. Diagnostiquer une cataracte est utile à condition que le patient puisse rencontrer un chirurgien et qu'il bénéficie d'une aide logistique ou financière.

Dans des endroits du globe très défavorisés, puisque l'IA ne peut pas résoudre les problèmes politiques ou sociétaux, on peut imaginer pour le moment que ces algorithmes soient utilisés par des organismes humanitaires qui proposent eux-mêmes la prise en charge chirurgicale.

6. Rétinopathie des prématurés

a) Un risque croissant

À l'échelle mondiale, on estime que 15 millions de bébés naissent prématurément chaque année (81).

En raison de l'amélioration des soins apportés aux nouveaux nés dans les pays en développement, et donc de l'augmentation de leur survie, la prévalence de la rétinopathie des prématurés (ROP) croît (82).

Il est donc capital de savoir diagnostiquer et traiter rapidement ces enfants prématurés afin de leur éviter les conséquences désastreuses de cette pathologie, potentiellement cécitante définitivement.

b) Les obstacles au dépistage de qualité

La prise en charge de la ROP est limitée par :

- Les défis logistiques liés à la coordination des examens au chevet de l'unité de soins intensifs néonataux ;
- La difficulté de l'examen clinique ;
- La responsabilité médico-légale ;
- La formation au diagnostic ROP qui est souvent insuffisante.

Enfin, il existe souvent une variabilité significative dans la classification diagnostique, même parmi les experts. Par exemple, dans le protocole CRYO-ROP, la confirmation du seuil de maladie nécessitait un double examen et dans 12% des cas les médecins n'étaient pas d'accord entre eux (83). Dans une étude multicentrique de télémédecine pour le diagnostic de la ROP, près de 25% des examens ne faisaient pas l'objet d'un consensus entre les experts (84).

c) *Les perspectives avec l'intelligence artificielle*

Brown et son équipe (85) ont développé et validé un algorithme de deep learning (i-ROP DL) pour le diagnostic de la ROP avec une classification en 3 stades :

- Stade 0 = absence de tortuosité ou dilatation vasculaire
- Stade « pré plus » = dilatation et tortuosité ne nécessitant pas de traitement
- Stade plus = dilatation et tortuosité posant l'indication d'un traitement

Le réseau de neurones artificiels a été entraîné en utilisant un ensemble de données de 5 511 photographies rétiniennes.
Le gold standard était défini par l'examen du fond d'œil par 1 expert + l'examen basé sur la rétinophotographie par 3 experts.

Sur les 5 511 photographies rétiniennes incluses, 4 535 (82,3%) ont été classées en stade 0, 805 images (14,6%) en stade pré plus, et 172 images (3,1%) en stade plus.

Le système i-ROP DL a ensuite été évalué dans un ensemble de 100 images RetCam grand angle. Les résultats montrent que l'algorithme atteint une sensibilité de 93% et une spécificité de 94% pour poser le diagnostic d'un stade plus et une sensibilité de 100% et une spécificité de 94% pour le diagnostic de fond d'œil pathologique (incluant les stades pré plus et plus).
De plus, les auteurs ont comparé le système i-ROP DL à 8 experts (plus de 10 ans d'expérience) évaluant le même ensemble de 100 images. L'algorithme était plus performant que 6 des 8 experts

Ainsi, les algorithmes intelligents peuvent être très utiles dans les pays en voie de développement, ou dans nos régions sous-médicalisées, où la disponibilité de l'expertise en ophtalmologie et en néonatologie peut être insuffisante pour gérer le nombre de prématurés à risque de ROP.

7. Kératocône et chirurgie réfractive

a) Un diagnostic complexe

Le kératocône est une pathologie cornéenne caractérisée par un amincissement et une ectasie cornéenne responsable d'un astigmatisme irrégulier.

Aux stades débutants, l'astigmatisme irrégulier rend parfois difficile l'adaptation de la correction optique, permettant difficilement une vision optimale. Aux stades avancés, les opacités cornéennes peuvent être responsables d'une baisse de vision irréversible.

Aucun traitement ne permet actuellement la guérison de la maladie et le seul possible à un stade avancé est la greffe de cornée transfixiante. Il s'agit donc d'un traitement invasif et lourd.

Ainsi, la détection précoce d'une ectasie, avant qu'elle soit responsable de complications cornéennes, reste primordiale. Mais poser le diagnostic à un stade infra-clinique est bien sûr beaucoup plus compliqué, d'autant que les examens complémentaires tels que la topographie et la tomographie par cohérence optique ne nous apportent pas forcément un diagnostic de certitude. (86)

Ce dépistage intéresse aussi particulièrement les chirurgiens réfractifs qui utilisent la kératomileusis in situ au laser (LASIK) car le diagnostic d'un keratocône subclinique contre-indique le geste opératoire ; en effet l'ectasie post LASIK est la complication la plus redoutée de cette chirurgie.

b) Les perspectives de l'intelligence artificielle

Dans les années 2010, Damien Gatinel et Alain Saad ont conçu un logiciel (SCORE ANALYZER) utilisant l'intelligence artificielle et les données fournies par le topographe Orsbcan. SCORE est destiné à fournir une aide à la décision clinique pour le dépistage précoce des formes débutantes de kératocône infra-clinique, avec une sensibilité de 92% et une spécificité de 96% (87). Un score supérieur à 0 signe une cornée à risque de kératocône. L'algorithme a obtenu le marquage CE (conformité européenne) en décembre 2013.

Plus récemment, une équipe française (88) a formé un réseau de neurones artificiels pour classer des topographies cornéennes en 3 catégories : normal / kératocône / antécédents de chirurgie réfractive.

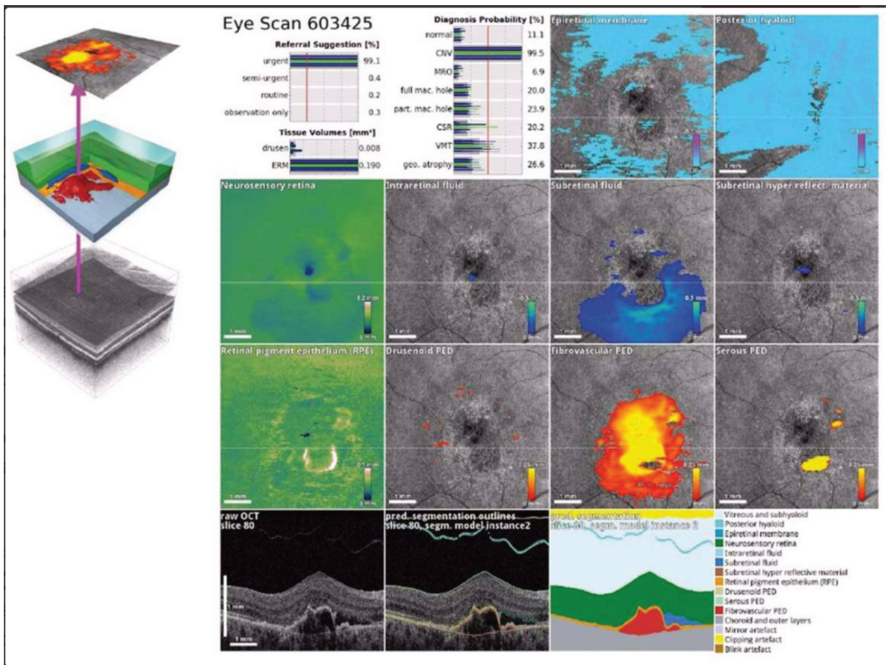
Un total de 3 000 examens Orbscan (1 000 pour chaque catégorie) ont été utilisés pour la formation (2700) et la validation (300) du modèle.
La sensibilité et la spécificité du modèle étaient respectivement de 100% et 100% pour le kératocône, 100% et 99% pour les examens normaux et 98% et 100% pour les antécédents de chirurgie réfractive.

8. Autres pathologies rétiniennes

La plupart des algorithmes ont été formés pour répondre à une question binaire : la papille est-elle suspecte ? Trouve-t-on des signes de rétinopathie diabétique ?
L'IA s'est montrée très performante pour rechercher une pathologie unique à partir d'une photographie du fond d'œil. Or, ce qui distingue l'humain de la machine, et fait une partie de notre valeur ajoutée, est notre capacité à analyser plusieurs informations simultanément et donc à dépister plusieurs pathologies lors d'un même examen.
Allons-nous garder cet avantage longtemps ?
Puisque l'IA s'est révélée si prometteuse, ne pourrait-elle pas apprendre à répondre à plusieurs questions ?

a) Deep learning & pathologies rétiniennes multiples en OCT

Google DeepMind, en collaboration avec l'institut ophtalmologique de l'university College et de Moorfields Eye Hospital (Londres), s'est attaché à évaluer les performances de l'IA pour orienter des diagnostics de pathologies rétiniennes (53 diagnostics possibles) ainsi que leur degré d'urgence de prise en charge à partir d'images OCT (89).



Logiciel Deep Mind. Le rapport annonce une probabilité diagnostique (néovaisseaux choroïdiens) et suggère un délai de consultation en fonction du degré d'urgence (89)

Les auteurs ont utilisé un réseau de neurones artificiels et ont entraîné le logiciel avec 14 884 images.

Chaque image OCT a bénéficié d'une analyse tridimensionnelle et a été segmentée en différentes couches. Cela a permis l'identification des différents constituants de l'image (par exemple : drusens, fluide intra-rétinien, fluide sous-rétinien, hyaloïde) exactement comme les yeux humains le font pour procéder à l'analyse.

Les résultats se présentent sous forme de probabilités :

- Le logiciel liste les différents diagnostics possibles avec le pourcentage de probabilités pour chacun.
- Enfin, il présente les différents degrés d'urgence de prise en charge.

Il est par ailleurs capable de repérer la concomitance de pathologies rétiniennes.

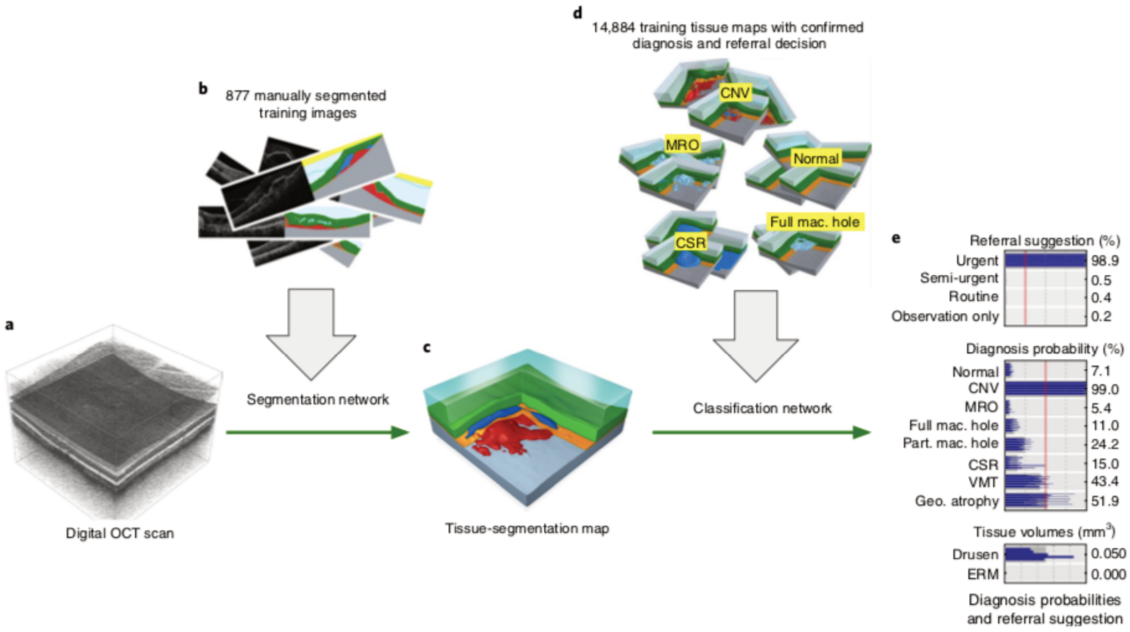


Fig. 1 | Our proposed AI framework. a, Raw retinal OCT scan (6×6×2.3 mm³ around the macula). **b**, Deep segmentation network, trained with manually segmented OCT scans. **c**, Resulting tissue segmentation map. **d**, Deep classification network, trained with tissue maps with confirmed diagnoses and optimal referral decisions. **e**, Predicted diagnosis probabilities and referral suggestions.

Les performances de l'IA ont été comparées au « gold standard » : les conclusions de 8 experts qui détenaient les images OCT associées aux données du dossier clinique du patient (comprenant donc l'AV, les rétinophotographies, l'histoire de la maladie et les éventuelles angiographies). Au total, les résultats de l'algorithme ont été satisfaisants avec l'obtention d'une AUC supérieur à 96% pour toutes les pathologies.

Les auteurs ont aussi comparé les performances de l'IA avec celles des experts lorsque ceux-ci ne détenaient que les images OCT, et il s'avère que celles de l'algorithme étaient meilleures.

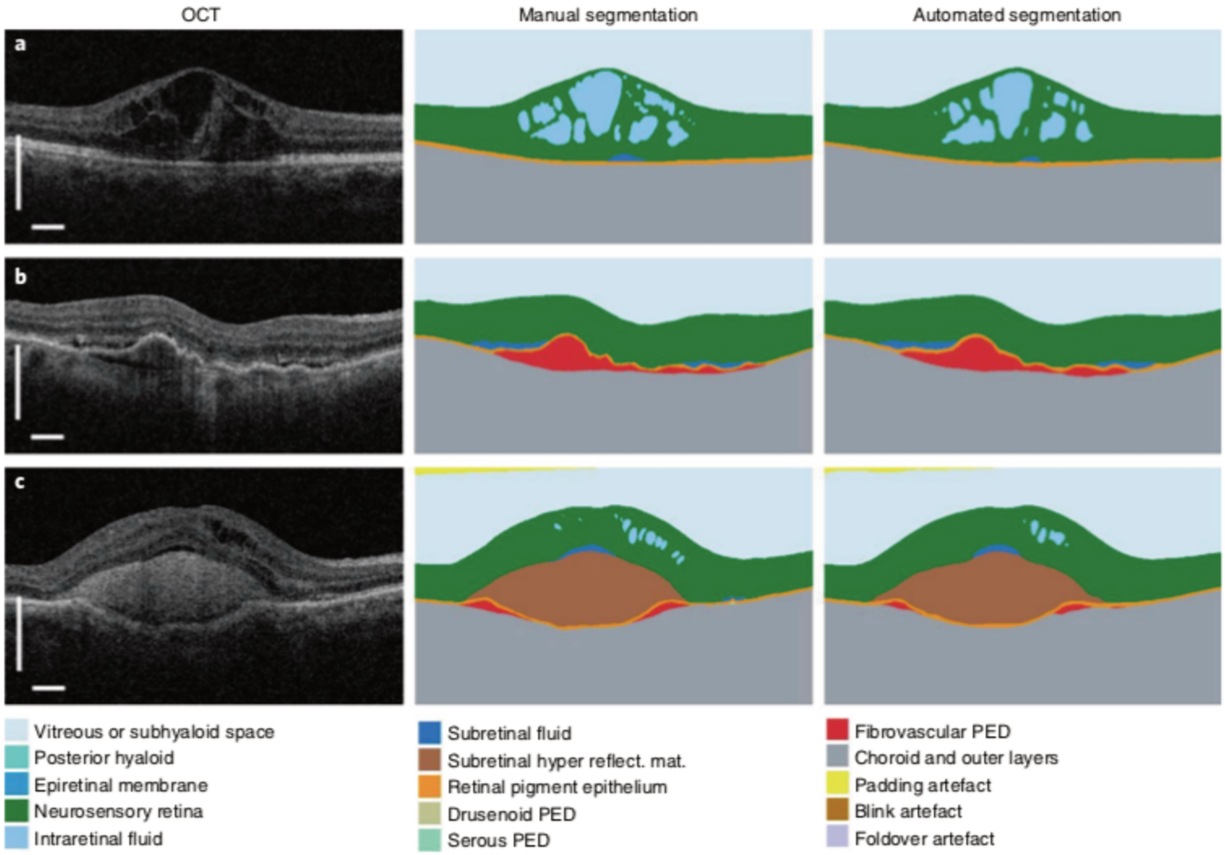
Par ailleurs, concernant le degré d'urgence, aucune prise de risque par l'IA n'a été décelée : les patients devant nécessiter une prise en charge urgente, notamment ceux présentant une exsudation rétinienne, ont été identifiés.

Cette étude suggère donc que l'IA pourrait représenter une aide précieuse :

- Pour l'aide au diagnostic de pathologies rétiniennes, et ce d'autant plus que dans l'étude, seulement 63 % des dossiers ont pu faire l'objet d'un consensus diagnostique entre les rétinologues experts ;
- Pour identifier le degré d'urgence.

Par ailleurs, afin de vérifier la généralisation possible de ce logiciel, les auteurs l'ont aussi testé en utilisant une autre machine OCT et grâce à l'apprentissage par transfert, les résultats ont été tout aussi satisfaisants.

Enfin, l'analyse des images OCT par segmentation permet de s'affranchir de la boîte noire : la segmentation réalisée par le logiciel est visible.



Cet algorithme ouvre plusieurs pistes :

- Tout d'abord, il peut servir de support pour mettre en lien ces zones avec l'acuité visuelle et ouvre une voie pour de futures études ;
- Second point, il permet de simplifier la lecture des images OCT, ce qui facilite l'apprentissage pour les internes mais ce qui rend aussi accessible l'analyse à des non-médecins tels que les orthoptistes, optométristes ou infirmières, soulevant la question de notre indispensabilité.

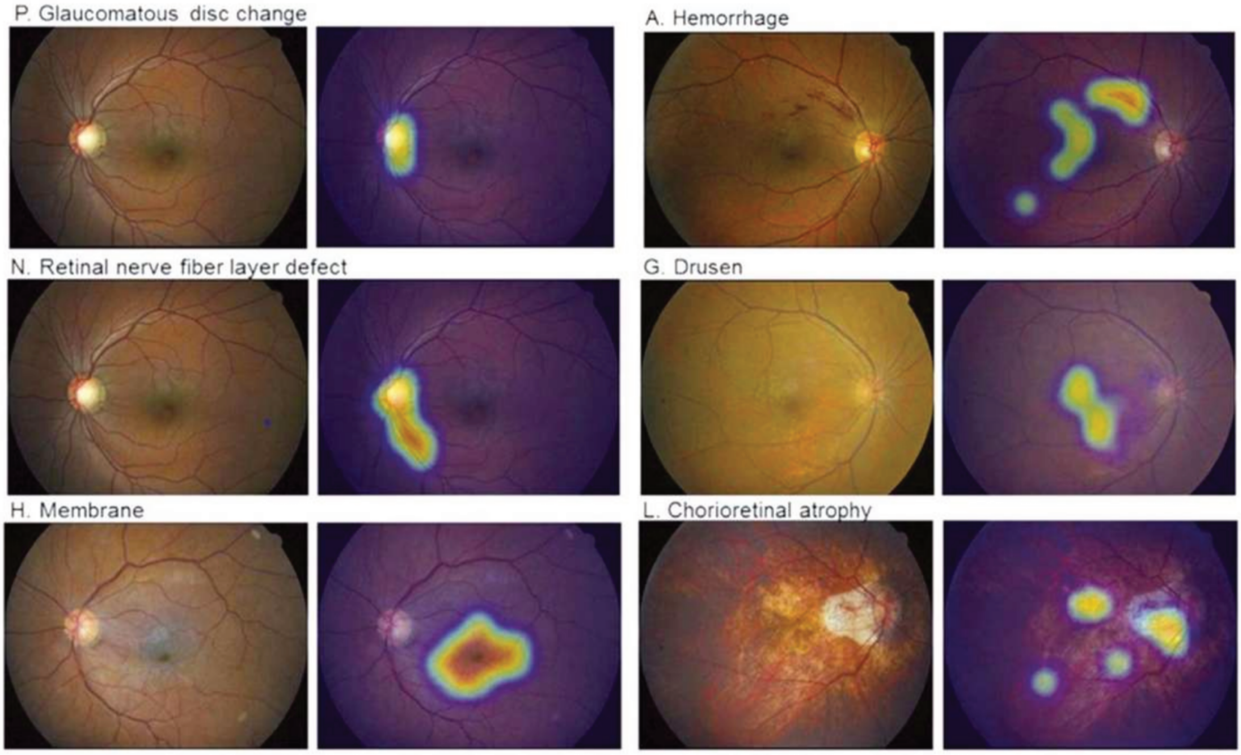
b) *Deep learning et pathologie rétinienne multiple en rétinophotographie*

Une étude coréenne très récente publiée dans *Ophtalmology* en 2020 (90) a évalué les capacités d'un algorithme d'IA à réaliser ce que nous pouvons appeler une analyse multiple.

Son apprentissage basé sur 96 500 images de fond d'œil lui a permis de repérer des signes de rétinopathie diabétique, de DMLA (drusen et hémorragies maculaires), de membranes épirétiniennes, de trous maculaires, d'une atrophie choriorétinienne myopique, de modifications de la papille évocatrices d'un glaucome, et de déficits de la couche des fibres optiques.

Les résultats du logiciel ont été comparés à ceux de 57 ophtalmologistes.

L'aire sous la courbe ROC était excellente pour l'ensemble des paramètres détectés, variant de 0,95 à 0,99. Ce projet ambitieux – former les algorithmes à interpréter une image de la même façon qu'un œil humain analyse un fond d'œil - semble donc réalisable. Si ces performances se confirment, il serait envisageable de réaliser un dépistage de masse des pathologies les plus fréquemment rencontrées à partir d'une photographie du fond d'œil.



Exemple d'anomalies du fond d'œil dépistées par l'algorithme (90).

D’autres équipes ont également formé des algorithmes intelligents capables de dépister plusieurs pathologies à partir de rétinophotographies avec des résultats encourageants (36,91).

9. Quand l’intelligence artificielle va encore plus loin : en route vers le futur ?

De nouvelles perspectives apparaissent avec l’essor de deep learning, car ces algorithmes intelligents sont capables, à partir d’une rétinophotographie, d’extraire des informations méconnues par l’homme.

Aussi, outre une amélioration des performances globales de notre système de santé, l’intelligence artificielle pourrait faire avancer la recherche par la compréhension du fonctionnement du système de l’algorithme.

a) Prédiction du risque cardio-vasculaire à partir d’une rétinophotographie

La rétinophotographie pourrait améliorer la prédiction des risques cardio-vasculaires. Le challenge de Google Deepmind était de démontrer que l'extraction et la quantification de facteurs de risques cardiovasculaires sont possibles à partir d'images rétiniennes en utilisant l’intelligence artificielle (30).

Poplin et son équipe ont évalué la capacité d’un algorithme de deep learning à prédire la présence de certains facteurs de risques cardio-vasculaires, qui a priori ne sont pas censés pouvoir être déterminés ni quantifiés par l’œil humain à partir d’une rétinophotographie.
Il s’agit de l’âge du patient, de son sexe, de sa tension artérielle, de son statut tabagique et de son indice de masse corporelle.
A partir de ces éléments ils ont pu réaliser un modèle de prédiction d’événements cardio-vasculaires dans les cinq ans, « MACE » avec une aire sous la courbe de 0,70 (IC 95% : 0,648 à 0,740) comparable avec le modèle européen SCORE (92) : aire sous la courbe 0,72 (IC 95% : 0,67 à 0,76).

Table 5 | Predicting five-year MACE in the UK Biobank validation dataset using various input variables

Risk factor(s) or model used for the prediction	AUC (95% CI)
Age only	0.66 (0.61,0.71)
SBP only	0.66 (0.61,0.71)
BMI only	0.62 (0.56,0.67)
Gender only	0.57 (0.53,0.62)
Current smoker only	0.55 (0.52,0.59)
Algorithm only	0.70 (0.65,0.74)
Age + SBP + BMI + gender + current smoker	0.72 (0.68,0.76)
Algorithm + age + SBP + BMI + gender + current smoker	0.73 (0.69,0.77)
SCORE[6,7]	0.72 (0.67,0.76)
Algorithm + SCORE	0.72 (0.67,0.76)

Of the 12,026 patients in the UK Biobank validation dataset, 91 had experienced a previous cardiac event before retinal imaging and were excluded from the analysis. Of the 11,835 patients in the validation dataset without a previous cardiac event, 105 experienced a MACE within 5 years of retinal imaging. 95% CIs were calculated using 2,000 bootstrap samples.

Si ces capacités peuvent nous surprendre, car l'œil humain est aujourd'hui incapable de parvenir à ces déductions, elles sont avant tout une opportunité pour nous d'utiliser le deep learning afin d'améliorer nos propres connaissances et de faire avancer la recherche clinique.

Dans cette étude, les auteurs ont par exemple pu identifier une partie des régions anatomiques utilisées par l'algorithme pour faire ses prédictions.
Par exemple, pour prédire le sexe, l'algorithme a utilisé les vaisseaux sanguins, la papille et la macula. Pour l'âge et le statut tabagique, les vaisseaux sanguins. Concernant la pression artérielle diastolique, les marqueurs anatomiques n'ont pas pu être retrouvés. (Figure 2 et tableau 6).

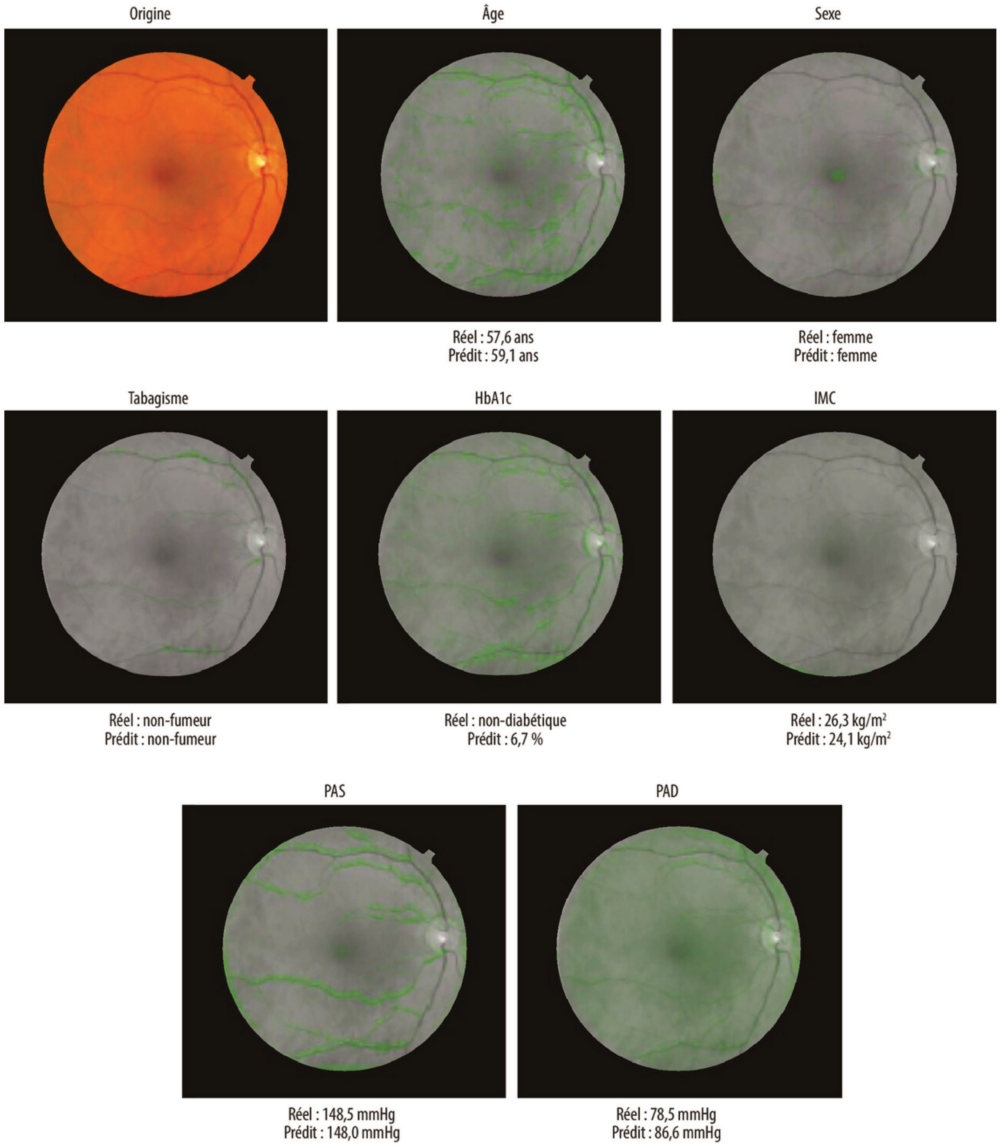


Fig. 2 | Attention maps for a single retinal fundus image. The top left image is a sample retinal image in colour from the UK Biobank dataset. The remaining images show the same retinal image, but in black and white. The soft attention heat map (Methods) for each prediction is overlaid in green, indicating the areas of the heat map that the neural-network model is using to make the prediction for the image. For a quantitative analysis of what was highlighted, see Table 6. HbA1c values are not available for UK Biobank patients, so the self-reported diabetes status is shown instead.

Table 6 | Percentage of the 100 attention heat maps for which doctors agreed that the heat map highlighted the given feature

Risk factor	Vessels (%)	Optic disc (%)	Non-specific features
Age	95	33	38
Gender	71	78	50
Current smoker	91	25	38
HbA1c	78	32	46
SBP	98	14	54
DBP	29	5	97
BMI	1	6	99

Heat maps ($n=100$) were generated for each risk factor and then presented to three ophthalmologists who were asked to check the features highlighted in each image ($n=300$ responses for each risk factor). The images were shuffled and presented as a set of 700, and the ophthalmologists were blinded to the output prediction of the heat maps and the ground-truth label. For the variables that were present in both datasets (age and gender), the most commonly highlighted features were identical in both datasets.

b) *Prédiction de la réfraction à partir des rétinophotographies.*

La prédiction de la réfraction à partir d'une rétinophotographie grâce à l'intelligence artificielle a été évaluée dans une étude britannique (93). Cette dernière a utilisé deux bases de données : UK Biobank et Age related Eye Disease Study (AREDS). Pour la première, les valeurs de l'auto-réfractomètre étaient disponibles et pour la seconde, la réfraction subjective l'était. Ce sont donc ces données qui ont été exploitées pour les comparer aux résultats obtenus avec l'algorithme.

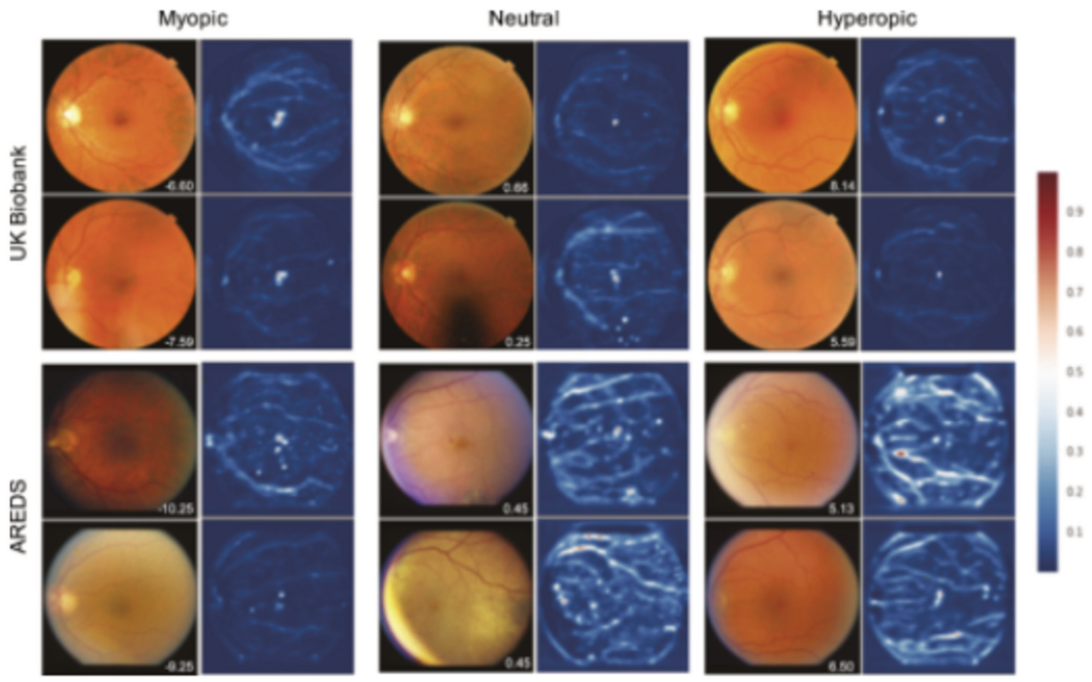
Concernant la base de données UK biobank, les résultats réfractifs de l'algorithme se trouvaient en moyenne à une dioptrie près de la valeur de l'auto-réfractomètre dans 85% des cas. Pour l'AREDS, les résultats obtenus étaient dans 65 % des cas à une dioptrie de la valeur de la réfraction subjective.

Le principal critère d'évaluation était l'équivalent sphérique. Les auteurs ont tout de même tenté d'évaluer les capacités de l'algorithme en différenciant la sphère du cylindre et ont conclu que leur outil était meilleur pour prédire les résultats sphériques. Cela s'explique aisément puisque l'astigmatisme total est le résultat de la toricité cornéenne et cristallinienne, éléments qui ne sont bien sûr pas pris en compte dans une rétinophotographie.

Bien que ces constatations soient surprenantes, et illustrent encore une fois les potentiels majeurs de l'IA, elles sont plus intéressantes sur le plan intellectuel que pratique. En effet, pour l'instant la marge d'erreur est encore trop importante et la technique mérite d'être améliorée avant une démocratisation. Par ailleurs les auto-réfractomètres utilisés actuellement sont très performants, non invasifs et assurent des résultats rapides.
Si d'autres études permettaient à l'avenir d'obtenir des algorithmes fiables, cette méthode pourrait en revanche suppléer à la cycloplégie, en permettant un gain de temps et d'argent et en évitant les potentiels effets secondaires des cycloplégiques.

Ce qui est intéressant, c'est de découvrir les zones de la rétine utilisées pour obtenir ces résultats : grâce à la cartographie thermique du fond d'œil, les auteurs ont pu mettre en évidence les zones anatomiques rétiniennes déterminantes pour les prédictions de l'algorithme. La fovéa arrive en tête, suivie du disque optique et des arcades vasculaires temporales.

L'IA ouvre donc la voie à de nombreuses recherches futures.



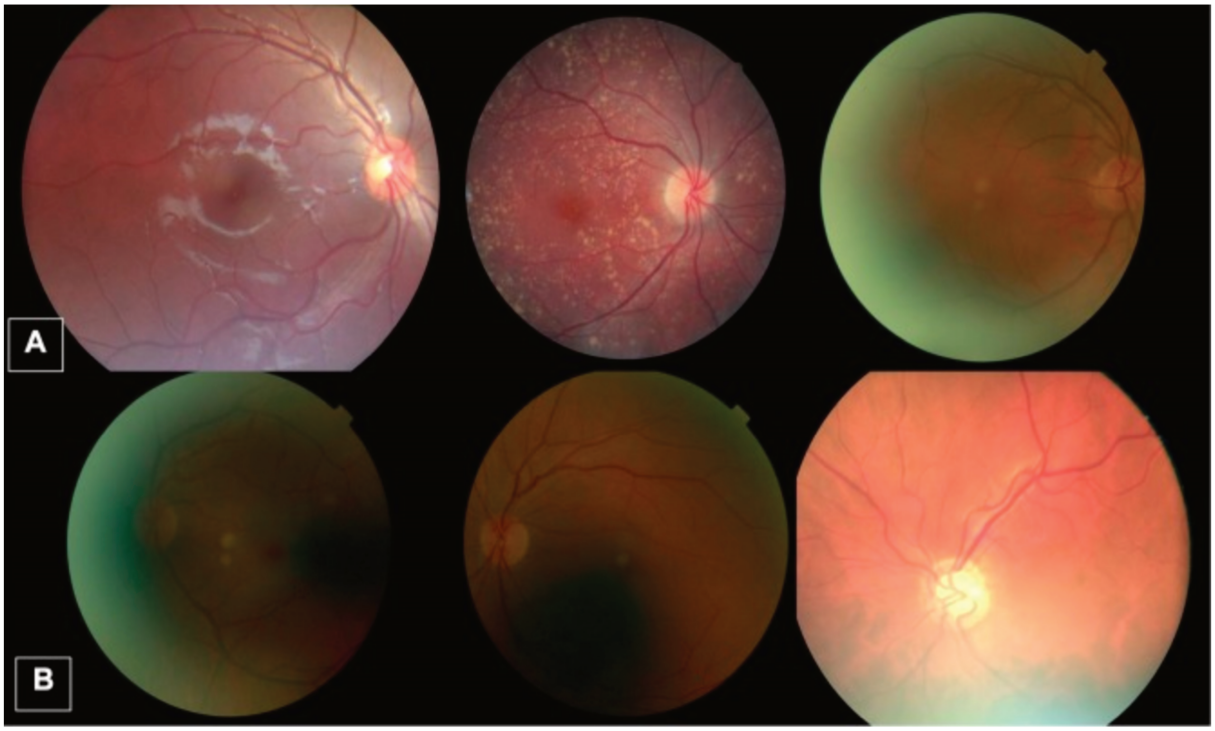
10. La vision artificielle

Récemment, des applications utilisant l'intelligence artificielle sont nées pour faciliter le quotidien des malvoyants. Citons par exemple Seeing AI de Microsoft (94) ou encore Lookout de Google (95).
Avec l'aide de l'appareil photo du smartphone, l'algorithme va permettre la reconnaissance faciale, la lecture d'un texte ou encore de scanner des codes-barres. En mettant le smartphone autour du cou, cette application se comporte donc comme un véritable troisième œil.
On peut également citer MyEye, une caméra que l'on fixe sur la branche d'une monture de lunettes, et qui communique oralement les informations de l'environnement comme la reconnaissance des visages ou la lecture d'un texte, le tout sans connexion (96).

11. Les difficultés techniques rencontrées à l'heure actuelle

a) La qualité des données

La qualité des images constitue un élément primordial de l'analyse réalisée par l'algorithme. Comme le démontre l'étude menée par Hanruo Liu pour le dépistage des papilles suspectes à partir d'une rétinophotographie, la performance de l'algorithme diminue si les images proviennent de site Web (70). Outre la performance, c'est l'interprétation même de l'image qui est compromise en cas de mauvaise qualité. Dans cette même étude, 4 812 photos sur 274 413 ont été exclues. Varadarajan et son équipe ont de leur côté dû renoncer à l'analyse de 12% de leurs images (90).
Lorsque l'on sait que les taux d'images de mauvaise qualité peuvent atteindre jusqu'à 20% lors de dépistages de masse (94), il apparaît urgent de trouver une solution à cet obstacle. Certains modèles intègrent donc des classificateurs automatisés de qualité d'image, identifiant celles inexploitables et incitant à la recapture (57,90,95).



A : Trois photographies de bonne qualité pouvant être interprétées par l'algorithme

B : Trois photographies de mauvaise qualité, non interprétables (91).

b) Le faible nombre d'études qui intègrent une population regroupant plusieurs ethnies

Beaucoup d'algorithmes ont été validés à partir de photographies issues d'une population mono-ethnique. Or, cela constitue un biais dans la conception de l'algorithme, notamment à travers la pigmentation rétinienne qui influe sur l'interprétation des images ; par exemple il est plus difficile de visualiser un micro-anévrisme sur une rétinophotographie d'un sujet mélanoderme (97).

La validation d'un algorithme à des fins de dépistage de masse devrait donc nécessairement inclure une formation basée sur une population pluriethnique.

c) La boîte noire : le talon d'Achille de l'intelligence artificielle

Après ce chapitre répertoriant les différentes possibilités d'applications en ophtalmologie, la performance du deep learning n'est plus à démontrer. Pour autant, les programmateurs ne peuvent pas entièrement se féliciter car il persiste des interrogations concernant son fonctionnement. « La boîte noire » est le terme consacré à ce système opaque (24).

En effet, nous connaissons les données fournies au logiciel ainsi que les réponses obtenues mais nous ignorons souvent comment l'algorithme parvient à ses conclusions.
S'affranchir de cette opacité permettrait d'augmenter notre confiance en l'IA pour travailler plus sereinement mais aussi pour faire avancer la médecine à travers « la recherche inversée ». Nous reviendrons plus tard sur ce second avantage.

Certaines équipes ont proposé des méthodes pour contourner le système de boîte noire :

- ***Les cartes thermiques*** **:**

Les cartes thermiques permettent de visualiser les zones utilisées par l'algorithme à travers des surbrillances.

Exemple :

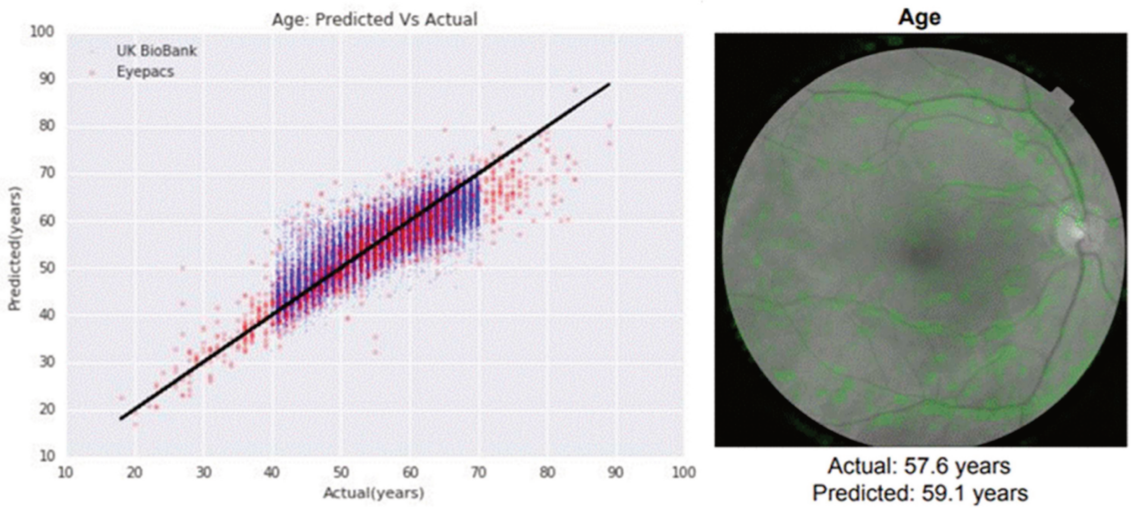
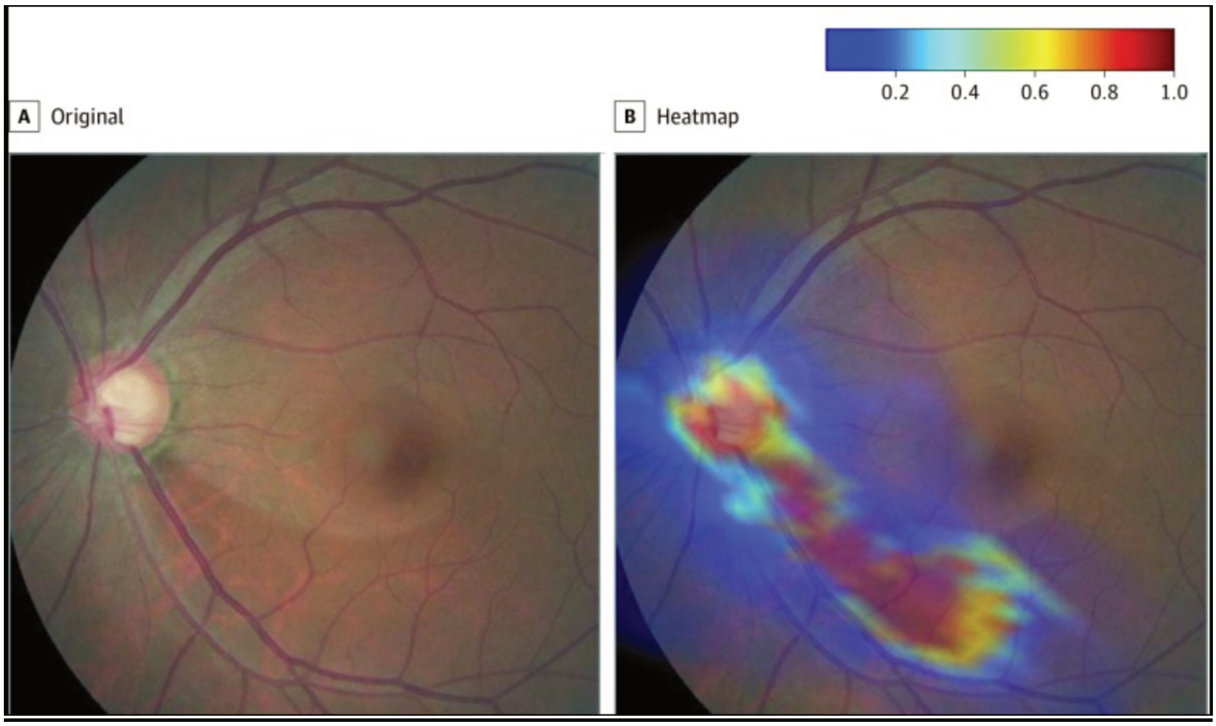


Figure montrant à gauche la prédiction de l'âge à partir d'une rétinophotographie à l'aide du deep learning, et à droite la carte thermique correspondante, avec en vert les zones du fond d'œil sur lesquelles l'algorithme s'est appuyé pour faire sa prédiction (30).



L'image de droite est la carte thermique générée par l'algorithme qui met en évidence les zones du fond d'œil utilisées par le système pour repérer une papille suspecte de glaucome (70).

- ***Diminuer l'utilisation du deep learning***

Un article de 2020 publié dans le journal de l'ARVO (98) a comparé l'efficacité d'un machine learning traditionnel où les données utilisées sont connues et apprises par l'humain, à un deep learning avec utilisation d'un réseau de neurones artificiels pour la classification de la rétinopathie des prématurés.
Les résultats révèlent des performances légèrement supérieures en faveur du deep learning, mais cette différence est faible et non significative. Les auteurs démontrent ainsi que l'utilisation du deep learning n'est pas forcément la meilleure option et qu'il est peut-être plus souhaitable d'utiliser un système a priori moins performant mais dont les caractéristiques sont connues et maîtrisées par l'humain.

d) La classification binaire : non applicable en pratique clinique

La plupart des algorithmes d'IA ont été formés pour classifier des images de façon binaire. Cependant, cela ne reflète pas la réalité de l'ophtalmologie puisque les patients sont potentiellement atteints de pathologies multiples. Par exemple, un modèle formé pour détecter la rétinopathie diabétique ne considérera pas un patient atteint de glaucome comme étant malade car le modèle n'a que la capacité de distinguer la rétinopathie diabétique de la non-rétinopathie diabétique.
Se limiter à ce type d'algorithme n'est pas possible en pratique clinique à moins d'utiliser plusieurs systèmes pour chaque patient, ce qui ne paraît pas raisonnable.
Cette problématique tente déjà d'être résolue avec la construction de nouveaux algorithmes pouvant dépister des pathologies multiples (58,89,90).

e) Études basées sur une seule imagerie : insuffisant pour un diagnostic de certitude

Une seule anomalie détectée à partir d'une technique d'imagerie ne peut pas toujours garantir le diagnostic correct d'une pathologie (exemple typique du glaucome). Les images cliniques multimodales, telles que l'OCT, le champ visuel et les images du fond d'œil, devraient être intégrées ensemble pour construire un système d'IA généralisé pour un diagnostic plus fiable (31).

f) Les algorithmes supervisés dépendant de la classification humaine

Lors de l'utilisation d'algorithmes supervisés, ces derniers reproduiront inévitablement les erreurs humaines (24,36).
Par ailleurs, il existe des situations cliniques où la classification d'une image peut être source de divergences d'opinions entre les experts humains (31).

F. ETHIQUE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

1. Qu'est-ce que l'éthique ?

D'après la définition du Larousse (99), l'éthique est « l'ensemble des principes moraux qui sont à la base de la conduite de quelqu'un ». C'est la manière d'agir selon les valeurs qui vont permettre d'orienter nos actions, afin de rechercher la bonne décision dans une situation donnée. C'est la recherche du meilleur compromis possible.
De ces principes éthiques découlent des règles à suivre, propres à chaque profession : ce qu'on appelle une déontologie. Celle-ci désigne alors, plus concrètement, des règles capables d'orienter la décision à prendre, dans un contexte précis.

2. L'importance d'une éthique médicale

Bien que le métier de médecin implique une formation scientifique indispensable, dans la pratique, les principes éthiques dictent notre conduite à tenir tout autant que nos connaissances médicales. Ces principes s'apprennent peu ou pas pendant notre cursus et pourtant font partie intégrante de notre métier. Cela constitue une véritable différence entre la théorie (la médecine dans les livres, celle que l'on apprend) et la pratique (la médecine dans la vraie vie, face au patient) avec parfois des dilemmes difficiles.
Si l'on se réfère au serment d'Hippocrate, dont le texte original daterait du IVème siècle avant JC, on constate qu'il accorde une place centrale à la morale et à la justice. On ne la nomme pas ainsi à l'époque, mais l'éthique apparaît comme le guide de notre conduite médicale.

Et même s'il semble parfois que les règles éthiques soient « évidentes » car relevant de notre humanité, n'oublions pas que cette « évidence » varie selon l'époque et le lieu, car la culture et l'Histoire se mêlent intimement à l'évolution de l'éthique. On ne juge pas une situation de la même façon en France au XXIème siècle qu'au XVème siècle (où la notion même d'éthique était inexistante).
On peut citer pour exemples extrêmes les expérimentations de médecins sous le régime nazi ou encore les débats houleux que suscite encore l'avortement.

Il n'est pas question ici d'approfondir cette question mais au moins d'indiquer la multiplicité et la complexité des situations dans lesquelles les médecins peuvent se retrouver.

Nous l'avons vu, science et morale se mêlent dans notre pratique. Pour autant, malgré l'ancienneté du texte du serment d'Hippocrate érigeant ses principes moraux, il aura fallu attendre plusieurs siècles et plusieurs « drames humanitaires » pour que la communauté scientifique établisse ce que l'on appelle à présent la bioéthique.

- Quels sont les grands principes de l'éthique médicale ? (100)

1. La bienfaisance : agir dans l'intérêt du patient.
2. La non-malfaisance : le fameux adage latin « *primum non nocere »*, « d'abord, ne pas nuire ».
3. Le respect de l'autonomie du patient : le médecin doit toujours donner une information claire, loyale et précise, afin d'obtenir le consentement libre et éclairé du patient avant un acte. Le patient est ainsi libre de faire ses propres choix s'il est en mesure d'exprimer son opinion.
4. La justice : les soins doivent être donnés à tous les patients avec le même souci d'efficacité, et les ressources doivent être partagées de manière équitable entre tous ceux qui en ont besoin.

La réflexion éthique autour de l'intelligence artificielle en santé n'est pas faite pour adopter une position hostile face à l'émergence de ces technologies numériques, mais pour veiller à ce que ces quatre grands principes ne soient pas affaiblis. Il s'agit avant tout d'être lucide pour éviter que certaines innovations soient utilisées à visée financière derrière une promesse d'offre de soins pour tous.

3. Quels sont les risques liés à l'utilisation de l'intelligence artificielle en médecine ?

a) La délégation des tâches aux algorithmes

L'objectif des algorithmes apprenants est d'accomplir automatiquement une tâche qui serait sinon effectuée directement par un humain. Autrement dit, il s'agit pour l'homme de déléguer des missions à des systèmes automatisés.

(1) En premier lieu, quel est le niveau d'importance de la tâche exécutée par l'algorithme ? Peut-elle impacter profondément une prise en charge médicale ?

En effet, il peut s'agir d'une tâche relativement anodine comme faire du triage par ordre alphabétique. Une erreur dans l'exécution de cette tâche aura a priori peu de conséquences pour l'individu concerné.
A l'inverse, il peut s'agir d'une tâche complexe dont dépend un diagnostic médical ou une décision thérapeutique. On imagine aisément qu'une erreur dans ce cadre-là aura potentiellement des conséquences très préjudiciables.

(2) Ensuite, se pose la question du degré d'autonomie de l'algorithme

Certains pays comme les États-Unis utilisent d'ores et déjà des systèmes automatisés de prise de décision entièrement autonome.

En effet, face à un système expert jugé ultra performant, presque infaillible dans une tâche bien précise, il est tentant de se fier aveuglément à cet outil intelligent.

Mais en cas de désaccord entre l'algorithme et l'humain sur une prise de décision, n'y a-t-il pas un risque d'être trop influencé par la machine ? Et n'y aurait-il pas alors une appréhension à prendre une décision allant à l'encontre de celle proposée par l'algorithme ?

En outre, cela représenterait le risque de voir l'Homme relayé au second plan de la prise de décision. Le médecin risquerait d'être relecteur et non plus acteur d'un système de soins.

Aussi, comment s'assurer que les prédictions et les recommandations fournies par les algorithmes ne soient qu'une aide à la prise de décision sans aboutir à une perte d'autonomie et à une déresponsabilisation de l'Homme ?

Quelle légitimité aurions-nous encore dans une situation où nous ne serions plus qu'observateurs d'un outil imparfaitement compris ?

Nous reviendrons sur ces points fondamentaux dans notre discussion.

(3) Que dit la loi ?

En France, la juridiction est claire : seul un médecin est en mesure d'établir un diagnostic. Une machine ne peut donc pas prendre seule (sans intervention humaine) des décisions ayant des conséquences cruciales pour les individus (Article 10 de la loi de 1978. Article 22 du RGPD).

Ainsi, en cas de recours à un système d'intelligence artificielle pour établir un diagnostic sans supervision humaine, pourrait être invoqué l'article L.4161-1 du code de la santé publique concernant l'exercice illégal de la médecine ; et de même l'article 10 de la loi du 6 janvier 1978 prévoyant qu'aucune décision produisant des effets juridiques à l'égard d'une personne ne peut être prise sur le seul fondement d'un traitement automatisé des données.

Les algorithmes d'intelligence artificielle dans le domaine médical peuvent être une « aide » à la prise de décision, sans toutefois se substituer au médecin.

Par ailleurs, le RGPD prévoit le droit pour les personnes d'obtenir, auprès de celui qui en est responsable, des informations sur le fonctionnement de l'algorithme (Article 39 de la loi de 1978. Article 15 du RGPD).

- Le principe de garantie humaine du numérique en santé

Initié par le Comité consultatif national d'éthique (CCNE), ce principe a pour objectif de « garantir une supervision humaine de toute utilisation du numérique en santé, et l'obligation d'instaurer, pour toute personne le souhaitant et à tout moment, la possibilité d'un contact humain susceptible de lui transmettre l'ensemble des

informations la concernant dans le cadre de son parcours de soins ». Cette supervision s'exprime à travers la « nécessité de préserver la maîtrise finale du professionnel de santé, en interaction avec le patient, pour prendre des décisions appropriées en fonction de chaque situation spécifique » (101).

b) Les problématiques soulevées par l'utilisation des données massives ou « Big data »

(1) Qu'est-ce qu'une donnée ?

De manière large, la commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) définit une « donnée personnelle » comme « toute information se rapportant à une personne physique identifiée ou identifiable ». *(29)*

(2) Qu'est-ce qu'une donnée en santé ?

L'article 4 du RGPD définit les données concernant la santé comme « des données à caractère personnel relatives à la santé physique ou mentale d'une personne physique, y compris la prestation de services de soins de santé, qui révèlent des informations sur l'état de santé de cette personne ».

Ainsi, comme le mentionne le comité consultatif national d'éthique (CCNE), les données en santé ne se limitent plus à celles que l'on peut recueillir dans le cadre d'une prise en charge médicale, et « toute donnée primaire issue d'une activité humaine, même sans lien apparent avec la santé, peut contribuer, par son croisement avec d'autres données qui ne lui sont pas liées, à la création d'une information nouvelle relative à la santé d'une personne » (101).

(3) À quoi sert une donnée en intelligence artificielle ?

Nous l'avons vu plus haut, les données massives (ou big data) forment le pilier des technologies d'intelligence artificielle. Elles alimentent les algorithmes afin qu'ils puissent apprendre à fonctionner en autonomie.

(4) Quelles sont les sources de données en santé ? (102)

Les données en santé ne se résument plus au dossier médical. Si la variété des sources ne permet pas de faire un listing exhaustif, on peut néanmoins citer comme exemples :

- Les données médico-administratives produites par l'Assurance maladie (Sniiram : système national d'information inter-régimes de l'Assurance maladie) ;
- Les données médico-administratives produites par les hôpitaux (PMSI : programme de médicalisation des systèmes d'information) ;
- Les données figurant dans les dossiers médicaux, à l'hôpital et en ville ;
- Les données détenues par des acteurs publics ou privés, recueillies auprès de patients (essais cliniques notamment) ou de professionnels de santé ;
- Les données générées par les objets connectés, les applications mobiles, les sites web, réseaux sociaux ou moteurs de recherche.

(5) Les « Big data », une « rupture » technologique ?

Pour évoquer les changements induits par les « Big data » dans l'utilisation des données, le CCNE décrit une rupture technologique et retient quatre éléments préoccupants (101) :

- un changement d'échelle : augmentation massive du nombre de données et de notre capacité à les analyser ;
- une conservation durable : utiliser les données ne les détruit pas, elles sont donc réutilisables ;
- un domaine de diffusion très étendu : un partage rapide dépassant le domaine médical et sans frontière terrestre ;
- une génération de données secondaires par l'effet de leur traitement. Il faut considérer que toute information primaire prise isolément, apparemment anodine, doit être aujourd'hui considérée comme pouvant contribuer à une information sur la santé.

(6) Quels sont les risques éthiques liés à l'utilisation des « Big data » ?

De nombreux principes éthiques peuvent être fragilisés par l'utilisation des données massives. Nous développerons ici ceux qui nous semblent les plus importants par leur fréquence ou leurs conséquences potentielles.

- Le non-respect du secret médical

Il paraît en effet plus difficile de le préserver en cas de multiplicité des sources d'informations partagées et des récepteurs de celles-ci.

- L'absence de consentement de la personne

Un consentement libre et éclairé, obtenu après une information loyale et précise, n'est plus possible lorsque les données sont dupliquées et réutilisées, laissant le patient sans protection face à leur utilisation.

- Le risque de sélection par le biais du numérique

En effet, des données médicales récupérées par une compagnie d'assurance, par exemple, pourraient pénaliser une personne et créer une forme de discrimination.
On peut illustrer ce propos de la façon suivante : une rétinophotographie réalisée dans le cadre d'un diabète serait utilisée par une compagnie d'assurance pour visualiser l'état des artères d'un patient et pénaliserait celui qui, pour les mêmes comorbidités, aurait des signes d'artériosclérose sur cet examen.

Ainsi, au regard de tous les risques encourus par la révolution numérique, l'enjeu éthique principal selon le CCNE est de trouver le bon équilibre entre le risque d'une large diffusion des données mal contrôlées mettant en cause les droits fondamentaux des individus, et celui d'une sous-exploitation des données limitant des recherches menées dans l'intérêt général (101).

(7) Comment garantir la protection des données en santé ?

Les données de santé sont soumises à plusieurs législations protectrices, essentiellement le code de déontologie, la Loi Informatique et Libertés de 1978, le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) de 2018 :

- Le code de Déontologie médicale

Le respect du secret médical est un des socles du code de Déontologie médicale. L'article 4 de celui-ci stipule que « *le secret professionnel, institué dans l'intérêt des patients, s'impose à tout médecin dans les conditions établies par la loi. Le secret couvre tout ce qui est venu à la connaissance du médecin dans l'exercice de sa profession, c'est-à-dire non seulement ce qui lui a été confié, mais aussi ce qu'il a vu, entendu ou compris » (103)*

- La Loi Kouchner du 4 mars 2002

Depuis cette date, le dossier médical est devenu la propriété du patient. Ainsi, pour utiliser un dossier médical à des fins collectives de recherche, il est indispensable d'obtenir son consentement.

- Le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD)

Il fait suite à la loi « Informatique et Libertés » de 1978
Ce texte de loi, adopté le 14 avril 2016 par le parlement européen, est entré en vigueur le 25 mai 2018.
Il permet d'encadrer juridiquement les organismes dans la collecte et le traitement des données personnelles en Europe, ceci afin de garantir l'exercice de leurs droits par les personnes (droit à l'information, droit d'opposition, droit d'accès, droit de rectification) afin de protéger leur vie privée et leur liberté.
Selon l'article 5.1 du RGPD (91) les données personnelles doivent être :

- Traitées de manière licite, loyale et transparente ;
- Collectées à des fins déterminées, explicites et légitimes ;
- Adéquates, pertinentes et limitées ;
- Exactes et tenues à jour ;
- Conservées pendant une durée raisonnable ;
- Traitées de façon à garantir leur protection.

- Utilisation des « Blockchain » en santé (104)

La Blockchain, ou « chaine de blocs », est une technologie de stockage décentralisée utilisée initialement pour sécuriser les transactions financières. La première Blockchain est apparue en 2009 avec le lancement de la cryptomonnaie le Bitcoin.

Il existe dans notre système de santé des multitudes d'échanges entre malades, médecins, pharmaciens qui prennent du temps car les données sont centralisées.
De plus, les documents d'un dossier médical peuvent être perdus, mal remplis, ou encore falsifiés.
Dans une Blockchain, les données ne sont pas stockées par une infrastructure unique, elles sont enregistrées par plusieurs acteurs Si l'un d'eux modifie une donnée, les autres détenteurs en sont informés systématiquement. Aucune modification ne peut être effectuée sans l'accord de tous les acteurs, qui constituent la « chaîne de blocs ».

La Blockchain pourrait ouvrir plusieurs pistes :

- Sécuriser les données : une Blockchain peut éviter toute perte ou falsification des data ;
- Facilité les échanges : le côté décentralisé de l'outil permet une plus grande interopérabilité entre les acteurs de santé et les laisse consulter le dossier dont ils ont besoin sans dépendre de la rapidité de l'interlocuteur.
- Impliquer le patient dans ses données de santé : il est en mesure d'autoriser l'accès à son dossier médical pour les personnes de son choix.

c) Médecine de précision : un frein vers la solidarité ?

Multiplier les sources d'informations à travers les données relatives au mode de vie, à la génétique ou à l'environnement d'une personne, cela est a priori bénéfique, en rendant compte de la singularité de chaque être humain. L'assemblage des données permettrait en quelque sorte un profilage de chaque individu. Cela aboutirait à ce que l'on appelle une « médecine de précision » en potentialisant les capacités diagnostiques et thérapeutiques.

Mais cette médecine personnalisée pourrait aussi diminuer le recours à la notion d'aléa sur laquelle est basée la mutualisation des risques dans la société. La solidarité nationale s'exprimant par cette mutualisation, il est important de veiller à ce que l'augmentation des performances du système de soins, en termes de dépistage et de prévention, ne la mette pas en péril. (101)

d) Appauvrissement de la relation médecin-patient

Sa qualité, voire son existence, sont bien sûr menacées dans le cas où l'interaction directe entre les deux protagonistes risque de ne plus avoir lieu. Nous y reviendrons dans la discussion.

e) Responsabilité en cas d'erreur médicale, à qui la faute ? (105)

On serait tenté de penser qu'il est possible d'imputer la responsabilité au système expert ou au concepteur du logiciel en cas d'erreur médicale liée à l'utilisation d'un algorithme.

Or, comme nous l'avons déjà expliqué, pour le moment en France cette question n'a pas lieu d'être puisqu'un diagnostic ne peut être établi que par un médecin. Les algorithmes d'IA ne peuvent constituer qu'une aide au même titre que les examens d'imagerie ou de biologie.

Si la question juridique venait à évoluer dans les années à venir et que les algorithmes d'IA avaient la possibilité d'être autonomes, cela imposerait que la loi réponde aussi à la question de la responsabilité.

III. Matériels et Méthodes

A. Comment ce travail est-il né ? Pourquoi un questionnaire ?

Applications médicales sur smartphone, télémédecine, chirurgie robotique : le numérique s'allie à la médecine depuis déjà plusieurs années et est associé au progrès de celle-ci.

En effet, à l'heure où la technologie fait partie intégrante de notre quotidien, l'image d'une médecine moderne est incontestablement celle d'une médecine très technique et outillée. La comparaison entre médecine actuelle et celle du siècle dernier, ou entre médecine occidentale et médecine des pays dits en voie de développement, repose davantage sur les progrès techniques que sur la formation des professionnels de santé.

Et dans cette course au progrès, l'IA trouve toute sa place. Les algorithmes mis au point sont déjà extrêmement performants et on imagine aisément que leurs compétences ne cesseront de croître. Elle suscite donc un intérêt exponentiel au sein des communautés scientifiques : en témoignent les nombreux articles qui lui sont consacrés.

Paradoxalement, il nous semblait qu'en dépit des publications et présentations dont elle faisait l'objet, l'IA était plutôt méconnue des ophtalmologues et ne constituait pas un sujet de discussion fréquent.

C'est face à ce constat subjectif qu'est née l'idée de ce travail.

Comment ignorer ce colosse grandissant, généreusement nourri par des ingénieurs qui y travaillent quotidiennement ?
Comment ne pas anticiper son arrivée chez nous, alors que des algorithmes sont déjà commercialisés aux États-Unis ?

Si nous voulons décider de la façon dont nous travaillerons avec l'IA et ne pas la subir, il nous faut être bien informés et préparer son arrivée dans notre pratique quotidienne.

L'objectif de ce travail n'est pas de s'attarder sur le fonctionnement de l'IA ni de faire un simple état des lieux des connaissances des ophtalmologistes, mais plutôt de comprendre comment nous envisageons l'avenir avec ce nouvel outil.

L'innovation technologique suscite souvent de l'enthousiasme tandis que l'ignorance génère la crainte : où les médecins se positionnent-ils devant une évolution technologique à laquelle ils n'ont pas été préparés ?

Un questionnaire nous est apparu comme la façon la plus appropriée de faire le point sur les connaissances, les attentes et les réticences des ophtalmologistes par rapport à l'IA.

L'étude est une enquête d'opinion prospective par questionnaire en ligne Google comprenant 21 questions fermées, et 2 questions ouvertes.
Nous avons privilégié les questions fermées pour bénéficier d'un recueil de réponses plus facile et plus rapide. Elles augmentent le nombre de participants et simplifient l'analyse des données.
Nous avons décidé d'interroger les médecins installés en libéral ou exerçant à l'hôpital, dans les Hauts de France mais aussi dans tout le territoire français, afin d'être le plus représentatif possible.
Nous avons aussi souhaité intégrer les internes puisque ce sont naturellement les plus concernés, ceux qui travailleront probablement avec des algorithmes d'IA.

Les participants ont été contactés :
- directement sur leur messagerie personnelle ;
- en demandant à chacun de diffuser le questionnaire à ses connaissances, ou aux autres médecins de son service ;
- sur un groupe Facebook d'entraide entre internes en ophtalmologie.

Le questionnaire est resté en ligne du 23 Juillet 2020 au 23 Janvier 2020.

B. QUESTIONNAIRE

1. À quelle tranche d'âge appartenez-vous ?
   - 25-30 ans
   - 30-45 ans
   - 45-60 ans
   - > 60 ans

2. Quel est votre mode d'exercice ?
   - Libéral
   - Hospitalier
   - Mixte
   - Interne

3. Dans quelle ville exercez-vous ?

4.Pourriez-vous donner une définition précise de l'intelligence artificielle ?
   - Oui
   - Non

5. Avez-vous déjà assisté à des conférences ou lu des articles sur l'intelligence artificielle en ophtalmologie ?
   - Oui
   - Non

6. Connaissez-vous les termes « machine learning » et « deep learning » ?
   - Oui, précisément
   - Oui, sans précision
   - Non

7. Êtes-vous intéressé par le sujet ?
   - Oui
   - Non

8. Pensez-vous qu'un algorithme d'intelligence artificielle puisse déterminer l'âge, le sexe ou le statut fumeur d'un patient à partir d'une rétinophotographie ?

- Oui
- Non

9. Pensez-vous qu'un algorithme d'intelligence artificielle puisse déterminer la réfraction d'un patient à partir d'une rétinophotographie ?

- Oui
- Non

10. Pensez-vous qu'il existe déjà un algorithme d'intelligence artificielle en ophtalmologie commercialisé dans le monde ?

- Oui
- Non

11. Pensez-vous que l'intelligence artificielle puisse un jour être intégrée dans votre pratique quotidienne en consultation ?

- Oui
- Non

12. Pensez-vous que l'intelligence artificielle puisse améliorer vos conditions de travail ?

- Oui
- Non

13. Pensez-vous que l'intelligence artificielle puisse améliorer votre relation médecin-patient ?

- Oui
- Non

14. Pensez-vous que l'intelligence artificielle puisse vous permettre de gagner du temps sur vos tâches répétitives en consultation ?

- Oui
- Non

15. Pensez-vous que l'intelligence artificielle puisse réduire les inégalités d'accès aux soins en ophtalmologie ?

- Oui
- Non

16. Si un logiciel d'intelligence artificielle d'aide au diagnostic devenait disponible, seriez-vous prêt à l'utiliser dans votre pratique ?

- Oui
- Non

17. En cas de désaccord entre l'algorithme d'intelligence artificielle et votre raisonnement sur un cas clinique, cela pourrait-il remettre en cause votre conviction personnelle ?

- Oui
- Non

18. Si un logiciel d'intelligence artificielle en ophtalmologie devenait disponible, seriez-vous pour l'interprétation automatique des résultats sans validation par l'ophtalmologiste ?

- Oui
- Non

19. En cas d'erreur diagnostique lors de l'utilisation d'un algorithme d'intelligence artificielle sans relecture par l'ophtalmologiste, quel serait pour vous le responsable légal ?

- L'ophtalmologiste responsable de la structure
- L'entreprise du logiciel
- Les deux

20. Pensez-vous que les algorithmes d'intelligence artificielle puissent diminuer le besoin en ophtalmologistes dans les années futures ?

- Oui, à court terme (<10 ans)
- Oui, à moyen terme (>10 ans)
- Non

21. Pensez-vous que l'intelligence artificielle puisse représenter une menace pour notre profession ?

- Oui
- Non

22. Quel est pour vous le meilleur bénéfice à espérer d'une éventuelle arrivée de l'intelligence artificielle en ophtalmologie ? (QROC)

23. Quel est pour vous le plus grand risque à craindre d'une éventuelle arrivée de l'intelligence artificielle en ophtalmologie ?

IV. Résultats & Discussion

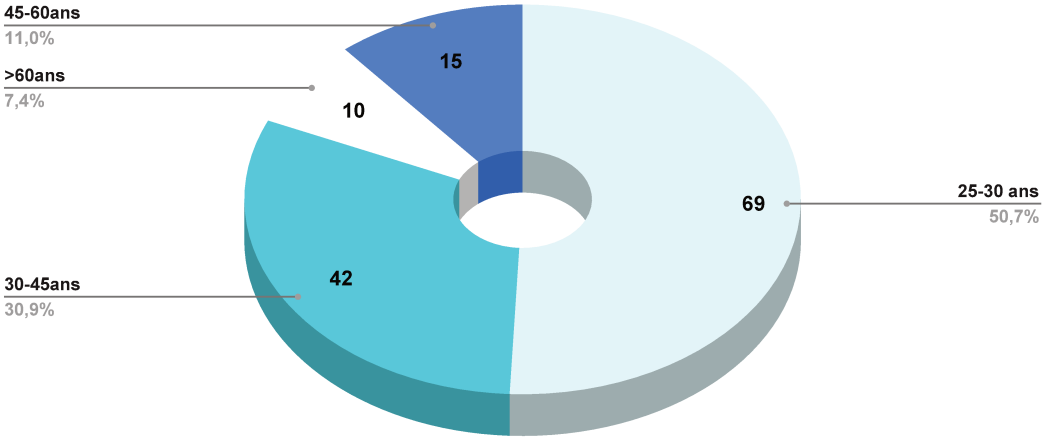
Pour fluidifier la lecture de ce travail, nous avons choisi de regrouper les résultats et la discussion.

A. Description de la population

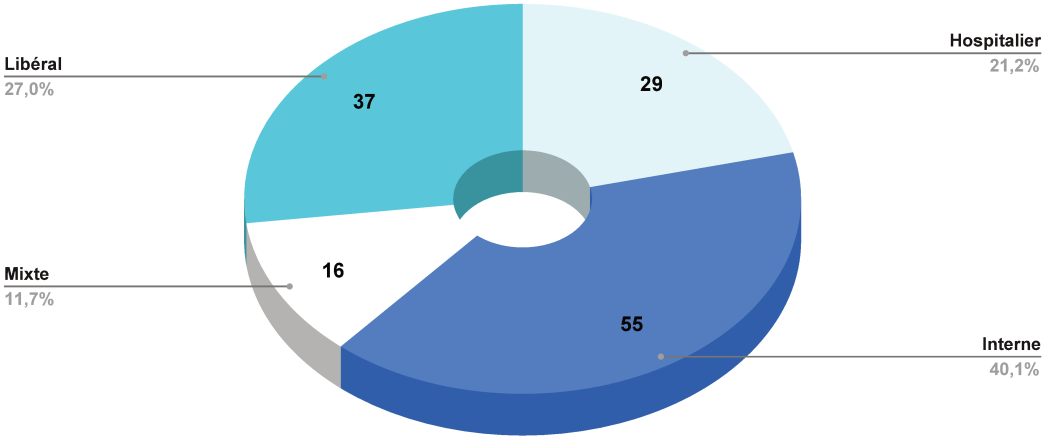
Au total, 137 questionnaires ont été remplis et analysés.

La répartition selon l'âge des patients était la suivante :

À quelle tranche d'âge appartenez-vous ?



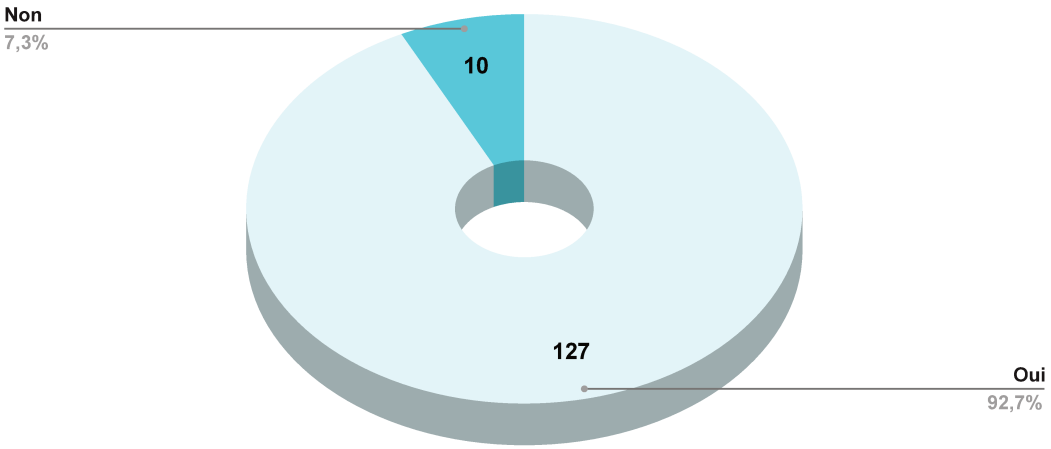
Quel est votre mode d'exercice?



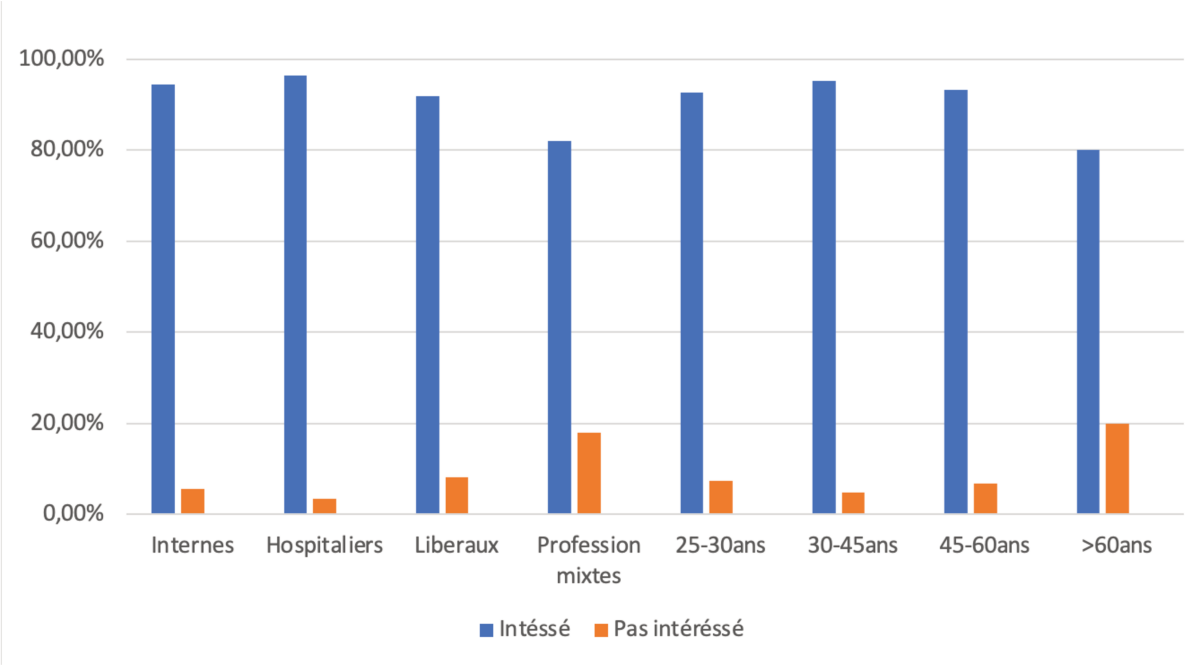
Notre échantillon se compose de 55 internes, 37 médecins installés en libéral, 29 médecins hospitaliers et 16 ophtalmologistes ayant une activité mixte (libérale et hospitalière).
Nous avons obtenu 98 réponses d'ophtalmologistes issus des Hauts-de-France et 39 réponses de médecins exerçant dans les autres régions de la France Métropolitaine.

B. Un intérêt presque unanime pour cette nouvelle technologie

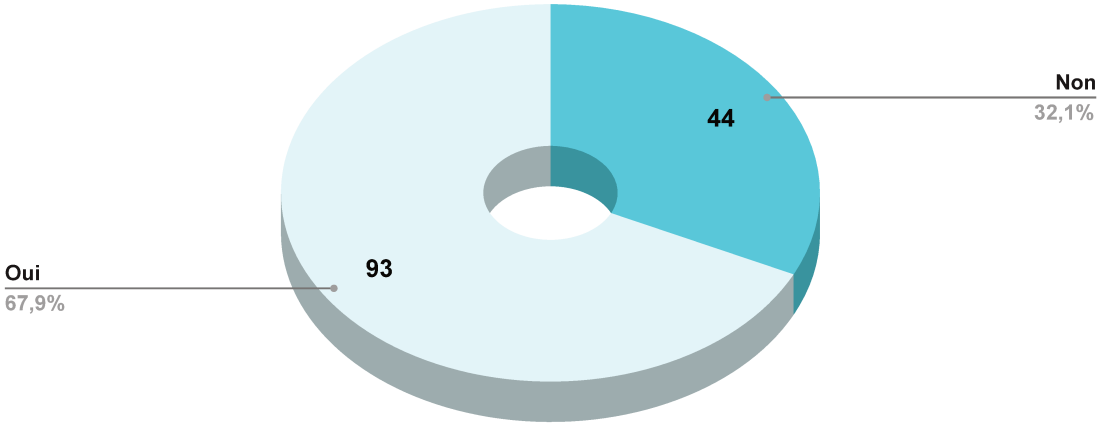
Êtes-vous intéressé par le sujet ?



Le premier constat de notre étude est que l'IA suscite un réel intérêt au sein de notre profession (92,7%).
Cet intérêt est plutôt homogène entre les différents sous-groupes.

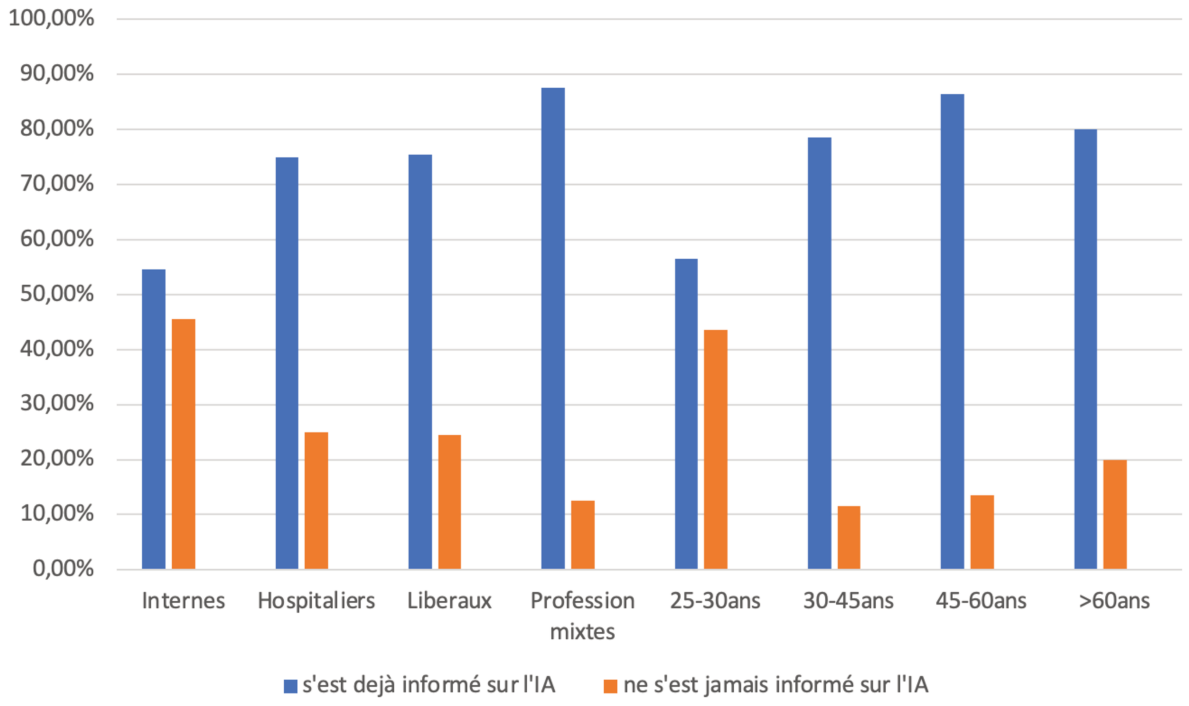


Avez-vous déjà assisté à des conférences ou lu des articles sur l'intelligence artificielle en ophtalmologie ?



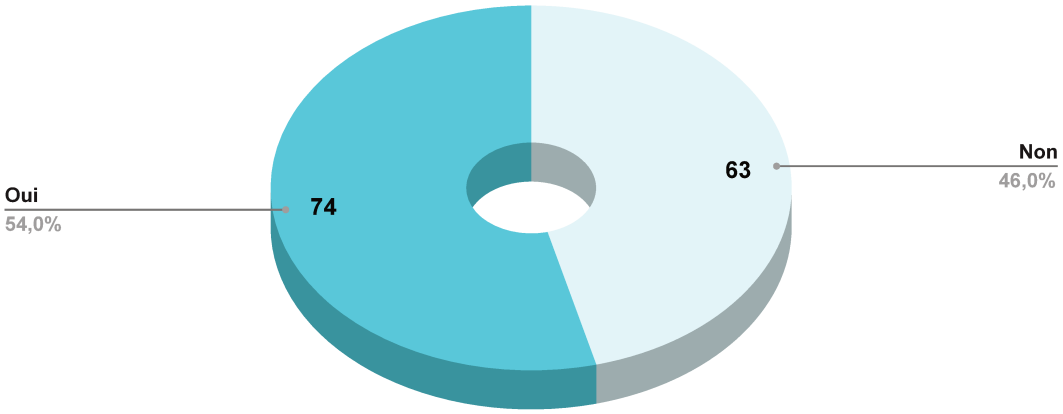
Preuve que le sujet est en vogue, deux tiers d'entre nous a déjà lu un article ou assisté à une conférence sur l'IA en ophtalmologie.

Les internes et le groupe des 25-30 ans (qui représentent globalement la même population) sont ceux qui s'informent le moins. On peut supposer qu'en début de formation ou de carrière, leur temps est essentiellement consacré à l'apprentissage de la spécialité.



C. Des connaissances hétérogènes

Pourriez-vous donner une définition précise de l'intelligence artificielle ?

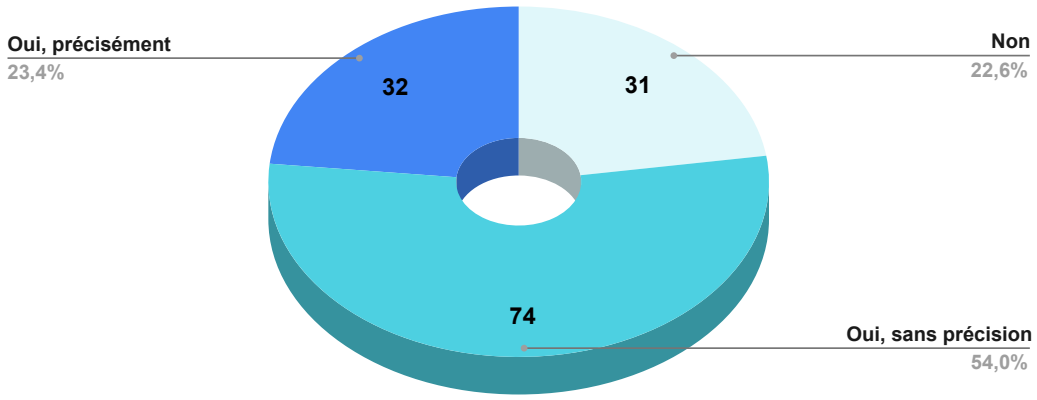


Il est évidemment délicat d'évaluer les connaissances des uns et des autres sous forme de questions fermées.

Nous étions partis du postulat que les ophtalmologistes avaient peu de notions sur l'intelligence artificielle et il semblerait que nous ayons eu tort.

En effet, 54% de notre échantillon pense pouvoir la définir précisément. Il s'agit cependant d'une question subjective dont la réponse dépend de la perception de ses propres connaissances.

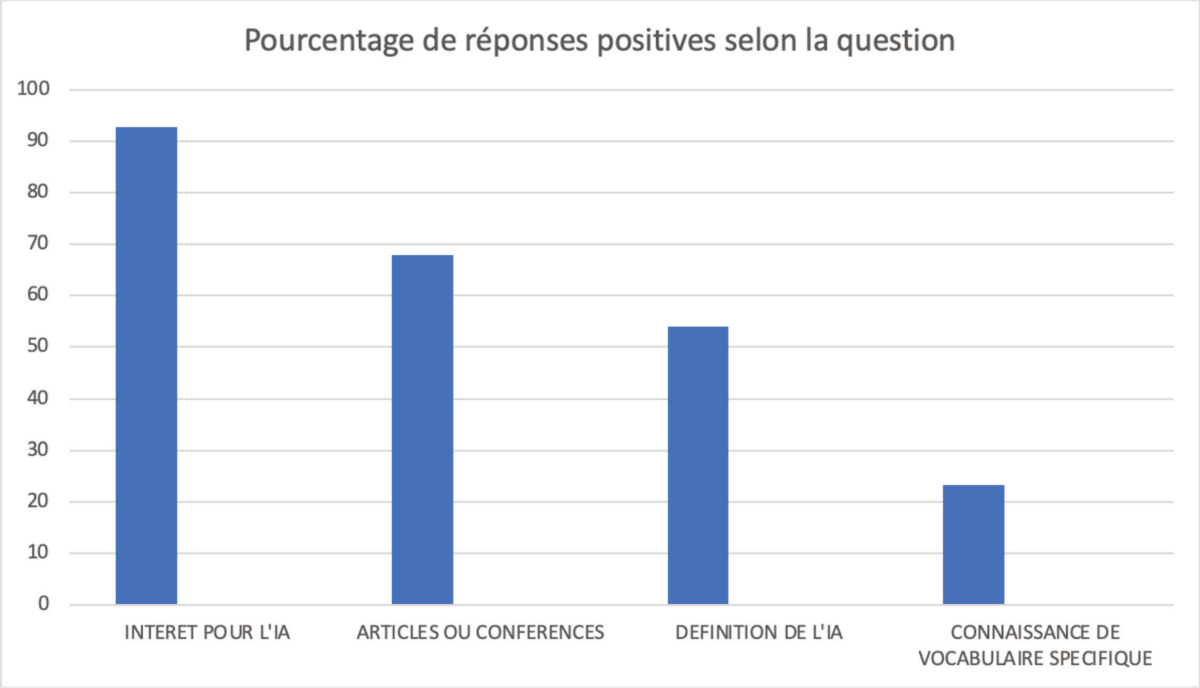
Connaissez-vous les termes « machine learning » et « deep learning » ?



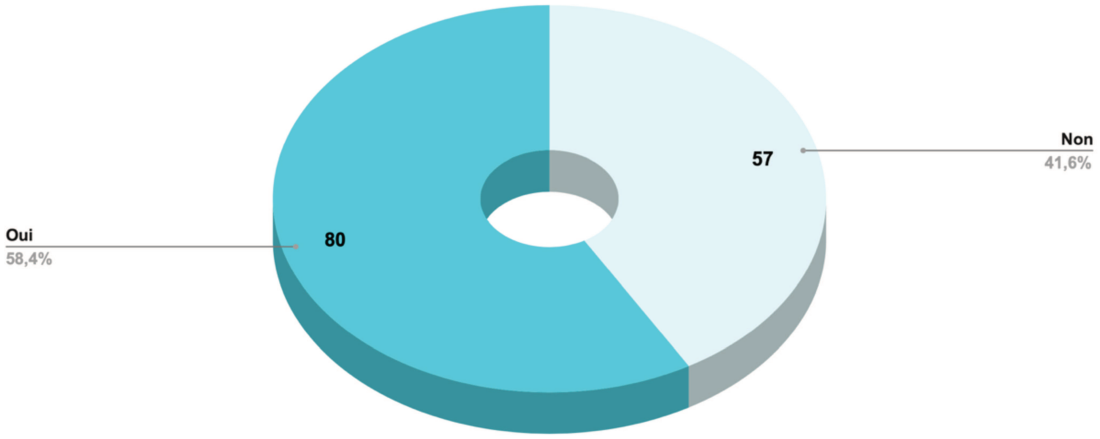
Effectivement, seuls 23% connaissent précisément les termes de « machine learning » et « deep learning » qui constituent pourtant les notions essentielles et basiques de l'IA. A titre comparatif, ils sont à l'égal des termes « réfraction » et « fond d'œil » en ophtalmologie.

Cette réponse ne nous surprend pas puisque l'IA n'est pas apprise dans notre cursus et qu'actuellement ces connaissances s'apparentent plus à de la culture générale qu'à un savoir médical.

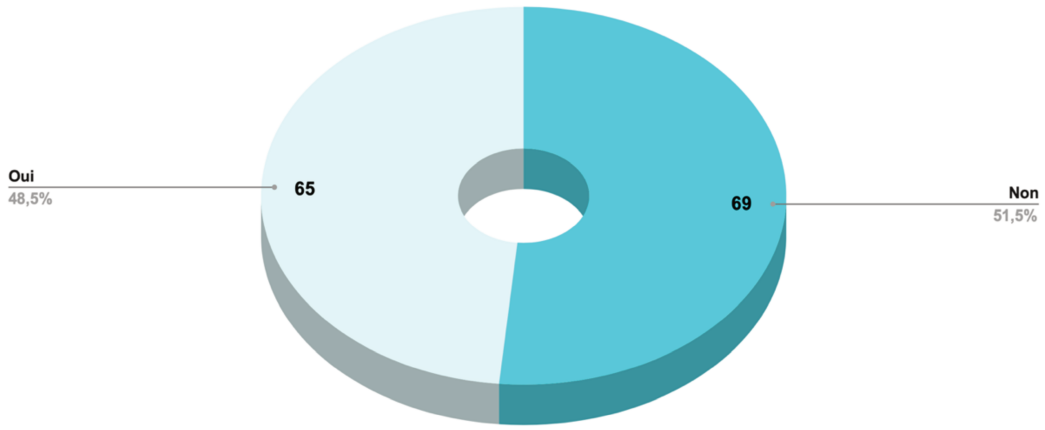
En nous attardant sur ces quatre dernières questions, nous constatons une décroissance progressive mais incontestable des réponses positives. En effet, la majorité des personnes sont intéressées par le sujet, une grande partie a déjà obtenu des informations sur l'IA au moins une fois, une petite moitié pense pouvoir la définir et enfin un simple quart peut véritablement expliquer des notions simples de l'IA.



Pensez-vous qu'un algorithme puisse déterminer l'âge, le sexe ou le statut fumeur d'un patient à partir d'une rétinophotographie ?



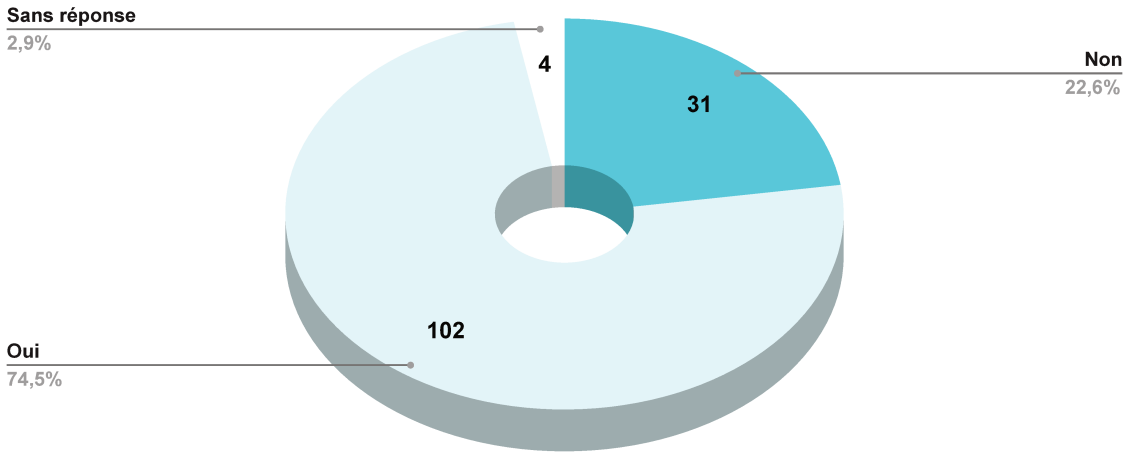
Pensez-vous qu'un algorithme d'intelligence artificielle puisse déterminer la réfraction d'un patient à partir d'une rétinophotographie ?



Lorsque l'on interroge ensuite les ophtalmologistes sur les capacités de l'IA appliquée à notre discipline, ce qui en théorie les concerne plus, 41,6% s'étonnent qu'un algorithme puisse détecter le statut fumeur, l'âge, le sexe ou encore l'IMC à partir d'une rétinophotographie (30).

D'ailleurs, plus de la moitié (51,5%) ignore qu'un algorithme puisse déterminer la réfraction d'un patient à partir d'une rétinophotographie (93).

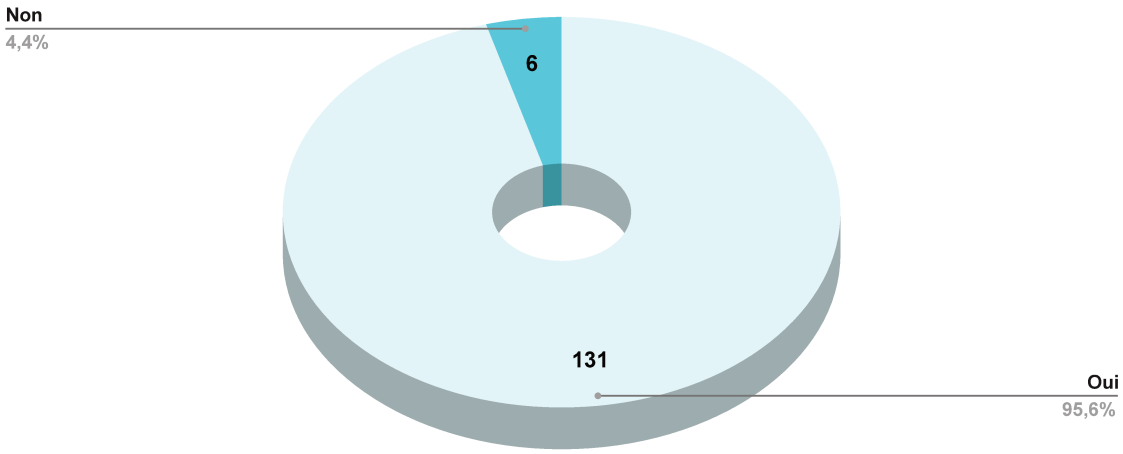
Pensez-vous qu'il existe déjà un algorithme d'intelligence artificielle en ophtalmologie commercialisé dans le monde?



En revanche, 75% savent qu'un algorithme d'IA est déjà commercialisé.
Cela signifie que ce sont les connaissances techniques et théoriques qui font le plus défaut. Au vu de nos réponses, cela proviendrait d'un manque d'informations plutôt que d'un manque d'intérêt. Or, nous verrons plus loin pourquoi il est important de pallier ces lacunes et de mieux informer les médecins sur le fonctionnement de cette nouvelle technologie.
Ceci dit, nous pouvons émettre une réserve liée à la méthode de questionnement. En effet, bien que les réponses soient anonymes, les questionnaires ont été envoyés personnellement pour une grande partie, et on peut imaginer que l'intérêt décrit est peut-être surestimé.

D. Les ophtalmologistes conscients de l'arrivée de l'IA

Pensez-vous que l'intelligence artificielle puisse un jour être intégrée dans votre pratique quotidienne en consultation ?

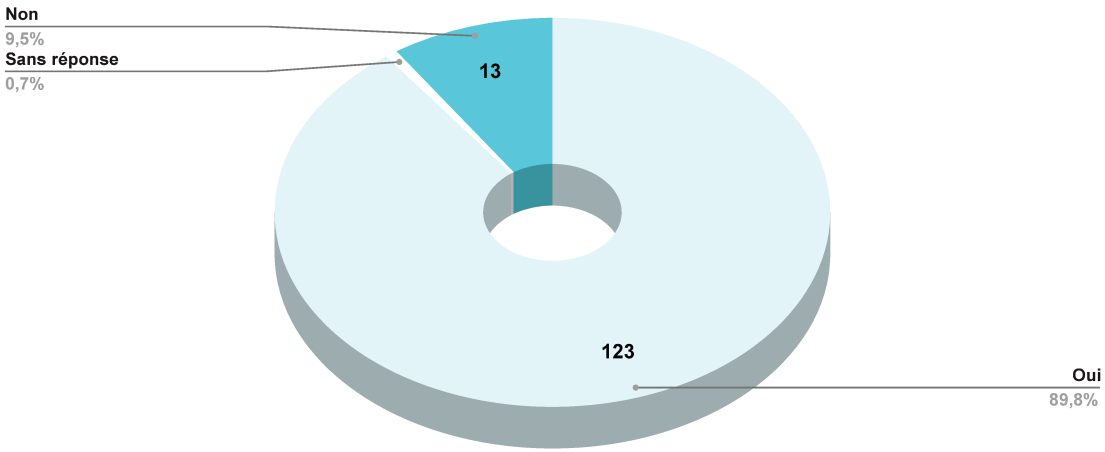


Même si l'IA n'est pas le principal sujet des discussions entre ophtalmologistes, nous avons pleinement conscience que cet outil se mêlera étroitement à notre pratique quotidienne dans un futur plus ou moins proche.
Cette question fait quasiment l'unanimité puisque seulement 6 ophtalmologistes, soit 4,4% de notre échantillon, ne pensent pas utiliser cette technologie un jour.

E. Les bénéfices espérés

1. Améliorer nos conditions de travail

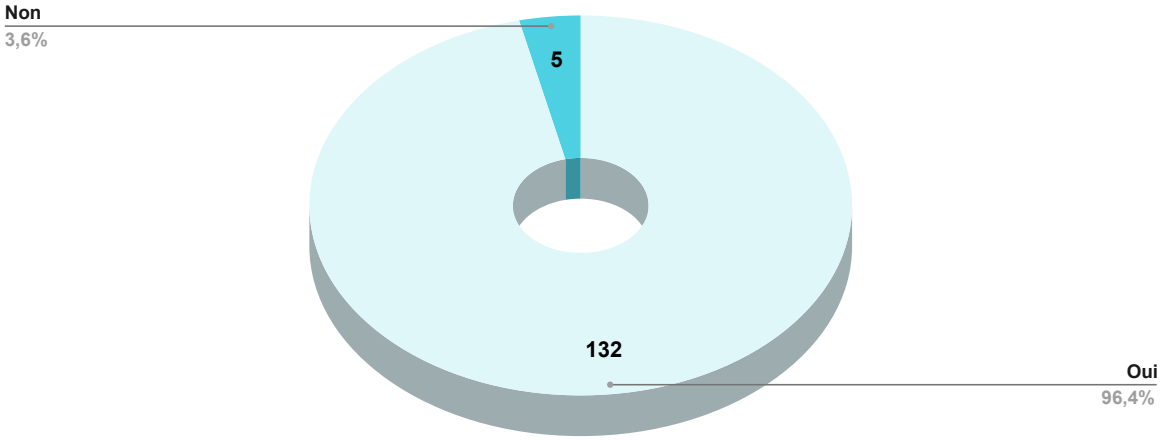
Pensez-vous que l'apport de l'intelligence artificielle en ophtalmologie puisse améliorer vos conditions de travail ?



Pour une grande majorité des médecins interrogés, l'IA est perçue comme un allié à venir puisque 89,8% d'entre eux estiment qu'elle permettra d'améliorer les conditions de travail en consultation. Ceci est particulièrement vrai chez les jeunes générations avec 91,3% des 25-30 ans qui ont répondu « oui » à cette question, ainsi que 95,2% des 30-45 ans, contre 80% des plus de 45 ans.

Il s'agit d'une question fermée qui ne permet pas d'expliquer par quels moyens les médecins s'attendent à ce que l'IA améliore leurs conditions de travail ; mais, en analysant les questions ouvertes, le gain de temps apparaît comme le principal bénéfice attendu de cette technologie pour 27 participants (23%).
Et même s'il ne représente pas l'avantage principal pour tous, 96,4% des médecins pensent tout de même que l'IA permettra de gagner du temps.

Pensez-vous que l'apport de l'intelligence artificielle en ophtalmologie pourrait vous permettre de gagner du temps sur vos tâches répétitives en consultation ?



Il convient à présent de s'interroger sur la façon dont est perçu le gain de temps.

Que signifie « gagner du temps » pour les ophtalmologistes ?

- Être plus rapide, et ainsi augmenter le nombre de consultations par jour ?
- Dégager du temps afin d'être plus disponible pour les patients ?

Ces deux possibilités sont envisageables et pourtant elles débouchent sur des pratiques tout à fait différentes.

En réalité, le CCNE a déjà répondu à cela et rappelle que « les technologies du numérique doivent rester une aide à la décision » et estime que « le temps ainsi gagné devrait être mis à profit pour libérer du temps d'écoute, d'échange, de prise en compte personnelle du patient » (101).

2. Gain de performance

Le chapitre « application en ophtalmologie » nous a permis de passer en revue l'éventail des capacités de l'IA, concernant tous les domaines de l'ophtalmologie.

Elle permet d'accroître nos performances de trois façons :

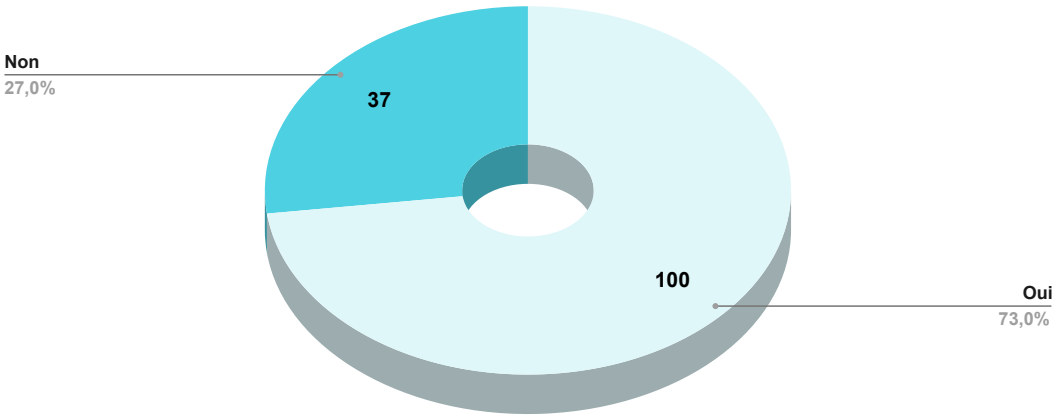
- Améliorer la précision des diagnostics ;
- Améliorer la précision des pronostics ;
- Orienter les prises en charges thérapeutiques.

Ces améliorations ont été citées par 35 participants dans les réponses ouvertes et semblent constituer une des grandes attentes des médecins.

Il semble évident pour la plupart d'entre nous que si nous utilisons l'IA à bon escient, nous serons plus efficients dans notre démarche de soins au quotidien.

3. Réduire les inégalités socio-démographiques

Pensez-vous que l'apport de l'intelligence artificielle puisse réduire les inégalités d'accès aux soins en ophtalmologie ?



L'intelligence artificielle pourrait soulager un système de santé surchargé en ophtalmologie.

Comme nous l'avons expliqué dans notre introduction, ceci s'explique par trois phénomènes majeurs :

-la répartition hétérogène des ophtalmologistes sur le territoire ;

-le peu de médecins formés à l'ophtalmologie avec des départs à la retraite qui ne pourront pas être remplacés ;

-le besoin croissant secondaire au vieillissement de la population.

Les régions sous-médicalisées du pays et du globe pourraient donc bénéficier de l'avènement de l'IA. Par exemple, l'utilisation de l'IA par des centres médicaux, avec relecture par un ophtalmologiste à distance, dans le cadre d'un dépistage massif, permettrait de réduire les inégalités démographiques.
Par ailleurs, le développement actuel de la télémédecine, accéléré par la crise du Covid19, sera plus efficient avec les outils d'intelligence artificielle.

Ce constat est partagé par 73% des ophtalmologistes ayant répondu à notre questionnaire.

Comme le rappelle le CNOM : « Il est impératif que les progrès attendus des technologies d'intelligence artificielle profitent à tous et n'accentuent pas des fractures sociales, socio-économiques ou culturelles mais contribuent à réduire les inégalités et les risques d'exclusion » (102).

Pour être véritablement bénéfique, l'utilisation de l'IA dans cette optique doit s'inscrire dans une prise une charge globale assurant aux patients un accès aux traitements si besoin. Quel serait l'intérêt de diagnostiquer une rétinopathie diabétique œdémateuse chez un patient qui n'aurait pas accès aux injections intra-vitréennes ?

4. La recherche « inversée »

L'intelligence artificielle offre la possibilité de réinventer la recherche à travers ce que l'on appelle « la recherche inversée ».

En effet, grâce à l'apprentissage profond, l'IA permet d'établir des diagnostics que les humains n'auraient pas pu poser sans elle.

Cela signifie que l'IA analyse des éléments que nous ne percevons pas ou que jusqu'alors nous n'avions pas envisagé de prendre en compte. Soit parce que nous ne le pouvons pas car cela dépasse non capacités sensorielles, soit parce que nous n'avons pas la connaissance scientifique nous permettant de considérer certains éléments comme pertinents.

En établissant des prédictions justes qui dépassent nos compétences, l'IA nous invite à élargir nos connaissances en recherchant les caractéristiques qui lui ont permis d'aboutir à ces résultats.

La littérature abonde en ce sens, puisque la plupart des articles concernant l'IA insistent sur l'intérêt de poursuivre les recherches en se concentrant sur son fonctionnement. Beaucoup ont proposé par exemple de se servir une cartographie thermique pour repérer les régions anatomiques utilisées par l'algorithme pour obtenir ses résultats.

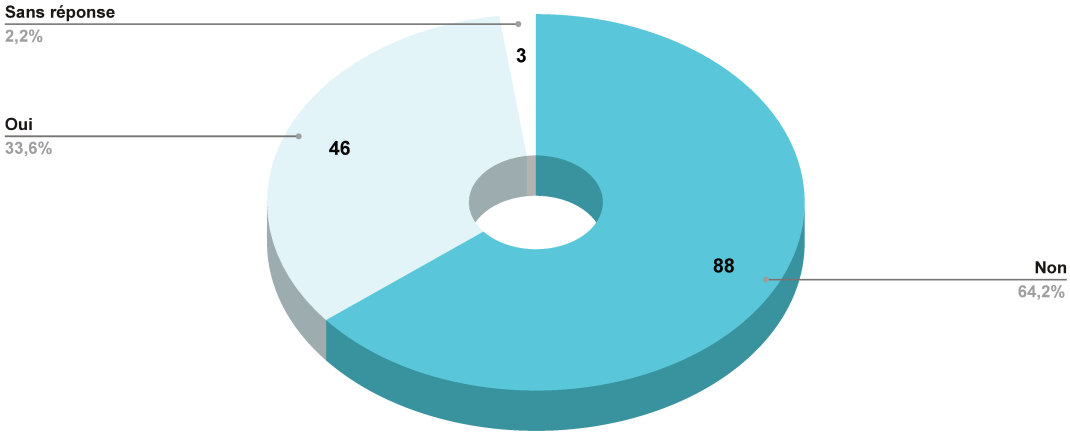
La revue de la littérature nous a véritablement permis de prendre conscience du potentiel de cette recherche inversée. Elle offre à la communauté scientifique des perspectives inattendues en ouvrant une nouvelle branche de recherche qui s'appuie sur un autre fonctionnement que celui utilisé jusqu'à présent. Il s'agit d'une opportunité à saisir, permettant d'élargir considérablement et rapidement nos connaissances, au-delà de ce que nous aurions espéré.

Bien que cet argument n'ait été cité que par un seul ophtalmologiste, certainement en raison du manque de lectures à ce sujet, c'est sûrement l'avantage le plus prometteur de l'IA.

F. Les risques encourus

1. Déshumanisation de la profession

Pensez-vous que l'apport de l'intelligence artificielle en ophtalmologie puisse améliorer votre relation médecin-patient ?



Lorsque l'on imagine la pratique de l'IA en ophtalmologie dans un futur plus ou moins proche, l'image d'un patient face à un robot, aussi caricaturale soit elle, apparaît vite. Cela traduit une crainte naturelle face à une technologie en pleine expansion que nous ne connaissons pas encore suffisamment.

On peut distinguer deux aspects à cette crainte : celle de perdre notre profession ou en tout cas d'être relayé au second plan, et celle de voir disparaître la relation médecin-malade.
Nous avons déjà insisté sur la dimension relationnelle de notre métier en nous appuyant sur le serment d'Hippocrate. Il s'agit d'un aspect fondamental de notre pratique que nous ne pouvons pas nous permettre de fragiliser.

Or, environ deux tiers des médecins interrogés (64,2%) ne pensent pas que l'IA puisse améliorer la relation médecin-malade et au contraire, en analysant les questions ouvertes, 21 participants (15%) considèrent qu'une déshumanisation de la profession est l'élément le plus dangereux lié à l'arrivée de l'IA.

Comment interpréter cela ?
Il semblerait que l'IA soit perçue comme un outil destiné à accroître nos performances globales en termes de diagnostic, de rapidité ou encore de rentabilité. Et ces notions s'opposent certainement pour beaucoup à l'empathie, à l'écoute et à la disponibilité.

Mais ne serait-ce pas une vision manichéenne de nos pratiques, que de considérer a priori absolument incompatibles rapidité, efficacité et empathie ? L'IA ne pourrait-elle pas nous aider à rendre ces exigences conciliables ?

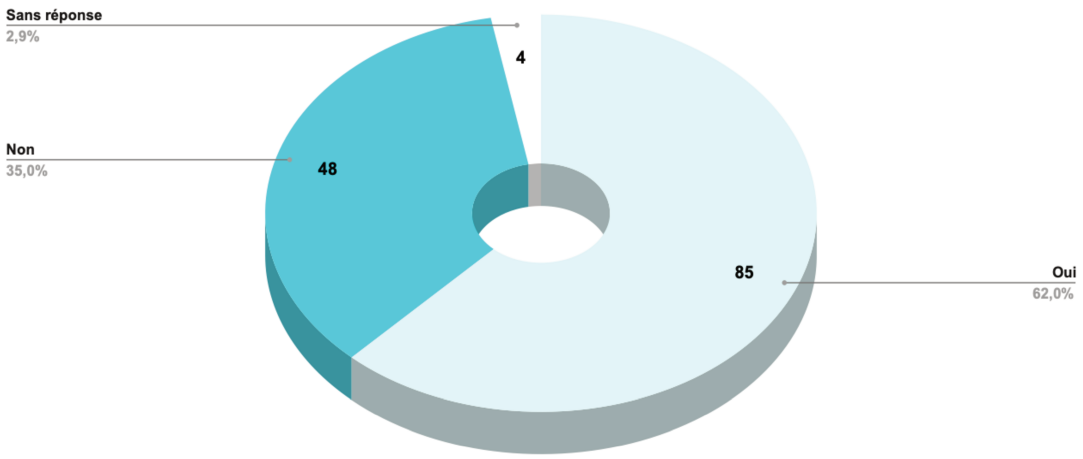
Le fait que les internes soient plus pessimistes concernant l'impact de l'IA sur la relation médecin-malade signifie que l'expérience acquise par les anciens permet au moins de concevoir comme possible cette difficile conciliation.

Nous pouvons reprendre l'exemple du gain de temps qui peut tout à fait permettre au médecin de se libérer pour des patients aux pathologies plus lourdes ou pour des consultations plus « complexes » (106). Le gain de temps profiterait ainsi au patient et non à la multiplication des consultations dans un but qui pourrait être à visée lucrative.

Dernier élément d'analyse, 68 ophtalmologistes sur les 88 (soit 77%) ne pensant pas que l'IA puisse améliorer la relation médecins-malades, sont néanmoins prêts à l'utiliser. Cela pourrait signifier qu'ils la considèrent comme un outil dédié à améliorer les conditions de travail beaucoup plus qu'un outil pouvant favoriser la dimension humaine de notre profession.

2. Risque d'accorder trop de confiance à cet outil « mystérieux » ?

En cas de désaccord entre l'algorithme d'intelligence artificielle et votre raisonnement sur un cas clinique, cela pourrait-il remettre en cause votre conviction personnelle ?



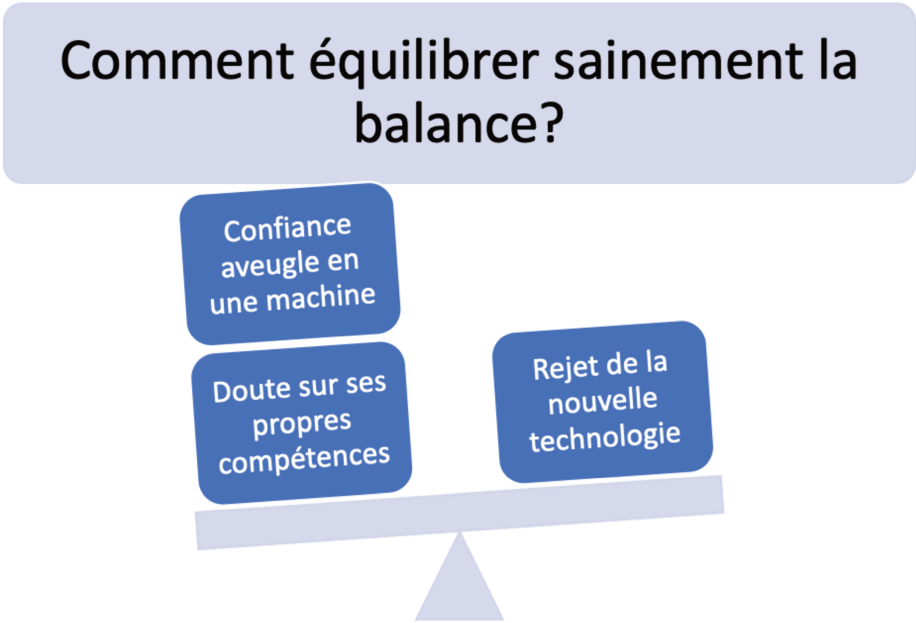
62% de notre échantillon remettrait en question sa conviction personnelle si l'avis de la machine divergeait du sien.
Ce résultat nous amène à plusieurs réflexions que nous développons ci-dessous.

a) Une confiance en l'algorithme liée à un manque de confiance en soi

A travers l'analyse des sous-groupes, on observe que 71% des internes remettraient en cause leur conviction contre 56% des médecins détenteurs d'une thèse.
On retrouve aussi une décroissance de la remise en cause avec l'âge (69,5 % des 25-30 ans, 57% des 30-35 ans, 48% des plus de 45 ans).

Encore une fois les internes se distinguent et doutent plus des capacités humaines. Nous en déduisons donc que l'expérience permet d'engranger une confiance en soi plus importante et de désacraliser la machine.

Cependant, exprimer des doutes n'est pas forcément un aveu de faiblesse. Savoir se remettre en question est tout à fait louable et permet aussi de progresser quel que soit son âge et son expérience.
La difficulté réside en la capacité à faire le distinguo entre une conscience saine de ses propres limites et une confiance excessive en une machine.



b) <u>Une confiance en l'algorithme par idéalisation de la technologie</u>

De façon assez surprenante, les médecins les moins informés au sujet de l'IA ne vont pas hésiter à remettre en question leur propre conviction en faveur de la machine : parmi les 44 ophtalmologistes n'ayant jamais lu d'articles ou assisté à des conférences sur l'IA, 31 se remettraient en question, soit 70%. De même, parmi 63 ophtalmologistes ne sachant pas définir l'IA, 38 douteraient d'eux-mêmes, soit 60%.
On peut donc parler de confiance aveugle en l'IA puisque ces personnes ne sont pas informées de ses performances. Cela traduit une forme d'idéalisation des nouvelles technologies. L'IA apparaît comme digne de confiance simplement par ce qu'elle est : une machine.

c) *Des prouesses suscitant la méfiance*

Parmi les 10 ophtalmologistes non intéressés par l'IA et les 18 refusant de l'utiliser, respectivement 40% et 35% d'entre eux remettent tout de même en cause leur conviction personnelle face à elle.
Cela signifie que ces derniers reconnaissent les capacités de l'IA en tant qu'aide diagnostique. Alors comment expliquer le refus de cette technologie ?
La première hypothèse à évoquer est la crainte face à un outil potentiellement plus performant que l'humain. Ceci est conforté par le fait que 59% des ophtalmologistes qui perçoivent l'IA comme une menace lui ferait confiance en pratique. La seconde hypothèse s'explique par les effets néfastes de l'IA. Certains ophtalmologistes considèrent sûrement que le potentiel de cette technologie ne suffit pas à la rendre attractive au vu des bouleversements qu'elle risque d'induire et que nous évoquons dans ce chapitre.

d) *Une confiance à modérer en raison de l'effet boîte noire*

Il est impératif que les médecins comprennent le phénomène de boîte noire. Elle constitue le seul véritable élément objectif que l'on peut reprocher à l'IA, freinant l'enthousiasme suscité par ses résultats.

Pour comprendre dans quelle mesure le mystère de la boite noire pose problème à la communauté scientifique, il convient de revenir aux fondements même de la science.
En effet, alors que depuis des siècles, ces fondements s'opposent à ceux de la simple croyance, la boîte noire semble y faire appel.
Si l'on se fie à la définition de la science selon le Larousse, il s'agit d'un « ensemble cohérent de connaissances relatives à une certaine catégorie de faits, d'objets ou de phénomènes obéissant à des lois ou vérifiés par les méthodes expérimentales » ou encore d'une « discipline ayant pour objet l'étude des faits, des relations vérifiables ».
Le phénomène de boîte noire apparaît clairement en opposition à ces définitions.

N’est-ce pas paradoxal, qu’arriver à un stade de technologie si avancée, défiant l’intelligence humaine et menaçant de la surpasser, les scientifiques en soient réduits à « croire » ? Peut-on en 2021 se définir comme scientifique et promouvoir une technologie si obscure ?
Quelle serait notre légitimité dans une situation où nous serions devenus relecteurs et non acteurs et donc dépendants d’un algorithme que nous ne comprenons pas parfaitement ?
Présentée de la sorte, il ne fait aucun doute que la poursuite de l’intelligence artificielle et son intégration au quotidien ne pourra se faire que si nous trouvons le moyen de nous affranchir de ce phénomène.

Aucun participant à l’étude n’a cité la boîte noire dans les questions ouvertes, probablement par ignorance de ce phénomène qui est pourtant devenu la préoccupation principale des concepteurs.

3. Perte de la réflexion intellectuelle

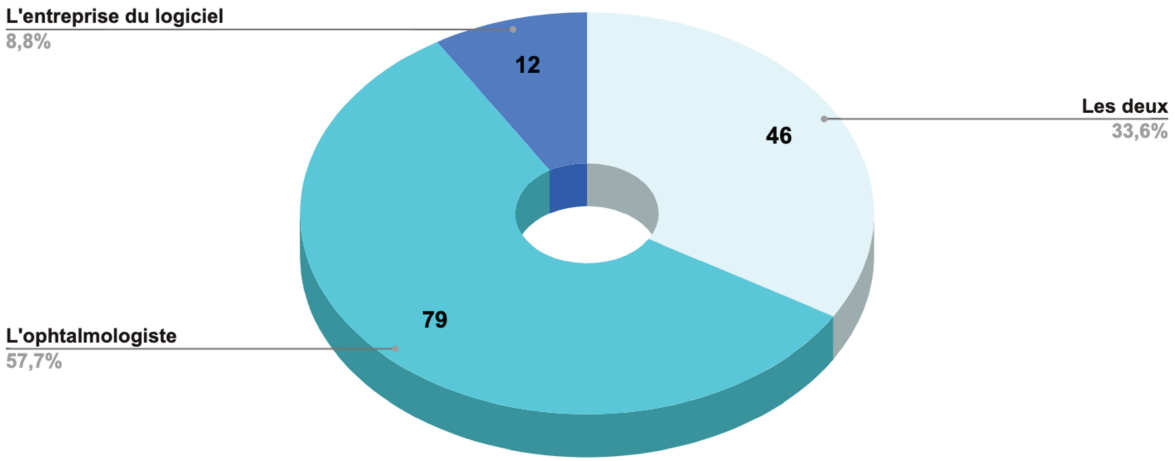
La perte de la réflexion intellectuelle accompagnant la robotisation de notre métier constitue une crainte majeure exprimée par nos confrères.
En témoignent les réponses ouvertes dans lesquelles 30 ophtalmologistes soulèvent cette problématique devant le risque de déshumanisation du métier (21 médecins) et le risque de dérives financières (20 médecins).

Pour illustrer la légitimité de cette crainte, nous citerons un exemple non médical mais néanmoins très parlant : le recours au GPS. La disponibilité permanente des GPS grâce à nos téléphones a contribué à son utilisation quasiment systématique. Or, une étude Britannique de l’University College London (107) a démontré, à l’aide d’une IRM fonctionnelle mesurant l’activité cérébrale, que l’utilisation du GPS désactive certaines régions du cortex pré-frontal (impliquées dans le processus de décision et de planification) et de l’hippocampe (impliqué dans l’orientation spatiale et la mémoire).

En rapportant ces résultats à notre situation, nous pouvons supposer que le recours systématique aux algorithmes d'IA diminue notre activité cérébrale, aboutissant à une « pauvreté intellectuelle » (sic). Perdre notre capacité de raisonnement revient à remodeler complétement notre métier et remet en cause notre légitimité. Comment se définir comme acteur du système de soins et décisionnaire si nous nous reposons entièrement sur l'IA ? (108)

Ce pronostic semble excessif et bien sombre mais il permet de garder à l'esprit que si l'IA augmente nos performances médicales, elle ne doit certainement pas se substituer à notre réflexion intellectuelle et notre expérience, auquel cas nous risquerions d'être les grands perdants de cette association IA-humain.

En cas d'erreur diagnostique lors de l'utilisation d'un algorithme d'intelligence artificielle sans relecture par l'ophtalmologiste, quel serait pour vous le responsable légal ?



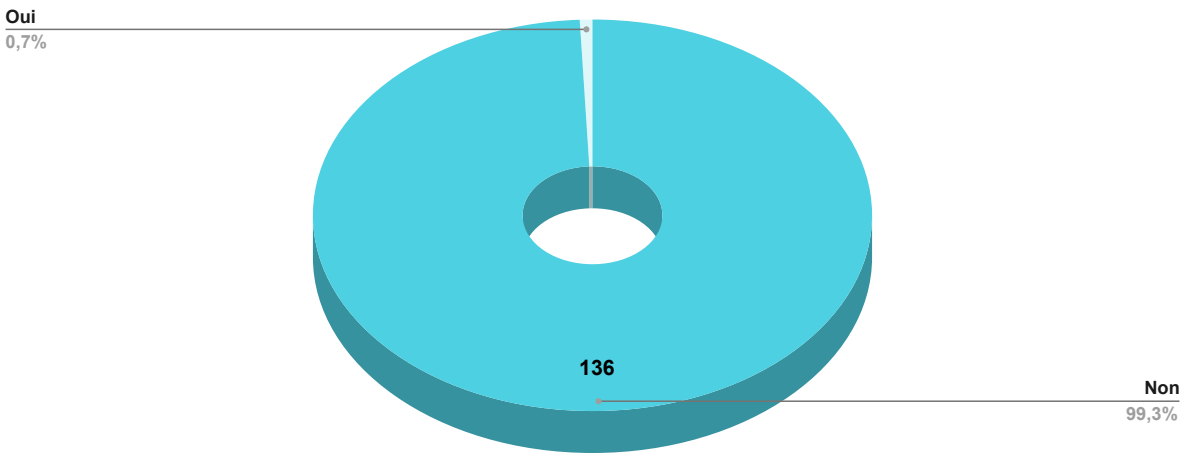
A l'heure actuelle, cette situation n'est pas applicable puisque la juridiction française ne permet pas (encore) l'utilisation d'un algorithme d'IA sans relecture humaine.

Cependant, connaître le positionnement des ophtalmologistes nous semble important. Seulement 8,8 % se dédouane complétement devant une erreur diagnostique commise par la machine alors que 57,7% en endosserait seul la responsabilité, sans même incriminer les concepteurs.
Nous constatons là toute notre implication et notre sens des responsabilités.

Comme pour contrebalancer les craintes émises à la question précédente, celle-ci démontre que nous nous percevons comme véritable décisionnaire dans la prise en charge des patients et que nous ne nous dérobons pas devant une situation inconfortable.

C'est ce constat qui nous semble le plus pertinent : nous assumons pleinement notre rôle et tenons à rester responsables dans toutes les situations, même les plus pénibles. L'hypothèse d'un médecin relayé au second plan dans le système de soins apparaît peu crédible au vu de ces réponses.

Si un logiciel d'intelligence artificielle d'aide au diagnostic devenait disponible, seriez-vous pour l'interprétation automatique des résultats sans validation par l' ophtalmologiste ?



La réponse à cette question, la seule de notre étude qui fait l'unanimité, conforte notre analyse précédente. Nous tenons véritablement à notre rôle de pilier dans le système de soin ophtalmologique.

Cela signifie que quels que soient nos intérêts, nos connaissances ou notre confiance en l'IA, nous refusons en bloc l'utilisation de cet outil sans nous.

Par sagesse ou par méfiance, nous n'envisageons pas d'être remplaçables.

4. Des dérives financières

a) *De la part des ophtalmologistes*

Cette éventualité n'a pas été évoquée par les participants à l'étude, mais (pour être honnête) il nous semblait important de l'aborder.
Avec un tel outil entre les mains, il est tout à fait possible d'augmenter le débit de patients en consultation à des fins lucratives, sans apporter de plus-value dans le soin apporté.

b) *De la part des non-ophtalmologistes*

C'est la 3ème grande crainte des ophtalmologistes exprimée dans les questions ouvertes, avec 20 réponses la mentionnant.
Le risque est que de grands groupes aux intérêts purement pécuniaires s'accaparent de cet outil pour créer un « marché des soins » avec comme étape ultime la mise à l'écart du médecin.
Le marché autour de l'IA est énorme et il est certain que les bénéfices financiers à en tirer attireront des groupes privés. La législation aura ici un rôle important afin de garantir une sécurité médicale en imposant un cadre légal d'utilisation. En effet, l'acquisition exclusive par un médecin pourrait être un gage de qualité de soins.

5. Les risques liés aux « Big data ».

Bien que l'apprentissage de l'algorithme nécessite d'exploiter les données massives, leur utilisation présente des risques spécifiques auxquels nous devons rester vigilants.

a) *La sélection par le biais du numérique*

Les rétinophotographies peuvent informer sur l'âge, le sexe ou encore l'IMC d'un patient. Quels autres éléments pourront-t-elles fournir dans les années à venir ? Quelles utilisations permettront-elles ? Ces informations sur notre santé globale pourraient par exemple être pénalisantes pour certains en cas d'exploitation par des compagnies d'assurance.

Il existe aussi des possibilités de discrimination tout à fait involontaires par le numérique. L'exemple le plus parlant est celui d'Amazon qui a tenté d'intégrer l'IA à sa méthode de recrutement. Or, en utilisant pour son apprentissage les curriculums vitae du personnel de l'entreprise, essentiellement masculin, l'algorithme a évincé les femmes, ce qui a abouti à son abandon.

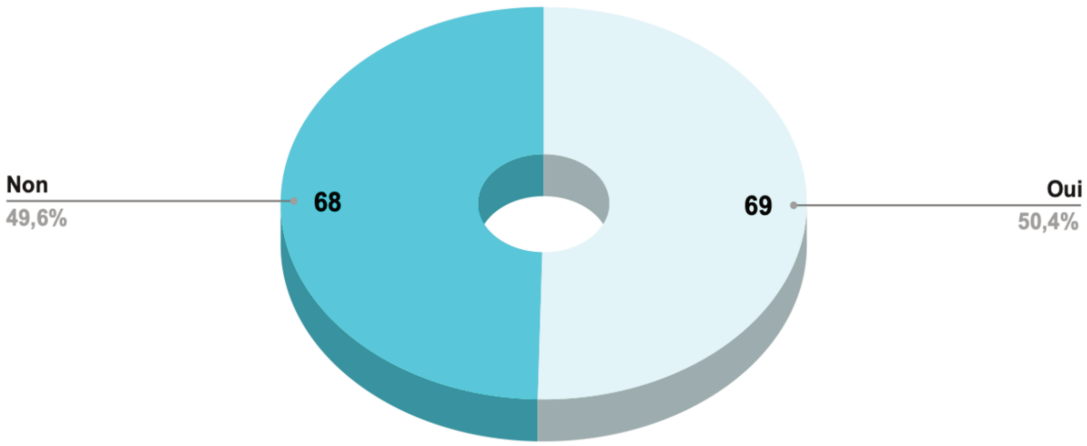
b) La violation des données confidentielles

Avec l'avènement du numérique, la majeure partie d'un dossier médical est dématérialisée, stockée dans un « cloud ». De ce fait, pour éviter toute fuite de données, les établissements médicaux deviennent dépendants du système de sécurité de leurs réseaux.
Depuis 2009, plus de 176 millions de patients aux États-Unis ont été affectés par des violations de données concernant les établissements couverts par la Health Insurance Portability and Accountability Act (109).

Malgré le risque sérieux qu'elle représente, la violation des données n'a été mentionnée que par un seul médecin dans notre enquête. Nous supposons qu'en tant que soignant, la prise en charge de ce risque n'est pas de notre ressort. Nous y sommes donc moins sensibilisés et évoquons au contraire plus spontanément les risques médicaux ou ceux impactant directement notre pratique.

G. L'intelligence artificielle est-elle crainte ?

Pensez-vous que l'intelligence artificielle puisse à terme représenter une menace pour notre profession ?



1. Quelle est la nature de cette menace ?

C'est la question qui divise le plus notre échantillon. Bien sûr, tous les risques sus-cités peuvent expliquer que certains perçoivent l'IA négativement, mais nous allons ici tenter de comprendre plus spécifiquement en quoi notre profession elle-même peut être menacée par cette technologie. Il convient donc de s'interroger sur ce que signifie « menace pour la profession ». S'agit-il d'une crainte d'assister impuissants à la disparition de celle-ci ou de participer malgré nous à sa dénaturation ?

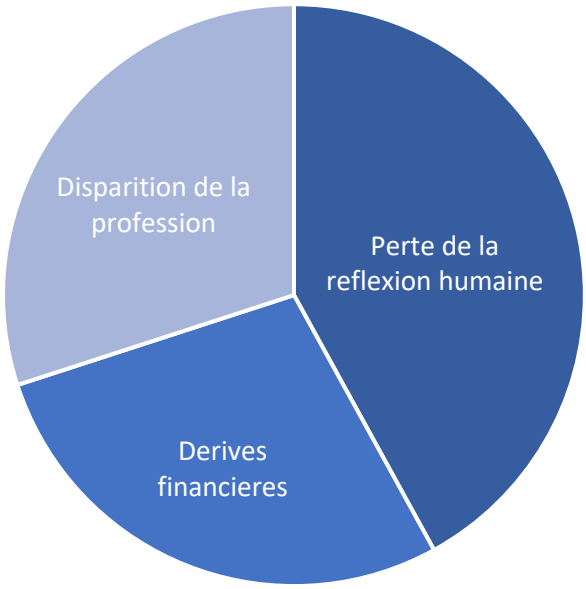
Bien qu'il soit difficile et présomptueux de supposer les arguments ayant motivé les réponses de chaque participant, l'analyse des sous-groupes et des réponses aux questions ouvertes nous permet d'obtenir quelques explications.

Après l'étude des réponses aux questions ouvertes, nous avons distingué trois axes autour desquels s'articulent les craintes des médecins :

- **Diminution de la réflexion humaine.** Pour 30 ophtalmologistes, le plus grand risque est de modifier notre façon d'aborder notre métier et de placer en l'IA une confiance supérieure à celle que nous nous accordons. Ces médecins craignent plus l'utilisation délétère qu'ils risqueraient de faire eux-mêmes de cet outil : se reposer sur lui, se déresponsabiliser, lui accorder une confiance excessive et le laisser seul décisionnaire.

- **Disparition de la profession**. Le risque de diminuer notre activité, voire de la faire disparaître, a été signalé comme étant le plus inquiétant par 21 médecins. De plus, parmi les 69 ophtalmologistes qui se sentent menacés par l'intelligence artificielle, 82,6% pensent que celle-ci diminuera le besoin en ophtalmologistes à court ou moyen terme, alors que parmi les 68 médecins ne se sentant pas menacés, seulement 39,1% le pensent. Ceci nous conforte dans l'idée que cette crainte contribue à considérer l'IA comme une menace.

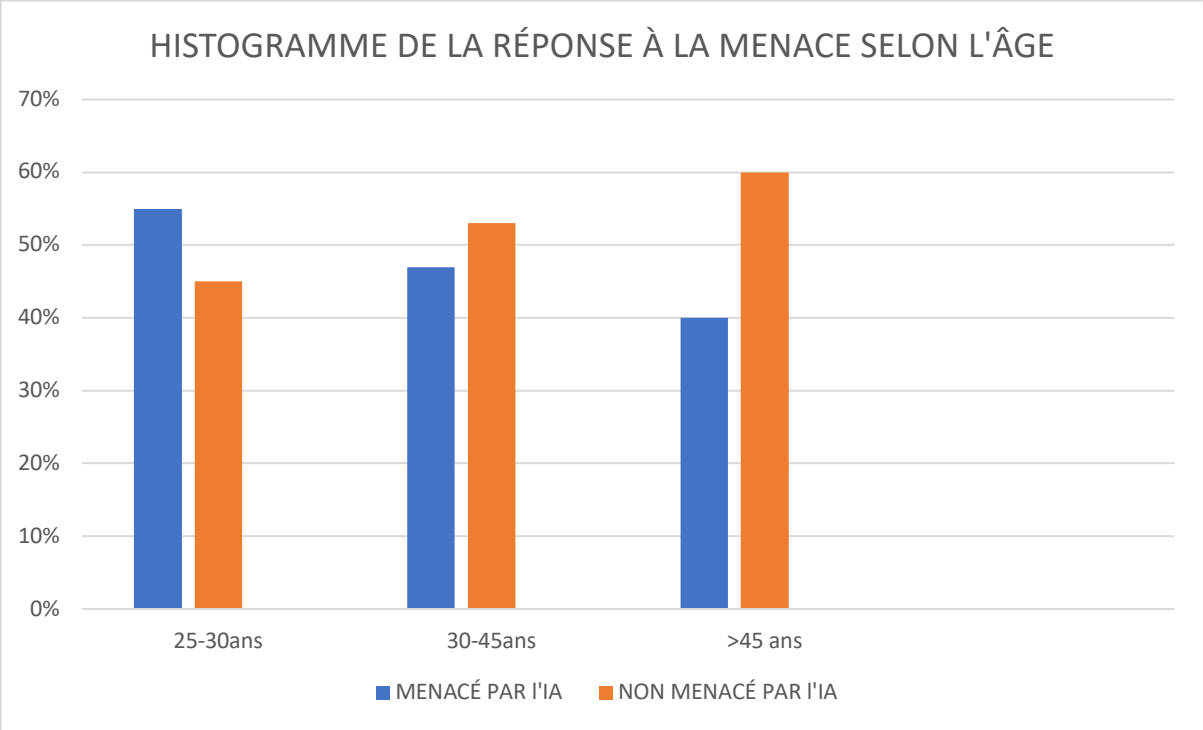
- **Dérives financières**. La possibilité que l'IA soit utilisée par des non-médecins, à but lucratif, représente le plus grand danger pour 20 médecins de notre échantillon.



2. Un sentiment de menace inversement proportionnel à l'âge

Plus les médecins sont jeunes, plus ils perçoivent l'IA comme une menace.
Nous avions déjà établi un constat similaire et supposé que l'expérience permettait certainement d'acquérir une solide confiance en soi, et en ses capacités d'adaptation. De plus, le pessimisme des plus jeunes pourrait traduire le désarroi des plus inexpérimentés qui ont aussi devant eux des décennies pendant lesquelles les innovations risquent d'être de plus en plus fortes et déstabilisantes. Quelles seront les compétences de l'IA dans vingt ans ? Nul ne sait mais elles auront forcément beaucoup évolué.

Par ailleurs, les 25-30 ans représentent plus de la moitié de la population, ce qui crée une surestimation de la réponse « OUI » à cette question.



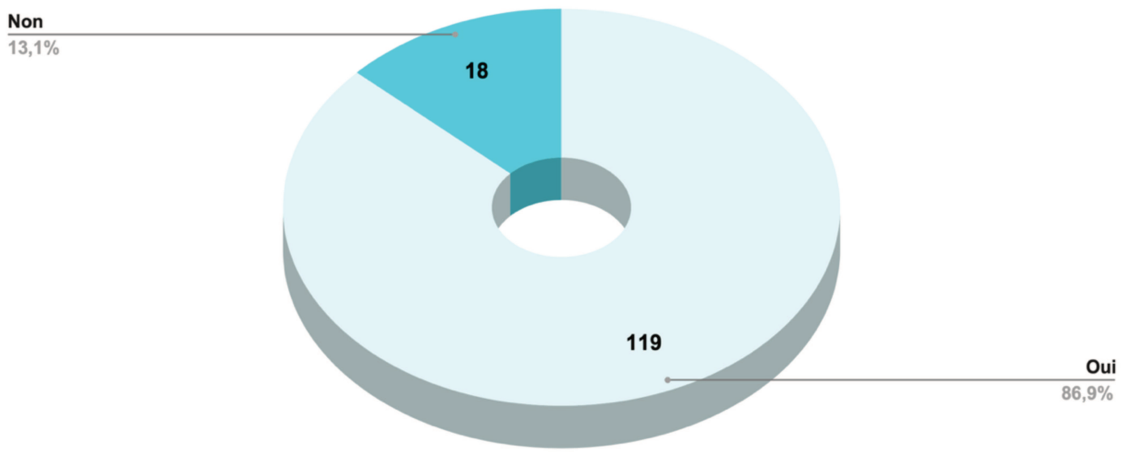
3. Une peur de l'inconnu qui n'explique pas tout

Nous avons émis l'hypothèse que les technologies inconnues suscitaient par essence de la méfiance. Mais cela ne constitue en rien une véritable explication.
D'une part, dans notre étude, la proportion de médecins ayant assisté à des conférences ou ayant lu des articles est la même au sein de l'échantillon de médecins qui perçoivent l'IA comme une menace qu'au sein de l'échantillon global (31,88% contre 32,1%). Il n'y a donc pas de sur-représentation d'ophtalmologistes non informés parmi ceux méfiants envers cette technologie.

D'autre part, même les plus grands chercheurs en intelligence artificielle mettent en garde face aux dérives possibles. En effet, dans un article publié en mai 2014 dans « *The Independent* », Stephen Hawking, physicien connu pour ses travaux sur les trous noirs et Stuart Russel, professeur d'intelligence artificielle à l'université de Berkeley, lancent un cri d'alarme : d'après eux les technologies se développent à un tel rythme qu'elles deviendront vite incontrôlables au point de mettre l'humanité en péril.

4. Une méfiance relayée au second plan

Si un logiciel d'intelligence artificielle d'aide au diagnostic devenait disponible, seriez-vous prêt à l'utiliser dans votre pratique ?

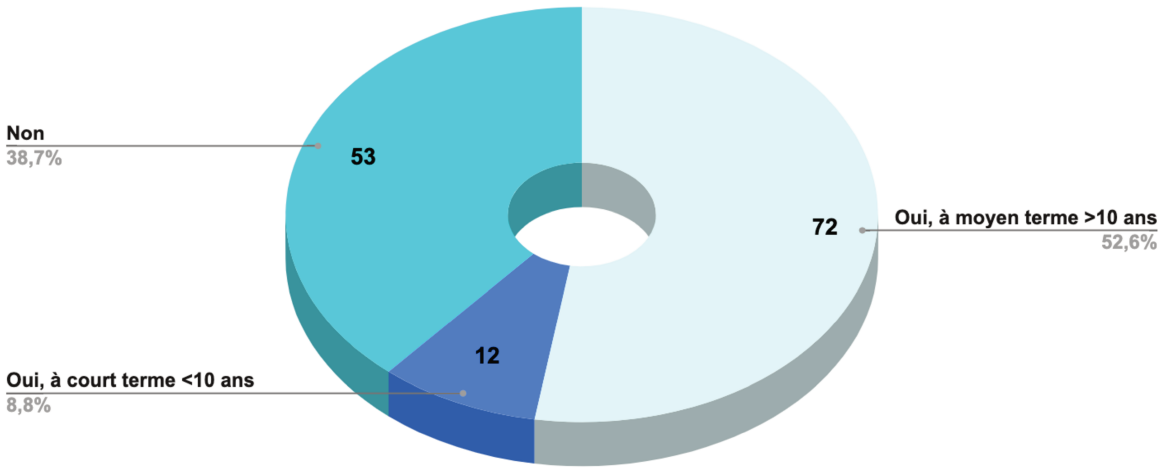


Nous déduisons de cette réponse que se sentir menacé ne signifie pas être réfractaire. Une très grande partie de notre échantillon est prête à intégrer l'IA à sa pratique et 80% des ophtalmologistes se sentant menacés par l'IA acceptent l'idée de travailler avec elle. Cela signifie que, malgré la méfiance que suscite cet outil et les risques encourus, ses avantages prennent le dessus dans la balance « bénéfice/risque ».

H. L'intelligence artificielle peut-elle nous remplacer ?

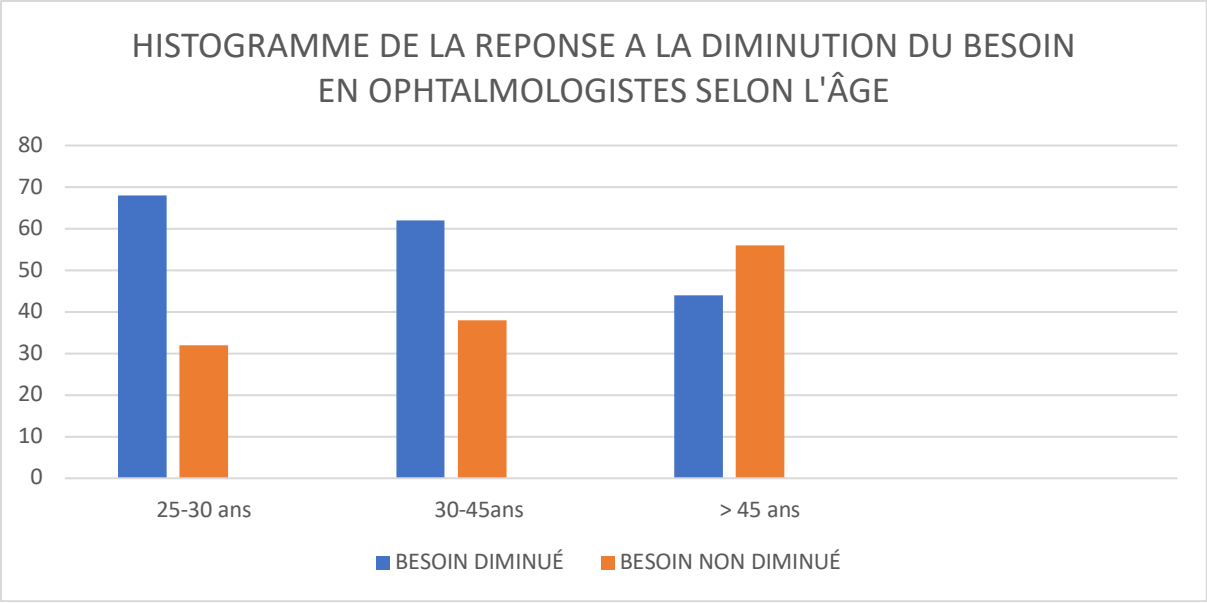
1. Diminution du besoin en ophtalmologistes

Pensez-vous que les algorithmes d'intelligence artificielle puissent diminuer le besoin en ophtalmologistes dans les années futures ?



Presque deux tiers des médecins interrogés estiment que le besoin en ophtalmologistes sera réduit à court ou moyen terme à cause de l'arrivée de l'IA. Ceci est d'autant plus vrai chez les 25-30 ans. On peut supposer que les plus jeunes ont peut-être plus de mal à envisager le métier autrement que par la façon dont ils l'apprennent.

A l'inverse, les plus âgés ont déjà vécu de grandes évolutions dans la profession : perfectionnement du matériel (réfracteur automatique pour remplacer la skiascopie, apparition de l'OCT et des rétinophotographies), travail aidé en consultation. Par exemple, certains auraient pu s'inquiéter de l'acquisition par des opticiens de réfracteur automatique. Pourtant, force est de constater que le besoin en ophtalmologistes n'a en rien été impacté par cela.



Nous ne pouvons cependant pas conclure que la réponse à cette question soit la traduction d'une crainte infondée. Les nouvelles technologies ont transformé le marché du travail ces dernières années, si bien que d'une génération à l'autre, des métiers familiers pour les plus anciens peuvent être tout à fait étrangers aux plus jeunes.

Imaginons une scène du quotidien en 2021 : faire ses courses et passer aux caisses automatiques, faire le plein d'essence, puis rentrer et regarder un film via une plateforme dédiée. Imaginons cette même scène trente ans plus tôt : payer ses courses à l'hôtesse de caisse, saluer poliment le pompiste, puis passer chez le vidéo club choisir son film du soir.

A travers cet exemple, nous venons d'illustrer la disparition de trois professions.

Au nom de la productivité et de la rapidité, certains métiers n'ont plus leur place. Mais il en a toujours été ainsi, les ouvriers à la chaîne en ont notamment fait l'expérience.
Il est donc tout à fait inutile de s'alarmer plus que nécessaire et il convient de rappeler que si certains métiers disparaissent, d'autres émergent et de nouveaux besoins apparaissent dans d'autres secteurs : on parle à ce propos de « destruction créatrice ».

Il est vrai cependant que les changements semblent se faire de plus en plus rapidement en raison de l'avancée exponentielle des technologies. Par ailleurs, si les métiers dits peu qualifiés étaient initialement les plus concernés, l'IA risque d'entraîner un réel bouleversement puisque, pour la première fois, des professions relevant de hautes qualifications sont menacées. Ce qui relève de l'intellect peut maintenant être égalé et l'éventail des professions concernées s'élargit.

Avoir conscience de ces changements à venir constitue un atout que nous devons exploiter en préparant le futur. Les métiers de la santé dont celui d'ophtalmologiste s'apprêtent à muter progressivement et il serait contre-productif de s'opposer à l'IA et de se priver de son aide. Simplement, les évolutions de la profession dépendront de la valeur ajoutée que nous pourrons encore apporter. Et de la même façon que certaines de nos compétences sauront être remplacées par l'IA, nous serons certainement amenés à en développer de nouvelles, amenant notre cursus à s'adapter. Gardons à l'esprit que l'association robot-humain sera toujours plus souhaitable que l'un ou l'autre seul.

2. La dimension humaine

De toute évidence, les métiers liés à l'apprentissage sont directement menacés.
A contrario, les métiers liés à l'affectivité sont pour le moment préservés. Les intelligences artificielles actuelles dites « faibles » ne possèdent pas de conscience morale ou d'émotions. Elles effectuent simplement les tâches pour lesquelles elles ont été programmées, sans perception des sens implicites.

Notre profession regroupe ces deux aspects : une haute qualification et un échange humain. En effet, la dimension humaine de notre pratique est fondamentale.
L'empathie et l'écoute forment le socle d'une relation de confiance entre un patient et son médecin. Les compétences techniques et diagnostiques, si elles sont indispensables, ne sauraient remplacer une relation médecin-malade de qualité.

Nul n'ignore que les patients sont très attachés à ces valeurs qui relèvent justement de notre humanité. Ils ont autant besoin d'être épaulés et accompagnés que de soins médicaux adaptés. Et comment envisager cet accompagnement par une machine, qui n'a ni émotion, ni conscience morale ? Comment ces algorithmes si performants sauront-ils adapter les prises en charge à des difficultés sociales ou familiales ? Ceci est d'autant plus vrai que les pathologies sont lourdes ou chroniques.

Le serment d'Hippocrate, récité par chaque docteur de France, démontre tout à fait ces propos. Les notions d'humanité apparaissent comme les fondements de notre profession. Nous promettons d'être fidèles aux lois de l'honneur, de respecter toutes les personnes, d'informer les patients, de ne jamais tromper leur confiance, de taire les secrets confiés, de soulager les souffrances. Dans un futur hypothétique où la science se passerait au quotidien de médecins au profit d'algorithmes infaillibles, il est évident que ce serment et ses valeurs ne seraient qu'un lointain souvenir.

3. La complexité de notre expertise

Si l'intelligence artificielle n'est jamais qu'une puissance d'analyse et de calcul en un temps record, ne serait-ce pas sous-estimer nos compétences que de nous comparer à cela ?

Le domaine de l'ophtalmologiste est très large : nous avons les moyens de dépister, diagnostiquer et traiter médicalement ou chirurgicalement les patients en parfaite autonomie, en réclamant peu d'interactions avec d'autres spécialités. Effectivement, dans la plupart des cas, le plateau technique ophtalmologique est suffisant, comprenant notamment nos propres examens d'imageries.
Mais au-delà de notre formation purement médicale, là où la pluralité de nos compétences s'exprime le mieux, c'est certainement dans notre capacité à avoir une vision d'ensemble du patient. Comme dans toutes les spécialités, il nous est nécessaire de savoir repérer et traiter plusieurs pathologies de façon concomitante, de déceler des interactions entre elles, ou entre les atteintes oculaires et extra-oculaires du patient. De même, les situations sociales, professionnelles, familiales ou psychiatriques des malades interviennent tout autant dans l'approche du patient et nous amènent à aiguiller notre conduite à tenir.

C’est ce raisonnement dynamique et cette capacité d’adaptation qui finalement nous distinguent de l’IA et font notre valeur ajoutée.
Gardons à l’esprit que pour le moment, si par un modèle d’apprentissage profond, un algorithme peut apprendre rapidement et efficacement à classer une rétinopathie diabétique, il classera en « normal » un patient ayant une papille très excavée et passera à côté d’un angle étroit. Le patient sera faussement rassuré et invité à consulter dans un an. Il aura alors tout le loisir de perdre son point de fixation ou de revenir en urgence pour un glaucome par fermeture de l’angle.
Peut-on véritablement être admiratif devant ces risques potentiels ? Pourrons-nous décemment parler d’avancée de la médecine si de telles situations venaient à se produire ?
Pour parvenir à nous remplacer, il faudrait imaginer une IA multi-tâches, capable d’avoir un domaine d’expertise aussi large que le nôtre.

I. Quelle attitude adopter face à l’IA ?

Pour faire de l’IA un allié à venir, il convient d’anticiper la place qu’elle occupera au sein du secteur de la santé, ou plutôt la place qu’on veut lui donner.
N’oublions pas que la technologie n’est ni bonne ni mauvaise, elle est ce qu’on en fait. C’est donc à nous, médecins, d’avoir d’ores et déjà un œil tourné vers l’avenir, d’anticiper et de nous adapter.

1. Faire évoluer la formation médicale

L’adaptation et l’anticipation passent en premier lieu par une meilleure compréhension des outils de demain. Pour cela, la formation des jeunes étudiants et des médecins est une des clés fondamentales.

En effet, comme le mentionne Jean-Luc Dubois-Randé, président de la Conférence des doyens de médecine : “Nous observons un très fort contraste entre une médecine qui reste enseignée de façon très traditionnelle, face à des étudiants totalement rompus aux méthodes numériques et qui réfléchissent déjà à ce que va apporter la médecine connectée.” (102)

La Conférence des doyens de médecine a en effet identifié, comme l'un des enjeux décisifs des années à venir, la « transformation des modalités d'apprentissage dans une société connectée où l'information est abondante ».

Pour le CNOM, la formation aux humanités, à la déontologie et à l'éthique, aux relations humaines, doit être renforcée dans un monde qui se technicise de plus en plus. Plus l'enseignement devient scientifique, plus le degré d'empathie doit être accentué. (102)

A Lille, nous pouvons saluer le travail du professeur Sabinski qui anime un Diplôme universitaire d'intelligence artificielle en santé.

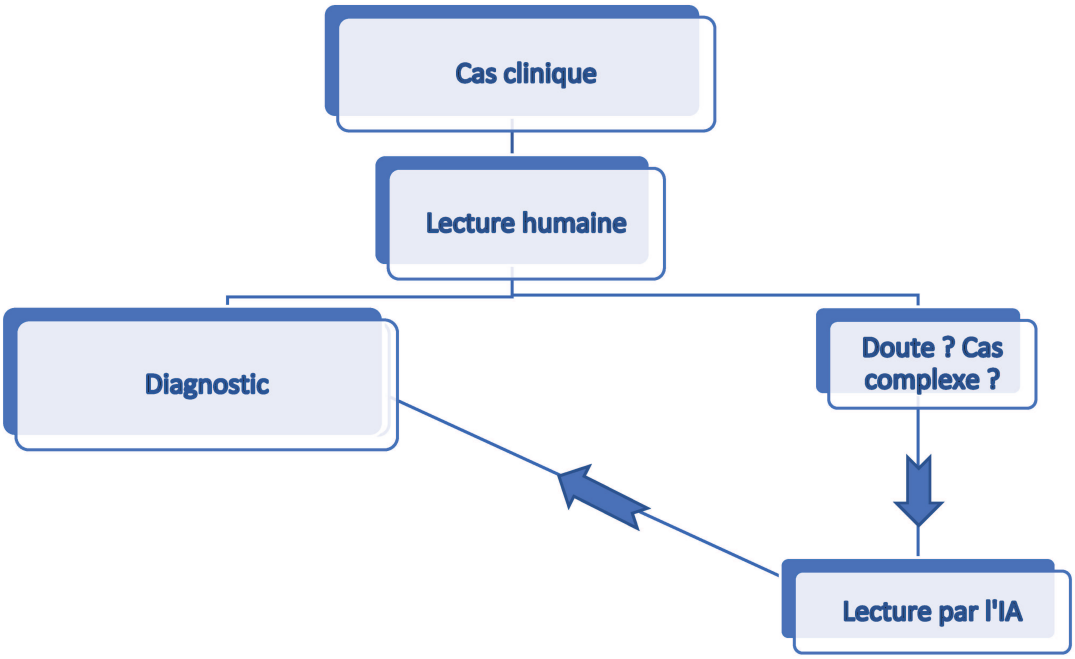
2. La place de l'intelligence artificielle dans notre pratique future

Il ne s'agit pas d'opposer l'IA à l'homme. Nous avons longuement évoqué les capacités différentes et complémentaires de chacun et compris que chercher une supériorité de l'un sur l'autre était vain.

Nous proposons trois façons d'utiliser l'intelligence artificielle dans notre quotidien :

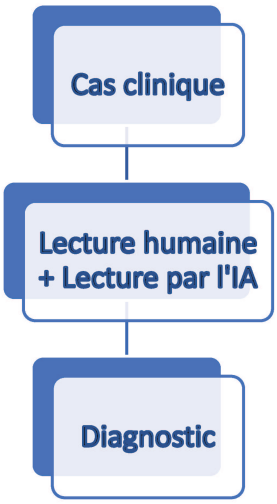
a) Une aide ponctuelle

La première hypothèse serait d'avoir recours à un algorithme d'intelligence artificielle uniquement si le clinicien le juge nécessaire, par exemple en cas de doute ou de cas clinique complexe.



b) *<u>Une aide systématique</u>*

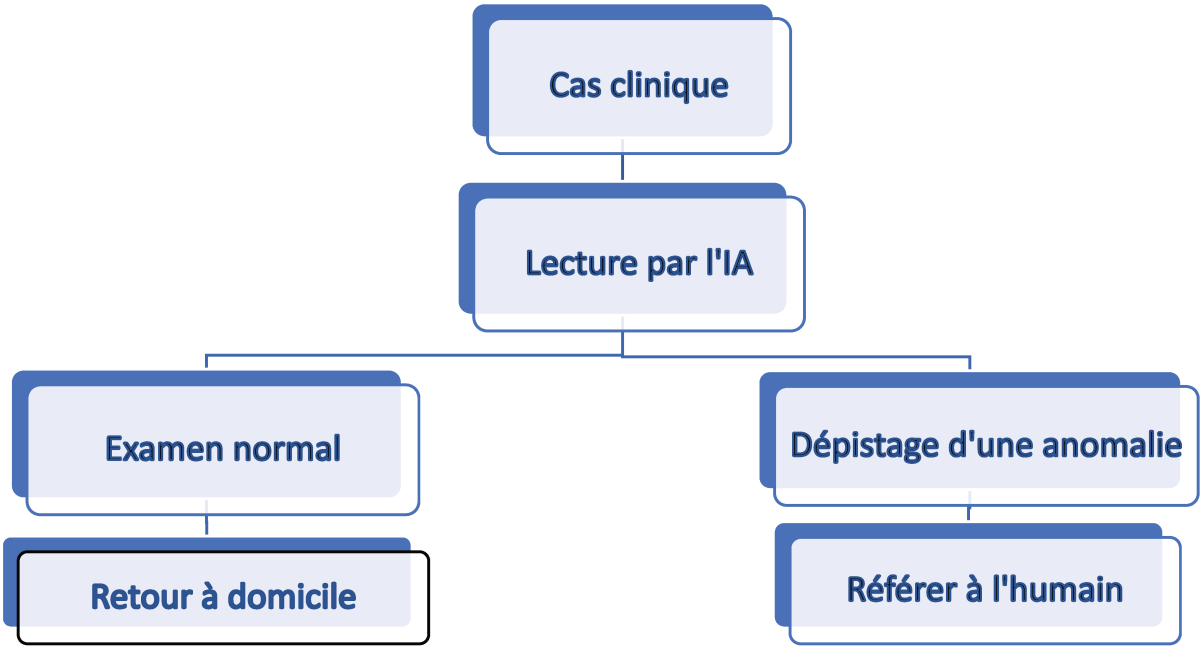
La deuxième hypothèse serait une lecture systématique par l'algorithme mais toujours supervisée par l'humain.



c) *Auto-dépistage sans supervision*

Enfin, la troisième et dernière éventualité serait d'avoir recours uniquement à l'outil intelligent. Ce dernier transmettrait alors au médecin les cas où l'algorithme identifie une anomalie.

C'est le modèle envisagé pour les dépistages de masse.



Rappelons que ce modèle est déjà utilisé aux États-Unis depuis 2018 avec IDX-R, pour le dépistage de la rétinopathie diabétique.

C'est lors de l'utilisation de ces deux derniers modèles, qui exploitent au maximum les capacités de l'IA, que se poseraient les questions éthiques et que nous serions confrontés aux risques évoqués plus tôt. En toute logique, plus nous utilisons l'IA en autonomie, plus nous exploitons son potentiel et profitons de ses performances, plus nous augmentons aussi le risque des dérives de toute sorte. C'est à nous de positionner le curseur et de définir à l'avance les attentes qui nous semblent essentielles et les limites que nous ne voulons pas franchir (centres sans médecins par exemple).

J. Limites de l'étude

1. Biais de sélection : des sous-groupes hétérogènes

On peut en effet reprocher à notre étude d'avoir obtenu majoritairement des réponses d'internes et a fortiori des 25-30 ans, ce qui n'est pas représentatif de la population d'ophtalmologistes sur le territoire français. Cette jeune génération de médecins est cependant la plus concernée par l'arrivée de l'IA, il n'est donc pas préjudiciable qu'elle soit sur-représentée. Le réel inconvénient réside dans l'interprétation des réponses puisque cette population s'avère moins confiante en l'humain, ce qui peut être rapporté au manque d'expérience plus qu'à une réelle conviction. Il persiste donc un doute quant à la possibilité d'extrapolation de nos résultats.

2. Biais de confusion : la désirabilité sociale

L'enquêté, bien que protégé par l'anonymat, peut éprouver le besoin de se sentir dans la norme par rapport à l'idée qu'il se fait des attentes de l'investigateur. Nos premières questions évaluant des connaissances sont sûrement plus impactées par ce phénomène, ce qui explique la diminution des réponses positives au fur et à mesure que les questions se précisent.
Par ailleurs, la majorité des participants à l'étude ont été contactés personnellement. Être un familier de l'investigateur potentialise ce biais dans d'autres types de questions, notamment celles concernant l'intérêt pour le sujet.

3. Les questions fermées

La majorité du questionnaire repose sur des questions fermées afin de simplifier l'analyse des données.
Par ailleurs, nous avons polarisé les choix de réponses afin d'augmenter notre matière de travail : empêcher le recours à « je ne sais pas » nous a permis d'exploiter chaque réponse. Les indécisions auraient fortement limité notre analyse ou nous auraient contraints à interroger beaucoup plus de médecins pour obtenir la même richesse de travail. La coupure entre les réponses positives et négatives est donc peut-être un peu artificielle mais ce choix nous a semblé nécessaire pour obtenir un support de travail suffisant.

Un autre inconvénient lié aux questions fermées réside dans l'interprétation des résultats puisque nous ne pouvons qu'émettre des hypothèses. Il nous est impossible de connaître les motivations de chacun et une même réponse chez deux individus peut trouver des explications différentes. C'est d'ailleurs pour cela que nous avons inclus deux questions ouvertes.

4. Quel crédit apporter aux réponses de médecins non informés ?

A travers notre questionnaire, nous avons imposé aux interrogés un exercice périlleux : se projeter et se positionner formellement au sujet d'une technologie qu'en réalité peu d'entre eux maitrisent.
Cela implique que les réponses sont parfois plus intuitives et liées à l'imaginaire associé à l'IA qu'à de réelles connaissances. Il est possible qu'à la lecture de ce travail, des médecins ne se positionnent plus de la même façon. Encore une fois, cela reste invérifiable mais il nous a semblé pertinent de le signaler.

V. Conclusion

L'IA est une technologie prometteuse et surprenante qui s'apprête à modifier le paysage médical tel que nous le connaissons actuellement et à remodeler notre façon de travailler.

La plupart d'entre nous s'y intéresse malgré des connaissances peu solides. Notre étude repose donc sur beaucoup de réponses intuitives de la part des ophtalmologistes. Elle nous paraît néanmoins très instructive.

Les bénéfices d'ordre individuel tels que la potentialisation de nos performances ou l'amélioration de nos conditions de travail ont souvent été évoqués. Il existe également des bénéfices collectifs à espérer à travers une diminution des inégalités socio-démographiques et une participation à la recherche médicale.

Comme toute innovation mal connue, l'IA suscite des craintes. En effet, la moitié des participants la perçoivent comme une menace : pour le médecin avec un risque d'être relayé au second plan et de perdre sa réflexion intellectuelle, et pour le patient avec une perte de contact humain ou encore le détournement de ses données.

Pourtant, une grande majorité des interrogés sont prêts à travailler avec l'IA mais refusent une interprétation sans relecture. Cela traduit la volonté de rester au cœur de la prise en charge médicale.

Cette attitude nous paraît la plus pertinente : accepter cette technologie en la gardant au rang d'outil. C'est en se l'appropriant que nous pourrons l'exploiter le plus sereinement et serons garants de l'avenir pérenne de notre profession. Lui tourner le dos, par méfiance ou déni, laisserait au contraire le champ libre à d'autres structures pour l'utiliser à des fins lucratives, compromettant la santé des patients.

Il faut donc préparer l'avenir ensemble : médecins, concepteurs et juristes. A la fois en cherchant à mieux comprendre le fonctionnement de l'IA et en s'intéressant de près au cadre légal nécessaire à son arrivée.

VI. ANNEXES

A. Réponses aux questions ouvertes

Quel est pour vous, le plus grand bénéfice à espérer de l'arrivée de l'IA en ophtalmologie (118 réponses)

1) Le gain de temps : 27

- Gain de temps
- Gain de temps
- Gain de temps en consultation
- Le gain de temps sur les tâches répétitives
- Gain de temps (RD, glaucome, DMLA..) de précision, meilleur suivi
- Aide tâche répétitive, dépistage
- Gain de temps/aide au diagnostic
- Temps
- Capacité à plus travailler, dépistage massif de patients
- Un gain de temps passé avec le patient en consultation
- Faire du dépistage avec une IA très performante pour reconnaître par exemple une rétinophoto normale mais qui ne doit pas passer à côté d'une anomalie.
- Cela permettrait de gagner du temps en consultation.
- Rapidité diagnostique
- Gain de temps
- Accélérer les prises en charge de routine
- Améliorer la prise en charge et le délai de consultation pour le dépistage des pathologies courantes sous couvert d'une validation pour un spécialiste
- Précision diagnostic et gain de temps
- Précision, rapidité du diagnostic et de sa prise en charge
- Gain de temps en automatisant certaines tâches rébarbatives
- Gagner du temps pour les tâches simples et répétitives
- Gain du temps
- Aide au diagnostic, gain de temps
- Un gain de temps dans la consultation pour l'examen, et donc une prise en charge plus importante de la population
- Le temps
- Gain de temps sur les tâches répétitives
- Gain de temps et reproductibilité
- Gagner du temps sur certaines tâches
- Gestion des tâches répétitives

2) <u>Amélioration de la prise en charge / précision diagnostique (35)</u>

- Amélioration de la prise en charge et prévention
- Outil, moyen utile pour mieux soigner
- Aide au diagnostic
- La précision
- Aide au diagnostic.
- Plus de précision dans le suivi des patients (abaques précis dans de nombreux domaines)
- Aide au diagnostic des rétinopathies
- Qu'elle nous aide à raisonner
- Améliorer la prise en charge des patients.
- Meilleur diagnostic donc meilleure prise en charge donc <u>plus de temps pour le patient</u>
- Comme toutes les évolutions techniques, une amélioration de la qualité des soins
- Précision diagnostique
- Aide au diagnostic et meilleur suivi en retinophoto
- Améliorer nos capacités diagnostiques
- Prédiction de l'évolution des rétinopathies/maculopathies (DMLA, OMD, OVCR) à partir de l'OCT initial et prise en charge au long cours planifiable dès le début.
- Améliorer la performance de nos actes
- Maladies rares
- Améliorer les prises en charge
- Aide à l'interprétation
- Amélioration de la pratique médicale
- Diminution de délai, réduction des erreurs humaines
- Aide à la consultation. Interprétation des résultats plus précise sur l'imagerie / homme
- Apport diagnostique, moins de faux négatifs
- Affiner le diagnostic et guider la prise en charge
- Un diagnostic plus précis
- Qualité des soins reproductible
- Meilleur diagnostic et prise en charge
- Cas complexes
- Une aide aux erreurs humaines
- Aide au raisonnement et aux tâches répétées
- L'obtention d'un pronostic plus précis qu'à l'heure actuelle pour toutes les pathologies à acuité visuelle variable dans le temps (dmla, oedemes maculaires)
- Diminution des erreurs médicales

3) <u>Diminuer les inégalités socio-démographique (8)</u>

- Aide au diagnostic pour régions isolées sur le plan médical
- Facilité d'accès à un ophtalmo dans les déserts médicaux
- L'accès aux soins pour tous
- Dépistage massif des pathologies chroniques : diabète, glaucome. Accès à distance à une consultation ophtalmologique.
- Plus grand dépistage, accès plus facile à un ophtalmologiste en cas de pathologie dépistée par l'IA
- Dans le cas d'un accès au soin difficile
- Prise en charge dans les pays du tiers-monde avec peu d'OT à moindre coût.
- Meilleur dépistage dans les zones sous-dotées en ophtalmologistes

4) <u>Outil de dépistage (19)</u>

- Moyen de dépistage
- L'intelligence doit permettre d'apporter une assistance au travail de l'ophtalmologiste en étant complémentaire sans pour autant le remplacer. Dans le même ordre d'idée que le travail aidé avec les orthoptistes ou encore la délégation des tâches par télémédecine, notamment dans le cadre de dépistage.
- Optimisation du dépistage de pathologies fréquentes et coûteuses pour le système de santé
- Activité de dépistage
- Tests de dépistage
- Amélioration du dépistage
- Augmentation des capacités de dépistage
- La possibilité de pouvoir dépister de manière plus large, ou d'aider au diagnostic dans les tableaux atypiques
- Intérêt d'un dépistage de masse (exemple du diabète)
- Le dépistage massif, pour réduire le nombre de consultations de suivi si tout va bien
- Aide à la consultation et proposition de parcours de diagnostic
- Amélioration de la sensibilité pour le dépistage lors des consultations répétitives de réfraction
- Dépistage rétinien
- Dépistage massif des cas simples de diabète, glaucome
- Élargir l'accès au dépistage (ex : diabète)
- Augmentation de la sensibilité
- Meilleur triage des patients et ne voir en consultation que la pathologie

5) <u>Autres :</u>

- Aide pour la recherche/études médicales.
- Aucun
- L'avènement de l'intelligence artificielle permettra de mieux guider le diagnostic mais également le traitement du patient avec des systèmes de détection précoce de rechutes dans les maladies exsudatives rétiniennes, mais également un meilleur suivi des rythmes d'injection par exemple. Pour ce qui

est de la pratique même de la profession, du temps à consacrer à la relation médecin-malade devrait se dégager.
- Rétine artificielle ?
- Bilans étiologiques
- La pré-consultation et le suivi des pathologies chroniques
- Rationalisation
- Trier les consultations nécessaires
- Favoriser le retour de la pratique libérale seul(e), sans-souci associé (e).
- Lecture automatisée des rétinophotos sur des diabétiques
- Sécuriser l'analyse de différents examens
- Suivi diabète
- Algorithmes de traitement (glaucome DMLA)
- Intérêt dans la réfraction subjective - Potentiellement, meilleure orientation des patients en fonction du degré d'urgence d'un bilan clinique
- Pré bilan pré diagnostic, orienter rapidement, moins de perte de chance patient / difficulté rdv
- Amélioration information du patient/prévention
- Appuyer une suspicion, alerter le médecin et le patient, être plus vigilant sur un point soulevé lors d'un résultat

Quel est pour vous, le plus grand risque à craindre de l'arrivée de l'IA en ophtalmologie (119 réponses)

1) Déshumanisation / Perte de la relation médecin patient (21)

- La déshumanisation
- Utiliser comme fin en soi au détriment de la rencontre médecin-malade
- Disparition du contact humain et de la relation malade-médecin
- Qu'on donne à la machine une place trop importante, où elle n'aurait plus un simple rôle d'assistance mais quasiment de "médecin remplaçant". Avec en plus le risque que la relation médecin-patient devienne inexistante.
- Déresponsabilisation, dépersonnalisation relation médecin-patient
- Perte relation patient-médecin
- Déshumanisation
- La perte de la relation ophtalmologiste-patient
- Déshumanisation médicale
- Perte de communication entre le médecin et son patient
- Dérive de l'activité, perte de relation médecin-malade
- Déshumanisation de la profession
- Remplacement du clinicien et automatisation (déshumanisation) de la profession
- Diminuer la relation médecin-patient
- Perte dans la qualité de relation médecin-patient
- Déshumanisation
- Responsabilité, déshumanisation

- De perdre le contact essentiel entre le médecin et le patient
- La perte du rapport de confiance médecin-patient.
- Moins de place à l'humain
- Que les ophtalmologistes se laissent guider par les instructions de l'IA sans tenir compte de la dimension humaine.

2) Perte de la réflexion humaine / excès de confiance à l'algorithme / interprétation sans relecture (30)

- Négliger son propre avis, ne pas tenir compte de sa propre expérience
- Lui faire trop confiance
- Perte du sens clinique des ophtalmologistes.
- Diminution de la clinique et des capacités de l'ophtalmo
- L'excès de confiance à l'IA
- Pauvreté intellectuelle des ophtalmologistes
- La robotisation du métier
- Moins de réflexion
- On devient relecteur de l'IA et plus acteur
- Que l'homme ne réfléchisse plus et devienne donc ignare et dangereux
- D'accorder une trop grande confiance à l'IA sans validation par un ophtalmologiste car comme on a pu le voir dans l'IA automobile les failles existent. On me répondra que les failles existent aussi chez l'ophtalmologiste c'est pourquoi je pense que les 2 combinées IA + ophtalmo permettront d'améliorer les prises en charge.
- Dérive de l'automatisation : enchaîner les dossiers sans vraiment les regarder pour toujours plus de rentabilité, mais cette dérive existe déjà aujourd'hui. Autre problème, le manque de sens critique donc l'éducation de l'ophtalmologiste primordiale en amont.
- De se reposer sur cet outil, qui doit être perçu comme un outil supplémentaire
- Le risque de se reposer trop largement sur l'intelligence artificielle notamment pour les diagnostics (au détriment de la clinique) ou la prise en charge (au détriment de la relation médecin-patient)
- Utilisation sans validation par l'ophtalmologiste
- Absence de contrôle par un ophtalmologiste
- L'utilisation « diagnostique » sans relecture par un ophtalmologiste
- Perte de la compétence et de l'expérience humaine.
- Baisse de la formation continue
- Ne faire confiance qu'au logiciel
- Absence d'examen complet du patient et donc le risque de méconnaître une pathologie latente débutante non concernée par l'outil IA de dépistage
- Décrédibilisation du praticien au profit du logiciel
- Négliger le raisonnement humain
- Risque d'abus ou d'erreur avec perte de chance pour le patient si pas de relecture par un ophtalmologiste
- Perte de considération pour l'ophtalmologiste
- La non surpervisation des réponses par des médecins et diagnostics erronés ou non posés

- Ne se fier qu'à elle et plus à l'ophtalmologiste pour l'interprétation finale
- Remise en cause de l'expertise des ophtalmos
- La non relecture par l'ophtalmo

3) <u>Dérives financières (20)</u>

- Qu'il soit mis entre les mains de commerciaux et non pas de médecins
- Que des non-ophtalmologistes se prennent pour des ophtalmologistes (les opticiens, les orthoptistes, les investisseurs +++)
- La délégation de tâches à d'autres professionnels : valider les retinophotos, perdre le bénéfice du dépistage GCAO et autres
- Profession remplacée par manipulateur
- Orientation privilégiée des patients vers un établissement de soins utilisant l'IA sans relecture par ophtalmologue et ainsi perte de chance pour le patient (selon le même principe que les réfractions réalisées par les opticiens)
- Possibilité, pour des professionnels non médicaux, d'utiliser l'intelligence artificielle sans intervention d'un professionnel de santé
- Dérive d'utilisation par des non ophtalmologues
- Dérives commerciales, avec ouverture de "centres d'intelligence artificielle", qui proposeraient des "diagnostics rapides" sans réel contrôle médical
- Médecine réalisée par des financiers.
- Utilisation abusive avec une confiance absolue en l'IA, sans contrôles nécessaires des données fournies par l'IA. Notamment dans un but lucratif.
- Tomber dans les mains de professionnels non médicaux
- Les dérives commerciales des sociétés exploitantes
- La tentation de son utilisation par des non ophtalmologistes, médecins ou non.
- Si l'intelligence artificielle tombe dans les mains d'hommes d'affaires et pas dans les mains des ophtalmologues
- Utilisation par les autres professionnels de la santé visuelle
- Baisse des cotations
- L'utilisation par des non-médecins dans un but lucratif, exemple avec l'actualité des dérives des « centres de vision » sans ophtalmos
- Baisse du besoin d'ophtalmologiste avec à terme baisse du nombre de patients vu en cs, de cotation, baisse de revenu
- Commercialisation de la médecine, automédication, nomadisme médicale.
- Utilisation abusive à but lucratif

4) Erreurs diagnostiques (7)

- Erreurs de diagnostic ou de prise en charge si pas de contrôle par humain ensuite
- Erreurs diagnostique
- Erreurs diagnostiques
- Faux négatifs
- Erreur diagnostiques liée à l'utilisation sans relecture
- Erreurs diagnostiques
- L'erreur diagnostique

5) Crainte pour l'avenir de la profession (21)

- Remplacement des médecins
- Diminution de l'activité
- Qu'elle prenne la place du médecin et de l'homme...
- Ne plus passer par un ophtalmo
- Remplacement d'un pan de notre profession par l'IA
- Suppléer à l'ophtalmologiste
- Disparition des ophtalmo médicaux.
- Le remplacement des ophtalmologistes par des orthoptistes ou orthométristes avec logiciel d'intelligence artificielle
- Remplacer le travail de l'homme
- Menace pour notre profession
- De remplacer l'homme
- Mise au chômage d'une grande partie de la profession
- Remplacement de l'ophtalmologiste
- La disparition de l'ophtalmologie avec une médecine « mécanique »
- Développement de nouveaux métiers en lien, réduction des tâches de l'ophtalmologiste,
- Diminution des besoins d'ophtalmologistes
- Disparition de la consultation
- Suppression des médecins
- Tendance à créer de grosses structures et fin de la petite ophtalmo de ville
- Fin des petits cabinets libéraux au profit des gros groupes
- Développement de centres sans ophtalmo

6) Autres (8)

- ? On verra bien et on s'adaptera
- Je n'en vois pas
- Aucun
- Le risque est que l'IA remplace certaines consultations chez un spécialiste au risque d'ignorer des pathologies que l'IA ne serait pas capable de dépister
- Hyperspécialisation
- Gros sujet sur la confidentialité des données (stockage, big data...)
- Il faut craindre une dévalorisation des actes, une délégation encore plus large à des professions tiers de la filière visuelle et une surdémographie médicale. Les ophtalmologistes risquent de ne se retrouver qu'avec les cas médicaux complexes et chronophages, ainsi que de se concentrer sur la pratique chirurgicale avec le risque d'indications chirurgicales mal posées afin de maintenir un niveau d'activité satisfaisant
- La mauvaise utilisation

VII. Références bibliographiques

1. Amisha null, Malik P, Pathania M, Rathaur VK. Overview of artificial intelligence in medicine. J Fam Med Prim Care. juill 2019;8(7):2328-31.
2. 2017 Ophtalmologie : objectif zéro délai en 2022 [Internet]. SNOF. [cité 26 févr 2021]. Disponible sur: https://www.snof.org/2017-ophtalmologie-objectif-z%C3%A9ro-d%C3%A9lai-en-2022
3. Christelle Millien, Hélène Chaput, Marie Cavillon (K. Stat Consulting) (2018, octobre). La moitié des rendez-vous sont obtenus en 2 jours chez le généraliste, en 52 jours chez l'ophtalmologiste. Études et résultats, 1085.
4. Cailar A. Wechsler David. - The Measurement of Adult Intelligence. Population. 1952;7(3):556-556.
5. Delemarre et al. - L'Intelligence Artificielle.pdf [Internet]. [cité 26 févr 2021]. Disponible sur: https://perso.esiee.fr/~delemarn/Intelligence%20Artificielle/images/Livre%20IA.pdf
6. Turing AM. I.—COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. Mind. 1 oct 1950;LIX(236):433-60.
7. McCarthy J, Minsky ML, Rochester N, Shannon CE. A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955. AI Mag. 15 déc 2006;27(4):12-12.
8. Moor J. The Dartmouth College Artificial Intelligence Conference: The Next Fifty Years. AI Mag. 15 déc 2006;27(4):87-87.
9. Mintz Y, Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine. Minim Invasive Ther Allied Technol MITAT Off J Soc Minim Invasive Ther. avr 2019;28(2):73-81.
10. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. - PsycNET [Internet]. [cité 26 févr 2021]. Disponible sur: /doiLanding?doi=10.1037%2Fh0042519
11. Weizenbaum J. ELIZA—a computer program for the study of natural language communication between man and machine. Commun ACM. 1 janv 1966;9(1):36-45.
12. Dreyfus HL. Alchemy and Artificial Intelligence. 1 janv 1965 [cité 28 févr 2021]; Disponible sur: https://www.rand.org/pubs/papers/P3244.html
13. Buchanan BG, Shortliffe EH, éditeurs. Rule-based expert systems: the MYCIN experiments of the Stanford Heuristic Programming Project. Reading, Mass: Addison-Wesley; 1984. 748 p. (The Addison-Wesley series in artificial intelligence).
14. Bohannon J. Fears of an AI pioneer. Science. 17 juill 2015;349(6245):252-252.
15. Cun YL, Boser B, Denker JS, Howard RE, Habbard W, Jackel LD, et al. Handwritten digit recognition with a back-propagation network. In: Advances in neural information processing systems 2. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.; 1990. p. 396-404.
16. Did Deep Blue Beat Kasparov Because of a System Glitch? [Internet]. Time. [cité 28 févr 2021]. Disponible sur: https://time.com/3705316/deep-blue-kasparov/
17. LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. Nature. mai 2015;521(7553):436-44.
18. World Changing Ideas 2015 [Internet]. Scientific American. [cité 28 févr 2021]. Disponible sur: https://www.scientificamerican.com/report/world-changing-ideas-20151/
19. Silver D, Huang A, Maddison CJ, Guez A, Sifre L, van den Driessche G, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature. 28 janv 2016;529(7587):484-9.
20. Wu J, Liu X, Zhang X, He Z, Lv P. Master clinical medical knowledge at certificated-doctor-level with deep learning model. Nat Commun. 19 oct 2018;9(1):4352.

21. Abràmoff MD, Lou Y, Erginay A, Clarida W, Amelon R, Folk JC, et al. Improved Automated Detection of Diabetic Retinopathy on a Publicly Available Dataset Through Integration of Deep Learning. Invest Ophthalmol Vis Sci. 1 oct 2016;57(13):5200-6.
22. Commissioner O of the. FDA permits marketing of artificial intelligence-based device to detect certain diabetes-related eye problems [Internet]. FDA. FDA; 2020 [cité 28 févr 2021]. Disponible sur: https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-permits-marketing-artificial-intelligence-based-device-detect-certain-diabetes-related-eye
23. à 20h38 PALL 29 mars 2018. Intelligence artificielle : Macron annonce un plan à 1,5 milliard d'euros [Internet]. leparisien.fr. 2018 [cité 28 févr 2021]. Disponible sur: https://www.leparisien.fr/economie/intelligence-artificielle-macron-annonce-un-plan-a-1-5-milliard-d-euros-29-03-2018-7636614.php
24. Rahimy E. Deep learning applications in ophthalmology. Curr Opin Ophthalmol. mai 2018;29(3):254-60.
25. avis_130.pdf [Internet]. [cité 28 févr 2021]. Disponible sur: https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/publications/avis_130.pdf
26. Deo RC. Machine Learning in Medicine. Circulation. 17 nov 2015;132(20):1920-30.
27. Mayro EL, Wang M, Elze T, Pasquale LR. The impact of artificial intelligence in the diagnosis and management of glaucoma. Eye. janv 2020;34(1):1-11.
28. What is Machine Learning? [Internet]. 2020 [cité 28 févr 2021]. Disponible sur: https://www.ibm.com/cloud/learn/machine-learning
29. Comment permettre à l'Homme de garder la main ? Rapport sur les enjeux éthiques des algorithmes et de l'intelligence artificielle | CNIL [Internet]. [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://www.cnil.fr/fr/comment-permettre-lhomme-de-garder-la-main-rapport-sur-les-enjeux-ethiques-des-algorithmes-et-de
30. Poplin R, Varadarajan AV, Blumer K, Liu Y, McConnell MV, Corrado GS, et al. Prediction of cardiovascular risk factors from retinal fundus photographs via deep learning. Nat Biomed Eng. 2018;2(3):158-64.
31. Mursch-Edlmayr AS, Ng WS, Diniz-Filho A, Sousa DC, Arnold L, Schlenker MB, et al. Artificial Intelligence Algorithms to Diagnose Glaucoma and Detect Glaucoma Progression: Translation to Clinical Practice. Transl Vis Sci Technol [Internet]. 15 oct 2020 [cité 10 mars 2021];9(2). Disponible sur: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7571273/
32. Cao C, Liu F, Tan H, Song D, Shu W, Li W, et al. Deep Learning and Its Applications in Biomedicine. Genomics Proteomics Bioinformatics. 2018;16(1):17-32.
33. Shen D, Wu G, Suk H-I. Deep Learning in Medical Image Analysis. Annu Rev Biomed Eng. 2017;19(1):221-48.
34. Ting DSW, Peng L, Varadarajan AV, Keane PA, Burlina PM, Chiang MF, et al. Deep learning in ophthalmology: The technical and clinical considerations. Prog Retin Eye Res. 2019;72:100759.
35. Lu W, Tong Y, Yu Y, Xing Y, Chen C, Shen Y. Applications of Artificial Intelligence in Ophthalmology: General Overview [Internet]. Vol. 2018, Journal of Ophthalmology. Hindawi; 2018 [cité 28 févr 2021]. p. e5278196. Disponible sur: https://www.hindawi.com/journals/joph/2018/5278196/
36. Tong Y, Lu W, Yu Y, Shen Y. Application of machine learning in ophthalmic imaging modalities. Eye Vis. 16 avr 2020;7(1):22.
37. dshahid380. Convolutional Neural Network [Internet]. Medium. 2019 [cité 28 févr 2021]. Disponible sur: https://towardsdatascience.com/covolutional-neural-network-cb0883dd6529
38. LeCun Y, Kavukcuoglu K, Farabet C. Convolutional networks and applications in vision. In: ISCAS 2010 - 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems:

Nano-Bio Circuit Fabrics and Systems [Internet]. 2010 [cité 28 févr 2021]. p. 253-6. Disponible sur: https://nyuscholars.nyu.edu/en/publications/convolutional-networks-and-applications-in-vision
39. Lecun Y, Bengio Y. Convolutional networks for images, speech, and time-series. Handb Brain Theory Neural Netw [Internet]. 1995 [cité 28 févr 2021]; Disponible sur: https://nyuscholars.nyu.edu/en/publications/convolutional-networks-for-images-speech-and-time-series
40. Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ. Learning representations by back-propagating errors. Nature. oct 1986;323(6088):533-6.
41. Dt H, Da M, Aw H. Current state and future prospects of artificial intelligence in ophthalmology: a review. Clin Experiment Ophthalmol. 30 sept 2018;47(1):128-39.
42. Cao C, Dragićević S, Li S. Land-Use Change Detection with Convolutional Neural Network Methods. Environments. févr 2019;6(2):25.
43. Simonyan K, Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. ArXiv14091556 Cs [Internet]. 10 avr 2015 [cité 28 févr 2021]; Disponible sur: http://arxiv.org/abs/1409.1556
44. He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. p. 770-8.
45. Szegedy C, Liu W, Jia Y, Sermanet P, Reed S, Anguelov D, et al. Going Deeper with Convolutions. ArXiv14094842 Cs [Internet]. 16 sept 2014 [cité 28 févr 2021]; Disponible sur: http://arxiv.org/abs/1409.4842
46. Schmidt-Erfurth U, Sadeghipour A, Gerendas BS, Waldstein SM, Bogunović H. Artificial intelligence in retina. Prog Retin Eye Res. 2018;67:1-29.
47. Parekh VS, Jacobs MA. Deep learning and radiomics in precision medicine. Expert Rev Precis Med Drug Dev. 2019;4(2):59-72.
48. Delacour H, Servonnet A, Perrot A, Vigezzi JF, Ramirez JM. La courbe ROC (receiver operating characteristic) : principes et principales applications en biologie clinique. Ann Biol Clin. 2005;63:10.
49. Hwang EJ, Park S, Jin K-N, Kim JI, Choi SY, Lee JH, et al. Development and Validation of a Deep Learning–based Automatic Detection Algorithm for Active Pulmonary Tuberculosis on Chest Radiographs. Clin Infect Dis. 16 août 2019;69(5):739-47.
50. Becker AS, Marcon M, Ghafoor S, Wurnig MC, Frauenfelder T, Boss A. Deep Learning in Mammography: Diagnostic Accuracy of a Multipurpose Image Analysis Software in the Detection of Breast Cancer. Invest Radiol. 2017;52(7):434-40.
51. Esteva A, Kuprel B, Novoa RA, Ko J, Swetter SM, Blau HM, et al. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. Nature. 02 2017;542(7639):115-8.
52. intelligence artificielle - Résultats de recherche - PubMed [Internet]. [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=artificial+intelligence&filter=years.1993-1993&timeline=expanded
53. Intelligence artificielle et santé [Internet]. Inserm - La science pour la santé. [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/intelligence-artificielle-et-sante
54. Saeedi P, Petersohn I, Salpea P, Malanda B, Karuranga S, Unwin N, et al. Global and regional diabetes prevalence estimates for 2019 and projections for 2030 and 2045: Results from the International Diabetes Federation Diabetes Atlas, 9th edition. Diabetes Res Clin Pract. nov 2019;157:107843.
55. Gulshan V, Peng L, Coram M, Stumpe MC, Wu D, Narayanaswamy A, et al. Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic

Retinopathy in Retinal Fundus Photographs. JAMA. 13 2016;316(22):2402-10.
56. Bellemo V, Lim G, Rim TH, Tan GSW, Cheung CY, Sadda S, et al. Artificial Intelligence Screening for Diabetic Retinopathy: the Real-World Emerging Application. Curr Diab Rep. 31 2019;19(9):72.
57. Quellec G, Lamard M, Lay B, Guilcher AL, Erginay A, Cochener B, et al. Instant automatic diagnosis of diabetic retinopathy. ArXiv190611875 Cs Eess [Internet]. 12 juin 2019 [cité 2 mars 2021]; Disponible sur: http://arxiv.org/abs/1906.11875
58. Ting DSW, Cheung CY-L, Lim G, Tan GSW, Quang ND, Gan A, et al. Development and Validation of a Deep Learning System for Diabetic Retinopathy and Related Eye Diseases Using Retinal Images From Multiethnic Populations With Diabetes. JAMA. 12 2017;318(22):2211-23.
59. Shah P, Mishra DK, Shanmugam MP, Doshi B, Jayaraj H, Ramanjulu R. Validation of Deep Convolutional Neural Network-based algorithm for detection of diabetic retinopathy – Artificial intelligence versus clinician for screening. Indian J Ophthalmol. févr 2020;68(2):398-405.
60. Wong WL, Su X, Li X, Cheung CMG, Klein R, Cheng C-Y, et al. Global prevalence of age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040: a systematic review and meta-analysis. Lancet Glob Health. févr 2014;2(2):e106-116.
61. Ghemame M, Bon V, Reilhac A, Philiponnet A, Mouriaux F. [Telemedicine monitoring for AMD patients]. J Fr Ophtalmol. 19 août 2020;
62. 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.
63. Chakravarthy U, Goldenberg D, Young G, Havilio M, Rafaeli O, Benyamini G, et al. Automated Identification of Lesion Activity in Neovascular Age-Related Macular Degeneration. Ophthalmology. 2016;123(8):1731-6.
64. Prahs P, Radeck V, Mayer C, Cvetkov Y, Cvetkova N, Helbig H, et al. OCT-based deep learning algorithm for the evaluation of treatment indication with anti-vascular endothelial growth factor medications. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol Albrecht Von Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol. janv 2018;256(1):91-8.
65. Burlina PM, Joshi N, Pacheco KD, Freund DE, Kong J, Bressler NM. Use of Deep Learning for Detailed Severity Characterization and Estimation of 5-Year Risk Among Patients With Age-Related Macular Degeneration. JAMA Ophthalmol. 01 2018;136(12):1359-66.
66. Peng Y, Dharssi S, Chen Q, Keenan TD, Agrón E, Wong WT, et al. DeepSeeNet: A Deep Learning Model for Automated Classification of Patient-based Age-related Macular Degeneration Severity from Color Fundus Photographs. Ophthalmology. 2019;126(4):565-75.
67. Waldstein SM, Vogl W-D, Bogunovic H, Sadeghipour A, Riedl S, Schmidt-Erfurth U. Characterization of Drusen and Hyperreflective Foci as Biomarkers for Disease Progression in Age-Related Macular Degeneration Using Artificial Intelligence in Optical Coherence Tomography. JAMA Ophthalmol. 01 2020;138(7):740-7.
68. Quigley HA, Broman AT. The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020. Br J Ophthalmol. mars 2006;90(3):262-7.
69. Tham Y-C, Li X, Wong TY, Quigley HA, Aung T, Cheng C-Y. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. Ophthalmology. nov 2014;121(11):2081-90.
70. Liu H, Li L, Wormstone IM, Qiao C, Zhang C, Liu P, et al. Development and Validation of a Deep Learning System to Detect Glaucomatous Optic Neuropathy Using Fundus Photographs. JAMA Ophthalmol. 12 sept 2019;
71. Phene S, Dunn RC, Hammel N, Liu Y, Krause J, Kitade N, et al. Deep Learning and

Glaucoma Specialists: The Relative Importance of Optic Disc Features to Predict Glaucoma Referral in Fundus Photographs. Ophthalmology. 1 déc 2019;126(12):1627-39.
72. SFO | Rapport 2019 - OCT EN OPHTALMOLOGIE [Internet]. [cité 6 mars 2021]. Disponible sur: https://www.em-consulte.com/em/SFO/2019/HTML/sforender/B978229476084650013X.html
73. Medeiros FA, Jammal AA, Thompson AC. From Machine to Machine: An OCT-Trained Deep Learning Algorithm for Objective Quantification of Glaucomatous Damage in Fundus Photographs. Ophthalmology. 2019;126(4):513-21.
74. Ran AR, Cheung CY, Wang X, Chen H, Luo L, Chan PP, et al. Detection of glaucomatous optic neuropathy with spectral-domain optical coherence tomography: a retrospective training and validation deep-learning analysis. Lancet Digit Health. 1 août 2019;1(4):e172-82.
75. Asaoka R, Murata H, Hirasawa K, Fujino Y, Matsuura M, Miki A, et al. Using Deep Learning and Transfer Learning to Accurately Diagnose Early-Onset Glaucoma From Macular Optical Coherence Tomography Images. Am J Ophthalmol. 2019;198:136-45.
76. Li F, Wang Z, Qu G, Song D, Yuan Y, Xu Y, et al. Automatic differentiation of Glaucoma visual field from non-glaucoma visual filed using deep convolutional neural network. BMC Med Imaging. 04 2018;18(1):35.
77. 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.
78. Goh JHL, Lim ZW, Fang X, Anees A, Nusinovici S, Rim TH, et al. Artificial Intelligence for Cataract Detection and Management. Asia-Pac J Ophthalmol. avr 2020;9(2):88-95.
79. Wu X, Huang Y, Liu Z, Lai W, Long E, Zhang K, et al. Universal artificial intelligence platform for collaborative management of cataracts. Br J Ophthalmol. 2019;103(11):1553-60.
80. Zhang L, Li J, Zhang Y, Han H, Liu B, Yang J-J, et al. Automatic cataract detection and grading using Deep Convolutional Neural Network. 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). 2017.
81. Quinn GE. Retinopathy of prematurity blindness worldwide: phenotypes in the third epidemic. Eye Brain. 2016;8:31-6.
82. Gilbert C, Rahi J, Eckstein M, O'Sullivan J, Foster A. Retinopathy of prematurity in middle-income countries. Lancet Lond Engl. 5 juill 1997;350(9070):12-4.
83. Reynolds JD, Dobson V, Quinn GE, Fielder AR, Palmer EA, Saunders RA, et al. Evidence-based screening criteria for retinopathy of prematurity: natural history data from the CRYO-ROP and LIGHT-ROP studies. Arch Ophthalmol Chic Ill 1960. nov 2002;120(11):1470-6.
84. Daniel E, Quinn GE, Hildebrand PL, Ells A, Hubbard GB, Capone A, et al. Validated System for Centralized Grading of Retinopathy of Prematurity: Telemedicine Approaches to Evaluating Acute-Phase Retinopathy of Prematurity (e-ROP) Study. JAMA Ophthalmol. juin 2015;133(6):675-82.
85. Brown JM, Campbell JP, Beers A, Chang K, Ostmo S, Chan RVP, et al. Automated Diagnosis of Plus Disease in Retinopathy of Prematurity Using Deep Convolutional Neural Networks. JAMA Ophthalmol. juill 2018;136(7):803-10.
86. Gatinel D, Saad A. The Challenges of the Detection of Subclinical Keratoconus at Its Earliest Stage. Int J Keratoconus Ectatic Corneal Dis. 1(1):36-43.
87. Saad A. Validation of a New Scoring System for the Detection of Early Forme of Keratoconus. Int J Keratoconus Ectatic Corneal Dis. août 2012;1(2):100-8.
88. Zéboulon P, Debellemanière G, Bouvet M, Gatinel D. Corneal Topography Raw Data

Classification Using a Convolutional Neural Network. Am J Ophthalmol. 2020;219:33-9.
89. De Fauw J, Ledsam JR, Romera-Paredes B, Nikolov S, Tomasev N, Blackwell S, et al. Clinically applicable deep learning for diagnosis and referral in retinal disease. Nat Med. 2018;24(9):1342-50.
90. 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. 2020;127(1):85-94.
91. Zapata MA, Royo-Fibla D, Font O, Vela JI, Marcantonio I, Moya-Sánchez EU, et al. Artificial Intelligence to Identify Retinal Fundus Images, Quality Validation, Laterality Evaluation, Macular Degeneration, and Suspected Glaucoma. Clin Ophthalmol Auckl NZ. 13 févr 2020;14:419-29.
92. Conroy RM, Pyörälä K, Fitzgerald AP, Sans S, Menotti A, De Backer G, et al. Estimation of ten-year risk of fatal cardiovascular disease in Europe: the SCORE project. Eur Heart J. juin 2003;24(11):987-1003.
93. Varadarajan AV, Poplin R, Blumer K, Angermueller C, Ledsam J, Chopra R, et al. Deep Learning for Predicting Refractive Error From Retinal Fundus Images. Invest Ophthalmol Vis Sci. 1 juin 2018;59(7):2861-8.
94. Seeing AI | Application caméra parlante destinée aux personnes ayant une déficience visuelle [Internet]. [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://www.microsoft.com/fr-fr/ai/seeing-ai
95. Google présente Lookout : une application pour aider les malvoyants à identifier les objets [Internet]. Siècle Digital. 2019 [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://siecledigital.fr/2019/03/14/google-presente-lookout-son-application-qui-identifie-les-objets-pour-les-malvoyants/
96. MyEye : les lunettes qui parlent aux malvoyants, une innovation ESSILOR disponible dans votre centre PANOPTESS | MyEye [Internet]. [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: http://www.myeye.fr/
97. Li Z, Keel S, Liu C, He Y, Meng W, Scheetz J, et al. An Automated Grading System for Detection of Vision-Threatening Referable Diabetic Retinopathy on the Basis of Color Fundus Photographs. Diabetes Care. 2018;41(12):2509-16.
98. Yildiz VM, Tian P, Yildiz I, Brown JM, Kalpathy-Cramer J, Dy J, et al. Plus Disease in Retinopathy of Prematurity: Convolutional Neural Network Performance Using a Combined Neural Network and Feature Extraction Approach. Transl Vis Sci Technol. 28 janv 2020;9(2):10-10.
99. Définitions : éthique - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 8 mars 2021]. Disponible sur: https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C3%A9thique/31389
100. Masson E. Les principes de l'éthique biomédicale. Beauchamp TL, Childress JF. 39 éd. Les Belles Lettres: Paris (2008). p. 644. Traduit de l'américain. [Internet]. EM-Consulte. [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://www.em-consulte.com/article/163607/les-principes-de-lethique-biomedicale-beauchamp-tl
101. Santé (CCNE) CCN d'Ethique pour les S de la V et de la, Comité Consultatif National d'Ethique pour les Sciences de la Vie et de la Santé (CCNE). Avis n°130. Données massives et santé : Une nouvelle approche des enjeux éthiques [Internet]. Paris: CCNE; 2019. 94p. Disponible sur: https://www.ccne-ethique.fr/fr/publications/donnees-massives-et-sante-etat-des-lieux-prospective-et-nouvelles-questions-ethiques
102. Recommandations sur les data et l'intelligence artificielle [Internet]. Conseil National de l'Ordre des Médecins. 2019 [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://www.conseil-national.medecin.fr/lordre-medecins/conseil-national-lordre/sante/medecine-futur-intelligence-artificielle/medecine-0
103. Article 4 - Secret professionnel [Internet]. Conseil National de l'Ordre des Médecins.

2019 [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://www.conseil-national.medecin.fr/code-deontologie/devoirs-generaux-medecins-art-2-31/article-4-secret-professionnel
104. Cas d'utilisation de la Blockchain : le monde médical [Internet]. Binance Academy. [cité 2 mai 2021]. Disponible sur: https://academy.binance.com/fr/articles/blockchain-use-cases-healthcare
105. Besse P, Besse-Patin A, Castets-Renard C. Implications juridiques et éthiques des algorithmes d'intelligence artificielle dans le domaine de la santé [Internet]. 2020 [cité 2 mars 2021]. Disponible sur: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02424285
106. Aminololama-Shakeri S, López JE. The Doctor-Patient Relationship With Artificial Intelligence. AJR Am J Roentgenol. 2019;212(2):308-10.
107. Javadi A-H, Emo B, Howard LR, Zisch FE, Yu Y, Knight R, et al. Hippocampal and prefrontal processing of network topology to simulate the future. Nat Commun. 21 2017;8:14652.
108. Neri E, Coppola F, Miele V, Bibbolino C, Grassi R. Artificial intelligence: Who is responsible for the diagnosis? Radiol Med (Torino). juin 2020;125(6):517-21.
109. Kessler SR, Pindek S, Kleinman G, Andel SA, Spector PE. Climat de sécurité de l'information et évaluation du risque de sécurité de l'information chez les employés de santé. Health Informatics J. 1 mars 2020;26(1):461-73.

AUTEUR : Caudron **Prénom : Aurélien**

Date de soutenance : 4 juin 2021

Titre de la thèse : L'intelligence artificielle perçue par les ophtalmologistes.

Thèse - Médecine - Lille 2021

Cadre de classement : *DES d'Ophtalmologie*

DES + spécialité : *DES d'Ophtalmologie*

Mots-clés : Intelligence artificielle, Apprentissage automatique, Algorithme.

Résumé :
Contexte : L'intelligence artificielle est une technologie en plein essor dont les compétences pointues ont déjà été établies par de multiples études et concernent de nombreux domaines de l'ophtalmologie. Il faut s'attendre à ce qu'elle modifie notre pratique dans un futur proche.

Méthode : Un questionnaire en ligne comprenant 20 questions fermées et 2 ouvertes a été soumis à des internes, des ophtalmologistes libéraux et hospitaliers de toute la France. 137 médecins ont participé à cette étude dont le but est de faire le point sur leurs connaissances, leurs attentes et leurs appréhensions concernant l'IA.

Résultats : L'intérêt pour l'IA est unanime mais les médecins sont encore peu documentés à son sujet. La majorité des participants perçoit en l'IA une possibilité d'améliorer les conditions de travail, d'augmenter les performances globales des soins et de diminuer les inégalités démographiques.
A l'inverse, beaucoup craignent que cet outil affaiblisse notre légitimité ou déshumanise notre profession. Le risque d'utilisation de l'IA par des non-médecins, à visée lucrative, a souvent été mentionné.
Même si la moitié des ophtalmologistes perçoit cette technologie comme une menace, 90% d'entre eux se disent prêts à l'utiliser dans leur pratique quotidienne.
Nos résultats sont cependant à nuancer puisque la moitié de l'effectif est constitué d'internes, encore inexpérimentés.

Conclusion :
Les ophtalmologistes apparaissent ouverts à l'utilisation de l'IA. Tout en ayant conscience des risques encourus, ils voient en elle des perspectives intéressantes à condition qu'elle soit supervisée. Pour préparer l'avenir, il convient d'adapter la formation des jeunes médecins afin d'exploiter au mieux cet outil et de l'intégrer sans crainte à leur pratique.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Jean-François Rouland

Assesseurs : Monsieur le Professeur Pierre Labalette, Monsieur le Professeur Jean-Pierre Pruvo, Monsieur le Docteur Valentin Bachet