



HAL
open science

Médecine générale et intelligence artificielle : revue de la littérature

Antoine Molcard

► **To cite this version:**

Antoine Molcard. Médecine générale et intelligence artificielle : revue de la littérature. Médecine humaine et pathologie. 2023. dumas-04419446

HAL Id: dumas-04419446

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04419446v1>

Submitted on 26 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

UNIVERSITÉ DE PICARDIE JULES VERNE

Faculté de Médecine d'Amiens

Thèse N° 2023-150 pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Médecine

Troisième cycle de Médecine Générale

Soutenue publiquement le 17 octobre 2023 à 14h00

**MÉDECINE GÉNÉRALE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE :
REVUE DE LA LITTÉRATURE**

Antoine MOLCARD

JURY

Président :

Pr Pierre DUHAUT

Assesseurs :

Dr Olivier BALÉDENT

Dre Pauline PIERRE-DUVAL

Directeur de thèse :

Dr Jean-Michel LEMOINE

Table des matières

1. Introduction	6
2. Méthodes	12
2.1 Nécessité d'une synthèse	12
2.2 Méthodologie	13
3. Histoire de l'IA dans la médecine	15
3.1 Science-fiction	15
3.2 Débuts de l'IA	16
3.3 Développement de l'IA médicale jusqu'à nos jours	18
4. Revue de la littérature actuelle	22
4.1 Constat	22
4.2 IA en médecine	23
4.3 Obstacles à l'adoption de l'IA	24
4.4 IA pour la médecine spécialisée	29
4.5 IA en médecine générale	31
4.6 Un exemple	43
5. Discussion	44
6. Conclusion :	
Evolution possible de la médecine générale avec l'IA	54
6.1 Proposition	55
6.2 Portée de ce travail	56

Bibliographie

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Pierre DUHAUT,
Professeur des Universités-Praticien Hospitalier (Médecine Interne)
Chef du service de Médecine interne et maladies systémiques
Pôle « Médico-chirurgical digestif, rénal, infectieux, médecine interne et endocrinologie »
(D.R.I.M.E)

Nous vous remercions de nous faire l'honneur de présider ce jury, et vous sommes particulièrement reconnaissants d'avoir accédé à notre sollicitation pour le moins tardive.

§

A Monsieur Olivier BALEDEMENT
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier
Responsable de l'unité de traitement de l'image médicale du CHU d'Amiens
Responsable de la thématique BioFlow de CHIMERE UR 7516 de l'UPJV

Nous vous remercions de nous faire l'honneur d'être notre juge, pour ce travail quelque peu éloigné de votre recherche mais dont il m'a semblé que votre expertise vous permettait de parfaitement saisir l'enjeu.

§

A Madame le Docteur Pauline PIERRE-DUVAL
Maître de Conférence Associé
Département de Médecine Générale

Nous vous remercions de nous faire l'honneur d'être notre juge, et saisissons l'occasion pour vous remercier de votre bienveillance en tant qu'enseignante au Département de Médecine Générale.

§

A Monsieur le Docteur Jean-Michel LEMOINE
Omnipraticien
Conseiller ordinal, Conseil de l'Ordre des Médecins de l'Aisne

Nous vous savons gré d'avoir immédiatement accepté de diriger cette thèse, et vous sommes reconnaissants d'avoir été une inspiration dans notre pratique médicale.

DÉDICACES PERSONNELLES

A mon père Dominique, de la Faculté de Médecine de Paris, médecin de campagne et gériatre

A ma mère Véronique

A Seung-hee, Jeanne et Michel

A Maxime, entre les mains de la médecine pré-IA

Aux médecins de la famille



Serment d'Hippocrate

JE jure par Apollon médecin, par Esculape, par Hygie et Panacée, je prends à témoin tous les dieux et toutes les déesses d'accomplir fidèlement, autant qu'il dépendra de mon pouvoir et de mon intelligence, ce serment et cet engagement écrit; de regarder comme mon père celui qui m'a enseigné cet art, de veiller à sa subsistance, de pourvoir libéralement à ses besoins, de considérer ses enfants comme mes propres frères, de leur apprendre cet art sans salaire et sans aucune stipulation s'ils veulent l'étudier; de communiquer les préceptes vulgaires, les connaissances secrètes et tout le reste de la doctrine à mes enfants, à ceux de mon maître et aux adeptes qui se seront enrôlés et que l'on aura fait jurer selon la loi médicale, mais à aucun autre. Je ferai servir suivant mon pouvoir et mon discernement le régime diététique au soulagement des malades; j'éloignerai d'eux tout ce qui pourrait leur être nuisible et toute espèce de maléfice; jamais je n'administrerai un médicament mortel à qui que ce soit, quelques sollicitations qu'on me fasse; jamais je ne serai l'auteur d'un semblable conseil; je ne mettrai pas aux femmes de pessaire abortif. Je conserverai ma vie pure et sainte aussi bien que mon art. Je ne taillerai jamais les calculeux, mais je les adresserai à ceux qui s'occupent spécialement de cette opération. Dans toutes les maisons où j'entrerai, ce sera pour le soulagement des malades, me conservant pur de toute iniquité volontaire, m'abstenant de toute espèce de débauche, m'interdisant tout commerce honteux, soit avec les femmes, soit avec les hommes, libres ou esclaves. Les choses que je verrai ou que j'entendrai dire dans l'exercice de mon art, ou hors de mes fonctions dans le commerce des hommes, et qui ne devront pas être divulguées, je les tairai, les regardant comme des secrets inviolables. Si j'accomplis fidèlement mon serment, si je ne faillis point, puissé-je passer des jours heureux, recueillir les fruits de mon art et vivre honoré de tous les hommes et de la postérité la plus reculée; mais si je viole mon serment, si je me parjure, que tout le contraire m'arrive!¹



1. Les fontes Fell Types ont été rendues disponibles par Iginò Marini (www.iginomarini.com)

1. INTRODUCTION

« Every great idea starts out as a blasphemy. »
Bertrand Russell

« We have modified our environment so radically that we must now modify ourselves to exist in this new environment. »
Norbert Wiener

La technologie a évolué au point de proposer des systèmes artificiels intelligents capables d'automatiser certains processus complexes. Il existe en lien avec ces technologies un domaine de recherche dédié à la résolution de problèmes dans un contexte médical qui a dès 1985 été identifié par l'IEEE¹ comme un domaine clef, nécessitant des financements de recherche en priorité[1], et pour lequel l'état français a récemment énormément investi (plan Innovation Santé 2030). Déjà en 2017, selon la lettre d'information CBinsights[2], les projets d'Intelligence Artificielle (IA) pour la santé avaient attiré plus d'investissements depuis 2012 que les projets d'IA dans n'importe quel autre secteur de l'économie. Certains systèmes issus de ces recherches sont conçus pour assister le médecin dans ses prérogatives, d'autres à un plus haut niveau pour classer la quantité toujours plus importante de données médicales. Il s'agit donc de réaliser une revue de la littérature principalement anglophone portant sur le sujet pour déterminer comment l'IA peut modifier notre façon de travailler en tant que médecins généralistes.

L'art de la médecine et l'algorithmique

L'art de la médecine comme nous l'entendons a changé, en particulier ces dernières années avec l'avènement de l'EBM (*Evidence Based Medicine* ou médecine basée sur des preuves) et l'enseignement aux étudiants d'algorithmes de décision. Alors que les médecins ont vu leur image et leurs conditions de travail se transformer, que les spécialistes se spécialisent encore, ils voient maintenant certaines de leurs prérogatives distribuées à d'autres professionnels de la santé qui ne sont pas médecins. Par ailleurs, ce qui est en effet demandé aux médecins de nos jours est bien différent de la part de la société et de la part des patients, et le temps imparti pour réaliser un compromis n'est pas toujours

1. Plus précisément : l'EMBS (Engineering in Medicine and Biology Society) de l'IEEE (Institute of the Electrical and Electronics Engineers)

suffisant. Du point de vue de la société (terme générique dans lequel par souci d'économie nous incluons par exemple l'administration, les Ordres, le ministère), on ne demande plus au médecin de résoudre un problème médical, mais de se mouvoir avec souplesse dans le parcours, rigide lui, dessiné par un aréopage d'experts appelé recommandations. Le patient quant à lui demande un diagnostic, et enfin une thérapeutique, et ceci en un temps acceptable qui à la limite appelle une certaine automatisation du processus. Voici que le bon médecin vu d'en haut est devenu celui qui applique au patient une prise en charge normalisée et correctement codée, et vu d'en bas, c'est encore celui qui applique au patient une prise en charge empathique et personnalisée. Ces deux conceptions ne sont pas antinomiques dans l'absolu, mais elles le deviennent lorsque la première seule est la priorité, incitée entre autres par rémunération, et que la seconde est découragée par, entre autres, le manque de temps. Tout se passe comme si l'on cherchait à diminuer les comportements humains pour favoriser un comportement logique, calculateur, algorithmique. Ceci est visible par exemple à la faculté, où la pensée analytique est favorisée et la nuance, la finesse propre à l'humain pratiquant ce qu'il était convenu d'appeler l'art de la médecine, sont encore tolérées mais peu à peu inusitées. C'est ainsi que l'étudiant en médecine français passe ses examens sous forme de QCM et sort de l'externat avec en tête des arbres de prise en charge, type de donnée² issu de la théorie des graphes imaginé pour les machines et dans lequel ces dernières se déplacent naturellement. L'étudiant français, du reste, est de moins en moins différent de l'étudiant américain : une standardisation sur laquelle nous reviendrons s'est opérée, par l'entremise de l'harmonisation des recommandations ou *guidelines* à travers les pays.

Nature du problème

La médecine de premier recours est confrontée à des problèmes qui ne sont pas seulement d'ordre médical (recueil de l'anamnèse et rédaction de l'observation, formulation des problèmes, examens clinique et complémentaires, thérapeutique ou orientation dans le système de soins) mais organisationnels : planning, classement des informations, gestion administrative et économique du cabinet, accès aux informations concernant un patient, accès aux recommandations, accès et participation aux bases de données de recherche, participation à la volée ou a posteriori à des programmes de recherche, adéquation aux politiques de santé publique, ... Chacun de ces problèmes devrait être traité par le médecin généraliste ou sa secrétaire, ce qui demande beaucoup de temps et une communication efficace.

Les médecins de famille cherchant à bien faire accordent le plus de temps possible à leurs patients (toujours plus nombreux étant donnée la démographie médicale) au détriment de leur propre vie de famille ou de la rentabilité de leur entreprise, consignent le

2. En informatique, un type de donnée abstrait est une description de valeurs possibles de données, des opérations possibles sur ces données et de ce que font ces opérations (équivalent d'une structure algébrique en mathématiques).

plus d'informations recueillies dans leur dossier patient désormais informatisé (mais encore local), appliquent les recommandations nationales, font de la prévention, etc, mais il apparaît que la charge représentée par ce travail est de plus en plus importante. Le burn-out est un problème déjà ancien mais nous commençons maintenant à voir un exode de la profession précisément par ceux des médecins qui refusent de pratiquer une médecine a minima, ayant perdu son côté humain³.

Dans le même temps, l'IA s'est révélée capable de traiter certains problèmes complexes, parfois avec une efficacité remarquable. L'exemple aujourd'hui médiatisé est ChatGPT, plateforme en ligne de dialogue avec un *chatbot* (bot vient de robot et chat vient de l'anglais *to chat*, discuter) actuellement basé sur la 4ème génération de son LLM (voir définitions à la fin de ce chapitre) développée par OpenAI capable de répondre de façon exhaustive à une question rédigée en langage naturel. ChatGPT peut, par exemple, répondre à des questions d'ordre médical d'une façon satisfaisante pourvu que la question soit bien posée, et s'est avéré proche de réussir l'examen qualifiant des étudiants en médecine américains USMLE sans entraînement préalable[3]. Notons que d'autres examens réputés difficiles aussi variés que le barreau américain ou la certification de sommelier ont été réussis avec des scores très honorables⁴. D'autres exemples d'IA moins médiatisés (quoiqu'ils le furent en leur temps) s'avèrent extrêmement performants en médecine, nous parlerons plus loin de Watson développé depuis plusieurs années par IBM.

La médecine est-elle, par un double mouvement de formatage des médecins à la pensée algorithmique et de formation des IA au raisonnement médical, en train d'accoucher de son successeur ?⁵

Nous avons cherché par ce travail à déterminer la place que prendra l'IA dans la médecine générale, à court voire moyen terme, à la lumière de la littérature qui est principalement anglophone. Ce champ de recherche est en effet bouillonnant outre-Atlantique et donne lieu à des débats passionnés. L'objectif principal de la présente étude est de répondre à la question suivante : **Dans quelle mesure l'intelligence artificielle pourrait-elle faire évoluer la médecine générale ?**

Après quelques définitions, nous établirons un bref historique de l'intelligence artificielle en particulier dans le domaine de la médecine, puis essaierons de présenter l'état des connaissances en IA médicale, en particulier en ce qui concerne la médecine générale. Nous traiterons la question posée, et nous aviserons de proposer une prospective quant à l'avenir de notre métier. Nous estimerons que notre travail aura été utile si grâce à sa lecture un confrère possède les notions élémentaires pour pouvoir lire sans peine la littérature en rapport avec le sujet, soit que les sujets couverts ici soient effectivement pertinents,

3. Voir l'article du 5 juillet 2023 du San Francisco Chronicle "Dedicated doctors are leaving medicine. This isn't burnout. It's a medical crisis"

4. Voir l'article du Business Insider "AI models like ChatGPT and GPT-4 are acing everything from the bar exam to AP Biology. Here's a list of difficult exams both AI versions have passed."

5. J.-M. Truong dans son essai « Totalement inhumaine »[4] tient un tel discours sans rapport avec la médecine mais avec la vie : nous donnerions naissance à une nouvelle forme de vie « électronique » qui nous succéderait.

soit que les enjeux dont s'emparent les auteurs aient été correctement vulgarisés dans ces pages.

Définitions

Nous appelons médecine générale, ce qui dans la littérature anglophone se nomme *general practice* (pratique, exercice ou cabinet généraliste, surtout en Angleterre), *family medicine* (médecine de famille, surtout au Canada ou en Suisse) ou *primary care medicine* (médecine de premier soins, aux Etats-Unis), et correspond à la médecine de premier recours (ou soins primaires), répondant aux besoins en santé d'une population de proximité sans cadre défini, couvrant également la coordination des soins et leur suivi. Le rôle du médecin généraliste est vaste et complexe, et évolue en particulier avec la progression de la science et de la société, aussi n'avons-nous pas ici l'ambition de proposer une définition canonique.

Nous appelons intelligence artificielle ou IA ce qui dans la littérature anglophone est appelé *artificial intelligence* ou *AI*. On utilise encore le terme d'intelligence par continuité avec un ancien terme adopté par les écrivains de science-fiction, alors qu'un expert lui préférerait sans doute un terme correspondant à la méthode mise en oeuvre, le *machine learning* par exemple (voir glossaire à la section suivante). Ces méthodes, servies par une puissance de calcul disponible toujours plus importante, découlent essentiellement de théories mathématiques dont la raison d'être est la modélisation de phénomènes : la logique, les statistiques, les probabilités. Le *machine learning* est probablement la méthode qui a le mieux fait ses preuves avec comme exemples d'applications la reconnaissance automatique du langage (chatbots comme ChatGPT), les réseaux de neurones artificiels (détection de motifs) culminant actuellement avec le *deep learning*.

Donnons une définition disons intentionnelle de l'intelligence artificielle : la discipline visant à imiter le raisonnement humain, pouvant être qualifié d'intelligent. Cette définition pourtant simple revient à définir l'intelligence, ce que l'on peut faire par exemple de façon constructiviste (théorie de Piaget), en postulant qu'elle consiste en processus cognitifs ayant pour nature des opérations mentales[5] (par exemple : la perception, la mémoire, le raisonnement, ...), lesdites opérations traitant une donnée pour en extraire un sens. Envisageons dès lors la possibilité que ces processus puissent être simulés.

Il est vain de vouloir donner une définition unique à une discipline procédant en réalité plutôt d'une idée construite à l'intersection de domaines clairs que sont les mathématiques et l'informatique par exemple, que d'un champ d'étude bien délimité. Nous allons donc tenter de dessiner les contours de l'IA pour avoir une « hypothèse de travail ».

Une définition plus proche des préoccupations des informaticiens, qui nous intéresse également dans la mesure où ce sont eux qui développent ces théories et coopèrent ultimement avec les médecins pour les appliquer à notre domaine, est celle de l'un des fondateurs du LIP6 (Laboratoire d'Informatique de l'université Paris VI) Jean-Louis Laurière [6] dans un ouvrage de 1987 abordant la logique, les langages naturels, la philosophie, la théorie des

jeux, l'apprentissage... : [l'objet de l'IA est de] reconstituer à l'aide de moyens artificiels - presque toujours des ordinateurs - des raisonnements et des actions intelligentes. Il postule que « tout problème pour lequel aucune solution algorithmique n'est connue, relève a priori de l'intelligence artificielle ». On entend par algorithmique, une suite d'opérations ordonnées et bien définies permettant d'arriver à la solution en un temps acceptable.

Les informaticiens Russell et Norvig, dans leur somme *AI : A modern approach*⁶, ont cherché à circonscrire cette discipline en plaçant les approches dont elle procède selon deux dimensions : celles qui s'intéressent au raisonnement par opposition au comportement, et celles qui se veulent fidèles à l'intelligence humaine par opposition à celles qui sont rationnelles (agissant au mieux selon leurs connaissances - logique aristotélicienne). Ces approches ne sont pas mutuellement exclusives car ici encore il s'agit seulement d'une tentative de définition.

Chacune peut donner lieu à un champ différent de recherche même si toutes peuvent éventuellement résoudre les mêmes problèmes, ainsi l'IA peut avoir pour objet : de reproduire la pensée d'un humain (résolution de problème, prise de décision, apprentissage, ...), de reproduire la pensée rationnelle (dont le résultat est objectivement juste, indépendamment de comment fonctionne la pensée humaine)⁷, d'égaliser la performance humaine pour une tâche cognitive (test de Turing⁸), ou enfin de construire un agent ayant un comportement intelligent (capable de prendre des décisions en fonction de son environnement, ce qui implique la perception et la représentation de celui-ci, et un certain raisonnement pour accomplir une tâche).

Lexique

Voici une brève description des technologies que nous pourrions citer. Nous n'entrerons pas dans les détails techniques trop éloignés du propos de ce travail.

- Algorithme : ensemble d'instructions ordonnées qui traite de façon systématique une donnée en entrée pour produire un résultat en sortie. Un algorithme s'apparente, en mathématiques, à une fonction ou la succession de plusieurs fonctions.
- *Machine Learning* (ML, terme utilisé par Arthur Samuel d'IBM en 1959, ou en français Apprentissage Numérique/Automatique) : Algorithme d'extraction automatique de connaissances (règles de classification) à partir de données sans programmation explicite, qui revient à l'optimisation automatique d'une fonction entre entrées et sorties, permettant ensuite de classer de nouvelles données.

6. Un livre de référence sur l'intelligence artificielle, utilisé comme manuel universitaire pour les informaticiens.[7]

7. Se référer aux syllogismes d'Aristote -par exemple *Socrate est un homme, tous les hommes sont mortels, donc Socrate est mortel-* qui définissent des processus de raisonnement irréfutables et ont fondé le champ de la logique.

8. ou « jeu d'imitation », décrit par le mathématicien Alan Turing en 1950[8] encore pertinent plus de 70 ans après, un ordinateur passe le test si un interrogateur humain, en posant quelques questions, ne peut dire si la réponse vient d'un humain ou d'un ordinateur.

-
- Neurone artificiel : modèle mathématique de neurone biologique (par exemple n’envoyant une valeur positive que lorsque la somme des résultats reçus est supérieure à une certaine valeur)
 - Réseau de Neurones Artificiels (en anglais ANN pour *Artificial Neural Networks*) : Réseau composé d’unités de neurones artificiels connectés entre eux en couches linéaires.
 - *Deep Learning* (ou en français Apprentissage Profond) : Utilisation de multiples couches de neurones artificiels (ou réseaux de neurones dits profonds), dans le but d’apprendre des représentations de données présentant de multiples couches d’abstraction.
 - Apprentissage supervisé : Optimisation de la fonction entre entrées et sorties par entraînement avec des couples entrée/sortie connus. A chaque nouveau couple entrée-sortie rencontré, la fonction améliore sa représentation de l’ensemble de données d’intérêt.
 - Apprentissage non supervisé : Optimisation par entraînement sans étiquettes a priori, où l’algorithme détermine un lien entre les données par lui-même en découvrant des motifs communs permettant de former des groupes partageant ces caractéristiques d’intérêt.
 - Traitement Automatique du Langage Naturel (TAL ou TALN, en anglais : NLP pour *Natural Language Processing*) : Représentation d’un texte en langage naturel, non structuré, en une forme structurée interprétable par une machine et permettant l’extraction d’informations.
 - Système expert : Programme utilisant une base de connaissances et des procédures d’inférence (logique) pour résoudre des problèmes requérant habituellement une expertise humaine. En général, la performance de ces systèmes dépend de la taille de la base de connaissances.
 - Grand modèle de langage (LLM pour *Large Language Models*) : Réseaux de neurones profonds utilisés principalement pour la prédiction de suite de texte (exemple : GPT-4 développé par OpenAI).
 - Agent conversationnel (ou *chatbot*, *conversational agent*, *CA*, *virtual assistant*, *dialog system* : agent logiciel de dialogue en langage naturel avec un utilisateur humain.

2. MÉTHODES

« A wealth of information creates a poverty of attention. »

Herbert A. Simon

« Nur für Verrückte. »¹

Hermann Hesse

2.1 Nécessité d'une synthèse

Avec la croissance rapide du champ de l'intelligence artificielle ces dernières années, le volume des informations pertinentes (découvertes empiriques, cadres conceptuels, théories, modèles, etc) croît plus rapidement que la capacité d'analyse des chercheurs dont le temps et les ressources sont limitées. Dans un article de 1988[9], Eddy présume que la complexité de la médecine de l'époque excède les compétences de l'expert. La pratique médicale, le cas échéant, demande en plus aux chercheurs en médecine un temps incompressible, c'est le cas également s'ils ont des fonctions de décision (à la faculté donc sur l'éducation des médecins, ou en politique). L'intelligence artificielle est un domaine vertigineux et abscons pour qui ne serait pas particulièrement versé dans l'informatique, et c'est le cas des médecins en général, alors que ces technologies ont le potentiel de bouleverser la pratique médicale dans un futur proche. Nous croyons donc qu'une synthèse à l'attention de nos confrères généralistes est pertinente et peut permettre d'appréhender la portée qu'aura l'adoption de ces technologies.

L'état de l'art en IA évolue extrêmement vite et l'exercice requiert une connaissance des problèmes qui se posent à l'utilisateur (dans notre cas le médecin ou le patient) mais également de ce dont est capable cette technologie. Etant donné le peu d'études francophones à ce sujet (40 résultats de recherche pour « intelligence artificielle & santé », près de 50000 pour « artificial intelligence & health » dans Pubmed en juillet 2023) et dans le but de proposer, modestement, notre contribution en français à ce champ de recherche, voici donc une synthèse de la littérature principalement anglophone concernant l'IA appliquée à la santé et plus particulièrement à la médecine générale. Nous avons résolu de se cantonner à une revue à mi-chemin entre le *narrative summary* (résumé narratif, ou résumé des motifs)[10] et la *scoping review* (revue de la portée, ou exploratoire, de la

1. Seulement pour les fous

littérature)[11] pour conserver une certaine latitude méthodologique et pouvoir répondre à la question de recherche dans le temps imparti.

2.2 Méthodologie

Une revue de la littérature est utile pour réaliser une synthèse de la recherche sur un domaine ou une question précise au moment de sa conception et donner une visibilité à certains concepts ou enjeux, en particulier dans un domaine en rapide croissance ou lorsque le volume d'information disponible est important, ce qui permet d'orienter l'attention de la communauté sur certaines questions. Les chercheurs intéressés par la manière de conduire la recherche en ont fait un outil utile pour l'avancement de la science en tendant à le rendre compatible avec l'un des axiomes admis de la recherche scientifique : rendre son produit en théorie reproductible par une méthode rigoureuse [12]. En pratique ces méthodes peuvent s'appliquer aux synthèses quantitatives mais leur reproductibilité pour un sujet principalement abordé par des études qualitatives ou de prospective n'est pas évidente [13], par ailleurs il n'existe pas qu'une seule méthode standardisée pour la mise en oeuvre de *scoping reviews* par exemple[14]. Il est admis dès lors que ce qui importe est moins l'adéquation d'une revue au type de revue duquel elle se réclame que son caractère systématique et transparent [15, 16]. Aussi nous efforcerons-nous ici de décrire le procédé par lequel nous avons identifié les articles pertinents et selon quels critères nous les avons inclus dans l'espoir de rendre ce travail reproductible si nécessaire.

La question que nous posons est vaste, et demande de convoquer différents domaines touchant la médecine et l'intelligence artificielle. Du point de vue médical, nous orienterons notre attention vers ce qui a trait à ou peut retentir sur la médecine générale et n'aborderons les autres spécialités que pour illustrer un propos. Du point de vue informatique, nous n'aborderons aucun problème technique qui ne soit à la portée des médecins profanes.

Nous avons essentiellement utilisé les deux moteurs de recherche de données bibliographiques Pubmed et Google Scholar, ou le catalogue de la bibliothèque universitaire pour notre bibliographie. Les mots-clefs utilisés sont : AI, artificial intelligence, machine learning, deep learning, chatbot, automatic, computational, digital, CDSS, clinical decision support systems, deep medicine, expert system, Artificial Intelligence in Medicine, AIM ; que nous associons à : medical doctor, MD, medicine, medical, health, healthcare, primary care, family medicine, GP, general practice, primary care provider, PCP ; ainsi que d'autres notions utiles déterminées une fois la bibliographie explorée : AI adoption, acceptability, risk, empathy, explainability, ...

Ces mots-clés relativement peu nombreux renvoient à une grande quantité d'articles. Nous excluons d'emblée ceux qui traitent d'autres sujets et ne parlent qu'incidemment de notre problème, ainsi que ceux trop techniques s'il est impossible d'en extraire un message exploitable. Nous excluons ceux concernant un champ relativement proche mais distinct de l'IA : la robotique, sauf lorsqu'ils traitent explicitement de notre propos. Nous excluons

également ceux dont nous n'avons pas pu obtenir de copie intégrale, à moins que l'extrait disponible serve une idée déjà explicitée par d'autres articles cités. Nous avons été aidés en cela par les différents accès académiques dont nous jouissons (la BU Santé d'Amiens en particulier), et par les accès en ligne (Google Scholar, Pubmed, Sci-Hub en particulier).

Les articles d'intérêt a priori sont ceux qui traitent explicitement de l'IA appliquée à la médecine générale, mais également pour les placer dans leur contexte d'IA pour la santé en général ce qui représente la grande majorité. Certains sont des rapports techniques, d'autres sociologiques, éthiques, des essais de prospection bien souvent écrits par d'illustres informaticiens ou médecins, des études qualitatives sur le ressenti de l'introduction de ces technologies, etc. Nous n'avons pas exclu a priori les articles dans d'autres langues pour peu qu'ils aient pu nous éclairer, et n'avons exclu aucune date de publication ou type d'article, en favorisant cependant les articles récents. Il est à noter que le champ étant relativement récent, la grande majorité des articles a été publiée depuis 2017 selon la quantité de résultats sur Pubmed, avec une augmentation progressive depuis 1994 (ce qui correspond à la fin du « deuxième hiver » de l'IA, voir chapitre sur l'histoire de l'IA). Guo et al.[17] ont mené en 2020 une étude bibliographique spécifiquement sur la littérature qui concerne l'IA dans la médecine, et notent en accord avec ces observations que le nombre de publications augmente d'environ 7% par an entre 1995 et 2010, puis de 23% par an entre 2011 et 2014, et de 43% par an entre 2014 et 2019. Il serait certainement possible de déterminer quels sont les facteurs décisifs pouvant expliquer les inflexions de la courbe du nombre de publications : des décisions politiques ou économiques, la démocratisation de l'utilisation des dossiers médicaux informatisés, la progression de l'efficacité de l'IA médicale et son acceptation dans le public, les opportunités économiques mieux identifiées par les entrepreneurs, etc.

Varghese[18] met ces chiffres en perspective en incluant dans sa recherche de publications ayant trait à l'IA dans la santé le critère « essai clinique », reflétant le nombre de dispositifs d'aide à la décision ayant passé toutes les étapes y compris le financement jusqu'à l'essai sur le terrain, et montre que ce nombre a peu changé depuis 2005, ce qui peut tempérer l'enthousiasme en suggérant que finalement peu de ces dispositifs sont suffisamment prometteurs.

Une fois une bibliographie relativement éclectique d'une petite centaine d'articles assemblée grâce aux mots-clefs cités plus haut en ayant uniquement lu les titres avec ou non l'extrait, nous en entreprenons la lecture dans un ordre arbitraire. Chaque article s'avère rapidement plus ou moins pertinent pour notre sujet et nous écartons ceux qui n'ont pas leur place. Ceux qui nous intéressent sont lus et réfèrent à des dizaines d'autres articles bien souvent d'un grand intérêt et que nous étudions autant que possible de la même manière pour en extraire la substance présentée ici, jusqu'à revenir à l'article d'origine. Nous dégageons ainsi, par cette méthode exploratoire partie d'une impulsion simple avec des thématiques bien identifiées, nombre d'informations inattendues nous permettant de découvrir des auteurs que nous ne connaissions pas et d'autres sujets de débat pertinents.

3. HISTOIRE DE L'IA DANS LA MÉDECINE

« You insist that there is something a machine cannot do. If you tell me precisely what it is a machine cannot do, then I can always make a machine which will do just that. »

John von Neumann

« The future is already here - it's just not evenly distributed ».

William Gibson

Nous présentons ici une brève histoire de l'IA en général puis de l'IA appliquée à la médecine.

3.1 *Science-fiction*

La science fiction est un domaine de la littérature décrivant des mondes où la société des humains interagit avec la technologie. Les auteurs s'intéressent aux possibles réactions de l'humain ou de l'humanité à l'adoption passée ou à l'introduction de technologies au sens large, c'est-à-dire allant de la simple interaction avec une technologie plus ou moins complexe (par exemple : cycle des Robots d'Isaac Asimov), à ses conséquences (Chroniques Martiennes de Ray Bradbury) ou à l'utilisation de la technologie pour la structuration de la société ou la doctrine politique (Le Meilleur des Mondes d'Aldous Huxley, pour citer l'un des plus connus). La médecine n'est que marginalement abordée, ses avancées allant de soi dans un monde où la technologie est considérée comme au service de l'humain. L'interface entre homme et machine est un motif récurrent, désormais fréquemment désigné par le terme « transhumanisme ».

Les chercheurs en IA, plus généralement les informaticiens, sont souvent d'anciens avides lecteurs de science-fiction et se sont familiarisés dès l'enfance à l'idée de technologies inimaginables pour les autres. Il faut donc comprendre l'état d'esprit des informaticiens : la technologie est loin de les rendre inquiets, au contraire pouvoir participer à l'émergence de nouvelles technologies constitue plutôt un privilège.

3.2 Débuts de l'IA

D'après l'histoire relatée dans plusieurs ouvrages américains (citons par exemple *Machines who think*, une histoire de l'IA par la romancière Pamela McCorduck, mariée à Joseph Traub, ami et collègue de célèbres informaticiens américains[19], dont la description des évènements est discutée [20], ou celle de Daniel Crevier également basée sur des interviews des mêmes protagonistes [21]), l'IA est née aux Etats-Unis avec la conférence de Dartmouth de 1956 où le terme « intelligence artificielle » aurait été retenu. Il s'agissait plutôt d'un atelier auquel ont participé pendant 2 mois les 10 chercheurs américains les plus intéressés par le domaine, reconnus par la suite comme pionniers (pour ne citer que les plus connus : John McCarthy, Marvin Minsky, Herbert Simon, Allen Newell, Oliver Selfridge, Claude Shannon).

Bien avant, l'érudit mystique catalan du XIII^{ème} siècle Raymond Lulle, lui-même inspiré des astrolabes ou *zairja* arabes, avait conçu des machines logiques mécaniques et est considéré comme un fondateur par d'illustres mathématiciens et logiciens comme Leibniz quatre siècles plus tard. En réalité l'IA a donc ses fondations sur des théories beaucoup plus anciennes, à l'origine de la logique (par exemple le système de syllogismes d'Aristote, IV^{ème} siècle avant Jésus-Christ, qui permet en principe de générer mécaniquement à partir de prémisses des conclusions et qu'on appelle maintenant logique traditionnelle), de la philosophie (Descartes considérant que les animaux ne seraient que des machines au XVII^{ème} siècle, le médecin Offray de la Mettrie du siècle suivant trouve absurde de ne pas y inclure l'humain[22]), ou des mathématiques (XVIII^{ème} siècle : théorie de Bayes à la base des théories modernes de raisonnement dans l'incertitude, XIX^{ème} siècle : algèbre de Boole, étude des mathématiques comme langage par B. Russell, ...).

Plus concrètement, l'IA emprunte à des disciplines récentes issues de ces théories fondatrices : l'informatique bien entendu qui en est le substrat, mais également la recherche opérationnelle (ou optimisation), la psychologie (comment les humains et les animaux pensent ?), les neurosciences (inspiration du fonctionnement du cerveau au niveau chimique ou au niveau intégratif), l'économie (Herbert Simon reçoit le prix Nobel en 1978 pour avoir montré que des décisions « suffisamment bonnes » sont plus proches du comportement humain que la solution optimale à un problème, plus difficile à calculer du reste), la cybernétique (de « gouverner », théorie du contrôle et de la communication, dont l'un des concepts clés est celui de *feedback* ou rétroaction¹), ou la linguistique (traitement automatique du langage naturel, influence de linguistes comme Noam Chomsky).

McCulloch et Pitts, respectivement neurophysiologiste et logicien, définissent dans un article de 1943 un modèle mathématique de neurone dont ils montrent qu'un réseau de plusieurs de ces neurones peuvent modéliser les fonctions d'une machine de Turing (modèle abstrait du fonctionnement d'une machine mécanique de calcul, ayant certainement contribué à l'invention de l'ordinateur) ou encore les opérateurs logiques booléens ET,

1. La cybernétique est la science de la communication et du contrôle chez l'animal et la machine (définition donnée par son fondateur le mathématicien Norbert Wiener dans un livre de 1948[23])

OU, NON [24]. Ces recherches attirèrent l'attention de John Von Neumann (grand mathématicien à l'origine de l'EDVAC, l'un des premiers ordinateurs) et Norbert Wiener. Frank Rosenblatt (qui deviendra neurobiologiste) publie un article en 1958 dans lequel il décrit le perceptron : un réseau de neurones à 3 couches dont il construit même un prototype physique. Marvin Minsky et Seymour Papert, auteurs du livre « Perceptrons » dans lequel ils démontrent les limites des réseaux de neurones, sont d'après la légende responsables en partie (avec le manque de progrès en robotique et en traitement du langage) d'un premier « hiver » de l'IA vers les années 70, pendant lequel les chercheurs auraient acquis la conviction que ce que pouvait faire l'IA était limité et auraient donc délaissé le domaine. Le connexionnisme (qui professe que les phénomènes mentaux peuvent être décrits à l'aide de réseaux d'unités simples interconnectées) a été délaissé au profit de l'approche computationnelle (voir [25] pour une explication des termes). L'algorithme dit de rétropropagation ou descente du gradient (correction de la dernière à la première couche de neurones des poids attribués aux connexions entre neurones en fonction de leur responsabilité dans l'erreur détectée à la fin du calcul), permettant l'autocorrection et donc l'apprentissage, est ensuite amélioré par d'autres chercheurs ([26, 27]).

Lors de la conférence de Dartmouth, Allen Newell et Herbert Simon présentent un programme conçu dans l'environnement de la RAND Corporation appelé LT pour Logic Theorist, qui a été ensuite capable de produire des preuves pour 38 des 52 théorèmes présentés dans les Principia Mathematica de Whitehead et Russell², dont certaines inédites. En 1957, Simon prophétise que dans les 10 ans la machine battra l'humain aux échecs, ce qui n'aura lieu qu'en 1997 (défaite du champion du monde Gary Kasparov contre l'ordinateur Deep Blue d'IBM). Depuis le programme AlphaGo de l'entreprise DeepMind (rachetée par Google) a battu en 2017 le meilleur joueur de go, un jeu japonais connu pour être beaucoup plus complexe que les échecs.

Dans les années 1960, Charles Rosen présente le robot Shakey, dont le cerveau est programmé en Lisp (langage de programmation créé par J. McCarthy, apportant beaucoup d'innovations conceptuelles à l'époque et encore célébré), capable à partir d'une instruction de programmer un plan d'action, de détecter les objets autour de lui et d'agir sur eux en se déplaçant.

Les années 80 voient les systèmes experts, basés sur la prise de décision fondée sur la logique à partir d'une base de connaissances, acquérir une certaine reconnaissance, et beaucoup d'entreprises séduites espèrent automatiser une partie de leurs procédures coûteuses en élaborant des solutions basées sur ces technologies (certaines économisent en effet beaucoup d'argent). Il s'avère que le maintien à jour et l'amélioration des bases de données de ces systèmes était très coûteux, et le rendement trop modeste en comparaison des promesses, ce qui a rendu les investisseurs frileux et donné lieu à ce qu'on a appelé un « second hiver » de l'IA pendant lequel la confiance en ces technologies a chuté. Par la suite les équipes de recherche travaillant sur les réseaux de neurones retrouvent des financements

2. L'un des ouvrages fondateurs de la logique contemporaine, partant d'un minimum de notions primitives pour en déduire entre autres la théorie des ensembles à partir d'un minimum de règles d'inférence.[28]

vers le milieu des années 90 au moment où la puissance de calcul des ordinateurs explose - permettant la multiplication des couches de neurones et donc de décupler la puissance de l'analyse (vers le deep learning), et où la quantité de données disponibles explose (vers le big data 20 ans plus tard) - donnant une raison d'être supplémentaire aux systèmes capables de traiter un grand nombre de données rapidement.

Après la revanche accordée à IBM en 1997 où il a perdu (il avait gagné contre Deep Blue en 1996), Kasparov a soupçonné les ingénieurs d'IBM d'avoir aidé leur machine avec les conseils d'un grand maître (Joel Benjamin avait été recruté pour améliorer Deep Blue après sa défaite), cette idée lui aurait fait organiser en 1998 une compétition d'échecs nommée « échecs avancés » entre équipes humain-machine, nommées « centaures ». Les résultats ont montré que la collaboration d'une IA avec l'humain était la plus performante, plutôt qu'humain seul ou IA seule, mais pas seulement : l'équipe gagnante n'était ni le maître d'échecs avec une quelconque IA ou la meilleure IA avec un quelconque humain, mais des amateurs qui ont su tirer parti de plusieurs faibles programmes d'échecs différents. Kasparov en a conclu que la meilleure combinaison est celle d'un humain « faible » avec une bonne méthode, en équipe avec une machine, autrement dit la *façon* d'utiliser la machine est fondamentale³.

3.3 Développement de l'IA médicale jusqu'à nos jours

Il peut être prématuré de parler d'histoire de l'IA dans la médecine dans la mesure où la plupart des protagonistes sont encore actifs dans ce champ de recherche et peuvent plutôt partager leurs réflexions sur le développement de ces technologies que relater une histoire objective[29]. Nous présentons donc ici un résumé des événements selon lesdits protagonistes, en attendant que l'histoire de l'IA médicale devienne une partie de l'histoire de la médecine (ou de l'histoire de l'informatique) et par conséquent étudiée par des historiens.

L'IA médicale n'a pas d'événement fondateur à proprement parler, elle bénéficiera plutôt à la marge de l'enthousiasme des chercheurs américains (ici encore la littérature relatant les débuts de l'IA médicale se concentre sur de petits groupes de pionniers aux Etats-Unis, mais ce sont peut-être ceux qui ont le plus d'audience) dont l'éclectisme les fait appliquer leurs idées à des programmes en rapport avec la médecine. ELIZA⁴, un simulateur de conversation présenté en 1966 par J. Weizenbaum[31], emprunte opportunément la structure monotone des conversations menées par un psychologue pour donner l'illusion d'une écoute bienveillante, par exemple :

-UTILISATEUR : Je trouve que ma vie actuelle ne me convient pas.

-ELIZA : Pourquoi pensez-vous cela ?

-Eh bien je dois être dépressif.

3. Voir la conversation de Kasparov avec Tyler Cowen, un économiste éclectique : Garry Kasparov on AI, Chess, and the Future of Creativity (Ep. 22)

4. Il existe une version portée en ligne du programme original sur le site de N. Landsteiner [30].

-Qu'est-ce qui vous rend dépressif ?

-Je ne sais pas...

-Je ne sais pas n'est pas une réponse, réfléchissez un peu enfin !

Les années 60 virent le développement de bases de données cliniques et les premières tentatives de créer un dossier patient informatisé. En 1971, Saul Amarel fonde la « Research Resource on Computers in Biomedicine » à l'université Rutgers aux Etats-Unis, qui hébergera en 1975 la première conférence en IA médicale. Le partage d'un système informatique appelé SUMEX-AIM (Stanford University Medical EXperimental - AI in Medicine) entre plusieurs universités avait été l'occasion de mettre en contact les chercheurs intéressés par l'application des avancées de l'IA dans la médecine. Lesdites conférences ont fait l'objet d'un livre édité par Peter Szolovits dont l'édition originale intégrale de 1982[32] est disponible sur son site internet⁵, revue et complétée en 2019[33]. Ce livre décrit notamment l'effervescence dans les années 70 autour des systèmes experts appliqués à la médecine, quelques exemples : PIP (Present Illness Program, diagnostic d'un problème médical après recueil d'informations sur le patient par le programme)[34], CASNET (modèle de réseau d'associations causales appliqué à un programme de consultation pour le glaucome[35]), INTERNIST (aide au diagnostic différentiel pour les cliniciens, déjà pressenti pour représenter une alternative à la médecine de premier recours dans les zones mal pourvues)[36], the Digitalis Therapy Advisor (aide au dosage de Digitaline en fonction de la réponse clinique d'un patient)[37], dans ce qu'il est convenu d'appeler un paradigme de « systèmes basés sur la connaissance »[38]. Feigenbaum⁶ publie en 1983 un livre intitulé « The Fifth Generation », où il explique l'importance selon lui du projet japonais de conception et déploiement d'ordinateurs dits de 5^{ème} génération (voir [39]), où nous sommes encore probablement, sauf si l'on considère que la miniaturisation permettant la mise sur le marché de téléphones portables et montres connectées constitue une 6^{ème} génération. Cette 5^{ème} génération promettait de manipuler des symboles, intégrer l'IA, comprendre le langage humain, etc. Le programme MYCIN issu du laboratoire HPP (Heuristic Programming Project) de Stanford est sans doute (peu après DENDRAL) l'ancêtre de tous les systèmes experts, il identifie la bactérie responsable d'un sepsis et recommande la prescription d'antibiotiques mais le temps de saisie étant trop long il n'a jamais été réellement utilisable en pratique.

DXplain est un logiciel accessible sur internet qui propose, à partir d'une liste de signes cliniques, des hypothèses diagnostiques [40]. Dès 1987, il a vocation à être utilisé par des médecins sans connaissance en informatique et a déjà l'ambition de bénéficier de l'expertise de ses utilisateurs qui peuvent commenter et enrichir la base de données. Ces programmes utilisent des données structurées, mais nous voyons à la même époque apparaître des projets utilisant l'expertise humaine (ici professionnelle) pour la création

5. <https://groups.csail.mit.edu/medg/people/psz/ftp/AIM82/>

6. Informaticien élève de Herbert Simon et détenteur du Prix Turing, ayant fait partie de l'équipe originale du SUMEX-AI à Stanford et actuellement directeur du *Knowledge Systems Laboratory* à Stanford

d'ontologies⁷ de sens commun, articulant une logique entre des faits décrits par le langage naturel (voir l'exemple de Cyc[41]), dans le but de donner aux machines du bon sens.

Ces programmes encore appelés systèmes experts auront pavé la voie à l'utilisation des machines pour aider le médecin, mais n'ont été que peu utilisés dans la réalité, en partie parce qu'ils n'étaient pas connectés aux dossiers patients informatisés, mais aussi parce qu'ils n'étaient applicables que dans un champ restreint[42].

Dans les années 2000, IBM met au point Watson servi par la technologie DeepQA, un moteur de réponse aux questions ouvertes, et impressionne le grand public américain en gagnant en 2011 contre les meilleurs joueurs de « Jeopardy! », un jeu de questions de culture générale équivalent à « Question pour un champion ». Des chercheurs d'IBM, dans un article de 2013, posent les jalons de l'utilisation de Watson pour la médecine[43]. Ils y envisagent l'utilisation de DeepQA pour l'exploration exhaustive d'hypothèses diagnostiques associées à leurs preuves scientifiques ou admises, avec la possibilité de dialoguer avec le clinicien pour répondre à certaines questions et trancher entre ces hypothèses. Watson n'est pas limité à l'utilisation de données structurées (comme MYCIN ou DXplain) ou non structurées (comme ISABEL[44] ou PEPID DDX), et fonctionne en langage naturel : il n'est pas nécessaire de spécifiquement mettre en forme une question pour l'utiliser. Quelques années plus tard, Watson peut non seulement automatiquement générer la liste des problèmes médicaux d'un patient [45], mais peut aussi identifier de façon pratiquement autonome des protéines altérées dans la sclérose latérale amyotrophique [46] et donc améliorer le diagnostic de cette maladie.

Watson, s'il est l'un des plus célèbres, n'est pas le seul et même de petites équipes produisent des logiciels d'aide médicale. Pharmabot est un chatbot pharmacien développé aux Philippines pour donner un conseil sur les médicaments pédiatriques aux parents[47]. Mandy est un chatbot thaïlandais pouvant recueillir l'anamnèse et les plaintes du patient, et produire un rapport à l'attention des médecins[48].

Après le « second hiver » de l'IA, les années 2000 ont donc vu l'émergence du Machine Learning (voir définition au premier chapitre), puis le renouveau des Réseaux de Neurones, et plus récemment du Deep Learning.

Beam et Kohane[49] rappellent que les technologies décrites lorsque l'on parle d'IA procèdent en réalité de l'extension naturelle des théories statistiques déjà connues et appliquées en médecine. Si l'on prend le score CHADS VASC par exemple : ses critères ont été déterminés par un groupe de médecins alliés à des statisticiens qui ont dégagé à partir des données les meilleurs prédicteurs pour un AVC. Ce que fait un algorithme de machine learning n'est ni plus ni moins que de déterminer ces prédicteurs, de façon plus ou moins supervisée par des experts. Dans le cas du deep learning, les règles de classification sont extraites par l'algorithme lui-même, sans supervision, et n'ont pas à être intelligibles pour l'humain qui ne voit sortir de cette boîte noire qu'un résultat comparable à celui

7. On appelle ontologie un modèle de données contenant des concepts et relations permettant de modéliser un ensemble de connaissances dans un domaine donné, autrement dit une représentation simplifiée de la connaissance sur un sujet.

donné par un groupe d'experts. Autrement dit, l'IA peut être un outil de décision au même titre que le CHADS VASC, simplement plusieurs ordres de grandeur les séparent en terme de finesse et de puissance prédictive.

Il y a une dizaine d'année, les géants Google et Microsoft ont massivement investi dans la santé sans pouvoir en tirer aussitôt profit, avec finalement la disparition de Google Health et la diminution en échelle du projet Microsoft HealthVault, tentatives de fonder un dossier médical informatisé à grande échelle[50]. Ce qui peut sembler être un échec était peut-être seulement un pas en arrière pour mieux sauter : aujourd'hui ces entreprises majeures et d'autres ont des projets de grande envergure basés sur l'IA médicale, avec des sommes considérables investies en capital-risque (plus de 8 milliards en 2018 d'après Rock Health[51]).

4. REVUE DE LA LITTÉRATURE ACTUELLE

« C'est ce que nous pensons déjà connaître qui nous empêche souvent d'apprendre. »

Claude Bernard

« Papert's Principle : Some of the most crucial steps in mental growth are based not simply on acquiring new skills, but on acquiring new administrative ways to use what one already knows. »

Marvin Minsky

4.1 *Constat*

Nous avons évoqué dans notre introduction un certain nombre de problèmes auxquels les médecins font face actuellement, notamment la charge de travail. Une étude européenne qui a 20 ans donne moins de 8 minutes de consultation par patient en Allemagne par exemple, avec plus de 200 patients vus par semaine [52] - et ce avant la démocratisation de l'informatique au cabinet!). Une étude de 2008 sur la charge de travail des radiologues japonais [53] qui montre une criante inadéquation entre les besoins et la réalité, est maintenant généralisable à presque tous les pays et presque toutes les spécialités depuis mais surtout en médecine générale, avec en plus une évolution des moeurs des patients (augmentation en particulier du nombre de requêtes au médecin généraliste pendant le temps d'une consultation[54]). Egalement source de frustration pour les généralistes : malgré l'efficacité et l'importance de la prévention sur les plans économiques et sanitaires, ils n'ont pas le temps de s'en occuper autant qu'il est préconisé[55]. Mais ce qui épuise le plus les médecins, ce qui vide de sens leur temps précieux, et par là-même les démotive ou les atteint même psychologiquement[56, 57], c'est la charge de travail médical indirect comme la documentation, réalisée avec des outils inefficaces : en moyenne 2 heures de documentation pour 1 heure de temps passé avec les patients [58-60]. La formule de Coiera (informaticien intéressé par l'IA et initialement formé en médecine) il y a plus de 20 ans, alors que les médecins n'étaient pas encore tous aux prises avec les ordinateurs, est plus que jamais vraie : « Notre conversation avec le patient a été remplacée par la compilation du dossier »[61] (alors que « Le dossier médical devrait être un sous-produit de l'entretien », citation plus récente[62]). Il s'agirait de catalyser la réaction pour que ce

sous-produit apparaisse plus vite.

D'autres problèmes en ce qui concerne la médecine de premier recours sont résumés dans une étude dite d'environnement bibliographique allant de 2010 à 2020 [63], qui identifie des problèmes structurels que nous avons pour certains abordés : le manque de médecins, le manque de ressources en comparaison aux besoins, des infirmières qui ne peuvent pas accomplir certains soins, l'inéquité de l'accès aux soins ; ainsi que des problèmes influant sur la performance : *burn-out*, coordination des professionnels inefficace, difficulté d'appliquer les recommandations pour des patients polymorbides, suivi perfectible. L'auteur identifie également les problèmes survenus pendant la crise du COVID19 (que l'on peut extrapoler à toute mise en tension du système) : manque d'équipement de protection, retard de paiement des soignants, manque d'infirmières, nécessité de diagnostic précoce et du suivi des patients à haut risque, soins de premier recours délaissés, soins à distance réduisant le lien humain à son minimum, continuité des soins, délai avant prise en charge.

En termes de santé publique, le coût des soins médicaux grimpe en flèche, l'augmentation de l'espérance de vie (avec cependant un diagnostic de cancer pour une personne sur deux et un AVC pour une personne sur quatre sur la période d'une vie aux États-Unis[64, 65]), l'augmentation importante des cas de maladies chroniques et le développement continu de nouvelles thérapies onéreuses entre autres y contribuent. Il est donc attendu que les systèmes de sécurité sociale de par le monde seront poussés dans leurs retranchements et l'IA pourrait représenter une réponse à ces problèmes en améliorant la prise en charge tout en diminuant le coût des soins[66], objectif pour le moins audacieux.

4.2 IA en médecine

Notons qu'il existe déjà quelques journaux scientifiques traitant exclusivement de l'IA en médecine, au premier rang desquels nous citerons *Artificial Intelligence in Medicine* publié depuis 1989 et dont l'objet est de couvrir « la discipline scientifique en rapport avec la recherche, les projets et les applications visant à soutenir les fonctions médicales basées sur la décision grâce à des solutions informatiques reposant sur les connaissances ou les données dans le but d'assister et d'améliorer in fine la performance d'un professionnel de la santé humain »¹.

Devant la rapide augmentation du nombre de publications concernant ce champ de recherche, l'important *New England Journal of Medicine* ouvre cette année une rubrique consacrée à l'IA, et lance en 2024 la publication d'un nouveau journal nommé NEJM AI.

Avant l'apparition de ces titres, les articles d'intérêts se trouvaient dans les revues spécialisées en intelligence artificielle ou en bioinformatique.

1. Traduction libre

4.3 Obstacles à l'adoption de l'IA

D'après la plupart des informaticiens s'intéressant à la médecine que nous avons lus, le *big data*² va transformer la médecine[67, 68]. Cependant, ces auteurs avertissent sur les obstacles encore dressés : les données seules ne sont rien, il s'agit encore de déterminer leur qualité puis de les trier, organiser, éventuellement les compléter, puis enfin les interpréter, car contrairement aux données idéalement calibrées que traitent la plupart des algorithmes actuels, les données réelles (issues par exemple d'organismes vivants à des fins d'utilisation par les médecins, ou de sources indirectement en rapport comme les factures de soins, etc) ont été générées dans un but initial différent de celui pour quoi elles seront à nouveau traitées. Chen et al.[69] prennent l'exemple de Google Flu Trends censé prédire l'activité de la grippe saisonnière dans plusieurs pays à partir des requêtes au moteur de recherche, le responsable du projet déclarant 97% d'efficacité en 2008 alors qu'en 2009 l'arrivée de la grippe H1N1 n'a pas été détectée et que les années suivantes GFT surestimait grandement le nombre de consultations médicales en rapport avec la grippe[70, 71].

Le volume de données à disposition est certes potentiellement riche d'informations, mais représente un problème majeur. La croissance du volume de données de santé est de 36% par an d'après l'analyse de Seagate (leader du stockage de l'information)[68], la plus importante de tous les domaines. L'une des façons de limiter le travail (ou temps de calcul) nécessaire pour l'analyse de données est de limiter leur volume. En d'autres termes, savoir éliminer des données jugées inutiles rapidement est fondamental. En traitement du signal (sous-discipline de l'électronique), il est question de mettre à profit des données provenant d'une ou plusieurs sources en minimisant le bruit (données parasites masquant le signal d'intérêt) ou la redondance (données pouvant nécessiter des ressources pour leur traitement alors que leur signification est déjà connue), il en est de même pour le traitement de données numériques ou symboliques par une IA où l'on cherchera à éliminer les distracteurs ou données inutiles (consommant du temps de calcul) ou erronées (en consommant davantage car pouvant induire en erreur l'algorithme en étant à l'origine de règles diminuant la performance et qu'il faudra désapprendre), avant de chercher à faire apparaître des *patterns* permettant de classer les données en minimisant le taux d'erreur tout en consommant le moins de ressources et de données d'entraînement possibles.

La qualité des données est donc aussi importante : des données complètes et reflétant bien la réalité permettent de se faire une meilleure image de cette réalité. La représentation des données considérées constitue un problème tout aussi fondamental en informatique. Considérons par exemple en psychiatrie le DSM (*Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*), qui contient une nomenclature exhaustive de la nosologie psychiatrique, selon Littré une nosographie, permettant de nos jours à un clinicien français par exemple de poser un diagnostic de la même manière qu'un clinicien américain puis d'appliquer une thérapie selon des recommandations ici encore standardisées. Sans ce canevas

2. Expression grand public désignant le volume à croissance exponentielle de données générées par les appareils et capteurs autour de nous et par extension entre autres leur stockage et leur traitement

international, les concepts et leur articulation seraient différents, ils auraient gardé leurs spécificités liées à leur histoire, en d'autres termes le traitement d'un problème identique (i.e. correspondant à une certaine entité nosologique quand bien même cette entité existerait dans les deux cas) serait différent. Pour ce qui nous intéresse, en admettant donc que l'on puisse mettre en relation deux maladies, l'une existant dans une taxonomie française et l'autre dans une taxonomie américaine, en réalisant la standardisation de ces taxonomies on rend comparables les objets d'étude de ces taxonomies, et possible le dialogue entre médecins français et américains selon un même vocabulaire. Il existe donc d'abord un problème de classification aussi objective que possible de la réalité, qui consiste en la conception de nomenclatures, de théories et systèmes philosophiques pour les humains, et pour les machines de modèles mathématiques, lié au problème de représentation des connaissances en une taxonomie optimale[72]. Le DSM5 s'il n'est pas optimal correspond à l'effort de classification de plus de 160 auteurs à travers le monde, il est adopté par tous les cliniciens, (nous supposons) parce que sa qualité est reconnue et parce qu'un effort de diffusion aux futurs professionnels de la santé (par les facultés de médecine) a été soutenu à travers le monde. Il a toujours existé un effort de représentation (qualité) et de standardisation (interopérabilité) des données médicales pour les cliniciens, un tel effort existe maintenant pour l'application future de l'IA. Ces recherches ont commencé assez tôt (voyons par exemple l'article de Horn[73] publié en 2001, auteur dont nous notons qu'il appartenait déjà à l'époque à un groupe nommé « Department of Medical Cybernetics and Artificial Intelligence », ou de Sittig[74] publié en 1994 où l'on cite parmi les challenges auxquels s'atteler l'unification du vocabulaire médical, ou encore la création d'un fichier patient complet et échangeable entre systèmes).

Kelly et al.[75] identifient d'autres problèmes épineux, par exemple la réglementation (qui devrait être guidée par des cliniciens), ou la vie privée (transit massif et traitement fréquent d'informations censées être protégées par le secret professionnel), cependant l'obstacle le plus important à l'adoption de l'IA dans la santé, d'après plusieurs auteurs, reste l'intégration avec les protocoles existants[76], entendre avec les procédés mis au point et utilisés par les humains.

Liaw, médecin de santé publique, et Kakadiaris, informaticien, résument ces considérations en considérant que l'IA pour la santé a deux caractéristiques uniques à partir desquelles il faut engager la réflexion[77] : l'importance cruciale de la sécurité des personnes (le dysfonctionnement d'un système automatique en lien avec la santé d'un patient peut lui être fatal), et le fait que les données de santé soient personnelles et doivent donc être protégées. De ces deux caractéristiques découlent selon eux les problèmes à résoudre que nous avons abordés[42] : le fait que les données soient lacunaires (inconstance de la qualité ou de la quantité des informations, souvent par manque de temps du praticien), qu'elles ne soient pas systématiquement utilisées (temps plusieurs fois perdu pour plusieurs personnes : au recueil, à la documentation, à la lecture et à l'évaluation de leur pertinence³),

3. Interprétation personnelle

qu'elles soient stockées sous des formats différents, que le résultat de leur traitement soit difficilement explicable, que les données d'entraînement ne soient pas représentatives du patient auquel l'analyse sera appliquée par disparité soit géographique soit temporelle (évolution de la population) voire que leur traitement puisse reproduire voire amplifier certains biais présents dans les données de départ (par exemple recommandations obtenues pour une femme potentiellement biaisées si le système a été entraîné uniquement avec des données venant de patients hommes), et enfin qu'il existe un risque accru de violation du secret professionnel (les patients peuvent de moins en moins déterminer quand, comment et dans quelle mesure les données les concernant ont été communiquées à d'autres).

Acceptation

Ce n'est que plusieurs décennies après que Laënnec eut décrit l'« auscultation médiate » dans un ouvrage séminal[78] (dans lequel il détaille précisément toutes les pathologies sur lesquelles cet outil lui permet de jeter la lumière) que le stéthoscope est devenu un outil accepté et effectivement employé par ses pairs, après avoir du reste reçu plusieurs améliorations avant d'aboutir à sa forme actuelle. Comme toute nouvelle technologie, il existe un temps de perfectionnement et un temps d'intégration avant qu'elle s'impose au plus grand nombre par ses qualités intrinsèques, le cas échéant. C'est ainsi que l'IA représente « le stéthoscope du XXI^{ème} siècle » selon Mesko[79] (médecin plus connu sous le sobriquet de *the medical futurist*, nom qu'il a donné à un institut de recherche hébergé par l'université Semmelweis en Hongrie⁴).

Il existe en effet une crainte[80, 81], pas particulièrement du grand public, mais de scientifiques de premier plan comme Stephen Hawking[82] ou Joi Ito (directeur du MIT Media lab, l'un des plus importants laboratoires d'informatique du monde) ou de visionnaires comme Elon Musk (connu pour Tesla et SpaceX et moins connu pour son interface cerveau-machine Neuralink), non pas que la performance de l'IA soit insuffisante, mais au contraire qu'elle surpasse tant l'humain qu'elle ou que l'emploi qu'on pourrait en faire puisse être dangereux pour l'humanité. Marvin Minsky considère que nous aurons de la chance si l'IA veut bien de nous comme animal de compagnie. Geoffrey Hinton, l'un des pères du deep learning et pionnier de l'IA, qui fut le professeur de Yann Le Cun et Peter Dayan pour ne citer que deux noms importants, vient de démissionner de chez Google pour « pouvoir parler librement des dangers de l'IA » qui pourrait être dangereuse « entre des mains mal intentionnées ». Le public quant à lui était jusqu'ici largement tenu à l'écart de ces discussions, mais il vient d'être mis en contact avec ChatGPT et commence donc à se familiariser avec. Les gens ne sont pas encore séduits par l'irruption de l'IA dans leur vie de tous les jours pour ne pas dire jusque dans leur intimité (cette éventualité est même combattue[83, 84]), cependant chez les chercheurs le débat portant sur les moyens de faire

4. Notons que, comme rapporté dans la thèse de médecine du Dr Louis Destouches, la découverte du Dr Semmelweis d'après qui est nommée la plus grande faculté de médecine hongroise selon laquelle la fièvre puerpérale est due à la contamination des femmes enceintes par les mains souillées des étudiants en médecine revenant de leurs séances de dissection, a d'abord été reçue avec beaucoup d'hostilité.

accepter ces technologies aux utilisateurs fait rage.

L'IA doit donc encore s'intégrer dans la pratique, obtenir l'approbation des organes de certification, et certainement comme le suggèrent Buch et al.[85] enthousiasmer les médecins et les patients au point d'investir dans un nouveau paradigme, voire favoriser une synergie entre médecins et IA. A minima, il ne doit pas être préjudiciable aux médecins de voir l'IA se développer pour qu'ils coopèrent à son arrivée [86]. Varghese suggère un acronyme pour faire adopter un cadre de pratiques désirables pour l'adoption de l'IA dans la médecine : RISE pour *Regulatory requirements, Interpretation & Interoperability, Structured and high quality data, Evidence*[18]. Ces critères devraient selon lui être respectés dès la phase de conception d'une IA pour que celle-ci soit jugée mûre, autrement dit faudrait-il se pencher avant la phase d'utilisation clinique sur l'obtention de l'autorisation d'utilisation, l'interprétabilité et la capacité à dialoguer avec d'autres systèmes, ainsi que la qualité et la structure des données à traiter.

L'interprétabilité par exemple, ou explicabilité des résultats obtenus grâce à l'IA, est un motif de discorde[87, 88]. Amann et al.[89] définissent l'explicabilité (*explainability*) comme étant une caractéristique d'un système d'IA permettant à quelqu'un de dire pourquoi ce système est arrivé à un résultat particulier. Il n'existe ici encore pas vraiment de définition consensuelle mais seulement des définitions personnelles appartenant à chaque auteur. Doran et al.[90] distinguent par exemple les systèmes opaques (ne donnant aucune indication quant à leur fonctionnement), interprétables (dont les mécanismes algorithmiques peuvent être analysés), et compréhensibles (donnant une indication symbolique, humainement compréhensible, de la façon dont un résultat est obtenu). Il convient selon ces auteurs de progresser du point de vue technologique, légal, médical et du point de vue du patient, ceci dans le but de proposer un canevas éthique pour l'explicabilité des systèmes d'aide à la décision clinique (appelés *clinical decision support systems* ou *CDSS* outre-Atlantique). Un système dont les décisions ne peuvent être correctement interprétées sera difficile à accepter, en particulier en médecine[75, 91].

Ces systèmes posent un problème aux développeurs (ou programmeurs), médecins et législateurs dans la mesure où ils entraînent une reconsidération des rôles et des responsabilités de chacun[92]. L'utilisation de systèmes opaques empêcherait les médecins de juger de la qualité du traitement des données, et pourrait les rendre responsables de ne pas respecter le droit des patients au consentement éclairé, par ignorance technique ou par incapacité à expliciter le processus mis en oeuvre. Ceci pourrait consécutivement dégrader la qualité de la relation ou de la confiance entre le médecin et son patient. On peut imaginer également la reproduction d'un certain paternalisme dont la plupart du corps médical salue la disparition depuis le siècle dernier. Il est possible également que l'explicabilité permette d'éviter un certain biais inhérent à un système donné, un tel biais pouvant résulter en une perte de chance pour certains patients voire certaines catégories de population[93].

Les informaticiens discutent donc depuis déjà plusieurs années de l'interprétabilité des

résultats obtenus et surtout du processus par lequel ils sont obtenus grâce au machine learning[94], alors qu’une partie d’entre eux (probablement les plus nombreux) n’en voit pas l’intérêt. Il existe donc une branche de la recherche sur l’IA consistant en la conversion de modèles ininterprétables (« boîtes noires ») en modèles explicables, donnant un résultat raisonnablement comparable au modèle d’origine (par exemple le procédé d’extraction de modèle de Bastani et al.[95]).

Les critiques à l’explicabilité sont basées sur le fait que lorsqu’un système même opaque arrive à une certaine performance ou jouit d’une certaine confiance parmi la profession médicale, l’explication devient superflue, le résultat étant déjà largement satisfaisant[96]. On peut prendre l’exemple des médicaments dont on ne connaît pas le principe d’action mais largement adoptés (lithium, paracetamol, ...). D’autres auteurs sont même catégoriquement contre l’inclusion de ce critère pour l’autorisation de déploiement de l’IA en conditions réelles[97] et arguent que le critère majeur doit être le bénéfice du patient.

En ce qui concerne l’acceptabilité de l’IA par le public, Longoni et al., professeurs dans le domaine du marketing, ont analysé les facteurs de résistance à l’IA médicale[98]. Ils avancent une explication simple à la résistance envers l’IA : le « déni d’unicité » (*uniqueness neglect*), ou l’idée qu’une IA traiterait tous les humains de la même manière, sans reconnaître le fait que chacun est unique. Cette résistance disparaît dès lors que l’IA offre des conseils perçus comme personnalisés ou lorsque l’IA assiste un professionnel humain.

Réglementation

Le paradigme traditionnel de réglementation des dispositifs médicaux n’est pas prévu pour ces technologies qui s’adaptent à leur environnement et évoluent en temps réel. Le résultat produit par de tels programmes ne change pas seulement en fonction des paramètres en entrée mais également en fonction des données d’entraînement et de l’état actuel d’adaptation à ces données par exemple. Cela pose des questions sur les plans éthique et juridique importantes : que réglementer et comment ? Comment tester et s’assurer de la sûreté et de la performance de tels dispositifs ? Comment contrôler le risque ? Qui est responsable : le développeur ou l’entraînement ?⁵. Entre 2015 et 2020, 124 systèmes basés sur l’IA ou le ML ont été approuvés par les agences américaines ou européennes, 80 d’abord en Europe[99], probablement parce que la législation était plus lâche. Ceci est en passe de changer avec le EU AI Act (chose étonnante : pour la plupart rédigée par la faculté de droit de Stanford) : la commission européenne a proposé le premier canevas de réglementation de l’IA, basé sur le risque posé aux utilisateurs déterminant la nécessité de réglementer (plus il y a de risque plus c’est nécessaire).

5. Voir la présentation de W. Lauer pour l’Agence Européenne du Médicament (EMA) : AI in Medical Devices and Digital Healthcare Applications - the BfArM perspective

Contre-intuitivement, mais de la même manière qu'il est pour une personne normale de nos jours parfaitement acceptable de partager une grande partie de sa vie privée sur les réseaux sociaux, certains patients se sentent plus enclins à parler de problèmes intimes avec un chatbot qu'avec leur médecin (« Ce n'est qu'un ordinateur »[100]). Bien que ce résultat puisse être discutable, le cabinet de consulting PwC estime que plus de la moitié des gens interrogés pour leur sondage dans le monde sont favorables à l'idée d'interagir avec une IA pour leur santé, moins de 40% sont défavorables[101]. Nadarzynski et al.[102] déterminent après leur sondage qu'environ les deux tiers des gens interrogés utiliseraient volontiers un chatbot médical, les réticents étant aussi les moins familiers avec l'informatique, ce qui signifie que la connaissance de l'outil donnant accès au chatbot pourrait rendre acceptable ce dernier. En 2019, Winn et al. ont montré que le degré d'urgence envisagé par un patient mis en relation avec un chatbot avait dans plus d'un quart des cas diminué après interaction avec[103], ce qui montre qu'ils peuvent avoir un impact sur la psychologie d'un patient.

En Asie où la robotique humanoïde est un champ de recherche extrêmement florissant avec des moyens colossaux, il n'est pas étonnant d'apprendre que les chatbots ont leur place, la division asiatique de Microsoft a ainsi mis au point et rendu public en 2014 un système appelé XiaoIce, avec lequel dialoguent à ce jour plus de 600 millions d'utilisateurs à travers le monde. Cette IA « compagnon » a été créée spécifiquement dans le but de satisfaire le besoin humain de communication, d'affection et d'appartenir à la société [104], et de fait certains Chinois se confient à elle lorsqu'ils souffrent par exemple d'une rupture amoureuse[105, 106]. La société chinoise, de nature flexible avec ses lois pourtant immuables, a du reste pratiquement résolu la question de l'acceptation de l'IA médicale par la population : d'après l'analyse des contenus postés sur une plateforme sociale accessible par internet, les Chinois démontrent une attitude positive envers l'IA médicale, contrairement aux médecins, et estiment à 80% que ces derniers seront remplacés[107]. Plus près de nous, *character.ai*⁶, lancé il y a tout juste un an par d'anciens directeurs d'équipes de recherche en IA chez Google, propose de dialoguer avec un chatbot simulant les réactions d'un personnage existant ou fictif, éventuellement créé de toutes pièces par l'utilisateur (exemples : Donald Trump, Super Mario, Son Goku, un psychologue, ...). Ce chatbot a déjà plus de 4 millions d'utilisateurs aux Etats-Unis et un journal français vient de publier un article dans lequel on apprend qu'il « comblerait la solitude des ados »⁷.

4.4 IA pour la médecine spécialisée

Sans s'attarder sur la question, nous ne pouvons faire l'impasse sur les avancées majeures des systèmes d'aide au diagnostic dans les disciplines où l'expertise du spécialiste

6. <https://beta.character.ai>

7. Les Echos : Character.AI, l'intelligence artificielle qui comble la solitude des ados

vient de son expérience à reconnaître des images pathologiques. Certains articles sont souvent cités par les auteurs voulant donner des exemples heureux d'applications de l'IA : ceux qui montrent l'efficacité d'algorithmes de classification d'images pour le diagnostic.

En radiologie par exemple, Teare et collègues[108] décrivent un système de détection de processus malins dans les mammographies aussi performant que les radiologues experts. Ils associent une méthode de traitement de l'image par amélioration du contraste associée à une classification par réseaux de neurones inspirés du fonctionnement du cortex visuel, c'est-à-dire en couches successives traitant différentes propriétés d'une image, ou des fenêtres de différentes tailles pour l'analyse de détails à différentes échelles dans une image de la meilleure qualité possible (i.e. en général la qualité d'acquisition). Des systèmes d'assistance aux radiologues ont par ailleurs déjà obtenu l'autorisation des autorités américaines pour leur utilisation par les spécialistes[109], citons Arterys (initialement autorisé pour la segmentation cardiaque selon les nomenclature de l'AHA⁸, mais depuis autorisé à mesurer les nodules pulmonaires et hépatiques - des tâches répétitives et chronophages pour les radiologues) et Viz.ai (initialement autorisé il y a 5 ans pour la détection automatique de thrombus sur scanner avec alerte pour accélérer la prise en charge, et depuis pour d'autres applications). Notons qu'au début de cette année, l'AHA a publié de nouvelles recommandations pour la prise en charge « idéale » de l'AVC incluant l'intégration de l'IA dans le processus de détection de la pathologie dans tous les *stroke centers*[110].

En anatomo-pathologie, Yu et collègues[111] ont démontré la précision de l'IA pour le diagnostic pathologique en utilisant un ensemble d'images avec coloration histologique d'adénocarcinome du poumon et de carcinome épidermoïde. L'IA peut donner un pronostic fiable et déterminer le traitement oncologique en rapport avec les recommandations. Bejnordi et al.[112] ont montré que des pathologistes ayant étudié pendant 30 heures 129 lames ont été moins performants que leur algorithme qui a réalisé la classification en 11 pathologies en une fraction de seconde.

En dermatologie, un article abondamment cité est celui d'Esteva et collègues[113], qui montrent qu'une IA peut concurrencer les dermatologues pour l'identification des cancers d'une part les plus fréquents (carcinome épidermoïde ou basocellulaire) et d'autre part les plus mortels (mélanomes malins).

En oncologie où la recherche produit énormément et demande une veille très active, avec des traitements changeant fréquemment pour une même maladie, une aide à la décision peut être désirable et c'est ce que démontrent Somashekhar et al.[114] dans une étude de validation en double aveugle avec Watson for Oncology (WFO), dont la décision de traitement a été comparable avec celle des experts constituant un tumor board concernant le cancer du sein (93% de concordance).

En cardiologie, Slomka et al.[115] commentent l'apparition de logiciels à l'instar d'Arterys dont nous avons parlé, capables d'interpréter rapidement et efficacement par comparaison avec des experts l'imagerie cardiaque non invasive (échographie, scanner, IRM

8. American Heart Association

par exemple), autre domaine où la quantité de données produite est très importante, et considèrent qu'ils peuvent optimiser la spécificité d'un traitement pour le patient. Pour donner un exemple concret, l'application ECG des smartwatches Apple a reçu l'approbation des instances de santé américaines et européennes pour la détection de la fibrillation atriale. Nous avons nous-mêmes reçu des patients aux urgences alertés par leur montre, qui présentaient une fibrillation atriale plus ou moins symptomatique.

En ophtalmologie, Gulshan et al.[116] ont montré qu'un algorithme de deep learning a pu automatiquement déterminer des règles sur un échantillon d'environ 10000 images de rétinopathie diabétique et d'œdème maculaire diabétique et les appliquer pour classifier des images dans ces deux maladies avec d'excellentes sensibilité et spécificité.

En gastroentérologie, Misawa et al.[117] proposent un système de détection des polypes colorectaux en temps réel, émettant par exemple une alerte visuelle sur le moniteur utilisé pour l'endoscopie lorsqu'un certain seuil de probabilité est atteint pour qu'une lésion à l'image soit pathologique. Ils concluent leur article en expliquant notamment que ce type de système va permettre de réduire la différence de performance entre endoscopistes plus ou moins expérimentés.

Enfin, Grace et collègues posent la question « Quand l'IA dépassera-t-elle les performances humaines ? » aux experts en intelligence artificielle rassemblés lors de deux conférences internationales en 2015, ils prédisent parmi d'autres choses intéressantes l'obsolescence du chirurgien pour 2053[118]. Notons que les mêmes experts avaient prévu qu'il faudrait attendre 2028 pour qu'une IA gagne au jeu de go en ne s'étant pas entraîné plus qu'un humain. AlphaGo a gagné l'année suivante contre le meilleur joueur de go au monde, mais s'est entraîné en jouant des centaines de millions de parties.

4.5 IA en médecine générale

Les articles que nous trouvons traitant de ce sujet sont en majorité publiés dans un certain nombre de journaux en rapport avec la médecine générale : *Annals of Family Medicine*, *Journal of the American Board of Family Medicine*, *Journal of General Internal Medicine*, *Indian Journal of Community & Family Medicine*, *Journal of Family Medicine and Primary Care*, *British Journal of General Practice*, ... Les autres sources concernent toute la médecine : *Journal of the American Medical Association*, etc, ou sont plutôt en rapport avec l'IA dans la médecine : *Artificial Intelligence in Medicine*, *Journal of Medical Internet Research* (grande contribution), *Journal of the American Medical Informatics Association*, ... La technologie est éprouvée mais les informaticiens cherchant encore comment l'appliquer à la médecine, il n'est pas étonnant à ce stade de trouver beaucoup d'études qualitatives, élaborées dans le but de comprendre l'usage que recherchent les médecins : il existe peu d'articles démontrant l'utilisation en conditions réelles d'outils déjà fonctionnels.

Changement de paradigme

Alors que les auteurs s'accordent en général pour dire que certaines spécialités verront rapidement leur cœur de métier sous-traité par des algorithmes (Obermeyer et al.[67] vont même jusqu'à prédire en 2016 que l'échéance du remplacement des radiologues et des pathologistes se compte en années), la situation est moins claire pour les généralistes[119]. Fogel et Kvedar par exemple soutiennent que ces technologies permettront, en libérant le temps du médecin, de se concentrer sur l'humain dans la consultation (l'empathie, la relation, le jugement dans le but de guider et conseiller)[120]. D'autres pensent que le généraliste étant un intermédiaire dans l'accès au soin, il sera à long terme court-circuité par l'IA, remplacé par des algorithmes avec des assistants[106, 121]. D'autres enfin affirment que ces craintes sont exagérées et que les innovations technologiques ne vont pas empiéter sur le métier de généraliste (« Ce dont a besoin cet ordinateur, c'est d'un médecin »)[122]. Alpert, cardiologue connu pour avoir donné la définition mondialement acceptée de l'infarctus du myocarde, se demande si les médecins cesseront d'examiner leurs patients[123], alors qu'il est admis que l'examen clinique est une des pierres angulaires de la clinique, étant du reste en lui-même bénéfique pour les patients. On se demande même si les médecins sauront encore examiner les patients dans le futur[124], et il existe déjà une tendance à la paresse. Rosenthal et Verghese rappellent à ce titre que le métier de médecin est d'être témoin de la souffrance des autres et de les reconforter et soigner[125]. Ces querelles ont lieu parfois au sein même de grandes institutions comme la faculté de médecine de la grande Université de Stanford, et ressemblent à des matchs de *debating* tant les vues sont parfois caricaturales.

Exploration des utilisations possibles de l'IA au cabinet médical

L'IA en médecine générale est encore dans une phase très précoce. Kueper et collègues[126], une équipe canadienne d'informaticiens, épidémiologistes et biostatisticiens, ont réalisé une revue exploratoire de la littérature qui met en lumière 405 articles traitant de l'IA en soins primaires, datant d'aussi loin que 1986[127] (où J. Orient évalue la performance du clinicien en comparaison avec 3 programmes d'IA différents - notons qu'à l'époque la machine est encore loin d'égaliser le médecin). Seuls 14% des articles en rapport avec l'IA appliquée à la médecine de premier recours ont parmi leurs auteurs un médecin généraliste, la majorité des auteurs sont informaticiens, ce qui peut expliquer l'enthousiasme et l'optimisme de ces chercheurs. Ils notent également que moins de 7% des articles concernent un essai de technologie en conditions réelles d'utilisation, l'IA est en effet plus souvent appliquée dans des cadres spécialisés [77]. Les technologies présentées sont basées sur des systèmes experts ou plus récemment sur du machine learning, et ont pour la plupart vocation, dans l'ordre de leur importance dans le corpus, à assister le médecin dans son diagnostic, puis dans sa thérapeutique, à extraire des informations du dossier médical, ou à faire des prédictions. La même équipe a plus récemment publié le résultat d'un consilium impliquant différents intervenants dans la prise en charge de pre-

mier recours en Ontario au sujet de l'IA[128]. Ils trouvent au moment de cette étude, en 2021, une centaine de systèmes d'IA actuellement utilisables, pertinents dans une pratique de médecine générale. Les intervenants intéressés par ou en rapport avec l'IA (professionnels de santé, informaticiens, décideurs ou politiques, managers, au nombre de 35) sont interrogés en petits groupes avec un référent capable de répondre aux questions d'ordre technique puis partagent par l'intermédiaire de l'un de leurs membres dans un plus grand groupe le résultat de leurs réflexions sur des sujets prévus d'avance par les auteurs de l'article (selon une méthodologie appelée « groupe nominal »[129] développée dans le but de générer dans un groupe une liste de priorités en peu de temps). Il arrivent alors à une liste de 9 sujets importants, qui peuvent fonder une utilisation efficace de l'IA au cabinet du généraliste, ici cités dans l'ordre de leur priorité :

1. Prévention et détermination du risque : offrir une aide décisionnelle dans les cas d'incertitude diagnostique, et libérer du temps dans la consultation.
2. Gestion de sa maladie par le patient lui-même, par exemple éducation sur le cours de sa maladie.
3. Gestion et synthèse de plusieurs sources d'information médicale : utilisation, combinaison et synthèse de sources multiples de grands volumes d'information.
4. Meilleure communication entre les médecins et les spécialistes en IA. Etablir une relation telle que l'utilisation soit fructueuse, par exemple établir un vocabulaire commun.
5. Partage des données entre médecins. Exemple : obtenir un standard de données entre les systèmes de santé.
6. Aide à la décision clinique, par exemple recommandations individuelles.
7. Appui administratif : planification des visites, rendez-vous, partage de l'information nécessaire avant la consultation, etc.
8. Rôle de clerc et d'assistant documentaliste : diminuer la charge de tâches de routine comme la documentation des cas, par exemple transcription automatique du dialogue entre patient et médecin, génération automatique de l'observation au terme de la consultation.
9. Améliorer la prise en charge psychiatrique, par exemple en diminuant l'effet d'ancrage (le fait de s'attacher à une première impression) en suggérant la poursuite de l'entretien sur d'autres aspects.

Collaboration souhaitable entre informaticiens et médecins

La liste précédente correspond aux souhaits formulés par d'autres groupes de praticiens anglo-saxons, qui exhortent leurs confrères généralistes à se joindre aux informaticiens dans le champ que constitue l'informatique médicale[130]. Du côté des informaticiens, une main ferme est tendue : Saleh et al. (informaticiens du MIT, du Vector Institute et de

Microsoft) interrogent à l’occasion de la conférence *Machine Learning for Healthcare* des experts en IA pour la médecine (plus précisément dans ce nouveau champ de recherche : le *Clinical Machine Learning* ou *clinical ML*) sur les façons de promouvoir une discussion efficace entre informaticiens et cliniciens[131]. Bien que Liaw et Kakadiaris considèrent que la communauté du soin de premier recours ne s’implique pas assez[77], pour Steven Lin, médecin de l’équipe de recherche sur l’IA appliquée à la santé de la faculté de médecine de Stanford, la médecine de premier recours est celle où la puissance de l’IA se révélera pleinement[132]. Liaw déplore qu’un auteur sur sept seulement parmi les auteurs d’articles dans ce domaine est généraliste, et évoque une relation synergique entre informaticiens et généralistes[133]. Citant McWhinney qui établit en 1966 la médecine générale comme une discipline à part entière, après avoir rencontré différents médecins américains et canadiens[134] : « le généraliste a un intérêt fondamental pour les gens, primordial pour la création d’un lien entre patient et médecin. », Liaw s’inquiète de ce que ce lien puisse être affaibli par l’addition de nouvelles couches de technologie. Il est donc vital, selon lui, que les professionnels impliqués communiquent dans le but de rétablir la prééminence de ce lien.

Les médecins de premier recours comme éclaireurs

Dans un autre article de 2022 à l’attention des médecins de premier recours, Lin décrit 10 façons par laquelle l’IA est en train de transformer la santé[135]. Chacun de ces points est digne d’intérêt et certains ont déjà été abordés dans le reste de ce travail car ils se subsument dans la médecine en général, mais l’auteur va plus loin en donnant plusieurs raisons pour lesquelles la médecine de premier recours devrait selon lui « piloter la révolution de l’IA dans la santé », et comment. En premier lieu, la médecine de premier recours représente aux Etats-Unis plus de 500 millions de consultations par an (en France plus de 100 millions d’après la base de données THIN de CEGEDIM Health Data, sans compter les urgences hospitalières), et plus de la moitié des consultations toutes spécialités confondues, elle est d’emblée une force dominante à la base de la pyramide des soins et génère une quantité considérable de données cliniques et métacliniques (l’auteur emploie le terme « données biopsychosociales »), qui sont l’objet même de l’IA. Par ailleurs ces médecins représentent le plus grand groupe d’utilisateurs potentiels de ces technologies et sont par conséquent ceux avec qui les développeurs doivent interagir pour avoir le plus d’impact sur les patients ou la santé en général (selon la formule du laboratoire de Lin *from code to bedside*[136], « du programme au lit du patient »). Starfield[137] définit la médecine de premier recours par 4 piliers, les 4 C (*first Contact, Comprehensive, Coordinated, Continuous*), concept repris dans beaucoup de publications subséquentes. Lin reprend ces 4 piliers en expliquant pourquoi chacun est encore pertinent pour l’IA dans la médecine (voir tableau que nous reproduisons ici en français - traduction libre).

Pilier	Signification	Importance pour l'IA en médecine
premier Contact	Le premier contact avec le système de santé se fait avec les soins de premier recours - quel que soit le problème, les médecins de premier recours le voient en premier	L'IA appliquée en amont a le plus de chance d'avoir un maximum d'impact sur la vie des gens et de créer un effet positif en aval
Complet	De la naissance au décès, du patient ambulatoire au patient hospitalisé, de l'accouchement à la petite chirurgie - les médecins de premier recours font presque tout	Les médecins de premier recours sont qualifiés dans presque tous les domaines de la médecine, et peuvent contribuer à pratiquement tous les cas d'utilisation de l'IA dans la santé
Coordonné	Les médecins de premier recours sont les piliers de l'équipe Santé, avec une connexion sans équivalent à chaque partie du système de santé	Les médecins de premier recours sont les intervenants clefs et connaissent tous les autres intervenants dans essentiellement tous les cas d'utilisation de l'IA pour la santé
Continu	Contrairement à la plupart des autres spécialités, la médecine de premier recours s'occupe des patients sur le long terme	L'IA appliquée pour des soins continus et non épisodiques a le plus de chances de gagner la confiance des patients et de susciter leur adhésion, ainsi que d'améliorer les résultats à long terme

Lin évoque ensuite la relation entre patient et système de santé. Selon lui le médecin généraliste est encore celui qui peut faire l'interface entre son patient et le reste du système de santé, il est en position de dissiper ses craintes et instaurer la confiance concernant l'IA en particulier.

Comment la contribution des médecins de premier recours peut-elle se matérialiser ? Lin considère que ce sont eux qui peuvent formuler les problèmes rencontrés « sur le terrain » et expliquer pourquoi ceux-ci sont importants pour les patients, les cliniciens, le système de santé et la société. Il s'agit de définir les problèmes en fonction de besoins réels, et de maintenir l'industrie focalisée sur des solutions centrées sur l'humain, avec l'idée d'améliorer la performance médicale du médecin et non de le remplacer. Pour cela, il propose une méthode (qu'il nomme « méthode Stanford ») basée sur des méthodes d'amélioration de qualité[138], à laquelle nous référons le lecteur. Il considère enfin que les généralistes sont aussi ceux qui peuvent alerter les décideurs sur le manque d'équité d'un système d'IA.

Les médecins entre ingénuité et crainte

L'enthousiasme des médecins impliqués dans la recherche en rapport avec l'IA médicale n'est pas partagé par les médecins en général. Nous mettons de côté les spécialistes qui auront des problèmes bien spécifiques, et nous concentrons sur les études publiées au sujet des généralistes. Blease et al. de la Harvard Medical School ont interrogé 720 médecins généralistes anglais pour une étude qualitative sur la vraisemblance qu'une future technologie remplace le médecin [139]. Notons qu'ils ont délibérément dans leur questionnaire évité d'utiliser les termes « algorithmes » ou « machine learning » pour leur préférer des termes génériques tels que « machine » et « future technologie », dans le but d'éviter la moindre confusion chez les médecins interrogés et le débat sur l'adéquation d'un terme employé pour évoquer une technique particulière. Les résultats montrent un certain scepticisme de la part des médecins, dont la perception est très éloignée de celle des informaticiens pour qui le remplacement pur et simple du médecin est une question de temps. Les auteurs dégagent trois thèmes : les limites de ces technologies futures, leurs potentiels avantages, des questions éthiques et sociales. Les médecins interrogés pensent que l'empathie et la communication sont l'apanage des humains, pour certains c'est aussi le cas du raisonnement clinique. On attend de ces technologies une amélioration de l'efficacité, et surtout la réduction des charges administratives, en particulier pour pouvoir se concentrer sur la médecine. Enfin, les médecins s'inquiètent de l'acceptation de ces technologies par les patients, mais pensent que dans l'intérêt de ces derniers il ne sera pas question de s'y opposer. Les auteurs concluent en montrant le décalage entre ces remarques et la réalité de la recherche actuelle : il existe un champ de recherche très actif pour chacun de ces problèmes, et les résultats sont probants. Prenons par exemple la détection d'émotion dans la mimique faciale : l'IA fait déjà mieux que l'humain selon certaines études [140, 141].

Ce qu'attendent les médecins de l'IA

Buck et collègues ont examiné l'attitude des généralistes quant au diagnostic médical assisté par l'IA en interviewant 18 médecins allemands [142]. Cette étude est particulièrement riche en enseignements car elle reflète l'avis de généralistes pour la plupart travaillant dans un environnement semi-rural, ce qui peut correspondre au généraliste français moyen, sur l'intégration de l'IA dans leur pratique. Seulement 22% de ces médecins ont l'expérience de ces technologies sans pour autant l'avoir utilisée dans leur pratique, ceci parce qu'ils ne savent pas que de tels outils existent ou qu'ils n'en voient pas l'utilité, ou encore par aversion générale. Les auteurs identifient à travers les entretiens menés différentes catégories de thèmes et concepts semblant déterminants dans l'attitude des médecins vis-à-vis de l'IA dans leur pratique, nous renvoyons le lecteur au tableau récapitulatif figurant dans l'article original. Sans surprise, les médecins sont préoccupés par la crainte de pouvoir être remplacés partiellement voire totalement un jour (voir [143] à ce sujet), et par la modification de la relation entre médecin et patient. L'un d'eux écrit « [le patient peut

avoir] l'impression que la machine fait le travail et que le médecin n'a qu'à signer » (une partie au moins du respect du patient pour son médecin vient du fait qu'il sache beaucoup de choses, qu'il ait un bon diagnostic, que le résultat de son traitement soit bon : quid du médecin qui s'appuie systématiquement sur l'IA ? Voir également [144]), un autre « [la consultation] peut devenir une interview standardisée ». La confiance en son médecin est tenue pour fondamentale et ces technologies sont perçues comme une menace étant donné le partage des informations ou de la conversation avec un système souvent connecté à un réseau ou des bases de données à distance dont on ne connaît rien. Les données en rapport avec le patient pourraient être interceptées, et utilisées à leur insu ou contre leur intérêt (l'un des médecins évoque même la possibilité qu'une grande firme pharmaceutique soit derrière une IA volontairement biaisée dans le but de vendre un médicament). Les médecins craignent aussi la possibilité d'être surveillés ou contrôlés par le fait d'être en rapport avec l'IA. Enfin, s'en remettre à une IA pour le diagnostic peut introduire un biais ou éloigner le médecin de sa propre intuition, éducation ou expérience, ce qui est à mettre en relation avec les « effets indésirables » de l'IA en médecine[124, 145]. Un autre thème central de la discussion est celui de ce qu'on peut attendre de l'IA en médecine générale, en bien ou en mal. Les médecins espèrent bénéficier du concours de l'IA pour améliorer la qualité (précision par exemple) et l'efficacité (rapidité par exemple) du diagnostic, et leur permettre de se concentrer sur les cas les plus importants (par priorisation des cas par exemple). Certains pensent que la responsabilité peut être transférée à l'IA. Le défaut le plus important que les médecins s'attendent unanimement à trouver pour les IA reste le manque d'humanité. Ceci peut paraître trivial, mais ils mentionnent certaines qualités inhérentes à la relation avec un patient, dont ils pensent qu'elles sont purement humaines : l'empathie, l'intuition, les gestes, l'expérience et le raisonnement clinique. L'un des participants écrit « [l'empathie] est quelque chose qui définit un bon médecin et ne peut pas être remplacé par l'IA ». Certains patients sont avides du contact humain et ne consultent parfois pour rien d'autre (« L'homme est certainement dépassé par l'IA dans beaucoup de domaines, mais pas dans le domaine émotionnel »). Knop et al., une autre équipe allemande intéressée par la question philosophique de la collaboration homme-machine, notent les mêmes remarques chez les médecins interrogés[146]. Enfin, certains médecins doutent du fait que l'IA puisse leur faire gagner du temps, faisant l'hypothèse qu'il faille prendre le temps de lui donner des informations alors que le diagnostic est parfois rapidement posé. L'attitude des généralistes envers l'IA peut évoluer en fonction d'influences environnementales : la démographie médicale, le volume des connaissances médicales par exemple, mais aussi les tendances (« un cabinet médical suit le marché comme une petite entreprise ») et l'avis des sociétés savantes. Les médecins admettent ne pas connaître l'état de l'art et seraient disposés à lire des articles en rapport dans les media. Ils ont également conscience que ces technologies reposent sur une infrastructure technique qui doit fonctionner impeccablement : logiciel, ordinateur, réseau, électricité et leurs périphériques. L'âge, ou l'affinité pour la technologie, sont deux possibles facteurs

de modification du comportement vis-à-vis de ces technologies. Les médecins, pour utiliser ces technologies, déterminent des critères minimaux : l'efficacité (vitesse et qualité du diagnostic), la sécurité des données, la viabilité économique, la transparence (à mettre en rapport avec le concept d'explicabilité développé plus haut), la préservation de l'autonomie du praticien. Au final les résultats de cette étude sont en accord avec ceux présentés par d'autres équipes (voir [147, 148] par exemple).

Nash et al.[149], l'équipe responsable de la revue de la littérature présentée en page 32, rappellent que le résultat d'une consultation est moins bien défini en médecine générale que dans d'autres spécialités, et la population ciblée plus hétérogène. Leur étude qualitative porte sur l'utilisation potentielle d'outils d'IA pour les soins de premier recours prodigués à une population défavorisée au Canada, servie par un « centre de santé communautaire »⁹ où travaillent des professionnels de différents métiers avec qui les entretiens ont eu lieu : médecins, infirmières mais aussi travailleurs sociaux, managers. Il semble avant tout que ces derniers soient pour la plupart peu versés dans les technologies dont ont voulu discuter les auteurs de l'article (ce qui reflète sans doute la réalité dans notre environnement également : peu parmi le personnel soignant français le sont). Le thème le plus important et le plus souvent évoqué par les participants était celui de la confiance en l'IA. L'un d'entre eux suggère qu'il faudrait une période où la technologie serait seulement informative avant d'avoir un impact réel, pour gagner la confiance des potentiels utilisateurs. Cette confiance dépend de critères déjà identifiés dans les études précédemment citées : la performance démontrée par la technologie est très importante, mais également la qualité des données sur lesquelles elle se base, autrement dit l'IA a besoin d'un dossier médical (informatisé) qui soit complet et fiable pour donner un résultat fiable. Il convient donc de résoudre d'abord le problème de la qualité du dossier médical informatisé pour obtenir une adhésion plus franche. L'acceptabilité, notion que nous avons abordée plus haut, est conditionnée à la confiance que le médecin et le patient peuvent placer en l'IA mais aussi à la facilité d'utilisation, cette technologie ne doit pas être un nouveau distracteur éloignant toujours plus le praticien du patient. Elle ne doit pas non plus être incontournable, les utilisateurs expriment le souhait de garder la main [142]. D'autres motifs d'inquiétude cités et attendus sont en particulier la sécurité des données et la vie privée, mais surtout la détérioration du lien entre le patient et le professionnel de la santé.

Kocaballi et al. ont également interrogé 16 médecins généralistes australiens dans une étude qualitative explorant les rôles possibles d'un futur « assistant documentaliste médical »[144] (ou « scribe médical », ce terme pouvant référer à des outils existant déjà, voir section suivante). Leur méthodologie basée sur des *future workshops*[150] où les participants étaient invités dans un cadre mis au point par des chercheurs intéressés par la conception de solutions futures à d'abord identifier les problèmes dans le contexte d'une consultation, puis imaginer des solutions futures à ces problèmes, et enfin en discuter.

9. Community Health Center ou CHC, au service d'un bassin de population de 600000 personnes correspondant environ au dixième d'une province canadienne. Ils ont servi de modèle pour le Medicare américain, organisant la prévention et les soins de premier recours aux populations dans le besoin.

Les principaux thèmes se dégageant de la discussion sont : l'autonomie professionnelle, autrement dit la possibilité de travailler à sa manière et non à celle de l'IA (nécessité d'une réflexion *bottom-up* ou venant des praticiens, pour la conception d'un tel assistant), la collaboration humain-machine (tâches de l'humain : raisonnement clinique, communication, interaction, empathie ; rôle de l'IA : documentation, adresser à un spécialiste, formalités) ; et enfin de nouveaux modèles de soin. Pour ce dernier thème, les médecins interrogés proposent des notions relativement novatrices : par exemple la « préconsultation » qui aurait lieu dans la salle d'attente, avec un assistant virtuel, qui pourrait par exemple recueillir l'anamnèse ou les antécédents, ou bien l'équivalent à domicile, permettant de remplir son propre dossier médical à distance, et d'éviter par exemple de se lever le matin lorsque vous êtes malade et d'avoir à vous froter à d'autres malades. Forts de ces résultats, les auteurs jugent extrêmement probable l'intégration de ce type de « scribe » automatique à la pratique en médecine générale, pourvu qu'ils soient supervisés jusqu'à preuve de leur performance en autonomie. Ils suggèrent que des modèles de collaboration homme-machine devront être élaborés et évalués de façon à ce que les soins prodigués soient sûrs. Pour Coiera, l'avenir verra l'IA documenter les interactions entre médecin et patient et donc produire l'équivalent de notes d'abord comme les médecins le font, puis de plus en plus dans un souci d'efficacité au bénéfice du patient sans rapport avec la façon de faire des médecins, c'est-à-dire à l'usage de la machine. Il existera également une pression pour conserver l'enregistrement d'origine pour pouvoir le réévaluer et produire de nouvelles interprétations médicales, mais aussi légales. Il existera donc également un courant contre, voulant effacer justement cet enregistrement et n'en garder que l'interprétation, qui se défend d'un point de vue médico-légal. Autant de problèmes que la technologie générera au fur et à mesure de son adoption.

Familiarisation à l'IA dans les facultés de médecine ?

Les étudiants en médecine actuels vont arriver à un moment où les systèmes de soin vont changer rapidement [151]. Dans un rapport dont il a été chargé par le NHS¹⁰ sur la façon dont le rôle des professionnels de la santé va changer pour les deux prochaines décennies, Topol se prononce également sur les compétences qui leur seront alors demandées et partant comment les sélectionner et les former[152]. Une étude allemande de 2018 impliquant des étudiants en médecine de trois universités montre qu'ils connaissent l'existence des enjeux concernant l'arrivée de l'intelligence artificielle dans la médecine, sans toutefois en comprendre la partie technique, mais qu'ils ne craignent pas le remplacement par ces technologies (biais de sélection ? Voir ingénuité des médecins page 36) qui devraient selon eux faire partie des matières étudiées dans les facultés de médecine[153]. Cette éventualité est déjà envisagée par les différents groupes de pédagogues à travers le monde[154, 155] et par exemple dans un sondage réalisé par Wood et al. [156], où l'on apprend que seuls 30% des étudiants sont au courant de l'existence du domaine de l'IA médicale et que

10. National Health Service, système de santé anglais

les 3/4 en ont entendu parler à travers les media. Le problème principal à l'intégration de ce domaine dans un cursus déjà chargé est le temps nécessaire, cependant étudiants comme professeurs s'accordent sur le fait qu'il serait bon de l'organiser[157]. Ganapathi et al. ont interrogé des médecins impliqués dans le développement ou l'adoption de l'IA médicale[158], pour comprendre comment les médecins vont adopter ces technologies. Il en ressort que l'éducation des futurs et actuels médecins est primordiale, soit dans leur cursus de base, soit pour ceux qui travaillent en leur ménageant du temps, ou en prévoyant pour eux des opportunités d'apprendre ou d'essayer sans perte de temps par ailleurs.

Applications concrètes

Dans la revue *Medical Economics*, Mary Pratt interviewe d'éminents médecins impliqués dans l'adoption de l'IA dans la médecine de premier recours qui évoquent les potentielles utilisations. L'un des avantages attendus est d'avoir accès à des modules de diagnostic spécialisés depuis le cabinet[159], comme par exemple IDx, premier outil adopté par la FDA ¹¹ permettant de détecter une rétinopathie diabétique[160, 161]. Elle mentionne beaucoup d'autres bénéfices attendus de l'utilisation de l'IA : la possibilité de croiser les informations de toutes les sources de données en rapport avec le patient en un temps négligeable, y compris les données physiologiques comme celles de sa montre connectée par exemple ; les utiliser pour faire de la prédiction ; ou pour adapter des recommandations à un patient en particulier (décision sur-mesure) ; utiliser des indicateurs subtils comme la voix du patient pour détecter une humeur particulière ; prendre des notes et remplir le dossier médical, etc. Notons qu'il existe déjà aux Etats-Unis au moins une solution de prise de notes commercialisée (voir chapitre suivant) : l'assistant Robin ¹², qui ressemble à Siri ou Alexa.

Le problème de la reconnaissance vocale et celui de la compréhension de l'information contenue dans le discours sont résolus, mais ce n'est pas tout. Une équipe bangladaise affiliée à l'université de Kyushu a récemment démontré que l'écriture légendairement incompréhensible des médecins était à la volée correctement reconnue par leur programme dans 93% des cas[162], ce qui ouvre la voie à la numérisation automatique des dossiers et documents actuellement sous forme physique, c'est-à-dire la plupart des anciens dossiers patients.

Karakulah et al.[163] ont réalisé un programme permettant de récupérer automatiquement sur internet la littérature d'intérêt pour un cas particulier d'affection congénitale dans le but d'aider le clinicien à prendre une décision. Ils ont utilisé pour cela des outils de NLP pour classifier les articles en ligne selon des termes d'intérêt correspondant à une nomenclature existante et ne présenter à l'utilisateur que ceux traitant effectivement du problème d'intérêt en analysant la construction des phrases de ces articles (par exemple en excluant un article où il est écrit « not affected with X », où X est un terme jugé

11. Food and Drug Administration, agence émettant l'autorisation d'utilisation des médicaments et dispositifs médicaux sur le territoire américain

12. <http://www.robinhealthcare.com>

d'intérêt décrivant une anomalie).

A domicile, les patients ou les médecins peuvent d'ores et déjà exploiter certaines applications telles que Kardia¹³ (électrocardiogramme au moyen d'un dispositif de la taille d'une carte de crédit compatible avec un smartphone) ou pour analyser des lésions dermatologiques. A l'hôpital, Regard co-pilot¹⁴, une solution logicielle développée par d'anciens du MIT Media Lab et Google entre autres, s'intègre directement dans le dossier médical, propose des diagnostics en fonction des données et génère automatiquement des compte-rendus et observations cliniques. Une différence entre ce programme et d'autres réside dans le fait d'être déterministe, au sens mathématique ou informatique du terme, c'est-à-dire que la réponse du programme avec un même ensemble de données en entrée sera toujours la même. En effet, les LLM produisent des réponses valables mais différentes pour une même demande réitérée, étant donné leur fonctionnement intrinsèque.

D'autres tâches rébarbatives peuvent désormais être automatisées, Akasa, une entreprise américaine, réalise automatiquement le codage des actes pour ses clients, à partir d'un compte-rendu médical par exemple¹⁵.

Il existe actuellement une application de partage des cas cliniques à travers le monde, l'idée est de soumettre un cas à la réflexion de médecins utilisateurs, qui essaient de résoudre le problème. Cette application s'appelle Human Dx ou Human Diagnosis Project (voir <http://www.humandx.com>). Derrière cette idée de partage se trouve en réalité probablement une méthode déjà employée par le passé pour nourrir des algorithmes : l'exploitation d'une expertise bénévole pour la génération de modèles de « sens commun » (voir à ce titre le travail de Douglas Lenat[41], Marvin Minsky [164], John McCarthy [165], ou plus récemment Hugo Liu [166]) et plus précisément ici de « sens clinique ». Nous pouvons en effet lire sur le site internet que l'application « combine l'intelligence collective avec le machine learning » pour « créer une cartographie des étapes pour aider n'importe quel patient ». Malheureusement la méthodologie est opaque, il n'existe pas d'article décrivant la technologie, et pour le moment le projet n'a été explicitement exploité scientifiquement que pour produire des moyens de mesure de performance de diagnostic pour un médecin ou de comparer la performance d'un médecin versus un groupe de médecins, c'est-à-dire sans rapport avec le but réel du projet qui est vraisemblablement de recueillir la substance du raisonnement médical en construisant un graphe décisionnel qui permettra de simuler le raisonnement clinique[167].

Assistants actuellement utilisables par les généralistes

En théorie les médecins généralistes pourraient adopter l'usage de certains assistants déjà au point, en particulier les « scribes » automatiques[62]. Nabla copilot¹⁶ génère par exemple un compte-rendu médical structuré en écoutant simplement la conversation entre

13. <https://www.kardia.com>

14. <https://withregard.com/>

15. <https://akasa.com/>

16. <https://www.nabla.com/>

le médecin et son patient. Derrière ce logiciel français se cache facebook/Meta AI (actuellement dirigé par Yann Le Cun, précurseur du deep learning), des médecins français impliqués dans la formation des internes et la formation continue des médecins généralistes comme le Pr Claire Le Jeune (faculté de médecine de l'Université Paris-Cité¹⁷) font partie des mentors. Cet assistant utilise pour l'instant GPT-3, l'ancienne génération du LLM d'OpenAI. D'autres entreprises proposent le même type de service : Robin Healthcare, Scribematic¹⁸, Deepscribe¹⁹, ou Phenopad[168] qui prend des notes pour le médecin pendant qu'il pose des questions au patient. Les grandes entreprises ont chacune une équipe travaillant spécifiquement dans ce domaine : Amazon a dévoilé Amazon Transcribe Medical²⁰, Microsoft travaillait sur EmpowerMD²¹ et a récemment fait l'acquisition de Nuance Dragon²², à l'origine d'un système de reconnaissance vocale pour la rédaction de compte-rendus médicaux et désormais d'une solution de type scribe médical artificiel.

Nous pouvons certainement attendre beaucoup de Google avec Med-PaLM[169] et plus récemment Med-PaLM 2²³, un LLM spécialisé en médecine basé sur Google PaLM. Il peut répondre aux questions médicales et interpréter les examens complémentaires comme des images radiologiques, ophtalmologiques, dermatologiques ou anatomopathologiques, il passe les examens de licence de pratique médicale aux Etats-Unis avec 86,5% de réussite et sera bientôt disponible « en phase de test ».

Remplacement des médecins généralistes ?

Avec ces avancées majeures, les informaticiens acquièrent un tel pouvoir que certains se moquent même des médecins. John Lynn, fondateur et présentateur de la chaîne Healthcare IT today considère que la plupart des médecins de premier recours vont disparaître (voir par exemple Will Physician Practices Survive? - Healthcare IT Today Podcast Episode 99). D'autres vendent même la peau de l'ours avant de l'avoir tué. Babylon Health propose un service de soins de premier recours appelé Babylon 360, nous pouvons lire sur leur site internet (accès le 23/08/2023) : « Let's face it. Healthcare today isn't really healthcare. It's designed to help you when it's too late or you're already sick. Goodbye traditional healthcare providers. Hello Babylon 360. Meet Babylon 360. Unlike traditional healthcare providers, it focuses on both preventative and primary care. ». Cette entreprise était également à l'origine d'un chatbot testé en 2017 en Angleterre pour la régulation des appels aux urgences médicales[170].

Nous avons abordé le fait qu'en Chine se confier à une IA n'était pas tabou. Même avec une bonne intention, les informaticiens prévoient de remplacer au moins en partie

17. fusion en 2021 de Paris V Descartes avec Paris VII Diderot, qui elles-mêmes avaient regroupé Necker, Cochin, Bichat etc après le morcellement de la faculté de médecine de Paris en 1970

18. <https://scribematic.ai/>

19. <https://www.deepscribe.ai/>

20. <https://aws.amazon.com/fr/transcribe/medical/>

21. <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/empowermd/>

22. <https://www.nuance.com/healthcare/ambient-clinical-intelligence.html>

23. <https://sites.research.google/med-palm/>

et probablement avant les médecins d’abord un manque de médecins par des (agents conversationnels) : il faut savoir que l’ACM (Association for Computing Machinery), qui organise la CHI (Conference on Human Factors in Computing Systems) qui est l’une des plus prestigieuses conférences en informatique, a hébergé en 2020 à cette occasion un atelier (*workshop*) nommé « Conversational Agents for Health and Well-being » (que nous pourrions traduire par « agents conversationnels pour la santé et le bien-être »). On y a présenté par exemple des coachs diététiques pour les diabétiques, ou différents agents conversationnels : pour les personnes âgées (ex : ADELE), dans un cadre psychiatrique, motivationnels, ou même d’auto-diagnostic[171].

4.6 Un exemple

Pour illustrer notre propos, voici un exemple de réponse donnée par ChatGPT 4²⁴ au moment où nous écrivons ces lignes (interrogé à travers Bing, le moteur de recherche de Microsoft) :

Question :

Quelles sont les applications de l’IA pour la médecine générale ?

Réponse :

L’IA peut avoir de nombreuses applications pour la médecine générale, comme :

- Aider au diagnostic, en analysant des données cliniques, des images médicales ou des résultats de laboratoire et en proposant des hypothèses ou des recommandations.
- Suivre les patients, en utilisant des objets connectés, des applications mobiles ou des assistants virtuels, et en fournissant des conseils personnalisés ou des alertes en cas d’anomalie.
- Prédire l’évolution d’une maladie, en utilisant des modèles statistiques, des données génomiques ou des données environnementales, et en estimant le risque ou le pronostic d’un patient.
- Développer de nouveaux traitements, en utilisant des techniques de simulation, de synthèse ou de découverte de molécules, et en accélérant la recherche et le développement de médicaments.
- Gérer les systèmes de santé, en utilisant des techniques d’optimisation, de planification ou de coordination, et en améliorant l’efficacité, la qualité et la sécurité des soins.

24. <https://openai.com/chatgpt>

5. DISCUSSION

« I have only proven the algorithm correct, not tested it. »

Donald Knuth

« Faire confiance aux hommes c'est déjà se faire tuer un peu. »

Louis-Ferdinand Céline

Sur l'IA

Crawford et al. expliquent que l'IA est un changement culturel autant qu'un changement technique[172], ce qui est similaire aux révolutions technologiques du passé comme par exemple l'introduction de l'impression ou les chemins de fer. Les systèmes autonomes sont en train de changer les lieux de travail, les rues et les écoles. Nous devons faire en sorte que ces changements soient bénéfiques, avant qu'ils ne fassent encore plus partie de l'infrastructure de la vie de tous les jours. Cependant, le progrès de l'IA est plus rapide que la capacité de réaction du corps médical, et même de l'humanité entière. Ceci pose des problèmes éthiques pratiquement inaccessibles à l'entendement.

Attardons-nous sur le deep learning qui est, à l'heure où nous écrivons ces lignes, le dernier cri en IA. Il faut réaliser qu'il est désormais possible pour un logiciel exploitant cette technologie de découvrir en un temps négligeable des liens dans un grand ensemble de données éventuellement hétérogènes qui sont ceux qu'un humain pourrait faire, mais aussi des liens inédits encore jamais découverts ou des liens cachés dans les données inaccessibles à un humain. Ceci est vrai pour, par exemple, la classification de vignettes représentant des animaux en deux groupes chiens et chats (par détection de motifs caractéristiques de l'un ou l'autre animal), mais aussi pour des images beaucoup plus complexes (par exemple radiologiques ou histologiques) ou d'autres types de données : des sons, des séquences d'événements, des ensembles de données vitales provenant de différentes modalités d'enregistrement (électrophysiologie, oxymétrie, pression artérielle, ...). Il faut donc considérer que cette tâche de synthèse qui était la substance du métier du médecin est dorénavant mieux réalisée par la machine étant donné le temps et la mémoire infinis qu'il faudrait pour pouvoir prendre en compte l'ensemble des données concernant un patient, sans compter celles qui sont inaccessibles à nos sens ou tout simplement à notre entendement. C'est ici que la notion de *centaure* chère à Kasparov entre en jeu, ou intelligence

hybride[173] : nous tenons qu'il faut se saisir de l'outil IA, le pratiquer pour le maîtriser et devenir un meilleur médecin que la meilleure IA seule ou le meilleur médecin seul, a minima ne pas être dangereux[174].

L'avenir de la médecine

Topol (pionnier parmi les médecins à s'intéresser à l'IA médicale) résume l'impact de l'IA dans la médecine à trois niveaux[175] : celui des cliniciens, celui des systèmes de santé, et celui des patients. Nous avons vu que les cliniciens pourront avoir accès à une aide diagnostique rapide, en particulier pour l'interprétation des images, et pourront voir les tâches répétitives et chronophages de leur pratique automatisées, ce qui permettra de gagner du temps et par conséquent d'en consacrer plus au patient. Dans son rapport auprès de la NHS[152], il définit quatre conditions à remplir pour permettre l'adoption de l'IA par les professionnels : du temps et de la volonté, la compréhension de la technologie, une technologie bien conçue répondant à un besoin, le soutien de l'employeur pour maximiser le potentiel de cette technologie (par exemple libérer du temps pour la maîtriser et en recueillir les fruits, plutôt que de l'introduire de force sans adhésion des utilisateurs).

P. Szolovits (pionnier de l'IA médicale) commentant le livre d'E. Topol de 2019 « Deep Medicine »[176] s'inquiète de ce que les « forces économiques et administratives » ne fassent pas dérailler l'idée de soins médicaux qui soient à nouveau des soins réellement humains[177]. Il fait ici référence à la vision d'une médecine à nouveau empathique permise par l'automatisation des tâches répétitives et chronophages, autorisant le médecin à passer du temps avec son patient. Topol ne décrit pas dans son livre l'avènement des machines pour remplacer l'humain dans la médecine, bien au contraire il attend de cette révolution technologique une réponse à la dégradation de la qualité des soins telle que nous l'avons décrite en préambule. Ses précédents ouvrages ont jeté les bases d'une nouvelle médecine envers la proverbiale résistance au changement du corps médical et ont permis d'envisager d'une part la numérisation du patient par l'utilisation de technologies telles que les capteurs (classiquement au nombre de 5 chez les humains - les 5 sens, mais infinis et infiniment plus précis chez les machines), de la télémédecine, du séquençage génétique, de l'imagerie, entre autres[178]; et d'autre part comment la médecine pouvait se démocratiser (entendre que le pouvoir de décision sera transféré du médecin au patient lui-même) avec non seulement la génération par les patients de leurs données mais leur possession de celles-ci[179].

Ces changements déjà déconcertants sont des prérequis au changement majeur que représente ce qu'il appelle *deep medicine*, terme dérivé de *deep learning*. L'un de ces changements d'environnement est le déploiement du *Medical Internet Of Things* ou MIOT[180], un concept en train de prendre forme dans la réalité représentant l'ensemble des terminaux matériels et logiciels reliés en réseau pour former des systèmes d'information médicaux,

de moins en moins centralisés donc et en même temps « centralisés » dans des *clouds*¹ propriétaires.

Le fait que ces informations normalement protégées par le secret médical (c'est-à-dire normalement partagées uniquement entre médecins) soient désormais aux mains de grandes corporations à but lucratif et non intrinsèquement bien intentionnées (par ailleurs souvent elles-mêmes détentrices voire créatrices desdites technologies d'IA), est un autre problème. A une plus petite échelle, l'échange de ces informations implique leur transit par des chemins pas toujours fiables, où une interception par un agent mal intentionné est à craindre. L'article de Mirsky et al. décrit comment, en obtenant l'accès aux données d'imagerie d'un hôpital par le biais d'un *malware* (ou logiciel malveillant), les images d'un scanner thoracique peuvent être modifiées par deep learning pour faire apparaître ou disparaître un nodule cancéreux[181]. Ceci ouvre en effet un monde de nouvelles possibilités de nuisance.

Au sujet de l'explicabilité d'un résultat obtenu via une IA : nous sautons une étape mais rien n'empêche l'IA ou son concepteur de servir une explication simple et attrayante au médecin pour son patient, sans qu'elle reflète la réalité. En effet : une explication dès lors qu'elle est simplifiée n'est plus *absolument juste*, il existe dès lors un delta de justesse et ce delta peut être fixé à une valeur « acceptable » qui peut varier dans le temps, i.e. être tirée jusqu'à un point où l'explication n'a plus besoin d'avoir un quelconque rapport avec ce qui se passe réellement. En tant que médecins, il s'agira de garder le contrôle de ce delta.

Les problèmes éthiques en médecine ont fait l'objet de centaines d'ouvrages, et l'apparition de l'IA dans les soins posent de nombreuses autres questions éthiques et légales (Voir [182] pour une vue d'ensemble). D'après Rajkomar et al.[183] par exemple, un patient devrait idéalement bénéficier d'une décision médicale basée sur l'ensemble des connaissances sur un problème donné, un but impossible à atteindre pour un médecin seul, mais en théorie à la portée d'un système capable d'accéder à l'intégralité de la littérature et des éventuelles autres sources de données à jour. Dès lors, que dire des pauvres patients encore à la merci de la médecine « préhistorique », pré-IA ? En Europe, des erreurs médicales prévisibles ont lieu dans environ 10% des hospitalisations, dont la moitié pourraient être évitées[184]. Rappelons qu'il s'agit de la 3ème cause de décès aux Etats-Unis. L'IA pourrait surveiller les processus intra- ou extra-hospitaliers pour prévenir les erreurs ou les détecter précocément. Faut-il que les médecins se soumettent à cette surveillance constante ? On pourra argumenter que si cela sauve une vie, oui.

Emanuel et al. rappellent que ce n'est pas la quantité de données ou de moyens de les analyser qu'il faut améliorer pour diminuer les coûts de la santé, problème crucial dans tous les pays du monde, mais le comportement à la fois des médecins et des patients[50]. Nous pourrions argumenter que si ces comportements n'ont jamais changé et sont consubstantiels à l'homme, autant abandonner l'idée de chercher à les modifier et s'en remettre

1. Cloud ou nuage : disponibilité à la demande de ressources informatiques à distance, en particulier stockage de données et puissance de calcul, gérées par l'administrateur et non par l'utilisateur.

à une nouvelle technologie pour agir sur les coûts de la santé.

Nous l'avons vu, il existe encore de nombreux freins à l'adoption de l'IA, cependant certains auteurs maintiennent que ces bouleversements arriveront de toutes façons par l'amélioration de la qualité et de la quantité de l'information disponible même si la technologie ne s'améliorait pas[185]. Il peut avoir semblé prématuré de la part des organes de régulation comme la FDA et l'EMA d'avoir adopté des technologies mal comprises par la plupart des médecins, créant un précédent sur lequel il sera difficile de revenir : la boîte de Pandore est désormais ouverte pour l'adoption de systèmes toujours plus performants d'où l'intervention humaine pourra être jugée de plus en plus inutile « pour la sécurité du patient ». Nous avons abordé le fait que ces systèmes sont auto-évolutifs, autrement dit un dispositif obtenant un blanc-seing de la part de l'EMA peut évoluer assez rapidement pour qu'une de ses caractéristiques ou un risque échappe à sa vigilance. Le EU AI act est censé répondre à ces questions.

Du décalage entre informaticiens et médecins

La grande majorité des informaticiens prédit que les technologies à venir vont bouleverser la médecine[186-188], cependant que les médecins bien que parmi les premiers intéressés n'en sont pas encore convaincus. Buck et al. listent un ensemble de compétences jugées purement humaines par les médecins allemands interrogés : l'empathie, l'intuition, les gestes, l'expérience, le raisonnement médical[142]. Il serait possible de présenter pour chacune de ces compétences au moins un article pour montrer qu'elles ne sont plus l'apanage de l'humain, à l'exception près de l'empathie réelle (quoiqu'elle puisse être simulée comme tout comportement).

Les médecins sont en effet occupés et préoccupés, cela demande une certaine acuité sur les nouvelles technologies, un certain temps de calme et une certaine flexibilité mentale pour pouvoir imaginer que le monde qui change puisse faire changer une activité relativement invariable depuis sa création et pour laquelle il a fallu sacrifier des années de sa vie pour maîtriser. Cela, alors que les médecins qui avaient accepté avec plus ou moins d'enthousiasme l'informatique y ont perdu beaucoup de temps médical. Ceux qui se sont intéressés à l'informatique médicale ont pensé qu'elle pouvait être leur chose, mais c'est toujours en réalité celle des informaticiens, c'est eux qui l'ont créée ainsi que l'IA, dont ils en comprennent les limites et les possibilités techniques. Les médecins les plus optimistes aspirent maintenant à récupérer avec l'IA le temps que l'informatique leur a pris pour pouvoir à nouveau exercer leur art, mais cette idée se téléscope avec celle de la disparition pure et simple du médecin, hypothèse pour nous effrayante mais à laquelle les informaticiens peuvent évidemment penser avec plus de sang-froid. Du reste les médecins mettent eux-mêmes une pression de sélection telle que le produit se présentera un jour déjà supérieur à eux dans plusieurs domaines. Buck et al. imaginent que les médecins vont arriver eux-mêmes à la conclusion qu'ils sont dépassés[142], John Lynn, informaticien dont nous avons parlé plus haut, est d'accord avec cela mais évoque le fait que beaucoup refuseront

de l'admettre. Ceci ne manquera pas de causer une crise existentielle, avec la diminution du prestige, la perte de la place dans la société, et enfin la perte de l'affection des patients qui parfois répond à un manque chez le médecin.

Quand la révolution arrivera-t-elle ?

Il ne semble pas qu'un « 3^{ème} hiver » se profile après l'avènement du deep learning, cette fois la technologie semble répondre aux attentes et les esprits sont plus murs. Comme toute technologie, il ne faut pas avoir la naïveté de croire que son déploiement et son utilisation ne dépendent pas de forces économiques et politiques souveraines. Le grand changement viendra quand les acteurs puissants le voudront : politique, assurances (remboursement des soins), reconnaissance par les instances de régulation et décisions consécutives en cascade (« si l'IA passe les ECN, ne peut-elle pas faire fonction d'interne ? »). En effet, maintenant que les patients et médecins dépendent beaucoup des remboursements, une manière d'obtenir l'adoption de l'IA par tous serait de dérembourser certains soins décrétés moins efficaces ou plus coûteux sans intervention de l'IA, et d'en rembourser d'autres faisant appel à ces technologies. Si l'IA remplit ses engagements (une médecine plus efficace et moins chère), elle serait adoptée naturellement, mais elle sera probablement de toutes façons imposée indépendamment de son efficacité ou de son prix, étant donné le pouvoir qu'elle donne aux gouvernements ou aux entreprises fournissant ces services.

Du dossier médical informatisé

Nous avons vu que le temps du médecin est de plus en plus accaparé par des tâches répétitives et administratives, notamment liées à l'obligation légale et éthique de documenter chaque interaction avec son patient. Imaginons un cuisinier qui devrait obligatoirement pour chaque plat servi prendre 2 fois le temps passé à le réaliser pour laborieusement documenter au moyen d'un outil mal conçu les détails de comment ce plat a été fait, avec un historique des goûts du patient, certaines expériences culinaires notoires dans son passé de gourmet, son péché mignon, quels vins il affectionne, comment articuler tout ceci avec le menu actuel, comment se passe le repas et comment il aura été vécu, la digestion, ... Combien de couverts seraient servis dans ce cas ?²

Considérons l'article de Meinert et al.[189], qui reflète la façon de présenter les dossiers médicaux informatisés en 2004 où il était déjà question d'« améliorer la relation médecin patient » en « libérant le temps de l'un et de l'autre ». Nous savons maintenant que l'informatique a considérablement réduit le temps de contact engagé, réel, entre eux car l'interaction avec le patient et sa documentation ne peuvent être réalisés en même temps, et demandent chacun un temps incompressible. L'article évoque même l'avis des médecins sceptiques qui craignaient cette funeste possibilité, et le fait que certains théoriciens du

2. Nous pourrions continuer : Combien de temps le cuisinier pourrait-il passer avec ses enfants ? La préparation des plats ne disparaîtrait-elle pas du restaurant ? Pourquoi deviendrait-on cuisinier si c'est pour finir par taper au clavier ? ...

dossier médical partagé avaient à l'époque recommandé de le rendre obligatoire, ce qui est finalement arrivé dans les hôpitaux. Nous pouvons nous attendre à ce que l'adoption de l'IA soit également rendue obligatoire dans la pratique dès lors que la plupart des décideurs seront convaincus de son utilité (ou plutôt de sa viabilité économique).

Le résultat de cette adoption a certes facilité le partage des informations concernant les patients, mais a rendu les médecins malheureux [59, 190], qui ont finalement perdu un temps considérable, la réalité des organisations humaines et administratives en ayant fait un outil envahissant, obligatoire, et inefficace. La documentation est en réalité encore à ce jour faite à la main, ce qui a toujours été le cas, mais à travers des outils rébarbatifs, dans un environnement où les médecins ne sont pas à l'aise. Maintenant que nous voyons ce qui se profile, il apparaît qu'il s'agissait en fait seulement d'une phase transitoire vers l'état stable suivant où la documentation sera automatique, ceux qui ont utilisé le dossier médical informatisé (rappelons que la grande majorité des généralistes y ont été incités financièrement, ce qui a suffi à convertir la grande majorité) étaient donc dans une phase expérimentale qui heureusement se termine, et seront enfin récompensés de leurs efforts par l'utilisation fréquente par les assistants des informations saisies pendant toutes ces années.

Nivelage de l'expérience par l'IA et conséquences possibles

Misawa et al 2018 [117] considèrent que leur système de détection de polypes du tube digestif peut permettre aux endoscopistes moins expérimentés d'être aussi fiables que les plus expérimentés. Peut-on considérer que, comme dans notre génération où les examens complémentaires sont désormais au premier plan pour le diagnostic par opposition à la génération précédente où la clinique primait absolument, l'avenir verrait la formation de spécialistes délestée de la partie technique ou analytique voire décisionnelle ? Peut-on même généraliser le fait que l'IA va réduire l'écart entre jeunes diplômés et experts à toute la médecine ? Sur le papier, il semble que l'expérience d'un médecin soit désormais peu de chose, alors que les algorithmes de machine learning se sont entraînés sur mille fois plus de cas que n'en peut voir un médecin sur une seule vie³. Ceci risque de mener à la baisse du niveau de compétence des médecins, un problème appelé *deskilling*[191].

Nous avons vu qu'il existe un certain nombre de programmes capables de donner des diagnostics fiables dans des disciplines difficiles d'accès pour les patients, comme la dermatologie, avec comme simple information la photographie de la lésion. Il est donc techniquement possible de proposer dès le cabinet médical du généraliste une application permettant de donner un diagnostic et donc un traitement, ou du moins de classer cette lésion par rapport à un risque de malignité. De tels outils de diagnostic précoce utilisés au cabinet feraient gagner un temps non négligeable aux médecins et aux patients, et seraient économiquement intéressants.

3. Admettons que ceci est une preuve du progrès qui reste à réaliser pour surpasser l'humain, qui a besoin de rencontrer moins de cas pour former un ensemble de règles efficace, son expertise.

En extrapolant sur le fait que le médecin ne soit plus qu'utilisateur de ce type d'outil, il est possible d'envisager le fait qu'une infirmière soit tout aussi capable de l'employer, c'est-à-dire d'obtenir un diagnostic, de documenter le problème puis de prodiguer des soins selon instructions. Ceci délesterait également les systèmes de santé en diminuant la charge de travail des médecins généralistes et spécialistes[183].

En 1976 Maxmen a prédit pour le XXI^{ème} siècle une ère « post-médecin », où les soins seraient donnés par des *paramedics* (équivalent d'infirmier aux Etats-Unis formé à certaines prises de décision médicales, déployés par exemple sur les accidents à la manière du SAMU qui chez nous est médicalisé) guidés par des ordinateurs[192]. Saluons l'un de ses détracteurs de l'époque, qui se sera fendu dans JAMA d'un commentaire méprisant sur son livre[193]. Lequel des deux avait raison ?

Ce que nous entrevoyons, c'est d'abord l'introduction progressive de ces technologies comme une aide au diagnostic sur la base du volontariat, sur laquelle médecins comme patients se reposeront de plus en plus (pensons en plus à une potentielle incitation de la part de l'assurance maladie), puis éventuellement (comme cela a été tout naturellement fait pendant l'épisode du COVID19) : la dilution des prérogatives du corps médical dans les corps adjacents (pharmacien, infirmier) dont le temps est moins cher, moins précieux, moins réglementé (utile pour l'introduction de nouveautés). Pour faire un peu de prospective, en suivant ce continuum, la compétence médicale de l'utilisateur devient superflue et la meilleure personne devient le technicien : l'infirmière, voire celle qui communique : le psychologue, ou celle capable d'exploiter le programme : l'informaticien, et finalement pour tout simplifier le patient lui-même. Autrement dit le médecin est d'abord assisté par l'IA, puis l'IA assistée par le médecin, dont elle n'emploie plus à un certain point que les compétences non médicales, et qui finit par disparaître purement et simplement de l'équation pour ce cas particulier. Notons tout de même que selon ce scénario ce n'est pas le généraliste qui disparaît en premier mais le spécialiste, comme le prédisent certains auteurs[67]. Nous imaginons qu'il y a une composante humaine essentielle, consubstantielle à la pratique de la médecine générale, qui rend l'IA moins dangereuse pour notre raison d'être que pour d'autres spécialités essentiellement techniques.

Pour ce qui est d'une autre part technique du soin, celle de « techniquer » un patient (le munir de dispositifs médicaux), il semble qu'elle soit plus difficile à automatiser car potentiellement plus dangereuse, en tous cas plus immédiatement dangereuse, et les infirmiers ou *effecteurs* même s'ils auront à être formés spécifiquement seront encore longtemps nécessaires.

Ce qui semble vraisemblable à moyen voire court terme : les généralistes hardis armés de l'IA pourraient empiéter sur l'expertise de certains spécialistes, pour le bien de tous probablement. Mais jusqu'où ? Ceci est bien entendu conditionné au fait qu'ils n'y perdent pas de temps, que les systèmes soient au point, autorisés, réglementés, remboursés, ... Car qui prend la responsabilité ? Probablement comme bien souvent : le médecin. Reprenons notre exercice de prospective : existera-t-il un nouveau paradigme où des cabinets ou

petites cliniques d'assistants ou infirmiers munis d'IA diagnostiques ou robotiques plus ou moins spécialisés, supervisés par un médecin, pourront traiter un bassin de population à la manière d'un cabinet ou d'une maison médicale (que nous considérons encore comme l'unité médicale actuellement la plus flexible, la plus réactive localement) ? Autrement dit une augmentation de la capacité de traitement et de la compétence du cabinet médical. Ou au contraire, les médecins de premier recours seront-ils vus comme une chose du passé, et les patients se confieront et confieront leurs données médicales à « Google doctor » (nom choisi au hasard) dans leur poche, dont on aura prouvé qu'il existe en comparaison une « perte de chance » à consulter un médecin humain faillible ?

Fiction

Voici une courte fiction élaborée sans trop d'exagération selon nos recherches, illustrant comment l'IA pourrait faire évoluer dans un avenir relativement proche la médecine générale.

Imaginons la journée typique du Dr Jeanmi, médecin de campagne. L'assistant d'IA pourrait, avant même le début de la consultation, avoir alerté le médecin sur l'état d'un patient, ayant recueilli par des capteurs ambiants (MIOT) des informations suggérant la préparation d'une dégradation de l'état de santé, avoir placé automatiquement en priorité cette visite sur le planning que le médecin consultera à son arrivée au cabinet (il aurait alerté directement le 15 si l'urgence était vitale). Il pourra avoir rassemblé les informations importantes à avoir en tête pour réfléchir au problème, préparé un résumé des résultats des examens complémentaires pertinents et en fonction du passé médico-chirurgical et familial voire en fonction de sa génétique suggérer d'autres examens pour tester telle ou telle hypothèse. Les autres patients auront reçu automatiquement un message les prévenant qu'une urgence décale d'une heure leur rendez-vous ou leur propose d'autres plages horaires dans le planning qui peut changer dynamiquement en fonction des urgences perçues par l'IA, mais selon des contraintes décidées par le médecin et par chaque patient, dictées oralement à l'assistant virtuel comme si l'on parle à sa secrétaire (par exemple pour le médecin : plus de changement de planning après midi sauf urgence, pas de visites ou consultation après 19h ; pour le patient : flexibilité entre 9h et 11h le 11 août mais plus de changement SVP à partir de la veille). Le médecin commence par 2 visites : pour la plus urgente l'examen clinique de cette patiente de 85 ans révèle des crépitations bi-basaux chez qui l'IA avait détecté grâce à la montre connectée deux épisodes de tachycardie paroxystiques dans la nuit, avec cette nouvelle donnée et sachant qu'un tel épisode avait été documenté lors d'une hospitalisation en service de chirurgie pour une prothèse de hanche et s'était soldé par un passage en fibrillation atriale et un oedème pulmonaire, il faut envisager une récurrence, c'est l'une des hypothèses qui étaient proposées par l'assistant avant la visite qui n'attend que l'accord du médecin pour appeler l'ambulance et réserver un lit en service de médecine dans l'un des hôpitaux rapidement accessibles. Le médecin choisit de traiter à domicile cette patiente étant donné que le traitement hospitalier

aurait été basé sur les mêmes recommandations que ce que suggère l'assistant, il décide cependant que la prochaine alerte déclenchera directement le transfert à l'hôpital plutôt qu'une visite de sa part (en accord avec le chef du service de médecine déjà prévenu). La deuxième visite est un constat de décès, le certificat est prérempli par l'IA qui a récupéré l'ensemble des informations nécessaires et est à contresigner par le médecin. L'IA établit un lien causal entre la récente administration d'un vaccin et la dégradation clinique du patient que le médecin choisit de ne pas inclure dans le certificat. La famille n'a pas à verser d'argent au médecin qui est rémunéré instantanément sur son compte car tous ces actes sont codés et facturés à la volée. La consultation commence par les cas les plus préoccupants selon l'IA (qui a réalisé une partie de l'interrogatoire) qui a donc modifié le planning en conséquence : une otalgie chez un enfant, une douleur testiculaire apparue brutalement, une confusion chez une personne âgée. Chaque consultation est de façon transparente transcrite intégralement par l'assistant qui enrichit le dossier médical (les patients ont donné leur accord), établit des liens parmi tous les documents depuis la naissance (conversion et inclusion automatiques dans le dossier médical informatisé des kilos de dossiers papier du prédecesseur qui a cédé sa patientèle le Dr Jaborandi) et au-delà (historique familial), propose un résumé du parcours médical visible en un coup d'oeil avec les problèmes en cours à l'entrée du patient dans la salle, saisit automatiquement les constantes et les données de l'examen clinique, propose un résumé de cette entrevue et plusieurs réponses jugées adéquates dans l'ordre de leur qualité perçue. La réponse choisie par le médecin entraîne l'« impression » dans la carte vitale du patient intégrée à son smartphone des ordonnances numériques, où il n'y aura jamais d'interaction médicamenteuse, et chez le pharmacien qui prépare déjà le pilulier, ainsi que des arrêts de travail en fonction des contraintes des patients. La 4ème consultation est un patient qui vient car son téléphone lui a dit de consulter pour un naevus suspect. Le médecin prend une photo qui est immédiatement analysée par l'assistant qui classe l'image avec 99% de précision, l'envoie automatiquement chez le dermatologue Dr Betnev et dialogue une fraction de seconde avec son assistant IA pour prévoir un rendez-vous. Le dermatologue verra apparaître dans sa boîte e-mail un courrier médical comme s'il avait été écrit par le Dr Jeanmi lui-même (avec sa façon d'écrire), qui ne retouche même plus ces courriers. La prochaine consultation est un patient du Dr Benichou, oncologue, qui a pris l'habitude de laisser les généralistes s'occuper d'inclure les patients dans ses protocoles de recherche, ce qui est réalisé automatiquement par l'assistant, le Dr Jeanmi ne fait que répondre à quelques demandes de celui-ci comme de prendre la pression artérielle et évaluer la présence d'un ganglion de Troisier. Le Dr Benichou ne voit guère plus les patients que lorsqu'il faut annoncer une bonne nouvelle, l'expérience a en effet montré que l'assistant se chargeait mieux que lui d'annoncer les mauvaises nouvelles. Le Dr Jeanmi a ensuite un planning de visites, c'est l'assistant qui lui donne le trajet en voiture pour minimiser le nombre de kilomètres. L'état rembourse en effet les frais kilométriques uniquement si le trajet est respecté à 10% près. Etc etc.

Ce texte peut sembler délirant en 2023 pour qui n'a pas lu le reste de ce travail mais nous espérons avoir convaincu au moins en partie le lecteur qu'il décrit un avenir qui s'en vient peut-être plus vite qu'on ne pense. Vinod Khosla, fondateur de Sun microsystems et entrepreneur émérite, aime à présenter une photographie de la 5ème avenue à New York prise pendant le dimanche de Pâques en 1900 où se pressent des dizaines de voitures à cheval, et une automobile. Seulement 13 ans plus tard, la même rue est photographiée pleine d'autos.

C'est ainsi que le temps fastidieux de la saisie à deux doigts des constantes dans de petites cases apparues après 5 clics de souris s'éloigne, au profit d'assistants qui peuvent automatiquement récupérer les informations collectées pendant l'entretien, produire une observation valable et la confronter à l'ensemble des observations passées d'un patient pour proposer un résumé des problèmes, des diagnostics voire une thérapeutique respectant des recommandations scientifiquement établies. Ce futur que nous croyons proche permettra nous le croyons de récupérer le temps humain précieux qui est l'une des raisons d'être du médecin. Espérons que ces technologies bien conçues et bien utilisées fassent même de nous de meilleurs médecins, pour le bien des gens que nous soignons.

Autocritique

Les points forts de ce travail sur le plan méthodologique incluent probablement la stratégie de recherche des articles assez exhaustive, à partir d'un groupe « germinal » de publications dont les références ont été à leur tour récursivement explorées de la même manière si leur contenu s'avérait utile, sans restriction a priori de date ou de langue, avec des critères d'inclusion et d'exclusion simples. Les limites de la méthodologie incluent au moins le fait que la stratégie de recherche des articles soit seulement en partie reproductible étant donné le caractère partiellement subjectif de l'intérêt ou non du propos d'un article pour notre propre propos, la réalisation par un unique auteur du travail favorisant en toute décision la subjectivité (biais de sélection possible), le manque de définition standard acceptées dans le monde entier pour des termes fondamentaux comme family medicine ou AI. Les articles inaccessibles aux moteurs de recherche employés sont absents de notre réflexion. Ce travail aurait pu gagner en clarté si nous avions eu le temps de le rendre plus concis.

Il n'existe pas à notre connaissance d'article scientifique mettant en relation l'algorithmisation des études de médecine et le progrès de l'IA dans le domaine médical, ceci aboutissant à une sorte de « singularité locale » en médecine⁴.

4. Singularité technologique : concept probablement plus ancien que les années 50 où l'on attribue à John Von Neumann des conversations en rapport avec le développement technologique constant qui pourrait mener à concurrencer voire nuire à l'espèce humaine, repris avec un sens plus proche du terme actuel par I.J. Good en 1965 puis plus récemment par Vernor Vinge[81] et Ray Kurzweil : un point hypothétique dans le futur où l'évolution de la technologie devient incontrôlable et irréversible, résultant en changements radicaux imprévisibles de la civilisation humaine.

6. CONCLUSION :

EVOLUTION POSSIBLE DE LA MÉDECINE GÉNÉRALE AVEC L'IA

« Ubik ... Safe when taken as directed. »

Philip K. Dick

敵は本能寺にあり¹

Proverbe japonais

L'IA nous promet une révolution qui se fait attendre dans la mesure où une partie de l'humanité connaît une angoisse existentielle à cause de l'automatisation des métiers[80], alors que le parachèvement de cette automatisation devrait au contraire libérer leur esprit et leur corps des contingences matérielles pour leur permettre de s'adonner à une vie choisie, à l'utilisation optimale de leur temps, à l'éducation des enfants, à l'apport de ce qui est purement humain à l'existence, c'est-à-dire mener à une utopie[194].

Nous imaginons que son déploiement changera d'une façon difficilement concevable la vie telle que nous la connaissons (voir encore [118], où l'on fait l'hypothèse que l'IA surpassera l'humain en toutes tâches dans 40 ans, ou bien la réflexion de Russell & Norvig sur cette question²), ce déploiement sera-t-il contrôlé et bienveillant, ou se fera-t-il de façon pseudo-anarchique, *humaine*, avant de s'auto-organiser ? Se fera-t-il de façon incontrôlée, au détriment de l'espèce humaine[195] (thèse de la singularité) ? Ou bien encore, se fera-t-il de façon forcée, subreptice, contrôlée par des intérêts privés ou malintentionnés ?

Nous présumons que même passivement l'IA s'introduira progressivement dans la vie de tous les jours, y compris dans la médecine, et en tant que technologie disruptive jusqu'à saturation.

Il s'agit en premier lieu d'admettre le fait que l'IA puisse nous surpasser pour certaines tâches. Nous tempérerons en rappelant que les médecins généralistes accomplissent encore tellement de tâches différentes qu'ils sont parmi les moins immédiatement remplaçables. Ensuite, nous proposons de se cultiver pour être capable d'exploiter le potentiel de l'IA, et de cultiver ce qui nous rend indispensable pour les patients : l'empathie. Aux informaticiens, nous proposons notre connaissance du terrain : connaissance des conditions de

1. Le véritable ennemi est ailleurs.

2. Page 1040 de la 3ième édition[7] : « Des machines ultra-intelligentes pourraient nous mener à un futur très différent d'aujourd'hui - nous pourrions ne pas l'apprécier, et à ce stade nous n'aurions pas le choix. »

vie réelles de nos patients, des liens entre soignants et avec l'administration, des problématiques de premier recours, c'est-à-dire la majorité de la médecine[135], dans le but de collaborer efficacement pour contribuer à la santé de l'humanité.

Sans se prononcer sur le fait qu'il soit bien ou mal que l'IA se mêle à la médecine, il faut y voir une aide providentielle là où le temps nous manque pour les choses les plus élémentaires. Il faut y voir également l'opportunité de devenir, allié avec l'IA, meilleur au bénéfice des patients, et de retrouver l'essence de notre métier qui demande du temps et de la tranquillité d'esprit : reconforter et soigner les gens[125].

6.1 Proposition

L'avenir de la médecine devant quoiqu'il arrive composer avec les avancées technologiques, nous proposons, en accord avec certains auteurs et c'est déjà le cas dans certaines universités, qu'il y ait à la faculté de médecine a minima une veille technologique sur l'IA en particulier, ainsi que des cours d'ouverture aux étudiants. Ce cours pourrait selon toute vraisemblance prendre de l'importance, pour un jour mériter une chaire d'IA médicale à la faculté de médecine comme cela existe aux Etats-Unis.

Nous avons souligné dans l'introduction le fait que les études de médecine reposaient de plus en plus sur l'apprentissage d'algorithmes de prise en charge. Les examens des connaissances sont désormais des QCM ne favorisant pas l'articulation d'une réponse mûrement réfléchie ou la nuance, mais permettent un recueil immédiat, l'obtention immédiate d'un score, et la réalisation de statistiques individuelles et collectives en un clin d'oeil, progrès peu pertinents si l'on abandonne en échange l'opportunité de juger certaines qualités déterminantes chez les candidats. Les jeunes médecins sont recrutés en fonction de leur performance à ces tests alors que les chercheurs sont d'accord pour dire que leur plus-value par rapport à l'IA ne se situe pas ici. Du reste ChatGPT, sans entraînement spécifique, est déjà capable de passer les examens américains[3, 143].

Il apparaît donc que l'humain, pour ces tâches algorithmiques, est par définition dépassé. Il s'agit donc de concentrer la plus-value du médecin humain sur ce qu'il ne peut que mieux faire que l'IA par définition : l'humanité.

Nous proposons donc plus ambitieusement de recentrer les études de médecine sur deux points : d'une part la sélection non pas des étudiants les plus performants sur des tâches que l'IA peut mieux réaliser qu'eux ou sur des connaissances de toutes façons accessibles immédiatement sur internet (un progrès indéniable), mais sur leur capacité à trouver l'information critique, à raisonner d'une façon à la fois logique et innovante, élégante (au sens mathématique du terme), sur leur curiosité, leur ouverture, sur leur morale, leur éthique, leur empathie, leur bienveillance, en bref leur philosophie; et d'autre part sur leur capacité à comprendre et utiliser à bon escient la machine (notion d'« intelligence hybride »[173]) ou du moins à dialoguer avec les informaticiens. Le premier point est le plus important, et le second sous-entend de former à l'informatique, ce qui peut sembler paradoxal, mais l'utilisation à son plein potentiel et la compréhension des limites ou

capacités d'un outil informatique comme l'IA nécessite un certain bagage que n'ont pas les médecins. Il ne s'agit pas de bureautique ou d'apprendre par coeur des algorithmes, mais de savoir comment modéliser un problème en termes symboliques et se représenter un algorithme pour le résoudre, éventuellement le concevoir soi-même. On pourra argumenter que le meilleur pilote n'est pas forcément un excellent mécanicien, mais nous avançons qu'il faut avoir certaines notions de mécanique, du reste il ne faut pas être complètement dépendant des mécaniciens pour un problème facile à résoudre ou pour l'entretien du véhicule.

Ces deux points réconcilient un peu les humanités avec la science, et feraient retrouver à la médecine devenue passive, formée en négatif sur des ouvertures de parapluie, sa grâce et son prestige par l'engendrement ou la sélection de polymathes comme il en a existé par le passé.

6.2 *Portée de ce travail*

Cette revue de la littérature pourrait être exploitée pour, par exemple, guider une analyse qualitative avec des médecins français (comme cela a été fait dans d'autres pays[139, 142, 144]), élaborer une réflexion éthique ou pédagogique, ou encore politique dans l'intégration de l'IA dans la médecine française. Elle pourrait être utile également pour qui souhaiterait mener une étude de marché dans le but d'introduire une nouvelle technologie.



BIBLIOGRAPHIE

1. POTVIN, A. R., CROSIER, W. G., FROMM, E., LIN, J. C., NEUMAN, M. R., PILKINGTON, T. C. *et al.* Report of an IEEE Task Force - An IEEE Opinion on Research Needs for Biomedical Engineering Systems. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 48-59 (1986).
2. CBINSIGHTS. <https://www.cbinsights.com/research/artificial-intelligence-healthcare-startups-investors/>. consulté le 17 juillet 2023. (2017).
3. KUNG, T. H., CHEATHAM, M., MEDENILLA, A., SILLOS, C., DE LEON, L., ELEPAÑO, C. *et al.* Performance of ChatGPT on USMLE : Potential for AI-assisted medical education using large language models. *PLoS digital health* **2**, e0000198 (2023).
4. TRUONG, J.-M. *Totalement inhumaine : essai* (Les empêcheurs de penser en rond, 2001).
5. HAIECH, J. Parcourir l'histoire de l'intelligence artificielle, pour mieux la définir et la comprendre. *Med Sci (Paris)* **36**, 919-923. <https://doi.org/10.1051/medsci/2020145> (2020).
6. LAURIÈRE, J.-L. Intelligence artificielle : résolution de problèmes par l'homme et la machine (1987).
7. RUSSELL, S. & NORVIG, P. *Artificial Intelligence : A Modern Approach* 3^e éd. <http://aima.cs.berkeley.edu/global-index.html> (Prentice Hall, 2010).
8. TURING, A. M. Mind. *Mind* **59**, 433-460 (1950).
9. EDDY, D. M. & BILLINGS, J. The quality of medical evidence : implications for quality of care. *Health Affairs* **7**, 19-32 (1988).
10. DIXON-WOODS, M., AGARWAL, S., JONES, D., YOUNG, B. & SUTTON, A. Synthesising qualitative and quantitative evidence : a review of possible methods. *Journal of Health Services Research and Policy* **10**, 45-53b. ISSN : 13558196, 17581060. <http://www.jstor.org/stable/26749970> (2023) (2005).
11. ARKSEY, H. & O'MALLEY, L. Scoping studies : towards a methodological framework. *International journal of social research methodology* **8**, 19-32 (2005).
12. GOUGH, D., THOMAS, J. & OLIVER, S. Clarifying differences between review designs and methods. en. *Syst. Rev.* **1**, 28 (juin 2012).

-
13. ALEC, C. W., MATHIEU, T. & GUY, P. (Re)considering the Concept of Literature Review Reproducibility. *Journal of the Association for Information Systems*, 5. <https://aisel.aisnet.org/jais/vol21/iss5/10> (2020).
 14. TRICCO, A. C., LILLIE, E., ZARIN, W., O'BRIEN, K., COLQUHOUN, H., KASTNER, M. *et al.* A scoping review on the conduct and reporting of scoping reviews. *BMC medical research methodology* **16**, 1-10 (2016).
 15. TEMPLIER, M. & PARÉ, G. Transparency in literature reviews : an assessment of reporting practices across review types and genres in top IS journals. en. *Eur. J. Inf. Syst.* **27**, 503-550 (sept. 2018).
 16. PARÉ, G., TATE, M., JOHNSTONE, D. & KITSIOU, S. Contextualizing the twin concepts of systematicity and transparency in information systems literature reviews. en. *Eur. J. Inf. Syst.* **25**, 493-508 (nov. 2016).
 17. GUO, Y., HAO, Z., ZHAO, S., GONG, J. & YANG, F. Artificial intelligence in health care : bibliometric analysis. *Journal of Medical Internet Research* **22**, e18228 (2020).
 18. VARGHESE, J. Artificial intelligence in medicine : chances and challenges for wide clinical adoption. *Visceral medicine* **36**, 443-449 (2020).
 19. MCCORDUCK, P. & CFE, C. *Machines who think : A personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence* (CRC Press, 2004).
 20. MIROWSKI, P. McCorduck's Machines Who Think after Twenty-Five Years Revisiting the Origins of AI. *AI Magazine* **24**, 135-135 (2003).
 21. CREVIER, D. *AI : the tumultuous history of the search for artificial intelligence* (Basic Books, Inc., 1993).
 22. De LA METTRIE, J. & ASSÉZAT, J. *L'homme machine* <https://books.google.ch/books?id=aQN9Etbut7IC> (F. Henry, 1865).
 23. WIENER, N. Cybernetics. *Scientific American* **179**, 14-19 (1948).
 24. MCCULLOCH, W. S. & PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics* **5**, 115-133 (1943).
 25. GAULD, C. Une brève histoire des sciences computationnelles. *Revue Médecine et Philosophie* **4**, 45 (2020).
 26. WERBOS, P. Beyond regression : New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. *PhD thesis, Committee on Applied Mathematics, Harvard University, Cambridge, MA* (1974).
 27. RUMELHART, D. E., HINTON, G. E. & WILLIAMS, R. J. Learning representations by back-propagating errors. *nature* **323**, 533-536 (1986).
 28. WHITEHEAD, A. N. & RUSSELL, B. *Principia Mathematica* (Cambridge University Press, 1925–1927).

-
29. KULIKOWSKI, C. A. Beginnings of artificial intelligence in medicine (AIM) : computational artifice assisting scientific inquiry and clinical art—with reflections on present aim challenges. *Yearbook of medical informatics* **28**, 249-256 (2019).
 30. LANDSTEINER, N. <https://www.masswerk.at/elizabot/>. consulté le 2 septembre 2023. (2005).
 31. WEIZENBAUM, J. ELIZA - a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Communications of the ACM* **9**, 36-45 (1966).
 32. SZOLOVITS, P. *Artificial Intelligence in Medicine* ISBN : 0891589007 (Westview Press, Inc., USA, 1982).
 33. SZOLOVITS, P. *Artificial intelligence in medicine* (Routledge, 2019).
 34. PAUKER, S. G., GORRY, G. A., KASSIRER, J. P. & SCHWARTZ, W. B. Towards the simulation of clinical cognition : taking a present illness by computer. *The American journal of medicine* **60**, 981-996 (1976).
 35. WEISS, S., KULIKOWSKI, C. A. & SAFIR, A. Glaucoma consultation by computer. *Computers in Biology and Medicine* **8**, 25-40 (1978).
 36. MYERS, J. & POPLE, H. E. *INTERNIST : A consultative diagnostic program in internal medicine* in *Proceedings of the Annual Symposium on Computer Application in Medical Care* (1977), 52.
 37. SILVERMAN, H. *A Digitalis Therapy Advisor, Project MAC, Massachusetts Institute of Technology* rapp. tech. (Technical Report TR-143, 1975).
 38. FEIGENBAUM, E. A. *Knowledge engineering : the applied side of artificial intelligence* (Department of Computer Science, Stanford University, 1980).
 39. FEIGENBAUM, E. A. *Innovation and Symbol Manipulation in Fifth Generation Computer Systems* in *Fifth Generation Computer Systems* (1982), 223-224.
 40. BARNETT, G. O., CIMINO, J. J., HUPP, J. A. & HOFFER, E. P. DXplain : an evolving diagnostic decision-support system. *Jama* **258**, 67-74 (1987).
 41. LENAT, D. B., PRAKASH, M. & SHEPHERD, M. CYC : Using common sense knowledge to overcome brittleness and knowledge acquisition bottlenecks. *AI magazine* **6**, 65-65 (1985).
 42. HOLLIS, K. F., SOUALMIA, L. F. & SÉROUSSI, B. Artificial intelligence in health informatics : hype or reality ? *Yearbook of medical informatics* **28**, 003-004 (2019).
 43. FERRUCCI, D., LEVAS, A., BAGCHI, S., GONDEK, D. & MUELLER, E. T. Watson : beyond jeopardy ! *Artificial Intelligence* **199**, 93-105 (2013).
 44. RAMNARAYAN, P, TOMLINSON, A, RAO, A, COREN, M, WINROW, A & BRITTO, J. ISABEL : a web-based differential diagnostic aid for paediatrics : results from an initial performance evaluation. *Archives of disease in childhood* **88**, 408-413 (2003).

-
45. DEVARAKONDA, M. & TSOU, C.-H. *Automated problem list generation from electronic medical records in IBM Watson in Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* **29** (2015), 3942-3947.
 46. BAKKAR, N., KOVALIK, T., LORENZINI, I., SPANGLER, S., LACOSTE, A., SPONAUGLE, K. *et al.* Artificial intelligence in neurodegenerative disease research : use of IBM Watson to identify additional RNA-binding proteins altered in amyotrophic lateral sclerosis. *Acta neuropathologica* **135**, 227-247 (2018).
 47. COMENDADOR, B. E. V., FRANCISCO, B. M. B., MEDENILLA, J. S. & MAE, S. Pharmabot : a pediatric generic medicine consultant chatbot. *Journal of Automation and Control Engineering* **3** (2015).
 48. NI, L., LU, C., LIU, N. & LIU, J. *Mandy : Towards a smart primary care chatbot application in International symposium on knowledge and systems sciences* (2017), 38-52.
 49. BEAM, A. L. & KOHANE, I. S. Big data and machine learning in health care. *Jama* **319**, 1317-1318 (2018).
 50. EMANUEL, E. J. & WACHTER, R. M. Artificial intelligence in health care : will the value match the hype? *Jama* **321**, 2281-2282 (2019).
 51. HEALTH, R. <https://rockhealth.com/insights/2018-year-end-funding-report-is-digital-health-in-a-bubble/>. consulté le 18 septembre 2023. (2019).
 52. DEVEUGELE, M., DERESE, A., van den BRINK-MUINEN, A., BENSING, J. & DE MAESENEER, J. Consultation length in general practice : cross sectional study in six European countries. *Bmj* **325**, 472 (2002).
 53. NAKAJIMA, Y., YAMADA, K., IMAMURA, K. & KOBAYASHI, K. Radiologist supply and workload : international comparison : Working Group of Japanese College of Radiology. *Radiation medicine* **26**, 455-465 (2008).
 54. ABBO, E. D., ZHANG, Q., ZELDER, M. & HUANG, E. S. The increasing number of clinical items addressed during the time of adult primary care visits. *Journal of General Internal Medicine* **23**, 2058-2065 (2008).
 55. YARNALL, K. S., POLLAK, K. I., ØSTBYE, T., KRAUSE, K. M. & MICHENER, J. L. Primary care : is there enough time for prevention? *American journal of public health* **93**, 635-641 (2003).
 56. DELBROUCK, M. Burn-out et médecine 1 : Le syndrome d'épuisement professionnel. *Cahiers de psychologie clinique*, 121-132 (2007).
 57. GALAM, É. Burn out des médecins libéraux. Deuxième partie : une identité professionnelle remise en question. *Médecine* **3**, 474-477 (2007).

-
58. ARNDT, B. G., BEASLEY, J. W., WATKINSON, M. D., TEMTE, J. L., TUAN, W.-J., SINSKY, C. A. *et al.* Tethered to the EHR : primary care physician workload assessment using EHR event log data and time-motion observations. *The Annals of Family Medicine* **15**, 419-426 (2017).
 59. YOUNG, R., BURGE, S., KUMAR, K., WILSON, J. & ORTIZ, D. A time-motion study of primary care physicians' work in the electronic health record era. *Family medicine* **50**, 91-99 (2018).
 60. FRY, E. & SCHULTE, F. Death by a thousand clicks : where electronic health records went wrong. *Fortune Mag* **18** (2019).
 61. COIERA, E. When conversation is better than computation. *Journal of the American Medical Informatics Association* **7**, 277-286 (2000).
 62. COIERA, E., KOCABALLI, B., HALAMKA, J. & LARANJO, L. The digital scribe. *NPJ digital medicine* **1**, 58 (2018).
 63. BAHNIWAL, R. Environmental Scan of Primary Care Needs in the Last Decade (2010-2020) (2021).
 64. ASSOCIATION, A. C. <https://www.cancer.org/cancer/risk-prevention/understanding-cancer-risk/lifetime-probability-of-developing-or-dying-from-cancer.html>. consulté le 10 septembre 2023. (2023).
 65. Of STROKE COLLABORATORS, G. L. R. Global, regional, and country-specific lifetime risks of stroke, 1990 and 2016. *New England Journal of Medicine* **379**, 2429-2437 (2018).
 66. HIGGINS, D. & MADAI, V. I. From bit to bedside : a practical framework for artificial intelligence product development in healthcare. *Advanced intelligent systems* **2**, 2000052 (2020).
 67. OBERMEYER, Z. & EMANUEL, E. J. Predicting the future - big data, machine learning, and clinical medicine. en. *N. Engl. J. Med.* **375**, 1216-1219 (sept. 2016).
 68. REINSEL, D., GANTZ, J., RYDNING, J. *et al.* The digitization of the world from edge to core. *IDC white paper* **13** (2018).
 69. CHEN, J. H. & ASCH, S. M. Machine learning and prediction in medicine — beyond the peak of inflated expectations. *N. Engl. J. Med.* **376**, 2507-2509 (juin 2017).
 70. BOELLE, P.-Y., THIÉBAUT, R. & COSTAGLIOLA, D. Données massives, vous avez dit données massives? *Quest. Santé Publique* **30**, 1-4 (2015).
 71. LAZER, D., KENNEDY, R., KING, G. & VESPIGNANI, A. The Parable of Google Flu : Traps in Big Data Analysis. *Science* **343**, 1203-1205 (2014).
 72. RECTOR, A. L. Terminology and concept representation languages : where are we? *Artificial Intelligence in Medicine* **15**, 1-4 (1999).

-
73. HORN, W. AI in medicine on its way from knowledge-intensive to data-intensive systems. *Artificial intelligence in medicine* **23**, 5-12 (2001).
 74. SITTING, D. F. Grand challenges in medical informatics? *Journal of the American Medical Informatics Association* **1**, 412 (1994).
 75. KELLY, C. J., KARTHIKESALINGAM, A., SULEYMAN, M., CORRADO, G. & KING, D. Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence. *BMC medicine* **17**, 1-9 (2019).
 76. DAVENPORT, T. H., RONANKI, R. *et al.* Artificial intelligence for the real world. *Harvard business review* **96**, 108-116 (2018).
 77. LIAW, W. & KAKADIARIS, I. A. Primary care artificial intelligence : a branch hiding in plain sight. *Annals of family medicine* **18**, 194 (2020).
 78. LAENNEC, R. T. *De l'auscultation médiate : ou traité du diagnostic des maladies des poumons et du coeur* (1819).
 79. MESKO, B. Artificial intelligence is the stethoscope of the 21st century. *The Medical Futurist* (2019).
 80. GILL, K. S. Uncommon voices of AI. *AI & society* **32**, 475-482 (2017).
 81. VINGE, V. The coming technological singularity : How to survive in the post-human era. *Science fiction criticism : An anthology of essential writings*, 352-363 (1993).
 82. HAWKING, O. M. S. *Artificial intelligence could be the greatest disaster in human history* 2016.
 83. NAUGHTON, J. Giving Google our private NHS data is simply illegal. *The Guardian* **9**, 9 (2017).
 84. SHAH, N. D., STEYERBERG, E. W. & KENT, D. M. Big data and predictive analytics : recalibrating expectations. *Jama* **320**, 27-28 (2018).
 85. BUCH, V. H., AHMED, I. & MARUTHAPPU, M. Artificial intelligence in medicine : current trends and future possibilities. *British Journal of General Practice* **68**, 143-144 (2018).
 86. GRUSON, D. Les effets du déploiement de l'intelligence artificielle sur les métiers de la santé. *Soins* **7630**, 1-50. ISSN : 0038-0814. [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038-0814\(22\)00112-8](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038-0814(22)00112-8) (2022).
 87. REDDY, S. Explainability and artificial intelligence in medicine. en. *Lancet Digit. Health* **4**, e214-e215 (avr. 2022).
 88. SAMEK, W. & MÜLLER, K.-R. Towards explainable artificial intelligence. *Explainable AI : interpreting, explaining and visualizing deep learning*, 5-22 (2019).
 89. AMANN, J., BLASIMME, A., VAYENA, E., FREY, D., MADAI, V. I. & PRECISE4Q CONSORTIUM. Explainability for artificial intelligence in healthcare : a multidisciplinary perspective. en. *BMC Med. Inform. Decis. Mak.* **20**, 310 (nov. 2020).

-
90. DORAN, D., SCHULZ, S. & BESOLD, T. R. *What Does Explainable AI Really Mean ? A New Conceptualization of Perspectives* 2017. arXiv : 1710.00794 [cs.AI].
 91. KUNDU, S. AI in medicine must be explainable. *Nature medicine* **27**, 1328-1328 (2021).
 92. POST, B., BADEA, C., FAISAL, A. & BRETT, S. J. Breaking bad news in the era of artificial intelligence and algorithmic medicine : an exploration of disclosure and its ethical justification using the hedonic calculus. en. *AI Ethics*, 1-14 (oct. 2022).
 93. OBERMEYER, Z., POWERS, B., VOGELI, C. & MULLAINATHAN, S. Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science* **366**, 447-453 (2019).
 94. VELLIDO, A., MARTÍN-GUERRERO, J. D. & LISBOA, P. J. *Making machine learning models interpretable*. in *ESANN* **12** (2012), 163-172.
 95. BASTANI, O., KIM, C. & BASTANI, H. Interpretability via model extraction. *arXiv preprint arXiv :1706.09773* (2017).
 96. CUTILLO, C. M., SHARMA, K. R., FOSCHINI, L., KUNDU, S., MACKINTOSH, M., MANDL, K. D. *et al.* Machine intelligence in healthcare - perspectives on trustworthiness, explainability, usability, and transparency. *NPJ digital medicine* **3**, 47 (2020).
 97. GHASSEMI, M., OAKDEN-RAYNER, L. & BEAM, A. L. The false hope of current approaches to explainable artificial intelligence in health care. *The Lancet Digital Health* **3**, e745-e750 (2021).
 98. LONGONI, C., BONEZZI, A. & MOREWEDGE, C. K. Resistance to medical artificial intelligence. *Journal of Consumer Research* **46**, 629-650 (2019).
 99. MUEHLEMATTER, U. J., DANIORE, P. & VOKINGER, K. N. Approval of artificial intelligence and machine learning-based medical devices in the USA and Europe (2015–20) : a comparative analysis. *The Lancet Digital Health* **3**, e195-e203 (2021).
 100. LUCAS, G. M., GRATCH, J., KING, A. & MORENCY, L.-P. It's only a computer : Virtual humans increase willingness to disclose. *Computers in Human Behavior* **37**, 94-100 (2014).
 101. ARNOLD, D. & WILSON, T. *What doctor ? Why AI and robotics will define new health* in *PwC* (2017).
 102. NADARZYNSKI, T., MILES, O., COWIE, A. & RIDGE, D. Acceptability of artificial intelligence (AI)-led chatbot services in healthcare : A mixed-methods study. *DIGITAL HEALTH* **5**. PMID : 31467682, 2055207619871808. <https://doi.org/10.1177/2055207619871808> (2019).
 103. WINN, A. N., SOMAI, M., FERGESTROM, N. & CROTTY, B. H. Association of use of online symptom checkers with patients' plans for seeking care. *JAMA network open* **2**, e1918561-e1918561 (2019).

-
104. ZHOU, L., GAO, J., LI, D. & SHUM, H.-Y. The Design and Implementation of XiaoIce, an Empathetic Social Chatbot. *Computational Linguistics* **46**, 53-93. ISSN : 0891-2017. eprint : https://direct.mit.edu/coli/article-pdf/46/1/53/1847834/coli_a_00368.pdf (mars 2020).
105. FIRSTPOST. <https://www.firstpost.com/tech/news-analysis/xiaoice-is-the-ai-chatbot-that-millions-of-lonely-chinese-are-turning-to-for-comfort-9910921.html>. consulté le 20 juillet 2023. (2021).
106. DARCY, A. M., LOUIE, A. K. & ROBERTS, L. W. Machine learning and the profession of medicine. *Jama* **315**, 551-552 (2016).
107. GAO, S., HE, L., CHEN, Y., LI, D. & LAI, K. Public perception of artificial intelligence in medical care : content analysis of social media. *Journal of Medical Internet Research* **22**, e16649 (2020).
108. TEARE, P., FISHMAN, M., BENZAQUEN, O., TOLEDANO, E. & ELNEKAVE, E. Malignancy detection on mammography using dual deep convolutional neural networks and genetically discovered false color input enhancement. en. *J. Digit. Imaging* **30**, 499-505 (août 2017).
109. BLUEMKE, D. A. Radiology in 2018 : are you working with AI or being replaced by AI? *Radiology* **287**, 365-366 (2018).
110. DUSENBURY, W., MATHIESEN, C., WHALEY, M., ADEOYE, O., LESLIE-MAZWI, T., WILLIAMS, S. *et al.* Ideal Foundational Requirements for Stroke Program Development and Growth : A Scientific Statement From the American Heart Association. *Stroke* **54**, e175-e187 (2023).
111. YU, K.-H., ZHANG, C., BERRY, G. J., ALTMAN, R. B., RÉ, C., RUBIN, D. L. *et al.* Predicting non-small cell lung cancer prognosis by fully automated microscopic pathology image features. *Nature communications* **7**, 12474 (2016).
112. BEJNORDI, B. E., VETA, M., VAN DIEST, P. J., VAN GINNEKEN, B., KARSSEMEIJER, N., LITJENS, G. *et al.* Diagnostic assessment of deep learning algorithms for detection of lymph node metastases in women with breast cancer. *Jama* **318**, 2199-2210 (2017).
113. ESTEVA, A., KUPREL, B., NOVOA, R. A., KO, J., SWETTER, S. M., BLAU, H. M. *et al.* Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. en. *Nature* **542**, 115-118 (fév. 2017).
114. SOMASHEKHAR, S., SEPÚLVEDA, M.-J., PUGLIELLI, S, NORDEN, A., SHORTLIFFE, E. H., KUMAR, C. R. *et al.* Watson for Oncology and breast cancer treatment recommendations : agreement with an expert multidisciplinary tumor board. *Annals of Oncology* **29**, 418-423 (2018).

-
115. SLOMKA, P. J., DEY, D., SITEK, A., MOTWANI, M., BERMAN, D. S. & GERMANO, G. Cardiac imaging : working towards fully-automated machine analysis & interpretation. *Expert review of medical devices* **14**, 197-212 (2017).
 116. GULSHAN, V., PENG, L., CORAM, M., STUMPE, M. C., WU, D., NARAYANASWAMY, A. *et al.* Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs. *jama* **316**, 2402-2410 (2016).
 117. MISAWA, M., KUDO, S.-e., MORI, Y., CHO, T., KATAOKA, S., YAMAUCHI, A. *et al.* Artificial intelligence-assisted polyp detection for colonoscopy : initial experience. *Gastroenterology* **154**, 2027-2029 (2018).
 118. GRACE, K., SALVATIER, J., DAFOE, A., ZHANG, B. & EVANS, O. When will AI exceed human performance? Evidence from AI experts. *Journal of Artificial Intelligence Research* **62**, 729-754 (2018).
 119. STEINHUBL, S. R., MUSE, E. D. & TOPOL, E. J. Can mobile health technologies transform health care? *Jama* **310**, 2395-2396 (2013).
 120. FOGEL, A. L. & KVEDAR, J. C. Artificial intelligence powers digital medicine. *NPJ digital medicine* **1**, 5 (2018).
 121. COIERA, E. The fate of medicine in the time of AI. English. *Lancet* **392**, 2331-2332. ISSN : 0140-6736 (déc. 2018).
 122. VERGHESE, A., SHAH, N. H. & HARRINGTON, R. A. What this computer needs is a physician : humanism and artificial intelligence. *Jama* **319**, 19-20 (2018).
 123. ALPERT, J. S. Will physicians stop performing physical examinations? *The American Journal of Medicine* **130**, 759-760 (2017).
 124. CABITZA, F., RASOINI, R. & GENSINI, G. F. Unintended consequences of machine learning in medicine. *Jama* **318**, 517-518 (2017).
 125. ROSENTHAL, D. I. & VERGHESE, A. Meaning and the nature of physicians' work. *N Engl J Med* **375**, 1813-1815 (2016).
 126. KUEPER, J. K., TERRY, A. L., ZWARENSTEIN, M. & LIZOTTE, D. J. Artificial intelligence and primary care research : a scoping review. *The annals of family medicine* **18**, 250-258 (2020).
 127. ORIENT, J. Evaluation of abdominal pain : clinicians' performance compared with three protocols. *Southern medical journal* **79**, 793-799 (1986).
 128. KUEPER, J. K., TERRY, A., BAHNIWAL, R., MEREDITH, L., BELENO, R., BROWN, J. B. *et al.* Connecting artificial intelligence and primary care challenges : findings from a multi stakeholder collaborative consultation. *BMJ Health & Care Informatics* **29** (2022).

-
129. Van de VEN, A. H. & DELBECQ, A. L. The nominal group as a research instrument for exploratory health studies. *American journal of public health* **62**, 337-342 (1972).
 130. KRIST, A. H., GREEN, L. A., PHILLIPS, R. L., BEASLEY, J. W., DEVOE, J. E., KLINKMAN, M. S. *et al.* Health information technology needs help from primary care researchers. *The Journal of the American Board of Family Medicine* **28**, 306-310 (2015).
 131. SALEH, S., BOAG, W., ERDMAN, L. & NAUMANN, T. *Clinical collabsheets : 53 questions to guide a clinical collaboration in Machine Learning for Healthcare Conference* (2020), 783-812.
 132. LIN, S. Y., MAHONEY, M. R. & SINSKY, C. A. Ten ways artificial intelligence will transform primary care. *Journal of general internal medicine* **34**, 1626-1630 (2019).
 133. LIAW, W. & KAKADIARIS, I. Artificial intelligence and family medicine : better together. *Family Medicine* **52**, 8-10 (2020).
 134. MCWHINNEY, I. General practice as an academic discipline : reflections after a visit to the United States. *The Lancet* **287**, 419-423 (1966).
 135. LIN, S. A clinician's guide to artificial intelligence (AI) : why and how primary care should lead the health care AI revolution. *The Journal of the American Board of Family Medicine* **35**, 175-184 (2022).
 136. SMITH, M., SATTLER, A., HONG, G. & LIN, S. From code to bedside : implementing artificial intelligence using quality improvement methods. *Journal of General Internal Medicine* **36**, 1061-1066 (2021).
 137. STARFIELD, B. *et al.* *Primary care : concept, evaluation, and policy* (Oxford University Press, 1992).
 138. VARKEY, P., RELLER, M. K. & RESAR, R. K. *Basics of quality improvement in health care in Mayo Clinic Proceedings* **82** (2007), 735-739.
 139. BLEASE, C., KAPTCHUK, T. J., BERNSTEIN, M. H., MANDL, K. D., HALAMKA, J. D. & DESROCHES, C. M. Artificial intelligence and the future of primary care : exploratory qualitative study of UK general practitioners' views. *Journal of medical Internet research* **21**, e12802 (2019).
 140. BARTLETT, M. S., LITTLEWORT, G. C., FRANK, M. G. & LEE, K. Automatic decoding of facial movements reveals deceptive pain expressions. *Current Biology* **24**, 738-743 (2014).
 141. YOUYOU, W., KOSINSKI, M. & STILLWELL, D. Computer-based personality judgments are more accurate than those made by humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**, 1036-1040 (2015).
 142. BUCK, C., DOCTOR, E., HENNRICH, J., JÖHNK, J. & EYMANN, T. General practitioners' attitudes toward artificial intelligence-enabled systems : interview study. *Journal of Medical Internet Research* **24**, e28916 (2022).

-
143. PETERSON, C. ChatGPT and Medicine : Fears, Fantasy, and the Future of Physicians. *The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles* **11**, 18-30 (2023).
 144. KOCABALLI, A. B., IJAZ, K., LARANJO, L., QUIROZ, J. C., REZAZADEGAN, D., TONG, H. L. *et al.* Envisioning an artificial intelligence documentation assistant for future primary care consultations : A co-design study with general practitioners. *Journal of the American Medical Informatics Association* **27**, 1695-1704 (2020).
 145. D'ELIA, A., GABBAY, M., RODGERS, S., KIERANS, C., JONES, E., DURRANI, I. *et al.* Artificial intelligence and health inequities in primary care : a systematic scoping review and framework. *Family Medicine and Community Health* **10**. ISSN : 2305-6983. eprint : https://fmch.bmj.com/content/10/Suppl_1/e001670.full.pdf. https://fmch.bmj.com/content/10/Suppl_1/e001670 (2022).
 146. KNOP, M., MUELLER, M., FREUDE, H., RESSING, C. & NIEHAVES, B. Perceived limitations of telemedicine from a phenomenological perspective (2020).
 147. CHAIBI, A. & ZAIEM, I. Doctor Resistance of Artificial Intelligence in Healthcare. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics (IJHISI)* **17**, 1-13 (2022).
 148. ABDULLAH, R. & FAKIEH, B. Health care employees' perceptions of the use of artificial intelligence applications : survey study. *Journal of medical Internet research* **22**, e17620 (2020).
 149. NASH, D. M., THORPE, C., BROWN, J. B., KUEPER, J. K., RAYNER, J., LIZOTTE, D. J. *et al.* Perceptions of Artificial Intelligence Use in Primary Care : A Qualitative Study with Providers and Staff of Ontario Community Health Centres. *The Journal of the American Board of Family Medicine* **36**, 221-228 (2023).
 150. KENSING, F. & MADSEN, H. in *Design at work* 155-168 (CRC Press, 2020).
 151. LEVY, J., MADRIGAL, E. & VAICKUS, L. Artificial intelligence : applications in clinical medicine. *Frontiers in Medical Technology* **5**, 1206969 (2023).
 152. TOPOL, E. *et al.* The topol review. *Preparing the healthcare workforce to deliver the digital future*, 1-48 (2019).
 153. Pinto dos SANTOS, D., GIESE, D., BRODEHL, S., CHON, S.-H., STAAB, W, KLEINERT, R *et al.* Medical students' attitude towards artificial intelligence : a multicentre survey. *European radiology* **29**, 1640-1646 (2019).
 154. HAN, E.-R., YEO, S., KIM, M.-J., LEE, Y.-H., PARK, K.-H. & ROH, H. Medical education trends for future physicians in the era of advanced technology and artificial intelligence : an integrative review. *BMC medical education* **19**, 1-15 (2019).
 155. HEDDERICH, D. M., KEICHER, M., WIESTLER, B., GRUBER, M. J., BURWINKEL, H., HINTERWIMMER, F. *et al.* *AI For doctors - a course to educate medical professionals in artificial intelligence for medical imaging in Healthcare* **9** (2021), 1278.

-
156. WOOD, E. A., ANGE, B. L. & MILLER, D. D. Are we ready to integrate artificial intelligence literacy into medical school curriculum : students and faculty survey. *Journal of Medical Education and Curricular Development* **8**, 23821205211024078 (2021).
157. OH, S., KIM, J. H., CHOI, S.-W., LEE, H. J., HONG, J. & KWON, S. H. Physician confidence in artificial intelligence : an online mobile survey. *Journal of medical Internet research* **21**, e12422 (2019).
158. GANAPATHI, S. & DUGGAL, S. Exploring the experiences and views of doctors working with Artificial Intelligence in English healthcare; a qualitative study. *Plos one* **18**, e0282415 (2023).
159. PRATT, M. Artificial intelligence in primary care. *Medical economics* **95**. <https://www.medicaleconomics.com/business/artificial-intelligenceprimary-care> (2018).
160. ABRÁMOFF, M. D., LOU, Y., ERGINAY, A., CLARIDA, W., AMELON, R., FOLK, J. C. *et al.* Improved automated detection of diabetic retinopathy on a publicly available dataset through integration of deep learning. *Investigative ophthalmology & visual science* **57**, 5200-5206 (2016).
161. ABRÁMOFF, M. D., LAVIN, P. T., BIRCH, M., SHAH, N. & FOLK, J. C. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *NPJ digital medicine* **1**, 39 (2018).
162. TABASSUM, S., ABEDIN, N., RAHMAN, M. M., RAHMAN, M. M., AHMED, M. T., ISLAM, R. *et al.* An online cursive handwritten medical words recognition system for busy doctors in developing countries for ensuring efficient healthcare service delivery. *Scientific reports* **12**, 3601 (2022).
163. KARAKÜLAH, G., DICLE, O., KOŞANER, Ö., SUNER, A., BIRANT, Ç. C., BERBER, T. *et al.* in *e-Health-For Continuity of Care* 570-574 (IOS Press, 2014).
164. MINSKY, M. *Society of mind* (Simon et Schuster, 1988).
165. MCCARTHY, J. *Formalizing common sense* (Intellect Books, 1990).
166. LIU, H. & SINGH, P. ConceptNet - a practical commonsense reasoning tool-kit. *BT technology journal* **22**, 211-226 (2004).
167. CAHAN, A. & CIMINO, J. J. A learning health care system using computer-aided diagnosis. *Journal of medical Internet research* **19**, e54 (2017).
168. WANG, J., YANG, J., ZHANG, H., LU, H., SKRETA, M., HUSIĆ, M. *et al.* PhenoPad : Building AI enabled note-taking interfaces for patient encounters. *NPJ digital medicine* **5**, 12 (2022).
169. SINGHAL, K., AZIZI, S., TU, T., MAHDAVI, S. S., WEI, J., CHUNG, H. W. *et al.* Large language models encode clinical knowledge. *Nature*, 1-9 (2023).

-
170. BURGESS, M. The NHS is trialling an AI chatbot to answer your medical questions. *Wired UK* (2017, January 5). Retrieved from <https://www.wired.co.uk/article/babylon-nhs-chatbot-app> (2017).
171. KOCABALLI, A. B., SEZGIN, E., CLARK, L., CARROLL, J. M., HUANG, Y., HUH-YOO, J. *et al.* Design and evaluation challenges of conversational agents in health care and well-being : selective review study. *Journal of medical Internet research* **24**, e38525 (2022).
172. CRAWFORD, K. & CALO, R. There is a blind spot in AI research. *Nature* **538**, 311-313 (2016).
173. DELLERMANN, D., EBEL, P., SÖLLNER, M. & LEIMEISTER, J. M. Hybrid intelligence. *Business & Information Systems Engineering* **61**, 637-643 (2019).
174. SARIA, S., BUTTE, A. & SHEIKH, A. *Better medicine through machine learning : What's real, and what's artificial ?* 2018.
175. TOPOL, E. J. High-performance medicine : the convergence of human and artificial intelligence. *Nature medicine* **25**, 44-56 (2019).
176. TOPOL, E. *Deep medicine : how artificial intelligence can make healthcare human again* (Hachette UK, 2019).
177. SZOLOVITS, P. AI for the MD deep medicine Eric topol. en. *Science* **363**, 1402-1402 (mars 2019).
178. TOPOL, E. *The Creative Destruction of Medicine : How the Digital Revolution Will Create Better Health Care* ISBN : 9780465061839. <https://books.google.fr/books?id=IN4ItAEACAAJ> (Basic Books, 2013).
179. TOPOL, E. *The Patient Will See You Now : The Future of Medicine is in Your Hands* ISBN : 9780465054749. <https://books.google.fr/books?id=HfXQDQAAQBAJ> (Basic Books, 2015).
180. AKHTAR, N., RAHMAN, S., SADIA, H. & PERWEJ, Y. A holistic analysis of Medical Internet of Things (MIoT). *Journal of Information and Computational Science* **11**, 209-222 (2021).
181. MIRSKY, Y., MAHLER, T., SHELEF, I. & ELOVICI, Y. *CT-GAN : Malicious tampering of 3d medical imagery using deep learning* in *28th USENIX Security Symposium (USENIX Security 19)* (2019), 461-478.
182. GERKE, S., MINNSEN, T. & COHEN, G. in *Artificial intelligence in healthcare* 295-336 (Elsevier, 2020).
183. RAJKOMAR, A., DEAN, J. & KOHANE, I. Machine learning in medicine. *New England Journal of Medicine* **380**, 1347-1358 (2019).

-
184. AHSANI-ESTAHBANATI, E., SERGEEVICH GORDEEV, V. & DOSHMANGIR, L. Interventions to reduce the incidence of medical error and its financial burden in health care systems : A systematic review of systematic reviews. *Frontiers in Medicine* **9**. ISSN : 2296-858X. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmed.2022.875426> (2022).
 185. NAYLOR, C. D. On the prospects for a (deep) learning health care system. *Jama* **320**, 1099-1100 (2018).
 186. KOHANE, I. S., DRAZEN, J. M. & CAMPION, E. W. A Glimpse of the Next 100 Years in Medicine. *New England Journal of Medicine* **367**. PMID : 23268669, 2538-2539 (2012).
 187. HINTON, G. Deep Learning - A Technology With the Potential to Transform Health Care. *JAMA* **320**, 1101-1102. ISSN : 0098-7484. eprint : https://jamanetwork.com/journals/jama/articlepdf/2701666/jama_hinton_2018_vp_180096.pdf. <https://doi.org/10.1001/jama.2018.11100> (sept. 2018).
 188. MURDOCH, T. B. & DETSKY, A. S. The Inevitable Application of Big Data to Health Care. *JAMA* **309**, 1351-1352. ISSN : 0098-7484. eprint : https://jamanetwork.com/journals/jama/articlepdf/1674245/jvp130007_1351_1352.pdf. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.393> (avr. 2013).
 189. MEINERT, D. B. Resistance to Electronic Medical Records(EMRs) : A Barrier to Improved Quality of Care. *Informing Science : International Journal of an Emerging Transdiscipline* **2**, 493-504 (2005).
 190. FRIEDBERG, M. W., CHEN, P. G., VAN BUSUM, K. R., AUNON, F., PHAM, C., CALOYERAS, J. *et al.* Factors affecting physician professional satisfaction and their implications for patient care, health systems, and health policy. *Rand health quarterly* **3** (2014).
 191. AQUINO, Y. S. J., ROGERS, W. A., BRAUNACK-MAYER, A., FRAZER, H., WIN, K. T., HOUSSAMI, N. *et al.* Utopia versus dystopia : Professional perspectives on the impact of healthcare artificial intelligence on clinical roles and skills. *International Journal of Medical Informatics* **169**, 104903 (2023).
 192. MAXMEN, J. S. The Post-Physician Era Medicine in the 21st Century (1976).
 193. ANDERSON, P. C. The post-physician Era : medicine in the 21st century. *JAMA* **237**, 2336-2337 (1977).
 194. SANTOW, E. *Emerging from AI utopia* 2020.
 195. REES, M. *Denial of catastrophic risks* 2013.



Résumé

La médecine a connu une évolution théorique (découvertes scientifiques fondamentales) et technique (examens complémentaires), mais la façon de la pratiquer a relativement peu évolué malgré l'introduction de l'informatique. La santé coûte de plus en plus cher, le volume des données générées croît de façon explosive et seule une petite partie de ces données est effectivement exploitée, par des opérateurs dont le temps est limité et précieux. A l'échelle du médecin généraliste, la prévention, la surveillance des patients, le temps administratif et de liaison avec d'autres professionnels de la santé, le maintien à jour des connaissances, et surtout la documentation représentent entre autres un travail considérable. L'intelligence artificielle (IA) a démontré qu'elle pouvait résoudre un certain nombre de problèmes médicaux et fait en ce moment l'objet d'investissements extraordinaires, dans l'espoir d'améliorer la prise en charge tout en diminuant le coût des soins.

Cette revue de la littérature concernant l'IA dans la médecine a pour objectif de répondre à la question suivante : dans quelle mesure l'intelligence artificielle pourrait-elle faire évoluer la médecine générale ?

Les progrès concernent surtout les spécialités médicales basées sur l'analyse de données en particulier d'imagerie, avec des outils diagnostiques que le généraliste pourra vraisemblablement invoquer au cabinet. Par ailleurs l'automatisation de la documentation, de la synthèse des informations du dossier médical, et l'assistance au diagnostic, sont déjà au point. Ces assistants pourront soulager la charge de travail des médecins, [en permettant probablement d'éliminer du temps administratif et ainsi récupérer du temps médical,]mais soulèvent des questions d'ordre éthique voire existentiel.

Mots-clefs : médecine générale, intelligence artificielle, IA, premier recours, revue de la littérature, cybernétique, informatique, apprentissage profond

Abstract

Medicine has evolved theoretically (fundamental scientific discoveries) and technically (complementary exams), however practicing itself has relatively little changed despite the introduction of computers. Healthcare is more and more expensive, the volume of generated data is growing explosively and only a small part of this data is actually being used, by operators whose time is limited and therefore precious. At the general practitioner scale, prevention, patient monitoring, administrative time and liaison with other healthcare professionals, keeping up-to-date expertise, and above all documentation, result among other duties in a considerable workload. Artificial Intelligence (AI) demonstrated that it could solve a number of medical problems and is at this time being tremendously invested in, in the hope of improving care while reducing costs.

This review about AI in medicine aims at answering the following question : In which respect could primary care evolve with AI ?

Advances especially apply to medical specialties based on data analysis and particularly imaging, with diagnostic tools that the general practitioner will be able to invoke at his practice. Furthermore, automation of documentation, synthesis of the information lying in the medical record, and diagnostic support, are already up and running. These assistants could relieve the doctors of part of their tasks, probably ridding them of some administrative time and thus redeeming some medical time, they nevertheless raise some ethical, even existential concerns.

Keywords : general medicine, artificial intelligence, AI, primary care, literature review, cybernetics, computer science, deep learning