

La santé à l'heure de l'intelligence artificielle

Synthèse

*Luc Pierron, cadre dans
le secteur de la santé*

*Antoine Evennou, cadre
dans le secteur de la
santé*

5 décembre 2017

Moins de six mois après la remise du rapport France IA, le gouvernement a chargé Cédric Villani d'une mission sur l'intelligence artificielle (IA) en septembre. Son rapport est attendu à la fin de l'année.

Le monde de la santé est sûrement l'un des secteurs où les enjeux de l'IA sont les plus importants. Jusqu'où une machine sera-t-elle capable d'analyser, de diagnostiquer et d'apprendre continuellement ? Quelles formes prendront la collaboration ou le partenariat entre l'homme et la machine ? Pourra-t-elle remplacer le professionnel, et si oui dans quelle mesure ? Quelle délégation de compétences ? Quelle division du travail ? Et quelles activités ou spécialités médicales seront prioritairement concernées ?

La présente note explore ces questions, sans faire de la futurologie. Elle part des systèmes, programmes et algorithmes déjà existants dans le champ de la santé en vue d'esquisser des perspectives pour l'avenir. L'idée est aussi de proposer une réflexion sur les politiques publiques à mettre en œuvre pour faire émerger une véritable stratégie française de santé en intelligence artificielle, et ainsi permettre la transformation du secteur médical à moyen et long terme dans les meilleures conditions.

SOMMAIRE

1. Des impacts envisageables dès à présent sur les métiers médicaux	10
1.1. Le médecin dans son activité	10
1.1.1. L'imagerie médicale.....	10
1.1.2. Le diagnostic	11
1.1.3. La recherche	13
1.2. L'articulation du médecin avec d'autres professionnels de santé	15
2. Des politiques publiques à mettre en œuvre pour une stratégie française de santé en intelligence artificielle.....	18
2.1. L'anticipation et la réactivité comme philosophie de régulation	18
2.2. Les lignes rouges	21
2.3. Les leviers de développement.....	23
2.3.1. Éducation	23
2.3.2. Soutien économique.....	26
2.3.3. Qualité des données.....	29
Conclusion.....	31

On l'appelle « intelligence artificielle ». Elle est partout, pour le meilleur comme pour le pire, suscitant autant d'espoirs que de craintes. Tous les secteurs sont concernés, et les perspectives économiques considérables : l'IA pourrait contribuer à hauteur de 15 700 Mds de dollars à l'économie mondiale en 2030, selon le cabinet de consultants Pricewaterhouse-Coopers¹, soit une hausse respective de 26 %, de 14,5 % et de 9,9 % des PIB de la Chine, des États-Unis et de l'Europe du Nord². Dans ces conditions, la mission « IA », menée par Cédric Villani, mathématicien et député LREM de l'Essonne, arrive à point nommé car elle pourra encourager à valoriser les atouts de notre pays et à en pallier les lacunes. Surtout, elle part d'un principe simple : la nécessité de ne pas être dépassé par cette technologie. Longtemps considérée comme prometteuse, mais en réalité peu dynamique depuis les années 1960-1970, celle-ci est désormais en plein essor grâce à la combinaison de deux facteurs : l'accélération de la puissance de calcul des machines, d'une part, et de l'autre, l'arrivée, avec le web et les applications numériques, de masses de données exploitables par les algorithmes.

Intelligence artificielle : une histoire récente, des progrès rapides

Émergeant lors de la conférence du Dartmouth College en 1956 portée par John McCarthy et Marvin Minsky, le concept d'intelligence artificielle (IA) a fait l'objet de près de soixante années de recherches et réalisations techniques et scientifiques. Ces dernières ont connu un bond technologique spectaculaire dans les années 2010. Dans l'intervalle, l'IA a connu différents coups d'arrêt, qui s'expliquent autant par les limites technologiques, des erreurs scientifiques et des revers budgétaires que par l'arrêt de plusieurs programmes de recherche, le pessimisme des médias et la défiance des investisseurs. Certains ont alors parlé d'« *AI Winter* », pour caractériser ces périodes de stagnation. Mais la saison du dégel a désormais largement commencé.

Il est désormais loin le temps de Deep Blue, l'ordinateur « intelligent » d'IBM, qui a battu Kasparov aux échecs en 1997. Nous en sommes maintenant à AlphaGo, la machine qui a détrôné le meilleur joueur de go en 2017, contre toute attente. Que s'est-il passé entre ces deux épisodes emblématiques ? Le développement de la capacité des machines à apprendre par elles-mêmes. Mais également la profondeur de cet apprentissage, grâce aux progrès considérables de leurs capacités de mémoire et de calcul. Et ces avancées de l'IA ne cessent de s'affirmer. Dans AlphaGo Zero, la toute nouvelle version présentée par Google, le 18 octobre 2017, le seul fait de donner à la machine les règles du jeu lui suffit à s'entraîner contre elle-même. Si la précédente version avait dû examiner des centaines de milliers de parties pendant plusieurs mois, la nouvelle a atteint le niveau d'un humain en quelques heures.

¹ <https://www.pwc.fr/fr/espace-presse/communiqués-de-presse/2017/juillet/intelligence-artificielle-un-potentiel-de-15700-milliards-de-dollars.html>

² Une ruée vers l'or d'un niveau tel qu'elle peut s'accompagner d'une nouvelle bulle financière : https://www.lexpress.fr/actualite/sciences/intelligence-artificielle-la-nouvelle-bulle-de-l-industrie-informatique_1911227.html

Avec le *deep learning* – cette capacité donnée aux machines non seulement de réagir de façon programmée à certaines situations mais aussi de réagir aux résultats de leurs propres décisions, de les garder en mémoire, de les analyser et de réélaborer en retour leurs propres modes de fonctionnement –, la question du transfert à la machine de capacités intellectuelles propres à l'être humain ne concerne plus uniquement la puissance de calcul ; elle concerne aussi et surtout la décision. La machine est désormais capable de tirer des leçons de ses comportements passés, d'améliorer elle-même la qualité de ses réponses et, pour être toujours plus efficace, d'optimiser son propre fonctionnement. Bref, elle est capable d'apprentissage automatique et profond.

Cette révolution a été permise par l'apparition et la démocratisation de matériels informatiques de plus en plus puissants. Yann LeCun³ l'a récemment évoqué s'agissant de « GPUs (Graphical Processing Units) capables de plus de mille milliards d'opérations par seconde », doublés de l'apparition des réseaux neuronaux artificiels (ensemble d'algorithmes inspirés du fonctionnement des neurones). Ainsi, la reconnaissance vocale fonctionne de mieux en mieux, la traduction automatique progresse à très grande vitesse, et la reconnaissance d'image est de plus en plus poussée.

L'accumulation de données permet à ces programmes de progresser continuellement. La digitalisation du monde est donc un atout précieux pour eux : objets connectés, réseaux sociaux, numérisation de documents, etc. charrient chaque jour d'énormes flux d'informations qui renforcent leurs capacités. Si nous restons loin de l'intelligence artificielle « forte⁴ », de la pleine conscience des machines, voire de la « singularité⁵ », il n'en demeure pas moins que ces technologies vont profondément impacter de très nombreux secteurs de l'économie.

Le franchissement de cette nouvelle frontière technologique soulève plusieurs interrogations.

- Les machines n'ont pas de motivations, pas de désirs, pas de croyances, pas de système de représentation du monde. En fait, elles n'ont pas d'intelligence au sens propre du terme. Un algorithme, et par extension une intelligence artificielle, est toujours conçu par un être humain ou un groupe d'individus. Le code (donc les gènes) de l'IA n'est pas neutre car il reflète l'avis, l'intérêt, les finalités ou les biais intellectuels de son ou ses constructeurs. Ces technologies peuvent donc comporter un risque majeur si elles sont monopolisées par quelques conglomérats

³ Yann LeCun est un informaticien, chercheur en intelligence artificielle, et plus particulièrement en « apprentissage automatique » (*machine learning*). Il est internationalement reconnu notamment pour ses résultats sur la reconnaissance de caractères et la vision par ordinateur en s'appuyant sur les réseaux de neurones convolutifs (qu'il a lui-même inventés). Il est professeur à l'université de New York et directeur du laboratoire d'Intelligence Artificielle de Facebook (Facebook Artificial Intelligence Research, FAIR). Il a été titulaire de la chaire « Informatique et sciences numériques » au Collège de France (2015-2016).

⁴ On distingue l'IA faible, capable de reproduire une tâche spécifique (celle qui est déployée aujourd'hui), l'IA semi-forte, capable de réaliser des tâches plus générales en comprenant notamment le contexte (un sujet de recherche) et l'IA forte, qui égale, voire dépasse l'intelligence humaine (et relève toujours, à ce jour, de la science-fiction).

⁵ La singularité technologique (ou singularité) est l'hypothèse que l'invention de l'intelligence artificielle déclencherait un emballement de la croissance technologique qui induirait des changements imprévisibles sur la société humaine. Au-delà de ce point, le progrès ne serait plus l'œuvre que d'intelligences artificielles, ou « suprainelligences » qui s'auto-amélioreraient, de nouvelles générations de plus en plus intelligentes apparaissant de plus en plus rapidement, créant une « explosion d'intelligence » créant finalement une puissante superintelligence qui dépasserait qualitativement de loin l'intelligence humaine.

et acteurs privés, et si les gouvernements démocratiques, mais aussi et surtout les citoyens eux-mêmes, ne veillent pas à réguler leur usage.

- *De facto*, cela pose aussi la question de la démocratisation et de l'acceptabilité sociale des changements qui sont ou seront introduits par ces technologies. Alors que des bouleversements de grande ampleur sont sur le point de se produire – nous y reviendrons dans le champ de la santé –, les débats publics nationaux ou internationaux restent peu nombreux (en ce sens, la mission confiée à Cédric Villani est essentielle). Or les gouvernements vont devoir réfléchir à des modes de régulation adaptés, souvent par-delà des frontières nationales, ces technologies et leurs applications ayant vocation à se déployer à une échelle globale⁶.
- D'autant plus que le cœur de la machine est surtout et d'abord une structure logique, un algorithme, un logiciel. C'est ce qui fait la difficulté de penser la technique aujourd'hui : elle n'est en rien réductible aux objets matériels qui sont offerts à notre perception et que nous avons sous la main. Elle réside essentiellement dans leur structure abstraite et formelle.
- Enfin, l'IA pose plus globalement la question des rapports entre les hommes et les machines dans nos sociétés. Sommes-nous préparés à comprendre et à vivre avec les intelligences artificielles ? Des robots sont, par exemple, déjà utilisés dans les maisons de retraite japonaises, où les personnes âgées leur parlent et interagissent avec eux. De telles situations permettent d'imaginer les transformations futures des relations, non seulement entre les humains et les machines, mais aussi entre les hommes, d'une part, et entre les hommes et la société, de l'autre. Si l'on veut concevoir une politique publique de l'IA pertinente, on doit envisager l'ensemble de ces transformations et parvenir à intéresser la société à son avenir.

Le monde de la santé est sûrement l'un des secteurs où ces enjeux sont les plus forts. L'IA, comme beaucoup d'autres innovations numériques, va transformer, déplacer les métiers du

⁶ Le règlement général sur la protection des données (RGPD) entrera en vigueur en mai 2018. Il pose les règles applicables pour l'Union européenne en matière de protection des données, notamment de santé, et donne un cadre partagé sur le territoire européen. Le RGPD ne limite pas le droit à la libre circulation des données à caractère personnel. La responsabilité de la protection de ces dernières revient à la personne en charge de leur traitement, qui doit mettre en œuvre les mesures techniques et organisationnelles appropriées pour assurer un niveau de sécurité adapté au risque.

monde médical, au risque de bouleverser certains schémas qui semblaient acquis. Mais elle le fera aussi en améliorant les conditions de vie des patients, voire en contribuant à sauver des vies, ce qui donnera de ces nouveaux moyens techniques une perception moins impersonnelle ou menaçante. Une demande se fera jour du côté des patients pour un usage toujours plus large des capacités techniques qui apparaîtront à leur service. L'IA va notamment contribuer de plus en plus à prévenir, voire, dans certain cas et sous certaines conditions, à prédire les pathologies, par exemple par le biais des analyses génomiques. Ceci est à mettre en parallèle avec le fait que l'on sait déjà séquencer les quelque 3 milliards de paires de nucléotides qui constituent notre ADN et que l'on sera en mesure de s'en servir, non plus pour tester des hypothèses spécifiques, mais pour explorer toutes les prédispositions génétiques à une maladie et éventuellement adapter les traitements⁷. De ce fait, des politiques de prévention plus importantes, plus ciblées et plus individualisées vont devoir se structurer, avec à la clé des choix philosophiques et moraux décisifs. La convergence entre la robotique et l'analyse des données conduira à des prises en charge de meilleure qualité, à des accompagnements plus poussés, à des opérations chirurgicales plus sûres. Chez un robot chirurgical, les algorithmes seront capables de reconstituer une image fidèle du corps et de voir ce qui se passe pendant une opération grâce à des systèmes couplés à des microcaméras. L'intelligence se nichera alors dans la puissance de ces algorithmes, qui auront été aiguisés grâce à l'analyse de milliers d'heures de vidéos d'interventions chirurgicales antérieures. Ils pourront reconnaître les étapes-clés d'une opération, repérer des complications éventuelles et avertir le chirurgien humain quand il approchera d'une zone particulièrement sensible.

Qu'il travaille pour le médecin généraliste ou pour le spécialiste, l'ordinateur aidera à formuler un diagnostic toujours plus sûr et à proposer une thérapie toujours plus pertinente, en s'appuyant sur les innombrables données qui l'alimentent.

De plus en plus, l'intégration de l'IA dans les pratiques ne vise pas seulement à délester le personnel médical de tâches routinières, possiblement fastidieuses, ou encore à en

⁷ Sur ce point, on peut déjà faire référence à la startup Atlas Biomed qui, à partir de données ADN recueillies sur des clients volontaires (salive et selles), est capable de déterminer les risques de développer 17 affections influencées par les gènes ou le style de vie (comme l'obésité), ainsi que 283 anomalies héréditaires, que l'on peut potentiellement transmettre à nos enfants. L'analyse des bactéries permet, quant à elle, de déterminer comment améliorer son bien-être avec des recommandations personnalisées sur la nourriture.

augmenter le rendement. Elle a également pour ambition de permettre des opérations que l'être humain, en raison de ses limites (capacité de traitement et de stockage, vitesse...), n'est pas capable de prendre en charge avec la même efficacité.

En particulier, l'esprit humain ne peut plus faire face seul au flux de connaissances généré par le Big Data. Il a besoin de la machine pour pouvoir accéder à, et traiter, cette masse gigantesque de données. Rien que dans la base de données PubMed, qui regroupe les articles de médecine et de biologie, environ 3 000 nouveaux articles sont indexés chaque jour. Un expert, s'il réussissait à lire trois articles par jour, ne lirait qu'un millième de ce qui est publié. Plus aucun humain ne peut donc lire, comprendre, inférer et résumer tout cela sans le secours d'un outil puissant.

Le développement de l'IA en santé sera d'autant plus rapide que, dans ce domaine, la production de données nouvelles est particulièrement abondante⁸. L'effort de recherche consenti dans le champ de la santé est d'ailleurs conséquent, les ressources en expertise et en argent sont déjà importantes, et les motivations, souvent très vives. De telles masses de données permettent « d'éduquer » des IA et d'affiner leurs réactions, de préciser leurs réponses et d'apporter des analyses propres. Ce rendement est croissant : chaque nouveau patient analysé constituera autant de données nouvelles intégrées au « système neuronal » de la machine. En outre, les individus malades ou en situation de handicap ont généralement moins de réticences à tester et adopter de nouveaux usages. L'idée pour ces personnes est avant tout de se soigner et de mieux vivre avec leur pathologie.

D'un point de vue de santé publique, l'utilisation de ces données permettra de repérer beaucoup plus aisément les écarts éventuels entre les pratiques collectives de prescription et les conditions de l'autorisation de mise sur le marché ou les recommandations d'usage. Elle permettra aussi de détecter des effets secondaires potentiels avant que de nombreux cas ne se soient déclarés⁹. Des outils dédiés à la veille et à l'alerte sanitaires se

⁸ Qu'il s'agisse des données cliniques et paracliniques générées dans les établissements de soins quotidiennement, en situation de soins courants ; des données générées par divers organismes de surveillance, telles que qualité de l'air, voirie, circulation des transports en commun ou privés, urbanisme, etc. ; des données générées individuellement, issues d'objets connectés, d'activité sur le Net, sur les réseaux sociaux ou sur les forums, etc.

⁹ Par rapport aux pays d'Europe du Nord (Royaume-Uni, Pays-Bas et Danemark) et d'Amérique du Nord (États-Unis et Canada), la France reste d'ailleurs très en retard vis-à-vis du croisement des sources de données (absence de base de données renseignant sur les motifs d'usage et les principales caractéristiques permettant de juger du bien-

développeront progressivement¹⁰. Des modèles permettent d'ailleurs déjà de définir et d'évaluer des stratégies de gestion des risques sanitaires et leurs coûts dans une zone géographique définie, en matière de santé animale par exemple¹¹.

Plus globalement, puisqu'il s'agit d'améliorer les conditions de vie, voire de sauver des vies, l'IA en santé se heurtera sans doute moins à la question du choix entre la garantie de son développement et le maintien de la paix sociale par la protection des emplois et usages existants ; contrairement à ce qui se passe dans d'autres secteurs (dans l'industrie, par exemple), elle générera probablement assez naturellement un assez large consensus si elle bénéficie au plus grand nombre. Des réactions de défense professionnelle se manifesteront sans doute, qui feront valoir les mérites des usages établis. Mais elles se montreront probablement insuffisantes à freiner ou empêcher l'avancée de cette vague technologique qui sera réclamée par les usagers des services de santé, pour améliorer la qualité des soins ou encore pour lutter contre les déserts médicaux – en favorisant l'accès, parfois à distance, à des diagnostics et prescriptions adaptés sur l'ensemble du territoire, avec une intervention humaine limitée, voire demain sans exiger ce type d'intervention.

C'est ici que se pose la question de la place occupée par les professionnels de santé et de l'organisation de leurs métiers. L'IA est susceptible d'accompagner ces professionnels, voire à terme de se substituer en partie à eux, dans ce qui est au fondement de leurs activités actuelles : non seulement les actes techniques, mais surtout le diagnostic et la prescription. Jusqu'où une machine susceptible d'analyser, de diagnostiquer et d'apprendre continuellement pourra-t-elle remplacer le professionnel ? Quelles formes prendront la

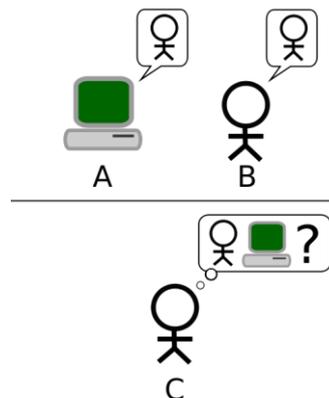
fondé d'une prescription) et, surtout, du partenariat avec le monde de la recherche. Ceci est préoccupant du fait du rôle d'explorateurs d'hypothèses et de lanceurs d'alerte que peut jouer le vaste réseau français des équipes de recherche en pharmaco-épidémiologie et santé publique.

¹⁰ Des outils existent déjà : eCerveau centralise des informations essentielles telles que les disponibilités en lits, les données d'activité du Samu ainsi que des données détaillées sur l'occupation des services d'urgence : nombre de patients présents dans le service, dans les salles d'attente, dans les box d'examen, en salle de déchoquage, etc. Ces informations en « temps réel » permettent un pilotage extrêmement fin des ressources de chaque service d'urgence, ainsi qu'une orientation et une prise en charge optimales des patients lors des périodes de tension ou de crise.

¹¹ Par exemple, en matière de santé animale. Dans le cadre du projet investissements d'avenir MIHMES (2012-2017), coordonné par BioEpaR, les chercheurs de l'Inra et de l'Inria ont développé de nouvelles méthodes de modélisation associant les technologies de l'intelligence artificielle et du *cloud*. Ensemble, ces innovations facilitent l'intégration des connaissances biologiques sur les pratiques d'élevage et des mesures sanitaires (hygiène, mouvements d'animaux, caractéristiques des vaccins...). Elles permettent aussi d'étudier autant de scénarios que nécessaire, de l'échelle troupeau à l'échelle régionale, de la filière, voire du pays.

collaboration ou le partenariat entre l'homme et la machine ? Quelle délégation de compétences ? Quelle division du travail ? Et quelles activités ou spécialités médicales seront prioritairement concernées ?

Le « test de Turing » peut nous aider à répondre. Dès 1950, le père de l'informatique moderne, Alan Turing, a proposé une expérience pour déterminer si une machine est intelligente ou pas : on laisse un humain dialoguer avec deux entités qu'il ne peut pas voir. L'une d'elles est un ordinateur, l'autre un humain. Si la personne qui discute avec les deux entités n'est pas capable de faire de différence entre elles, on peut considérer que l'ordinateur a réussi l'examen et qu'il est intelligent. En 2011, le programme Cleverbot a ainsi réussi à convaincre une majorité de participants de son « humanité ».



En dépit des faiblesses que certains attribuent à ce test (notamment pour mesurer l'intelligence effective des programmes d'IA), c'est surtout la démarche entreprise qui nous intéresse ici. Plus la machine sera en capacité de tromper les juges humains, plus aisée sera sa pénétration dans notre domaine d'étude, la santé. Par exemple, pour un même acte médical, si le patient n'est pas en mesure de déterminer si sa prise en charge résulte d'un homme ou d'une machine, la pénétration de la technologie dans ce champ précis sera d'autant plus forte. Il serait dès lors possible de déterminer quelles sont les spécialités qui vont se trouver plus particulièrement impactées par des formes développées d'intelligence artificielle.

Nous nous intéresserons ici aux activités, aux métiers et aux actions sur lesquels la confusion entre la machine et l'homme est déjà complète au point de réinterroger rapidement la place et le rôle du professionnel qui les accomplit aujourd'hui (1.). Il ne s'agit donc pas de prospective ou de futurologie : nos réflexions partent de systèmes, programmes et algorithmes déjà existants en vue d'esquisser des perspectives pour l'avenir.

Cela fait, nous proposerons une réflexion sur les différents enjeux des politiques publiques à mettre en œuvre pour faire émerger une véritable stratégie française de santé en intelligence artificielle, et ainsi permettre la transformation du secteur médical à moyen et long terme dans les meilleures conditions (2.).

1. DES IMPACTS ENVISAGEABLES DÈS À PRESENT SUR LES MÉTIERS MÉDICAUX

Nous faisons le choix de nous limiter ici à deux angles : le médecin dans son activité ; l'articulation du médecin avec d'autres professionnels de santé.

1.1. LE MÉDECIN DANS SON ACTIVITÉ

L'apprentissage de plus en plus poussé des systèmes suggère à ce jour que des IA, dans les domaines médicaux de l'imagerie, de l'aide au diagnostic ou encore de la recherche, sont d'ores et déjà capables de se substituer à l'intelligence humaine pour l'exécution de certaines tâches. Elles soulèvent ainsi la question de la frontière entre l'activité des machines et celle des professionnels.

1.1.1. L'imagerie médicale

Mammographie, dermatologie, rétinopathie diabétique... sont autant de domaines où l'IA accélère le travail médical et fournit des résultats plus affinés que ceux apportés par le seul regard expert du clinicien. On peut citer en exemples ce qui est déjà développé par :

- **Aidoc Medical**, programme généraliste.
L'IA permet de détecter des anomalies sur les radios. Elle combine les scans avec les données du patient et oriente l'action du radiologue. L'idée est d'utiliser les nouvelles technologies pour intégrer tous les diagnostics et les données cliniques

jusqu'à construire une vision complète et holistique du patient, présentée dans une interface intuitive et simple d'utilisation par le professionnel.

- **Zebra Medical Vision**, programme généraliste.
Face à la hausse continue des besoins de radios, Zebra veut proposer une solution qui facilite le travail des radiologues et leur fait gagner du temps et de la précision dans les diagnostics.
- **Therapixel**, programme généraliste.
Il s'agit d'un outil de lecture automatique d'image de radiologie basée sur une intelligence artificielle. Cette dernière est associée à un *cloud* permettant l'accès à des millions d'images qui contribuent à renforcer les connaissances de l'IA.
- **MedyMatch**, programme dédié aux traumatismes crâniens.
Les outils comparent des millions de points spécifiques dans les images scannées et identifient immédiatement les plus pertinents, y compris des anomalies invisibles aux yeux des médecins (pour rappel, l'œil humain voit en moyenne 17 nuances de gris, contre déjà plus de 200 pour certaines machines).
- **Google**, programme dédié aux diabétiques.
Le groupe a conçu un algorithme capable de détecter une maladie de l'œil qui touche – à des stades différents – environ 50 % des diabétiques. **DreamUp Vision** s'intéresse aussi aux maladies de l'œil dues au diabète.

On peut aussi citer Tilak Healthcare, startup qui propose de détecter et de suivre la rétinopathie diabétique ou les maculopathies, avec des jeux sur ordinateur et smartphone. Les irrégularités sont décelées en analysant les comportements adoptés par les joueurs.

1.1.2. Le diagnostic

L'analyse, à un moment « t » ou de façon constante, de données de santé facilite l'émergence d'alertes en temps réel aux fins d'établir des diagnostics de plus en plus précis ou d'assurer un suivi exhaustif des patients, notamment ceux qui souffrent de pathologies chroniques.

- **Your.MD**, chatbot de prédiagnostic.
Cette application, développée en collaboration avec le NHS (National Health Service) au Royaume-Uni, utilise l'intelligence artificielle pour fournir des conseils

médicaux sous forme de *chatbot*¹². De même qu'un médecin pose des questions pour établir un diagnostic, Your.MD pose des questions pour obtenir des informations sur les symptômes. En fonction de la réponse, des questions complémentaires sont posées jusqu'à aboutir à un pré-diagnostic.

- Une application à mettre en parallèle de deux autres :
 - **Clustaar**, experte sémantique, cette startup développe un outil qui permet d'analyser les mots-clés dans les requêtes pour déceler l'intention de l'utilisateur ou améliorer le langage des assistants virtuels. On peut imaginer son application à la compréhension de rapports médicaux, des symptômes recherchés sur des plateformes en libre service tels que Doctissimo ou encore l'amélioration du diagnostic par bot ;
 - **Syllabs**. Cette startup propose de rédiger certains documents à la place du praticien grâce à une IA. Son application permettrait de rédiger des fiches produits de médicaments ou des compte rendus médicaux, voire des ordonnances médicales ; ordonnances que les professionnels de santé, en particulier les médecins, resteraient libres de prescrire, une machine ne pouvant pas endosser le rôle de prescripteur au sens du Code de la santé publique.
- **DreamQuark**, solutions d'analyse de données.

La startup développe des algorithmes pour détecter des phénomènes rares et invisibles pour l'homme, dans une grande variété de types de données (images, textes, audio, etc.).
- **Lifen**, plateforme globale de gestion des données de santé.

Cette plateforme est capable de faciliter la collaboration entre praticiens et de permettre le partage et l'analyse des données grâce à une IA, tout en protégeant les données personnelles des patients.
- **Cardiologs**, solution web de lecture des électrocardiogrammes (ECG).

En récupérant un signal d'ECG, il est possible, en le poussant sur la plateforme Cardiologs, d'obtenir un rapport personnalisé en temps réel. Cette startup travaille notamment avec Bioserenity, qui conçoit des vêtements connectés permettant notamment de surveiller les personnes épileptiques avec plus d'efficacité.

¹² Un « *chatbot* » est un outil de conversation automatisée avec l'utilisateur, contraction de « *chat-robot* » (« *to chat* » : discuter).

- **Implicity**, solution de télécardiologie.

La startup veut permettre de gérer à distance les pacemakers afin de gagner du temps sur le contrôle et de pouvoir ainsi se concentrer sur les problématiques de fond de façon rapide.

- **WinterLight Labs**, diagnostic de maladies mentales et cognitives.

En analysant des extraits de conversation de patients, le programme permet de réaliser un diagnostic sur certaines maladies mentales et cognitives, notamment la maladie d'Alzheimer. Dans le même type d'expérience, nous pouvons noter celle d'Andrew G. Reece et Christopher M. Danforth, qui ont créé un algorithme relatif à l'analyse des photos Instagram, afin de mettre en évidence des signes précurseurs éventuels de cas de dépression et participer ainsi à l'accompagnement des professionnels.

1.1.3. La recherche

Troisième champ identifié d'impact direct des IA existantes dans le monde de la santé : la recherche. Si l'on a accès à la totalité de la littérature scientifique, aux résultats des centaines de milliers de recherches existantes, aux comptes rendus cliniques mais aussi aux données génétiques des patients... il ne faut que quelques jours, voire quelques heures à des IA pour mettre en évidence de premiers résultats, détecter une pathologie, proposer une molécule utile ou sortir des médicaments du circuit au regard de leurs dangers potentiels ou avérés, etc.

- **IBM Watson**

Watson est un programme informatique d'IA conçu par IBM. Il s'est fait connaître du grand public grâce à ses incroyables performances au jeu télévisé américain Jeopardy. La machine a, en effet, réussi à battre les champions en titre du jeu qui consiste à deviner la question à partir de la réponse. Pour y parvenir, Watson a montré qu'il pouvait comprendre le langage naturel (celui qui nous permet de communiquer entre humains), émettre des hypothèses et les faire valider. Ses capacités analytiques lui ont permis d'apprendre de ses erreurs, de décoder les ambiguïtés, les jeux de mots et l'ironie de certaines propositions, mais aussi d'argumenter ses réponses. Cette IA a notamment été orientée vers le diagnostic médical et la recherche en oncologie, en croisant les données personnelles du

patient avec un immense corpus d'articles de recherches constamment mis à jour. Il a également été utilisé aux mêmes fins dans le domaine de la génomique. Capable de reconnaissance de langage, Watson peut en effet analyser un corpus, des statistiques et scanner toute information utile sur Internet. Il s'est, par exemple, illustré en diagnostiquant en dix minutes un cas rare de leucémie, les équipes médicales considérant par la suite qu'il leur aurait fallu au minimum deux semaines pour poser le même diagnostic. La rapidité et la puissance de Watson en font l'une des IA les plus avancées dans le champ de la santé. Watson s'illustre aussi dans le monde de la finance en facilitant le travail de priorisation des banquiers. Cette IA trouvera aussi des applications dans le droit, un cabinet d'avocats américain ayant intégré Watson à son activité pour accélérer l'analyse de la jurisprudence.

- **La Caisse nationale d'assurance-maladie (Cnam) et l'École**

polytechnique, exploitation et analyse du Système national inter-régimes de l'assurance maladie (Sniiram).

Les deux institutions se sont alliées dans l'objectif de développer, d'ici à 3 ans, des technologies autour du Big Data dans le champ de la santé. Parmi les axes de travail, on peut noter : la détection de signaux ou anomalies en pharmaco-épidémiologie, les abus et la fraude, etc. Leurs recherches mettent aussi en évidence les possibilités induites par le Big Data pour construire des études épidémiologiques de grande ampleur et permettre ainsi de construire des politiques de santé publique et de prévention, voire d'en renforcer la portée et l'efficacité.

- **Inato**, recherche de partenaires dans le cadre du lancement d'essais cliniques.

Cette plateforme tire profit des bases de données publiques sur les essais cliniques dans le monde et des données disponibles au sein des industries de santé, pour identifier de potentiels partenaires pour les essais, interroger ceux qui paraissent le plus pertinents, critiquer et réévaluer leur capacité de recrutement. En mettant en contact différentes sources et jeux de données sur les investigateurs, la startup parvient à avoir suffisamment de critères explicatifs pour aider à la prise de décision. Elle couvre aujourd'hui plus de 200 000 services hospitaliers dans le monde, 1,2 million de médecins investigateurs ayant participé à un historique d'environ 900 000 essais. L'IA intervient donc à trois niveaux : l'automatisation de

la collecte et de la structuration des données, le croisement des sources pour améliorer la fiabilité des données, et la mesure des signaux prédictifs qui vont déterminer la propension d'un professionnel de santé à intégrer un essai clinique et à le mener jusqu'au bout.

Ces quelques exemples montrent à quel point les IA semblent déjà supérieures à la capacité technique humaine ou tendent à la dépasser dans certains domaines spécifiques. Les professions médicales basées avant tout sur l'analyse de signaux, telles que la radiologie, les images microscopiques, les données génétiques, voire les symptômes dermatologiques, pourraient être, à l'avenir, largement automatisées. Par ailleurs, si les outils d'accompagnement des professionnels ne se substituent pas encore au médecin pour établir le diagnostic et définir la prescription, leurs capacités s'étendent et se consolident. Assistera-t-on d'ici peu à un tri entre les « petites » affections, qui seront traitées de façon toujours plus automatisée, et les cas plus complexes qui mobiliseront l'avis de spécialistes, avec les risques que présenterait cette dichotomie ? Dans tous les cas, la question de l'articulation du médecin avec les machines, d'une part, et les autres professionnels, d'autre part, est dès aujourd'hui posée.

1.2. L'ARTICULATION DU MÉDECIN AVEC D'AUTRES PROFESSIONNELS DE SANTÉ

Au-delà du médecin dans sa propre activité, les IA pourraient bouleverser la gradation des réponses apportées aux patients, à travers les rapports entre le médecin et les autres professionnels de santé.

Le digital et la santé sont économiquement performants pour s'adresser rapidement au plus grand nombre. En effet, les services numériques permettent de gagner du temps (diagnostic et prévention), sont *user friendly* (diminution du besoin en formation, fonctionnalités à distance, entre autres), permettent de soigner à moindre coût (moins d'investissement), sont plus rapides à déployer, souvent utilisables par des personnels moins qualifiés, etc. Par conséquent, si la délégation de tâches¹³, vers des infirmiers par

¹³ Exemples de délégations de tâches : consultation et diagnostics (évaluation psychologique et physiologique) ; consultation et accueil de patients avec problèmes non identifiés en vue de détecter des facteurs de risques et les signes précoces de la maladie chez les patients ; prescription et interprétation des examens complémentaires (y compris radio, échographie, examens de laboratoire) ; prescription de médicaments sans supervision médicale ;

exemple, semblait encore complexe pour des questions de formation des personnels délégataires, les IA vont permettre de combler une partie de ce manque en suppléant à l'expertise technique rapidement. Dans de nombreux pays de l'OCDE (Royaume-Uni, États-Unis, Finlande, Irlande, Australie, etc.), des infirmiers dits spécialisés clinique ou de pratiques avancées se chargent déjà d'une série de missions en lieu et place du médecin, voire sans supervision médicale.

Aussi, dans la perspective d'une démographie médicale qui se contracte, avec la persistance des déserts médicaux et de contraintes budgétaires lourdes, une éventualité serait d'évoluer, pour les tâches les plus simples, souvent chronophages, vers un duopole infirmiers praticiens/cliniciens et IA, y compris dans le cas de pathologies lourdes ou chroniques¹⁴ ; le médecin serait alors plus attendu sur d'autres champs d'activité.

Cette délégation de tâches pourrait aussi se faire envers une autre IA, experte cette fois-ci : les *chatbots* qui collaborent avec les médecins pour se charger des premières questions à poser lors d'un rendez-vous médical. Ces même *chatbots* peuvent aussi aider à poser les premiers diagnostics pour aiguiller tel ou tel patient vers tel ou tel spécialiste ou hôpital ou service hospitalier.

Dans ces deux hypothèses, le médecin pourrait apparaître comme un passeur de savoir. Il connaît la médecine, le patient et sa maladie. Cela ne changera pas à court et moyen terme¹⁵. Mais que le médecin soit accompagné dans son diagnostic ou qu'il soit même en partie remplacé, il devra être là pour aider son patient à comprendre ce que peut apporter un outil tel que l'IA dans les prises de décision sur sa santé et sur les soins. L'ordinateur ne prendra pas de décision à la place du patient, mais proposera des pistes qui devront être évoquées et discutées entre le médecin et le patient. Le rôle du médecin comme conseiller et coordinateur des soins sera d'autant plus renforcé, et ses compétences humaines et

gestion d'une catégorie de pathologie chronique ; adressage de patients aux spécialistes ; autorité pour admettre ou faire sortir des patients d'un établissement et les adresser à d'autres professionnels ; etc.

¹⁴ Les pathologies chroniques nécessitent en effet du temps de gestion, d'accompagnement, de coordination, de renouvellement des ordonnances, de suivi des constantes que l'on ne retrouve pas forcément pour les pathologies plus simples voire bénignes.

¹⁵ Dans l'immédiat en tout cas : gardons bien en tête qu'ici aussi tout pourrait changer, de plus en plus d'IA parvenant à « singer » la relation humaine avec talent ! Selon les modèles comportementalistes prédominants aux États-Unis notamment, l'IA est une fine psychologue capable de plonger au cœur de nos émotions...

relationnelles d'autant plus valorisées : écoute, confiance, conseil, empathie, prise en compte du contexte de vie global du patient, de ses valeurs, de sa « vision » de la vie. D'autant que nous sommes encore loin du moment où l'ensemble de la population acceptera de s'en remettre directement à des machines, si toutefois ce moment arrive jamais.

Cela pose bien évidemment la question de la responsabilité médicale. Le médecin est tenu à une obligation de science et de conscience. Sa responsabilité peut être engagée non seulement en cas de faute technique, mais encore en cas de *faute d'humanisme*¹⁶, laquelle trouve sa traduction la plus fréquente dans le manquement à l'obligation d'information et au droit du patient à consentir, de manière éclairée, à l'acte médical. Or rien ne permet de penser aujourd'hui que l'algorithme ou le robot puissent se voir reconnaître dans le futur une personnalité juridique autonome. C'est pourquoi un principe de responsabilité de l'utilisateur, c'est-à-dire de la personne qui utilise l'algorithme pour les besoins de ses activités ou autrement dit du « gardien de la chose » au sens du principe de la responsabilité du fait des choses issu du droit civil français, doit être clairement affirmé. Concrètement, dans notre domaine, il s'agira de tenir le médecin pour responsable de l'utilisation des programmes, algorithmes et systèmes d'intelligence artificielle, sauf défaut de construction de la machine (auquel cas, il pourra se retourner contre le constructeur ou le concepteur de la machine). Dans tous les cas, qu'il s'agisse d'une erreur de diagnostic, de traitement ou de soins, le patient souhaitera pouvoir se tourner vers ou se retourner contre un responsable.

En somme, le développement à grande échelle de l'IA en santé pourrait conduire à redéfinir considérablement le rôle du médecin : passeur de savoir et responsable, il aurait à développer les tâches les moins automatisables de son activité, et renforcer son rôle d'écoute et de conseil, ainsi que sa capacité, déjà sollicitée aujourd'hui pour les spécialités les plus appareillées, à maîtriser des machines complexes.

¹⁶ La faute d'humanisme se caractérise par le non-respect des droits des patients. Il s'agit du droit à un consentement éclairé sur l'acte médical, du droit au respect de leur dignité, de leur droit à l'information, de leur droit au secret médical

Il est d'ailleurs possible que les médecins spécialistes soient plus directement amenés à repenser leur pratique que les généralistes par l'avancée de cette vague technologique. En effet, face à une IA développée et conçue pour le surpasser sur tous les plans, selon un modèle très tayloriste (à savoir une hyperspécialisation des compétences pour découper en mono-tâches précises le processus de production d'un bien ou d'un service), on peut légitimement se demander si les qualités aujourd'hui recherchées chez le médecin traitant (coordination, orientation, connaissance et gestion du dossier médical, relations personnelles) ne se révéleront pas les plus résilientes face aux bouleversements à venir. Ce qui pose une autre question : les impacts de l'IA étant plus forts pour certaines pathologies ou certains actes, celle-ci captera les investissements et l'attention, au détriment de spécialités qui risquent d'être reléguées au second plan. Comment dès lors compenser ou équilibrer ce changement de hiérarchie ? Quels effets cela aurait-il sur les enjeux de pouvoir au sein du monde médical et de l'hôpital ? Afin de mieux appréhender la transformation à venir des métiers de santé et préparer les évolutions futures, il est nécessaire de développer des politiques publiques adaptées.

2. DES POLITIQUES PUBLIQUES À METTRE EN ŒUVRE POUR UNE STRATÉGIE FRANÇAISE DE SANTÉ EN INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Trois aspects seront plus particulièrement traités ici : l'anticipation et la réactivité qui devront gouverner le modèle de régulation ; les lignes rouges à ne pas dépasser ; les leviers de développement pour permettre à la France de capitaliser sur ces technologies.

2.1. L'ANTICIPATION ET LA RÉACTIVITÉ COMME PHILOSOPHIE DE RÉGULATION

Le développement de l'IA va contraindre de nombreux secteurs industriels à évoluer. Certaines habitudes françaises pourraient cependant prendre le dessus. La crainte du risque pourrait ainsi conduire à une sur-réglementation du champ d'application de ces technologies. Or cette attitude maintiendrait peut-être à court terme des situations existantes, mais les exposerait à un danger mortel à moyen et long terme. Surtout, un tel choix empêcherait notre pays de prendre position dans ces secteurs et de développer un tissu économique dédié, alors même que les géants du web glanent déjà nos données personnelles en permanence sans rencontrer beaucoup d'obstacles.

Il faut donc donner à la France les moyens de se positionner sur ce marché pour accélérer des développements économiques sur son territoire, d'une part, et pour être en capacité de construire une philosophie propre sur les intelligences artificielles, d'autre part. Aujourd'hui, ce sont principalement les GAFAs et les BATX¹⁷ qui construisent l'éthique de l'IA, à travers la façon de l'utiliser, de capter les données, etc. Sans une forte recherche en matière d'IA, sans entreprises bien positionnées dans ce domaine, sans intérêt de notre pays pour cette question, il faudra se résoudre à ne pas avoir voix au chapitre.

L'arme réglementaire nationale est d'autant plus limitée que les IA et leur capacité d'action dépassent les frontières. Les patients atteints de pathologies rares ou orphelines seront les premiers à rechercher le secours d'outils qui auront fait leurs preuves sur un autre continent ou dans un autre pays. Dans ces conditions, un environnement réglementaire trop contraignant reviendrait à abandonner aux États disposant d'un cadre plus souple, tels que les États-Unis ou la Chine, la plus grande partie du marché. En voulant protéger notre souveraineté, nous l'aurions en réalité perdue.

C'est pourquoi la question de l'IA doit faire l'objet d'un débat international et *a minima* européen. C'est bien une gouvernance mondiale autour de l'IA dont nous aurons besoin demain, afin d'assurer la transparence et la neutralité des machines, une juste compétition mondiale et les prémices d'un contrôle politique des algorithmes.

Il faut cependant agir, réfléchir et se projeter sans attendre. L'enjeu est avant tout géopolitique : comment la France souhaite-t-elle se positionner sur les IA et quel discours souhaite-t-elle porter ? Au plan économique et diplomatique, il existe un risque de décrochage et de perte d'indépendance, si le phénomène de concentration de l'activité numérique autour de quelques grandes plateformes se prolonge. C'est pourquoi la France doit, dès aujourd'hui, affirmer son ambition au niveau européen en matière d'IA et en faire un facteur d'attractivité grâce à une meilleure compétitivité de ses entreprises. Cet objectif doit guider l'action des pouvoirs publics comme des acteurs économiques : il s'agit de permettre à la France d'être connue et reconnue comme l'un des pays les plus en pointe en matière d'IA et offrant les meilleures conditions à son développement. Si elle se réalise,

¹⁷ Désigne les géants du Web chinois Baidu, Alibaba, Tencent et Xiaomi.

cette ambition constituera un facteur important d'attractivité auprès des talents étrangers, mais également de maintien en France des talents qui y sont formés. La France doit être un choix évident pour tout passionné d'IA, qu'il soit chercheur (déjà 5 300 recensés dans 200 laboratoires¹⁸), investisseur ou créateur d'entreprise.

Anticipation et réactivité doivent être par ailleurs au fondement de notre modèle de régulation. Il est indispensable de pouvoir questionner en permanence la manière dont les hommes et leurs pratiques vont évoluer au contact de cette « espèce inorganique » que sont l'IA et ses diverses incarnations robotiques.

Comme souvent dans le passé, les évolutions technologiques et techniques vont nous imposer de renégocier, collectivement et progressivement, un compromis entre nos valeurs et le surcroît de puissance que nous apportent ces nouveaux outils.

Éclairer les progrès de la science, soulever des enjeux de société nouveaux et poser un regard éthique sur ces évolutions... autant de missions aujourd'hui endossées par le Comité consultatif national d'éthique (CCNE) pour les sciences de la vie et de la santé. Mais aussi par la Commission nationale informatique et libertés (Cnil) qui a la charge d'analyser l'impact des innovations technologiques et des usages émergents sur la vie privée et les libertés. Parallèlement, le Conseil national du numérique (CNNum) a également pour mission de formuler de manière indépendante et de rendre publics des avis et des recommandations sur toute question relative à l'impact du numérique sur la société et sur l'économie.

Mais on le voit bien, l'intelligence numérique soulève des questions qui débordent chacun de ces trois cadres. Sans doute une instance permanente de réflexion, existante ou à créer, mérite-t-elle d'être spécialement désignée pour regrouper ces différentes compétences et parvenir à questionner ces mutations technologiques dont nous découvrons progressivement le potentiel.

¹⁸ Bertrand Braunschweig, directeur de l'Institut national de recherche en informatique et automatique (Inria) in « Intelligence artificielle : où en est-on vraiment ? », *Sciences et Avenir*, septembre 2017, p. 77.

Ce qui est sûr, c'est qu'il faut choisir une philosophie de régulation progressive en posant des interdits fermes mais peu nombreux pour commencer.

2.2. LES LIGNES ROUGES

Être volontariste sur le développement des IA ne signifie pas suspendre toute forme d'interdiction : respect de la vie privée et du secret médical, droit individuel d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles, limitations dans l'accès aux données non anonymisées de santé pour les assureurs et les industries pharmaceutiques... sont autant de principes qui méritent d'être affirmés et défendus.

Lors d'une rencontre organisée par France Stratégie et intitulée « Algorithmes, libertés et responsabilités¹⁹ », ces enjeux ont été rappelés. « Parce qu'ils produisent des effets sur les individus, ces traitements algorithmiques, aussi "objectifs" puissent-ils paraître, réinterrogent les notions :

- de liberté : notre capacité à ne pas être là où nous sommes attendus ou de ne pas faire tout ce dont les algorithmes nous jugent capables ;
- de déterminisme : les "profils" algorithmiques ne sont-ils pas des prophéties auto-réalisatrices ?
- de justice : la justice est-elle réductible à l'objectivité numérique et à la fiabilité computationnelle ?
- d'égalité : les distinctions de traitement fondées sur des profils algorithmiques sont-elles nécessairement favorables à l'idéal d'égalisation des opportunités ?
- de responsabilité : qu'est-ce qu'assumer une décision dans un contexte marqué par la recommandation automatisée ? Qu'est-ce que rendre compte de soi dans un contexte de profilage intensif ? »

Jusqu'où sommes-nous prêts à aller²⁰ ? Face aux menaces que font peser sur la liberté et la responsabilité des individus la prolifération des données et leur traitement par les IA, le principe de loyauté nous semble devoir être clairement affirmé. Ce principe est déjà

¹⁹ <http://www.strategie.gouv.fr/debats/algorithmes-libertes-responsabilites>

²⁰ Pour un bel exercice de prospective en matière de santé et d'utilisation des données, on renvoie vers les cahiers *Innovation et Prospective* réalisés par la Cnil (« Le corps, nouvel objet connecté », n° 2, p. 8) : https://www.cnil.fr/sites/default/files/typo/document/CNIL_CAHIERS_IP2_WEB.pdf

applicable en France pour la collecte et le traitement des données en général, et il sera étendu à l'ensemble de l'Union européenne avec l'entrée en vigueur du règlement général sur la protection des données (RGPD)²¹. Ce choix repose d'abord sur un constat : l'impossibilité pratique de restituer, dans un langage clair et compréhensible par tous, la complexité des systèmes d'intelligence artificielle. Dans ces conditions, l'affirmation d'un principe général de transparence des algorithmes risque d'être vaine ; elle serait d'ailleurs susceptible de nuire au respect du secret industriel et pourrait potentiellement freiner l'innovation. C'est pourquoi il vaut mieux privilégier le principe de loyauté.

Concrètement, une opération de traitement de données ne peut être considérée comme « loyale », et donc licite, qu'à la condition que les sujets de droit – dans notre cas, les patients – soient en capacité de déterminer avec suffisamment de précision le sort ultérieur de leurs données, afin de pouvoir le cas échéant refuser de consentir à leur exploitation ou, *a minima*, faire invalider tout traitement incompatible avec les finalités pour lesquelles ces données ont été initialement collectées²². Autrement dit, la loyauté signifie que les traitements ne peuvent porter que sur des données à caractère personnel qui sont collectées et traitées sans chercher, même par omission, à tromper la personne qui a accepté de les fournir. C'est d'autant plus important que le consentement à la collecte et au traitement des données de santé porte sur un contexte, des usages, des rapports de force, des circonstances d'expression et de recueil bien spécifiques. Il peut avoir un impact majeur sur la personne qui l'exprime, qui s'expose à des risques de violation de ses données, sur les tiers indirectement exposés au même risque, voire sur les valeurs et intérêts protégés par la société, d'autant plus lorsqu'il s'agit de santé.

²¹ La dernière étude annuelle du Conseil d'État, intitulée « Puissance publique et plateformes numériques : accompagner l'«ubérisation» », lui accorde de larges développements.

²² Selon l'article 58 de la loi Informatique et libertés, les droits des mineurs sont exercés par les titulaires de l'exercice de l'autorité parentale, qui sont d'ailleurs censés être les destinataires des informations les concernant. Il en va de même s'agissant du représentant légal vis-à-vis des personnes faisant l'objet d'une mesure de tutelle. Par dérogation, pour les traitements de données à caractère personnel réalisés dans le cadre de recherches ou d'études ou d'évaluations dans le domaine de la santé, ayant une finalité d'intérêt public et incluant des personnes mineures, ces dernières, âgées de 15 ans ou plus, peuvent s'opposer à ce que les titulaires de l'exercice de l'autorité parentale aient accès aux données. Les mineurs concernés exercent alors seuls leurs droits d'accès, de rectification et d'opposition. Le même droit d'opposition est ouvert aux mineurs de 15 ans ou plus, si le fait de participer au traitement des données conduit à révéler une information sur une action de prévention, un dépistage, un diagnostic, un traitement ou une intervention pour laquelle le mineur s'est expressément opposé à la consultation des titulaires de l'autorité parentale ou si les liens de famille sont rompus et que le mineur bénéficie à titre personnel du remboursement des prestations en nature de l'assurance maladie et maternité.

L'exigence de loyauté emporte donc des précautions qui sont de nature à augmenter la confiance dans les IA, et donc leur acceptabilité, sans pour autant requérir des industriels qu'ils s'assurent de la compréhension par les usagers de l'ensemble des fonctionnements algorithmiques, ce qui apparaît bien souvent hors de portée.

Il faudra cependant envisager d'aller plus loin encore en travaillant notamment au plan technique à la définition de solutions sécurisées et respectueuses de la vie privée par défaut (« *privacy by design* » et « *security by design* »), en renforçant la compréhension de ce que font réellement les systèmes reposant sur l'IA, et en améliorant la transparence sur les traitements réalisés par ces derniers. Mais là encore, trouver un équilibre entre précaution et progrès ne doit pas conduire à des réglementations trop rigides. Il faut au contraire demeurer pragmatique.

2.3. LES LEVIERS DE DÉVELOPPEMENT

Le même pragmatisme doit nous guider vers la mise en place des leviers de développement nécessaires à l'émergence d'une France forte dans ce nouveau domaine technologique. Éducation, soutien économique et qualité des données constituent à cet égard des enjeux décisifs.

2.3.1. Éducation

Il est nécessaire d'engager une action résolue en matière d'éducation, sur deux aspects en particulier :

La formation initiale et continue des professionnels de santé

La formation initiale des professionnels de santé ne peut plus faire l'impasse sur l'émergence des systèmes intelligents dans le monde de la santé. Ce n'est d'ailleurs pas qu'une question de technologie, mais bien un défi culturel et un enjeu de société. Le développement des IA nécessitent à la fois des compétences techniques qui leur sont spécifiques, mais également des qualités générales d'adaptabilité, de créativité et d'esprit critique. À cet égard, les professionnels de santé vont se trouver confrontés à un défi de polyvalence : ils devront rester de bons médecins, mais aussi maîtriser les nouveaux outils et faire preuve d'empathie et d'humanité dans la relation au patient. Le contenu de la formation devra en particulier évoluer en intégrant une interrogation permanente sur le rôle

que doit remplir l'homme face à des machines qui ont été développées et conçues pour le surpasser sur presque tous les plans.

De la même façon, voire de manière plus marquée, il faut agir sur la formation continue des professionnels de santé, aussi appelée développement professionnel continu (DPC), pour permettre à ceux qui sont en poste d'appréhender les évolutions et de les incorporer à leurs pratiques médicales. Il s'agit à la fois de favoriser de nouvelles compétences de médiateur mais aussi d'apporter des compétences techniques sur le fonctionnement et l'usage des technologies. Les professions susceptibles d'être le plus rapidement touchées par ces technologies (radiologues, dermatologues, par exemple) pourraient être la cible prioritaire d'une telle politique de formation.

Parfois par crainte, parfois par conservatisme, ces questions restent pour le moment peu approfondies. Évidemment, s'y attarder, c'est aussi accepter l'inévitable transformation des métiers, des pratiques et de la division du travail dans le monde de la santé. Mais on peut dès aujourd'hui anticiper la nécessité d'avoir des professionnels dotés de compétences techniques sur les machines.

Il est probable que, à défaut de réorienter dans ce sens la formation des médecins, se développera un corps de techniciens de la santé qui aura un pouvoir croissant dans la chaîne thérapeutique, comparable à celui des informaticiens aujourd'hui dans certaines grandes organisations. Une évolution qu'il s'agit d'anticiper pour mieux la maîtriser en fonction de ce que nous jugeons collectivement souhaitable.

Une action éducative plus globale

Plus largement, il est impératif que le grand public soit sensibilisé et informé avec objectivité sur les enjeux que soulèvent ces innovations comme sur les perspectives qu'elles ouvrent. Il s'agit d'une condition *sine qua non* à un débat public éclairé. Cela présuppose aussi de favoriser, dès le plus jeune âge, l'acquisition de certaines compétences et l'appropriation de concepts de base sous-jacents.

C'est pourquoi l'État doit intégrer dans l'éducation au numérique, encore trop faible aujourd'hui dans les écoles de la République, la question des IA et du digital. Il y a

évidemment un enjeu d'acculturation pour ne pas créer des inégalités fortes entre les citoyens qui maîtriseraient ces technologies et ceux qui ne les maîtriseraient pas. Il y a aussi des enjeux éthiques afin que chaque citoyen soit pleinement conscient des technologies qui vont l'entourer, parfois le conseiller et, demain, le soigner. Cette éducation a un double objectif : comprendre pour ne pas être effrayé, et comprendre pour maîtriser et continuer à innover.

Le rapport du Conseil national du numérique (CNNum), intitulé « Jules Ferry 3.0, Bâtir une école créative et juste dans un monde numérique », intègre à cet égard des recommandations riches d'enseignement, autour de deux grands axes.

- Ce qu'il faut enseigner et comment : informatique, notions fondamentales, humanités numériques.
- Comment redessiner le tissu éducatif : école en réseau, nouvelles industries de la formation, recherche, startups, etc.

L'idée d'instaurer un enseignement « IA, traitement des données et sciences numériques » de l'école primaire au lycée, comme l'évoque la stratégie #FranceIA²³ est également pertinente dans ses grandes lignes. Cet enseignement, critique, multiforme et pluridisciplinaire, doit montrer que les aspects techniques sont indissociables des enjeux éthiques, sociétaux et des applications. Cet effort sera naturellement amené à diffuser dans toute la population. Il s'adosse aux apprentissages en mathématiques et implique l'utilisation d'applications et une initiation à la programmation.

La priorité consiste à renforcer les programmes existants. Cet enseignement s'adosse naturellement aux apprentissages en mathématiques (classement, regroupement et traitement de données, travail sur des procédures systématiques, traitement de problèmes par des outils d'intelligence artificielle...). Comme cela est désormais prévu dans les programmes, on peut aborder l'initiation à la programmation, notamment *via* un outil pédagogique de codage comme Scratch ou *via* l'usage de robots comme les Bee-bot.

²³ Pendant deux mois, entre janvier et mars 2017, chercheurs, entreprises, startups et acteurs institutionnels se sont réunis pour contribuer à définir les grandes orientations de la France en matière d'intelligence artificielle, à savoir la stratégie française en intelligence artificielle ou #FranceIA.

Au collège et au lycée, il existe déjà un certain nombre d'enseignements qui permettent d'aborder les problématiques des sciences numériques. L'utilisation de Scratch dans les classes de collège est vue comme un succès qui permet de structurer une certaine rigueur et développe des qualités intéressantes (persévérance, autonomie, etc.). Un enjeu consiste certainement à impliquer les enseignants de disciplines non scientifiques dans l'utilisation d'outils numériques et le développement d'un regard critique sur cette utilisation (questions éthiques, juridiques, de sécurité, etc.).

2.3.2. Soutien économique

Si la Chine et les États-Unis se positionnent aujourd'hui en leader en matière d'IA, la France a de nombreux atouts à faire valoir en matière de recherche, de formation, de transfert technologique et de création d'entreprises innovantes.

Ainsi, par l'excellence de ses équipes académiques et industrielles dans les disciplines qui concourent au domaine du numérique pour la santé et la médecine, et grâce au Système national inter-régimes de l'assurance maladie (Sniiram), l'une des bases de données les plus volumineuses au monde, l'Hexagone a la capacité de créer de véritables « champions de l'IA » en santé. En effet, la France est l'un des rares pays qui dispose de bases de données médicales, sociales et économiques nationales centralisées, constituées et gérées par des organismes publics, couvrant de façon quasi exhaustive et permanente l'ensemble de la population dans divers domaines stratégiques : utilisation des produits de santé, recours aux soins, hospitalisations, handicaps, prestations et situations professionnelle et sociale. Par ailleurs, la quasi-totalité des champs de l'IA dispose d'applications dans le domaine de la santé.

Cependant, les possibilités de transfert des travaux de recherche vers l'industrie sont freinées et ce, pour des raisons multiples : difficultés d'accès aux données, contraintes réglementaires, niveau des financements publics et privés par rapport à d'autres pays, disponibilité des chercheurs, etc.

La stratégie #FranceIA a déjà fait de nombreuses propositions que nous jugeons intéressantes.

- Étudier la possibilité et l'intérêt de favoriser, *via* une défiscalisation, le rachat de startups de l'IA par les grands groupes français afin qu'ils s'approprient plus rapidement des technologies innovantes et pointues pour garder leur avantage compétitif.
- En prolongement de l'action de la BPI²⁴, soutenir la mise en place de fonds pour des investissements unitaires en capital supérieurs à 25 M€ pour aider à la transformation des startups de l'IA en futurs champions.
- Faciliter les transferts recherche-entreprises grâce à des démarches d'*open innovation* :
 - organiser des challenges ouverts et des bourses aux technologies d'IA permettant à une entreprise, en particulier les PME/ETI, voire à l'administration, de lancer un challenge auprès de startups ou de solliciter le soutien d'organismes de recherche – l'objectif serait de répondre à une difficulté technologique ou d'évaluer l'intérêt potentiel (y compris d'usage) d'une technologie avant son implémentation ;
 - appels à projets « multipartenaires » impliquant obligatoirement *a minima* un organisme de recherche et un industriel. Sélection par l'excellence et l'impact économique de projets de recherche industrielle utilisant des technologies existantes dans les laboratoires de recherche, pour les faire passer à la dimension industrielle. Une condition nécessaire serait la démonstration rapide d'une plus-value mesurable, et la participation effective d'entreprises du secteur y compris au niveau du pilotage des projets ;
 - appels à projets de type « laboratoire commun » entre chercheurs universitaires et entreprise dont l'objectif serait là aussi l'industrialisation de résultats de recherche ou de technologies ;
 - appels à projets « sur l'explication » ciblés sur les besoins des entreprises et des administrations.
- Attribuer un financement de recherche, sur une période de cinq ans, pour des projets innovants. Dans la stratégie #FranceIA, il était recommandé l'octroi de

²⁴ La BPI a déjà versé près de 250 M€ pour l'aide à l'innovation et l'investissement en fonds propres dans les entreprises de santé.

40 bourses chercheurs confirmés et 30 bourses jeunes chercheurs par an pendant dix ans (dotations situées entre 500 k€ et 1 M€).

- Détecter, soutenir et accompagner les talents entrepreneuriaux – dans l'esprit des programmes « French Tech Ticket » ou « French Tech Diversité », cette mesure reposerait sur 3 actions :
 - détecter les talents porteurs d'un projet (par exemple un projet d'étudiant de master, d'un jeune ingénieur contractuel dans un laboratoire de recherche...), sur la seule base de l'intérêt du projet et des qualités du porteur, donc sans plan d'affaire, ni actif de propriété intellectuelle requis ;
 - financer par une bourse le porteur pour lui permettre de « se lancer » à plein temps pour développer son premier prototype produit, le tester auprès de premiers utilisateurs ou clients potentiels, développer un réseau de soutien autour du projet, etc. – le financement pourrait être de durée relativement courte (6 mois ?) mais donner lieu à un livrable identifié et ambitieux (en application des principes de « l'effectuation ») ;
 - dès que le projet démarrerait, le porteur devrait être « immergé » et accompagné dans un environnement entrepreneurial (et non académique, tout en gardant des liens), d'une part pour bien orienter effectivement le projet vers un projet de startup et d'autre part pour le développement de réseau (incubateurs, accélérateurs, etc.).

Parallèlement à ces initiatives, deux axes méritent plus largement réflexion et action.

- L'investissement dans l'innovation directe pour produire de nouvelles machines : ces innovations appellent des investissements importants, qui manquent parfois, au point de pousser certains de leurs porteurs à s'expatrier pour bénéficier des capitaux requis. Or la capacité à lever ces capitaux est essentielle à un développement en phase avec la vitesse des évolutions technologiques. Nier cela conduit à la fois à une fuite des cerveaux et à une perte d'autonomie technologique fondamentale pour les évolutions qui nous attendent. La fiscalité peut être un levier important pour inciter les acteurs à prendre des risques supplémentaires en la matière. Mais il faut aller plus loin, avec une principale difficulté : comment assurer un financement précoce, progressif et contrôlé à une innovation basée sur une technologie apprenante qui, par nature, connaît un développement exponentiel ?

Sur le modèle de ce que vient de lancer la FDA (Food and Drug Administration) aux États-Unis, un programme pilote de pré-certification pourrait être imaginé. Outre-Atlantique, il s'agit de concentrer les inspections en vue de l'approbation d'un programme, d'un algorithme ou d'un système sur les développeurs plutôt que sur le produit lui-même. Les entreprises bénéficiant de ce programme pilote sont alors en mesure d'optimiser leurs recherches et réalisations techniques et scientifiques, sans avoir à solliciter une nouvelle approbation des autorités à chaque fois que celles-ci évoluent.

- L'investissement en équipement : si l'on veut que les bénéfices liés aux usages de l'IA se déploient dans notre pays, il faut également favoriser l'équipement des institutions et professionnels de santé. Ces investissements soulèvent toutefois une question économique relativement inédite. La valeur d'une machine (et donc son amortissement) décroît habituellement avec le temps (elle s'use, s'abîme, est dépassée par une autre...). Ce sera bien sûr toujours le cas avec le hardware. Mais l'intelligence contenue dans la machine, elle, croîtra avec le temps. À qui appartiendra-t-elle ? Si elle restait la propriété exclusive de celui qui a vendu la machine, c'est comme s'il volait à son client la valeur de ses expériences thérapeutiques qui ont fait grandir la machine. Si elle est pour partie la propriété exclusive du client, l'équipement est un capital dont l'amortissement est beaucoup plus rapide, mais ses expériences thérapeutiques ne vont pas profiter aux autres machines analogues. Faut-il aller jusqu'à admettre, compte tenu du fait qu'on parle de santé et donc d'enjeux éventuellement vitaux, que l'intelligence elle-même est la propriété indivise de l'humanité, un bien dont l'usage est commun à tous ? Autant cette dernière solution apparaît comme la plus juste socialement, surtout quand on sait que l'apprentissage est en majorité fondé sur des données *open source*, autant elle interroge forcément la logique même d'amortissement.

2.3.3. Qualité des données

Ces interrogations soulignent le fait que la valeur provient davantage encore des données nécessaires à l'apprentissage que de l'algorithme lui-même. En conséquence, les entreprises ou les administrations (pour la production de services publics) doivent se concentrer sur l'identification des données susceptibles d'être utilisées et sur les modalités

concrètes d'exploitation (mise à disposition des données, éventuellement mutualisation, en conservant le contrôle des exploitations qui en sont faites ou en bénéficiant d'un juste retour). Pour certains, l'atout majeur des données réside dans l'exhaustivité : tout est mesuré, sous tous ses aspects. Cette exhaustivité ferait disparaître *de facto* toute problématique de biais, sinon de représentativité, d'échantillonnage et de puissance statistique. En réalité, il existe nécessairement tout un pan d'activités n'entrant pas dans l'horizon du Big Data, et plus dangereusement, tout un ensemble de la population. À ce jour, une partie seulement de la population est réellement « mesurée », et cette partie n'est pas nécessairement majoritaire, et encore moins représentative. Aux inégalités d'accès pourraient alors s'ajouter des inégalités de représentation, ce qui est déjà le cas dans certaines études et sources mobilisées. La culture, les goûts personnels, la liberté de chacun ou encore la littératie sont autant de facteurs jouant probablement sur l'adhésion consciente ou inconsciente à un système de représentation numérique des différentes dimensions de la vie individuelle et sociale. Le Big Data, aussi big soit-il, ne traitera pas d'autres données que celles qui existent et lui sont accessibles.

Dès lors, il faut faire très attention aux biais de ces systèmes d'apprentissage censés affûter l'intelligence de nos complices numériques. Par exemple, aux États-Unis, un distributeur de savon dans les toilettes publiques ne fonctionnait pas pour les peaux très noires. Malveillance ou erreur dans la base de données, ces différents points posent la question, outre de la programmation des IA (et donc de leur « idéologie »), celle de leur éducation (à savoir des bases de données qu'elles utilisent). Méthode de programmation, qualité de bases de données, processus de *deep learning* sont susceptibles de cacher des biais colossaux, capables de nuire au développement des IA. Or les données biaisées renforceront encore le biais dans les décisions de ces systèmes. Pire, d'autres chercheurs ont montré qu'il est possible de corrompre les données utilisées pour développer l'apprentissage de la machine : par exemple, en trompant des voitures autonomes en ajoutant du ruban argenté à un panneau de signalisation, ce qui pourrait déclencher une action inappropriée du véhicule.

Plus que la sensibilisation des organisations à la valeur des données en tant que ressources essentielles à l'entraînement des algorithmes d'intelligence artificielle, il est indispensable d'inciter les acteurs publics et privés à œuvrer pour des conditions optimales

de stockage des données et d'améliorer le degré de raffinement des données utilisées. Plus spécifique à notre domaine d'étude, cela passe aussi par de larges travaux à réaliser sur le Sniiram (système jusqu'ici très utilisateur-dépendant, en particulier dépendance vis-à-vis des professionnels et établissements de santé en tant que prescripteurs de soins) et par le soutien à la constitution de bases de données médicales et de santé.

CONCLUSION

Le monde de la santé sera confronté à des défis spécifiques liés à l'arrivée des intelligences artificielles. Les impacts humains seront importants et la politique de formation indispensable. Les risques associés à ces bouleversements nourriront certainement des craintes et des comportements de méfiance. Cependant, le pessimisme technologique serait le pire des guides en la matière. Et s'il y a un risque à agir en faveur des applications de l'IA dans le domaine de la santé, il y a aussi un risque à ne pas agir et à être, demain, dépendant de technologies et d'usages qui auront été développés ailleurs et dans un cadre normatif et réglementaire qui ne nous conviendra pas nécessairement. Au contraire, il paraît pertinent d'accompagner ces technologies et de les orienter pour mieux maîtriser les nouveaux usages. Cela implique une grande vigilance aux transformations des métiers, des positionnements, des pratiques. Mieux anticipés, ces changements seront mieux régulés. Éducation, soutien économique et qualité des données sont autant d'enjeux forts pour la santé dans un monde où l'IA prendra une place croissante.

Avancer sur ces sujets est une question éminemment politique pour la France. Il en va de son positionnement mondial et de sa capacité à faire émerger seule ou dans des coopérations européennes importantes des acteurs concurrents de ceux qui existent d'ores et déjà à l'est ou l'ouest du globe.