

THÈSE
pour le
DIPLOME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE
par

Arthur de Méhérenc de Saint-Pierre

Présentée et soutenue publiquement le 10 avril 2020

Intelligence artificielle en santé : état des lieux et perspectives

Président du jury de thèse : Mr Yves-François POUCHUS, Professeur Universitaire de Cryptogamie et Botanique, Faculté de Pharmacie de Nantes

Directeur de thèse : Mr Tanguy LE NEEL, Maître de Conférence Universitaire de Pharmacie Galénique – Industrielle et Technologie Biomédicale, Faculté de Pharmacie de Nantes

Membres du jury : Mme Anne HAIE et Mr Stéphane BOUTHOLEAU, Docteurs en pharmacie

Remerciements

Je tiens, en premier lieu, à remercier les membres du jury et les personnes qui m'ont aidé à rédiger cette thèse :

A Monsieur Yves-François POUCHUS,

Pour avoir porté de l'intérêt à ce sujet et d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Je souhaite que ce travail et mes recherches soient à la hauteur de vos attentes.

A Monsieur Tanguy LE NEEL,

Pour m'avoir fait l'honneur de devenir mon directeur de thèse. Merci également pour votre disponibilité et votre patience durant toute la réalisation de ce travail, depuis le dépôt du sujet jusqu'à la soutenance.

A Madame Anne HAIE,

Pour m'avoir pris en stage lors de ma 6^{ème} année d'officine et m'avoir formé au travail officinal en m'ayant donné l'occasion de participer aux nombreuses tâches réalisées par les pharmaciens. Je vous remercie aussi pour l'attention que vous avez porté à ma thèse lors de ce stage dans votre officine.

A Monsieur Stéphane BOUTHOLEAU,

Pour m'avoir appris toutes ces choses venant compléter mes stages en officine, pour toutes ces saisons plus ou moins longues dans cette superbe officine, ainsi que pour tous ses précieux conseils, tant sur le plan professionnel que sur le plan personnel.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidé à aller au bout de ces longues études et m'ont permis de devenir la personne que je suis aujourd'hui :

A ma famille et particulièrement mes parents,

Pour m'avoir aidé et encouragé durant tout ce cursus universitaire. Merci pour votre participation à la relecture et vos précieux conseils. Ce travail est l'aboutissement de toutes ces années de scolarité avec des hauts et des bas, mais durant lesquelles vous avez toujours été présents.

A Alice,

Pour ton amour sans faille depuis ces nombreuses années, pour ton soutien et tes encouragements. Il n'a pas toujours été simple de rédiger cette thèse mais tu m'as toujours poussé dans le bon sens. Merci également pour ta contribution à la relecture et à tes remarques pertinentes lorsque j'en ai eu besoin. Merci d'être toi, tout simplement, aujourd'hui et pendant encore de nombreuses années.

A Johanna,

Mon binôme de TP et de soirées. Merci d'avoir égayé mes journées de cours. Toutes ces années universitaires m'auraient paru bien trop longues sans toi. Après tout ce temps, nous voilà enfin rentrés dans la vie active.

A mes amis,

Les De LaVega, vous m'aurez bien fait décompresser que ce soit à Saint Jean de Monts, à Nantes ou ailleurs dans le monde. Merci Alexandre, Robin, Haribo, Alex, Josso, Liberge et les frères Gillou. Un grand merci également à mes amis de la faculté (Victor, Lauranne, Chloé, David et j'en passe), vous avez toujours été présents pour moi.

Après tout ce temps passé sur les bancs de la faculté, une page se tourne et j'espère que celles d'après seront toutes aussi belles voire encore meilleures !

Liste des abréviations

GAFAM : Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft

IA : Intelligence Artificielle

Mo : Méga octet

RGPD : Règlement Général sur la Protection des Données

CNIL : Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés

UE : Union Européenne

DP : Dossier Pharmaceutique

LSO : Logiciel de Suivi d'Observance

Go : Giga octet

IRM : Imagerie par Résonnance Magnétique

TEP : Tomographie par Emission de Positons

AVC : Accident Vasculaire Cérébral

TDM : Tomodensitométrie

ANSM : Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des produits de santé

RCP : Résumé des Caractéristiques du Produit

ARN : Acide ribonucléique

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

DMP : Dossier Médical Partagé

NFS : Numération Formule Sanguine

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
LISTE DES ABREVIATIONS	4
TABLE DES MATIERES	5
INTRODUCTION.....	8
I) L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.....	10
A) HISTOIRE DE L'IA.....	10
1) <i>Alan Turing, pionnier de l'intelligence artificielle</i>	10
2) <i>Le test de Turing</i>	12
a) Principe du test de Turing.....	12
b) Forces et faiblesses du test de Turing.....	13
3) <i>L'intelligence artificielle de Turing à aujourd'hui</i>	14
a) L'âge d'or de l'IA	14
b) L'hiver de l'IA.....	15
c) La renaissance de l'IA.....	15
d) La seconde crise de l'IA.....	16
e) L'intelligence artificielle de nos jours	16
B) LES DIFFERENTES FORMES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.....	18
1) <i>L'intelligence artificielle faible</i>	18
a) Le machine learning.....	19
b) Les réseaux de neurones.....	21
c) Le deep learning.....	24
1- Architecture d'un réseau de neurones complexe.....	24
2- Entraînement d'un réseau de neurones complexe.....	25
2) <i>L'intelligence artificielle forte</i>	27
C) APPLICATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS NOTRE VIE QUOTIDIENNE.....	28
1) <i>L'agriculture</i>	29
2) <i>Le transport</i>	29
3) <i>L'éducation</i>	30
4) <i>L'armée</i>	30
5) <i>Les finances</i>	31
6) <i>Autres domaines</i>	31
II) ATOUTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN SANTE.....	32
A) L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DU CABINET MEDICAL A L'OFFICINE	33
1) <i>Outil de consultation médicale</i>	33
2) <i>Aide à la prescription médicale</i>	34
3) <i>Conseils aux patients</i>	35
4) <i>Suivi des patients</i>	36

5) <i>E-commerce</i>	37
6) <i>Gestion des stocks</i>	40
7) <i>Différentes applications de l'IA en officine</i>	41
B) <i>L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN INDUSTRIE</i>	42
1) <i>Les différentes étapes du développement d'un médicament</i>	42
a) Compréhension de la maladie et sélection de la cible thérapeutique	43
b) Génération des têtes de série	43
c) Optimisation des têtes de série	43
d) Développement non clinique.....	44
e) Développement clinique	44
2) <i>Utilisation de l'intelligence artificielle dans le développement d'un médicament</i>	47
a) Amélioration de la recherche primaire.....	47
b) Réduction du temps de criblage des molécules	47
c) Optimisation des essais cliniques	47
d) Diminution des coûts de recherche et de développement	48
C) <i>L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE A L'HOPITAL</i>	49
1) <i>La pharmacie hospitalière à l'ère de l'IA</i>	49
2) <i>L'IA : un allié pour la validation biologique</i>	50
3) <i>L'aide au diagnostic médical</i>	51
a) Endocrinologie	51
b) Oncologie	52
c) Infectiologie	53
d) Neurologie.....	54
e) Autres domaines médicaux.....	55
4) <i>L'analyse des clichés médicaux</i>	56
a) Automatisation de la détection et de la prédiction des maladies.....	56
b) Segmentation automatique des images	58
c) Diagnostic de précision	58
d) Aide à la prise de décision.....	58
5) <i>Intelligence artificielle et littérature biomédicale</i>	59
a) Fouille textuelle.....	59
b) Génération de rapports médicaux.....	60
c) Détection d'erreurs.....	60
6) <i>La chirurgie 2.0</i>	61
7) <i>Vers une médecine personnalisée</i>	62
D) <i>UTILISATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LES INSTITUTIONS NATIONALES DE SANTE</i>	64
1) <i>Pharmacovigilance</i>	64
2) <i>Addictovigilance</i>	65
3) <i>Epidémiologie</i>	66
E) <i>DIVERSES APPLICATIONS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN SANTE</i>	67
1) <i>L'e-santé</i>	67

a) Définir l'e-santé.....	67
b) Quelques applications d'e-santé.....	67
2) <i>La robotique</i>	70
III) REGLEMENTATION ET LIMITES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	71
A) REGLEMENTATION	71
1) <i>La Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés</i>	72
a) Présentation de la CNIL.....	72
b) Rôle d'information de la CNIL	73
c) L'intelligence artificielle et la CNIL.....	74
2) <i>La Loi pour une République Numérique</i>	75
3) <i>Le Règlement Général sur la Protection des Données</i>	76
a) Les principales mesures du RGPD	76
b) Le RGPD en officine.....	77
4) <i>Autres mesures de réglementation de l'intelligence artificielle</i>	79
a) Charte éthique européenne d'utilisation de l'IA dans la justice	79
b) La Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'IA	79
B) LIMITES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	80
1) <i>Limites scientifiques</i>	80
a) Causes économiques.....	80
b) Causes techniques.....	80
2) <i>Limites éthiques</i>	81
a) Protection des données personnelles	81
b) Sécurité des patients.....	82
c) Fiabilité de l'intelligence artificielle	84
CONCLUSION.....	85
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	86
BIBLIOGRAPHIE	87

Introduction

En 1976, le premier ordinateur grand public est mis sur le marché par deux pionniers de l'informatique, Steve Jobs et Steve Wozniak, c'est le lancement d'Apple. Une année auparavant, Microsoft fut créé par Bill Gates. Pendant 20 ans, de nombreux logiciels et processeurs verront le jour jusqu'à l'avènement du moteur de recherche Google en 1998. Entre temps, Amazon, une entreprise de commerce électronique voit le jour en 1994. Au début du XXIème siècle, un jeune informaticien crée Facebook, le premier réseau social au monde. En seulement 40 ans, les GAFAM (Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft) ont révolutionné le monde.

Durant ces années, l'intelligence artificielle (ou IA) s'est également considérablement développée. Après des débuts poussifs au milieu du XXème siècle, l'utilisation de l'IA a explosé au début des années 2000 au point de la retrouver dans la plupart des appareils multimédias que nous utilisons aujourd'hui.

On l'a imaginé dans les films de science-fiction comme « I Robot » du réalisateur Alex Proyas où une intelligence artificielle tente de prendre le contrôle du monde, ou encore, en plus sympathique, dans les films de la franchise Marvel, « Iron Man » où JARVIS (comprenez Just A Rather Very Intelligent System) aide le fantasque Tony Stark à vaincre ses ennemis.

On la retrouve aujourd'hui dans la vie réelle dans le commerce en ligne, les appareils utilisant la reconnaissance vocale, dans la traduction automatique, les chatbots, les voitures autonomes... Elle peut également être utilisée dans des domaines aussi différents que l'aide médicale au diagnostic, la réduction des consommations d'énergie, la prévention, ou l'éducation. L'intelligence artificielle touche donc tous les secteurs d'activités et possède des champs d'application quasiment illimités (1).

Les dernières phases d'emballement de la recherche en IA font qu'aujourd'hui le sujet ne se cantonne plus seulement au monde scientifique, mais est devenu un phénomène présent dans notre quotidien. Les investissements atteignent des sommes astronomiques, notamment en Chine et aux Etats-Unis. Les pays, leaders dans le domaine de l'intelligence artificielle, risquent à terme de contrôler les systèmes mis en place à travers le monde, en mettant ainsi en cause l'indépendance des pays n'ayant pas les mêmes moyens financiers.

Mais concrètement, qu'est-ce que l'intelligence artificielle ? Elle se définit comme l'ensemble des théories et des techniques développant des programmes informatiques complexes capables de simuler certains traits de l'intelligence humaine comme le raisonnement ou l'apprentissage (2). Ces facultés habituellement associées à l'être humain peuvent donc être améliorées grâce à la technologie afin de permettre le traitement de grandes quantités de données, le discernement de modèles indétectables par un humain ainsi que l'aptitude à comprendre ces modèles. L'interaction continue avec l'homme permet également d'améliorer sans cesse les performances de l'IA.

L'intelligence artificielle fonctionne notamment grâce à l'utilisation de l'apprentissage supervisé, du machine learning ou encore du deep learning. Autant de mots compliqués qu'il va falloir définir simplement. L'IA actuelle repose sur l'alliance de trois éléments : une énorme quantité de datas (données), une puissance informatique très importante pour pouvoir exploiter ces données, et de nombreux algorithmes permettant de développer la capacité d'apprentissage.

Il sera, ici, question d'expliquer de manière claire et concise ce qu'est l'intelligence artificielle, son histoire, et ses champs d'application. Seront ensuite développés, les (très) nombreux apports de l'IA dans le domaine de la santé, du cabinet du médecin généraliste à l'officine, mais également à l'hôpital, dans les laboratoires pharmaceutiques (pour la recherche et le développement de nouveaux médicaments) ou dans les institutions nationales de santé. Enfin, il est impossible de parler d'intelligence artificielle sans mettre en lumière les limites, encore nombreuses, de cette technologie, ainsi que des lois et directives qui la régulent.

I) L'intelligence artificielle

A) Histoire de l'IA

1) Alan Turing, pionnier de l'intelligence artificielle

L'un des premiers à s'être intéressé à ce domaine est l'anglais Alan Mathison Turing. Né à Londres le 23 juin 1912, ce mathématicien et cryptologue britannique a, pendant toute sa carrière, été l'auteur de nombreux travaux qui posèrent les bases de l'informatique. Il a fait ses classes dans les meilleures écoles du monde notamment le très sélectif King's College de Cambridge (1931-1934) ou encore la prestigieuse université de Princeton (1936-1938) aux Etats-Unis (3). Durant ces années, Turing s'intéressa à la mécanique quantique, aux probabilités ou encore à la logique. Cela lui permit d'imaginer le concept d'une machine à calculer universelle pouvant résoudre des problèmes à l'aide d'un algorithme. C'est la naissance de la machine de Turing dont les ordinateurs et les automates d'aujourd'hui sont des réalisations concrètes (4). Alan Turing peut donc être considéré comme le fondateur de l'informatique.

Pendant la Seconde Guerre Mondiale, Turing va aider les Alliés à s'imposer sur les mers et océans après avoir mis au point des machines et des méthodes pour percer les codes d'Enigma, une machine électromagnétique permettant aux forces armées allemandes de transmettre à leurs U-Boot, leurs sous-marins, des messages indéchiffrables par les Alliés car changeant chaque jour de code. C'est en collaboration avec d'autres mathématiciens, chercheurs et autres joueurs d'échecs que Turing conçut une machine électromécanique capable de trouver les clés permettant de décrypter les messages allemands. Son approche était de mettre en œuvre une logique basée sur la connaissance du fonctionnement interne d'Enigma et d'utiliser les erreurs des chiffreurs allemands pour découvrir le réglage quotidien des machines Enigma, comme la disposition et le réglage initial des rotors ou encore les permutations des fiches du tableau de connexions, tout cela parmi des millions de réglages disponibles (4). Pour chaque réglage possible, la machine faisait une chaîne de déductions logiques basées sur les mots probables et à chaque possible contradiction, la machine écartait le réglage et passait au réglage suivant. Cela rejetait de nombreux réglages et le peu qui restait était examiné de près. La « Bombe » créée par Turing permettait de faire le travail quotidien de plus de dix mille personnes. Cela permit à la Grande-Bretagne de prendre l'avantage dans les batailles d'Angleterre, de Libye ou encore de l'Atlantique puisque la Kriegsmarine (la marine allemande), la Luftwaffe (l'aviation) et la Wehrmacht (l'armée de terre) communiquaient également entre-eux par ce système.

En 1943, Alan Turing participa également aux recherches qui contribuèrent à percer les codes Fish qui permettaient aux états-majors allemands de communiquer entre-eux. Il permit de nombreuses avancées importantes dans les domaines de la transmission pendant la durée de la guerre.

A la fin de la guerre, Turing part travailler pour le laboratoire national de physique britannique à la conception des premiers ordinateurs. Il va également s'intéresser à la physiologie et à la biologie et en particulier aux connexions neuronales en commençant à comparer les ordinateurs aux êtres humains. C'est le début de l'intelligence artificielle.

La carrière d'Alan Turing va cependant tourner court. Bien qu'il n'ait jamais caché son homosexualité, il va être inculpé, en 1952, d'indécence manifeste et de perversion sexuelle. Turing aura le choix entre l'incarcération et la castration chimique. Il choisit cette dernière option et commence un traitement d'un an. Malgré cela, Turing est écarté des plus grands projets scientifiques et gouvernementaux.

Le 7 juin 1954, Turing est retrouvé mort chez lui, l'écume aux lèvres après avoir probablement croqué dans une pomme préalablement trempée dans du cyanure. Une légende y voit l'origine du logo de la firme Apple. Près de 60 ans après sa mort, la reine Elizabeth II le reconnaîtra comme héros de guerre et le graciera à titre posthume le 24 décembre 2013. Le gouvernement britannique a reconnu comme injuste et discriminatoire sa condamnation et salue le génie de cet homme qui a permis de sauver des milliers de vie. Depuis 1966, le prix Turing, considéré comme le prix Nobel de l'informatique, récompense une personne ayant apporté une contribution d'une importance technique majeure et durable au monde de l'informatique (5). En 2015, le personnage d'Alan Turing a été porté à l'écran par l'excellent Benedict Cumberbatch dans le film oscarisé « Imitation Game ».

2) Le test de Turing

a) Principe du test de Turing

Le test de Turing (ou jeu des imitations) fut inventé en 1950 par Alan Turing. Il aborda pour la première fois ce sujet dans son article *Computing Machinery and Intelligence* (6). Il propose de réfléchir à la question : « Les machines peuvent-elles penser ? ». Mais il faudrait pour cela commencer par définir les termes « machine » et « penser », et la tâche semble quasiment impossible. Turing a donc proposé de remplacer cette question par un procédé expérimental.

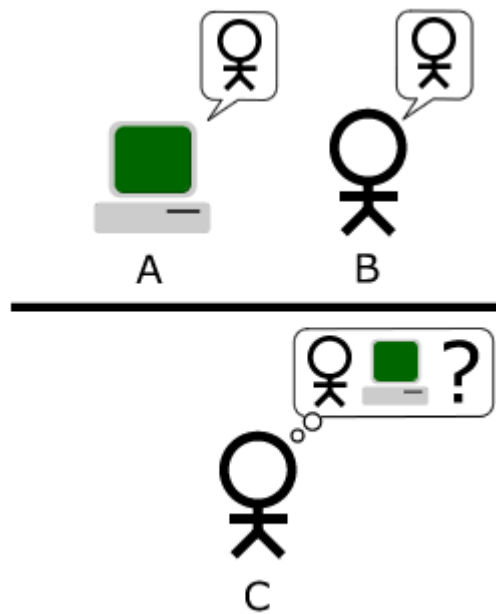


Figure 1 : Illustration du Test de Turing (7)

Ce test permet de voir si une machine est capable de montrer des signes d'intelligence humaine. Son principe est plutôt simple. Il faut mettre en confrontation verbale un humain avec un ordinateur et un autre humain, et cela, à l'aveugle. Si l'être humain qui engage les conversations n'est pas capable de dire lequel des interlocuteurs est un ordinateur, alors on peut considérer que ce dernier a passé le test avec succès (Figure 1). Pour que le test reste simple et universel, la conversation reste limitée à des messages textuels entre les protagonistes.

Alan Turing affirmait que les ordinateurs avec une capacité d'au moins 128 Mo pourraient tromper environ 30% des juges humains pendant un test d'une durée de 5 minutes.

Le premier programme à avoir passé le test de Turing, fut créé en 1966 par Joseph Weizenbaum et se nommait ELIZA (8). Ce programme était capable d'analyser un texte à partir de mots-clés puis de formuler une réponse cohérente. Si ELIZA ne trouvait pas de mots-clés, le programme répondait alors de manière générique. Six ans plus tard, PARRY, un programme similaire à ELIZA, fut le second à passer le test de Turing.

Aujourd'hui, de très nombreux programmes comme les chatbots, ces agents conversationnels, sont capables de tromper les êtres humains. Certains de ces programmes sont utilisés de manière malhonnête et cherchent à convaincre certains utilisateurs d'Internet à dévoiler des informations sur leurs identités ou les incitent à visiter des sites Internet qui contiennent des virus visant à collecter des données personnelles.

b) Forces et faiblesses du test de Turing

Il est difficile de définir ce qu'est l'intelligence artificielle, mais, malgré ses défauts, ce test permet de mettre en place un étalon de mesure. Il permet également de mesurer certains critères importants de l'IA. En effet, pour réussir ce test, elle doit utiliser le langage naturel, la raison, la connaissance ou encore l'apprentissage. De plus, ce ne sont pas les connaissances techniques de l'IA (traitement de l'information, accumulation de savoir) qui sont évaluées par le test de Turing mais surtout la faculté à faire preuve d'empathie car Turing avait pour idée que l'empathie et l'intelligence émotionnelle seraient les facteurs clés permettant de développer les intelligences artificielles bienveillantes (8).

Ne pas mesurer l'intelligence même de l'IA est aussi une des faiblesses de ce test. En effet, si un programme se montre plus intelligent qu'un être humain, il a de fortes chances d'échouer au test car les examinateurs vont penser que c'est une machine. L'intelligence ou la naïveté de l'examineur peut également influencer les résultats du test. Ces failles font que des chercheurs pensent que le test de Turing aurait plus tendance à ralentir la recherche dans le domaine de l'IA. En effet, de nombreuses intelligences artificielles n'ont pas à tromper l'être humain pour se montrer efficaces.

3) L'intelligence artificielle de Turing à aujourd'hui

Contrairement à l'informatique, l'intelligence artificielle n'a véritablement impacté notre société que très récemment. Les premiers programmes, dans les années 1950, montraient pourtant d'impressionnantes capacités.

a) L'âge d'or de l'IA

Le terme d'intelligence artificielle est utilisé pour la première fois en 1956 à la conférence de Dartmouth en présence des plus grands scientifiques de l'époque dans ce domaine. A compter de cette date, les projets en intelligence artificielle fleurissent, stimulés par les débuts de l'informatique (9).

Les premières applications de l'IA sont principalement liées aux mathématiques et à la géométrie (résolution de problèmes, démonstration de théorèmes). Le premier programme, appelé « Logic Theorist », créé en 1956 par Allen Newell et Herbert Simon, était capable de démontrer des théorèmes mathématiques de manière simple. En 1957, Frank Rosenblatt invente le premier programme d'apprentissage grâce à un réseau de neurones simple, cette invention fut appelée le « Perceptron ». Durant ces années, motivée par la guerre froide entre les Etats-Unis et l'URSS, l'IA se focalise principalement sur la traduction automatique, notamment sur la traduction de l'anglais vers le russe et inversement.

En 1959, Simon et Newell, encore eux, créent le « General Problem Solver » (ou GPS) capable de résoudre tous les problèmes, qu'ils soient d'ordre mathématiques ou géométriques (Figure 2). Dans les années qui suivirent, ils s'essayèrent à perfectionner ce système pour créer un système informatique se rapprochant du système cognitif de l'être humain, mais le programme n'a malheureusement jamais abouti (10).

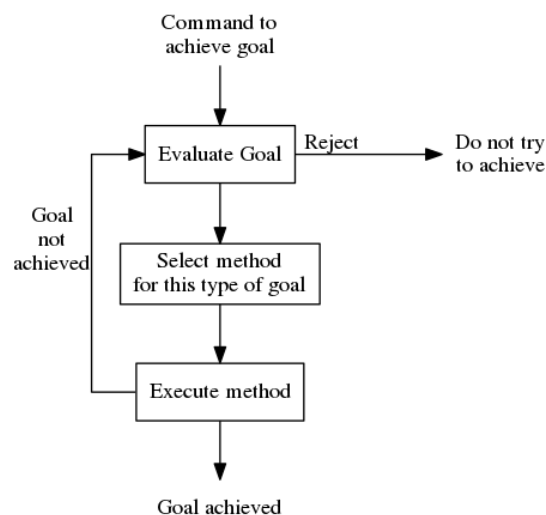


Figure 2 : Illustration du fonctionnement simplifié du GPS (11)

L'IA se répand également dans la culture populaire, notamment par le cinéma comme en 1968 dans le film « 2001, l'odyssée de l'espace », où l'on y voit, HAL, un ordinateur intelligent capable de piloter un vaisseau spatial.

b) L'hiver de l'IA

Malheureusement, les problèmes à surmonter pour développer des systèmes toujours plus performants se sont avérés bien plus compliqués que prévus et les progrès ont alors fortement ralenti. Les financements pour la recherche dans ce domaine furent suspendus dans les années 1970-1980, ce fut « l'hiver de l'IA » (12). L'IA sera rudement critiquée durant cette période, notamment à cause de l'échec du GPS mais aussi à cause des nombreuses erreurs commises par les traducteurs automatiques de l'époque. C'est également l'émergence des premières questions éthiques.

En 1972, le philosophe américain Hubert Dreyfus écrit le livre (« What Computers Can't Do ») où il critique et contredit toutes les hypothèses formulées par ses prédécesseurs. Pour lui, l'intelligence ne doit pas être réduite à un simple calcul et souligne l'importance des émotions et des ressentis du cerveau humain. Cette période permet de revoir les objectifs de l'IA à la baisse et de définir des projets plus réalistes.

Malgré ce gel des projets, d'importants programmes virent tout de même le jour au cours de cette période et des nouvelles méthodes de développement de l'IA furent testées. Ainsi, en 1974, c'est le début des premiers systèmes experts. Avec ces systèmes, les machines effectuent les mêmes analyses que des experts humains dans des domaines bien précis comme le diagnostic. C'est le cas avec MYCIN (13), un programme conçu pour l'aide au diagnostic des maladies infectieuses du sang et au diagnostic des méningites qui donnera des résultats très satisfaisants.

c) La renaissance de l'IA

A partir de 1980, l'intelligence artificielle effectue un retour en force avec le développement des systèmes experts dans de nombreux domaines (finances, santé, industrie, ...) (9). Ces programmes simples et faciles à mettre en œuvre seront très utiles car ce sera la première fois que l'on trouvera une application pratique à l'IA. Plus d'un milliard de dollars seront donc injectés dans la recherche et le développement de l'intelligence artificielle durant cette période.

C'est également pendant ces années que vont se développer les algorithmes d'apprentissage permettant la résolution de problèmes plus complexes qu'auparavant. C'est surtout le développement de réseaux neuronaux qui va très fortement contribuer au second boom de l'IA.

d) La seconde crise de l'IA

A la fin des années 1980, le développement des ordinateurs personnels des firmes comme Apple ou IBM fait que les investissements se concentrent plutôt dans l'informatique classique. Les systèmes experts créés dix ans auparavant ont désormais un coût d'entretien beaucoup trop élevé et peuvent en plus faire d'énormes erreurs lorsque des paramètres sortent des normes traditionnelles. Les résultats espérés n'ont pas été atteints ou l'ont été, mais trop tardivement. Comme pour lors des années 1950-1960, les objectifs fixés étaient beaucoup trop importants (9).

Au cours de ces années, la recherche en intelligence artificielle continue pourtant à avancer. Elle fait peau neuve avec une approche totalement inédite basée essentiellement sur l'usage de l'IA en robotique. En effet, de nombreux chercheurs considèrent que pour parler d'une réelle intelligence, une machine doit avoir conscience du corps qu'elle possède car les aptitudes senso-motrices seraient essentielles aux capacités les plus importantes des systèmes d'IA. On parle alors d'« embodiment » qui est le fait de mettre une intelligence artificielle dans un corps dans lequel elle pourra penser (cognition), bouger (corps et comportement) et sentir (émotions).

e) L'intelligence artificielle de nos jours

C'est finalement grâce à l'augmentation de la puissance de calcul des nouveaux ordinateurs et à l'arrivée d'Internet et du Big Data que l'intelligence artificielle va exploser de la fin des années 1990 jusqu'à aujourd'hui. La première sortie médiatique de l'IA se fera en 1997, avec l'élaboration de Deep Blue, un supercalculateur joueur d'échecs créé par IBM, capable de battre le champion du monde en titre des échecs, Garry Kasparov. Durant les années qui suivirent, d'autres programmes d'intelligence artificielle seront au centre de toutes les attentions en réalisant des prouesses ou en battant des records. Ce développement exponentiel suit la loi de Moore (14). Cette dernière développe l'idée que la vitesse et la capacité de mémoire des différents ordinateurs doublent tous les deux ans (Figure 3).

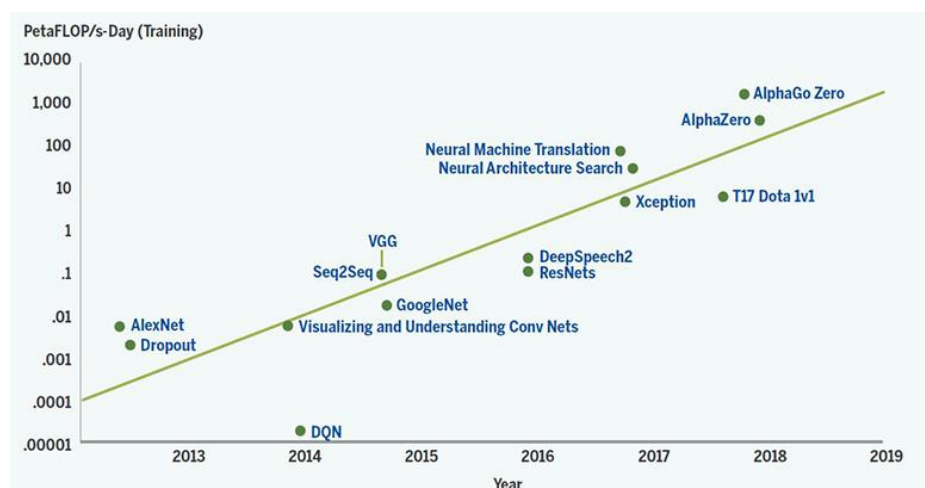


Figure 3 : Graphique illustrant la loi de Moore au cours des dernières années (14)

La notion d'agent intelligent est apparue au cours des années 1990. Il s'agit d'une machine autonome capable de percevoir son environnement à l'aide de capteurs mais également d'interagir avec celui-ci à l'aide d'effecteurs dans le but d'atteindre des objectifs. Pour ce faire, un agent intelligent est capable d'apprendre ou d'utiliser ses connaissances. L'intelligence artificielle sera alors redéfinie comme l'étude des agents intelligents afin de ne plus étudier seulement l'intelligence humaine mais toutes les formes d'intelligence.

Dans les années 2000, la loi de Moore poursuit sa route et le monde vit un véritable boom informatique. Les êtres humains, avec l'essor d'Internet, s'équipent avec des ordinateurs personnels ou des smartphones (9). Et dès le début des années 2010, un super ordinateur du nom de Watson, créé par IBM, s'illustre à la télévision américaine en battant les deux plus grands champions de Jeopardy!. Quelques années plus tard, c'est Alphago de Google (un algorithme de machine learning), qui bat le champion européen du jeu de go, un jeu de stratégie aux milliards de possibilités.

Au cours du XXIème siècle, la puissance de calcul des ordinateurs, leur capacité de stockage et l'accumulation des données augmentant toujours de manière exponentielle, permettent l'amélioration de la performance des algorithmes. Les scientifiques vont alors développer de nouveaux procédés d'apprentissage pour l'IA tels que le machine learning ou le deep learning. Ces nouvelles méthodes d'apprentissage, nourries par de monstrueux flux de données, dépassent de nombreux records ce qui pousse beaucoup d'entreprises à suivre cette voie.

Le fait de développer l'IA à partir de données propulse certaines entreprises devant toutes les autres. C'est le cas de Facebook qui permet à ses utilisateurs d'utiliser la traduction simultanée ou encore la reconnaissance faciale avec l'algorithme Deep Face qui égale presque les performances humaines (9). On retrouve également l'intelligence artificielle dans les suggestions des moteurs de recherche comme Google. Les plus grosses firmes mondiales comme Amazon, Microsoft, Apple ou encore Tesla ne sont pas en reste.

Aujourd'hui, l'intelligence artificielle permet de conduire des voitures, jouer à des jeux vidéo, créer des musiques ou des œuvres d'art, imaginer une partie manquante d'une photographie, voir à travers un mur ou encore interpréter une radiographie encore mieux qu'un médecin. Au XXème siècle, les premiers films de science-fiction comme « Blade Runner », « Tron » ou encore « Matrix » avaient ouvert la voie à de multiples hypothèses sur notre futur sans pour autant imaginer que de tels scénarios pourraient être approchés quelques dizaines d'années plus tard.

Les champs d'applications de l'intelligence artificielle sont immenses et prometteurs dans de nombreuses disciplines mais de nouvelles questions, notamment éthiques, sont plus que jamais d'actualité afin de réguler son développement.

B) Les différentes formes d'intelligence artificielle

Il faut comprendre que pour avancer, l'IA utilise des algorithmes et des processus faits d'ensembles d'opérations et de règles données pour un seul calcul. Il s'agit donc d'une sorte de mode d'emploi permettant de réaliser une tâche bien précise. Ces algorithmes permettent de distinguer deux sortes d'intelligences artificielles qui sont les IA faibles et fortes d'où se dégagent d'autres formes ou sous-ensembles d'IA comme le machine learning ou encore le deep learning.

1) L'intelligence artificielle faible

Comme son nom l'indique, l'IA faible est celle qui a le fonctionnement le plus simple. Elle est très différente de l'intelligence humaine et ne fait que simuler le raisonnement. Elle reproduit un comportement spécifique, défini à l'avance, le plus précisément possible, sans aucune forme d'improvisation quelle qu'elle soit. Ici, l'IA ne comprend pas ce qu'elle fait. Ces IA sont néanmoins très performantes dans leurs domaines mais restent cantonnées dans ces derniers car elles sont trop spécialisées.

Un des exemples les plus couramment utilisé est la comparaison entre l'oiseau et l'avion. En effet, les deux sont capables de voler, certes en utilisant des méthodes différentes mais avec un résultat (le déplacement par les airs d'un endroit à un autre) quasiment identique (15). Il se passe exactement la même chose entre le cerveau de l'être humain et l'intelligence artificielle faible. Le programme ELIZA, simule l'intelligence humaine en dialoguant avec l'être humain par des phrases simples. Son créateur, Joseph Weizenbaum, avait mis en garde, dans son livre « Computer Power and Human Reason » (16), en déclarant que même si ces programmes paraissaient intelligents, en fait, ne l'étaient pas.

Ce type d'intelligence artificielle, dite descendante, a connu un très fort développement à ses débuts dans les années 1960-1970. C'est, en effet, ce genre d'IA que l'on retrouve dans les systèmes experts qui sont encore très utilisés aujourd'hui, notamment dans le monde de l'entreprise, pour résoudre des problèmes et aider à la prise de décisions. Ils fonctionnent sur le principe qu'un fait va respecter ou non une règle, ce qui permettra au système de donner une conclusion logique.

On retrouve également l'IA faible dans de nombreux domaines déjà présents dans notre quotidien, comme les jeux vidéo, les logiciels de traduction, les moteurs de recherche, les chatbots, les systèmes de recommandations personnalisés, les voitures autonomes ou encore dans certaines méthodes de diagnostic médical (17). Le machine learning et le deep learning sont deux sous-ensembles de l'intelligence artificielle faible.

a) *Le machine learning*

Le machine learning ou apprentissage automatique est un sous-domaine de l'intelligence artificielle se basant sur une approche statistique. On va prendre des données qui seront des observations particulières (données provenant de différents appareils, applications, ...) et on va les étudier pour découvrir un lien entre elles afin de généraliser et de réaliser des prédictions (Figure 4). On a des données sous la forme d'une entrée X et d'une sortie Y que l'on va montrer à un algorithme qui va essayer de faire le lien entre ces données (18). Dans le cadre d'un apprentissage supervisé, on entraîne les algorithmes avec des données étiquetées (des exemples qui sont bien définis). L'algorithme essaiera alors de faire des extrapolations. C'est ici une explication très basique de ce qu'est un algorithme de machine learning avec un apprentissage supervisé.

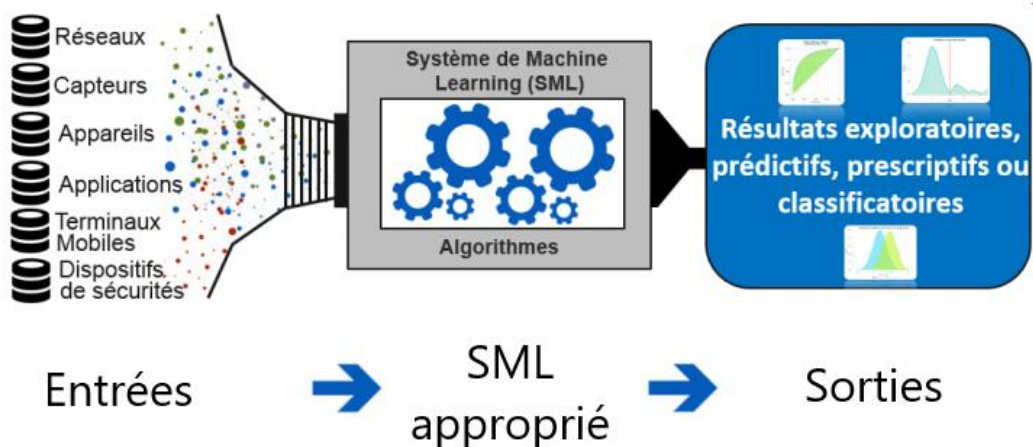


Figure 4 : Illustration du fonctionnement d'un système d'apprentissage automatique (18)

L'apprentissage non supervisé, quant à lui, n'a pas besoin de données étiquetées. On n'a alors aucune idée des résultats que l'algorithme va proposer à la fin. L'objectif de ce type d'apprentissage se résume à découvrir des similitudes dans des données afin de les regrouper. Il est utilisé pour trouver des règles à l'intérieur des données. C'est ce dernier type d'apprentissage qui est, par exemple, utilisé par Amazon. Lorsque l'on achète un produit sur ce site, un algorithme nous propose aussitôt des recommandations (objets complémentaires ou similaires) pour accompagner notre achat (18).

Le dernier système de machine learning existant est l'apprentissage par renforcement (Figure 5). Cela consiste, pour un agent autonome comme un robot, à apprendre les meilleures actions à prendre, et ce, à partir d'expériences, dans le but d'optimiser une récompense quantitative au cours du temps (19). L'apprentissage par renforcement est notamment utilisé par AlphaGoZero à qui on a appris les règles du jeu de go et qui s'est entraîné en jouant contre lui-même, après 3 jours d'apprentissage, AlphaGoZero a ainsi battu AlphaGo.

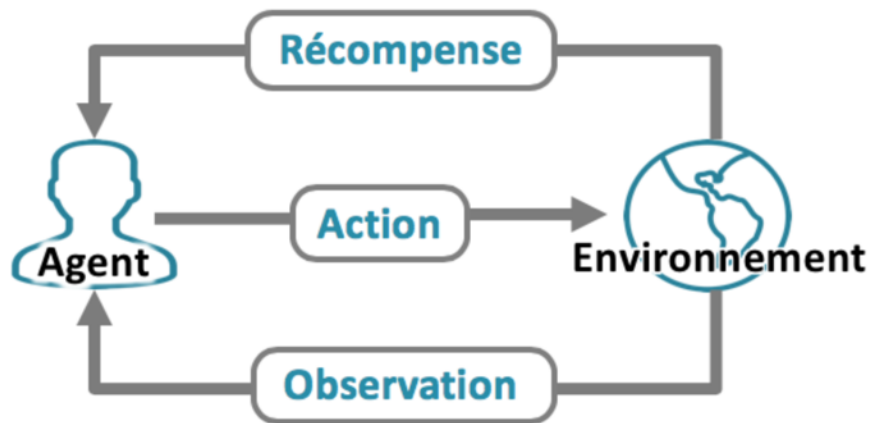


Figure 5 : Illustration du fonctionnement d'un système d'apprentissage par renforcement (19)

Pour ces différents types d'apprentissage, il existe de nombreux algorithmes différents. Le choix de l'algorithme se fait en fonction de la vitesse avec laquelle on veut les résultats, en fonction de la précision des prévisions, de la durée de l'apprentissage, de la quantité de données nécessaires à l'apprentissage et de la facilité de la mise en œuvre du système.

Les algorithmes les plus populaires sont la régression linéaire (le plus simple à comprendre), la régression logistique, les réseaux de neurones, la méthode du plus proche voisin, les machines à vecteur de support, les réseaux bayésiens, le regroupement hiérarchique, les forêts aléatoires d'arbres de décision, ou encore le clustering (partitionnement des données) (Figure 6).

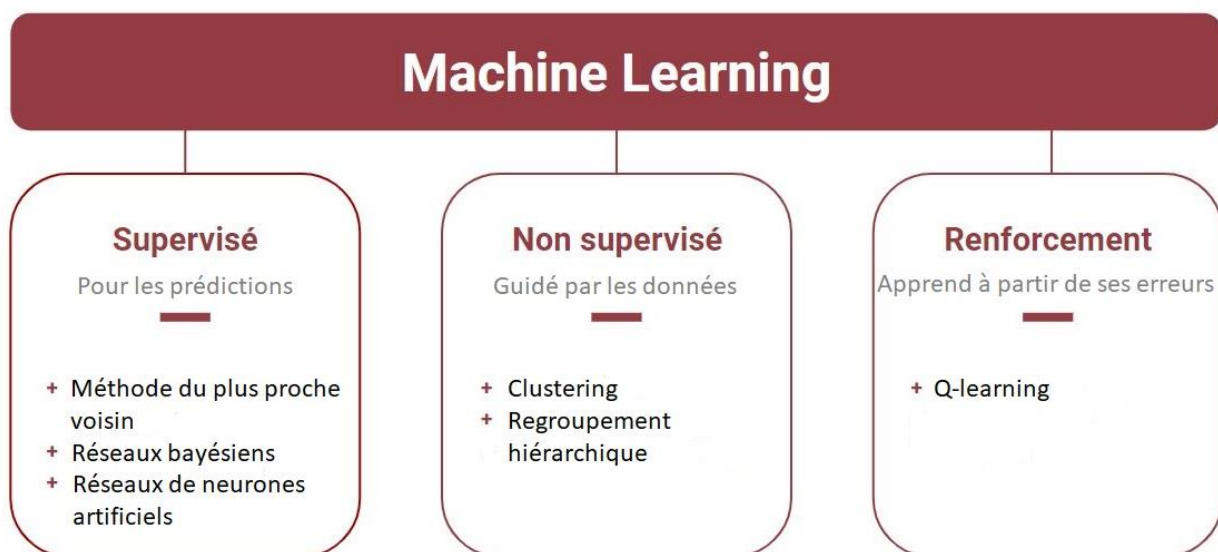


Figure 6 : Schéma illustrant les différents types d'apprentissage automatique et les principaux algorithmes utilisés

On retrouve certains de ces algorithmes de machine learning sur Facebook. En effet, le fil d'actualités de Facebook ne nous montre pas tout ce à quoi nous sommes abonnés. Il choisit certaines actualités et nous présente ces dernières dans un ordre précis. Derrière cela, on a un algorithme de machine learning qui va essayer de déterminer quelles sont les actualités les plus susceptibles de nous intéresser. Pour ce faire, l'algorithme prend tout un tas de données sur la nature du post, la date, la personne qui l'a posté, le sujet de la nouvelle, etc... et va, in fine, déterminer si cela va nous intéresser ou non (18).

Le machine learning peut également être utilisé dans la reconnaissance d'image. On aura en données d'entrée, des images, et l'algorithme devra deviner en sortie à quoi correspondent ces images. Pour ce faire il va falloir créer un algorithme capable de lire de très nombreuses données d'entrée et de déterminer énormément de liens entre toutes ces données afin d'obtenir la bonne sortie. C'est afin de répondre à ce problème qu'ont été créés les réseaux de neurones.

b) Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont un sous-ensemble du machine learning. Ce sont des fonctions mathématiques qui vont chercher à imiter le fonctionnement des neurones humains. Le neurone de l'être humain est une cellule que l'on possède dans notre système nerveux. C'est le messenger de l'influx nerveux composé d'un corps cellulaire ou soma, d'un axone et de dendrites (20). Les neurones sont liés les uns aux autres par ces terminaisons nerveuses que l'on appelle des axones (Figure 7). C'est par ces axones et en formant des synapses que les neurones communiquent les uns avec les autres à l'aide de signaux.

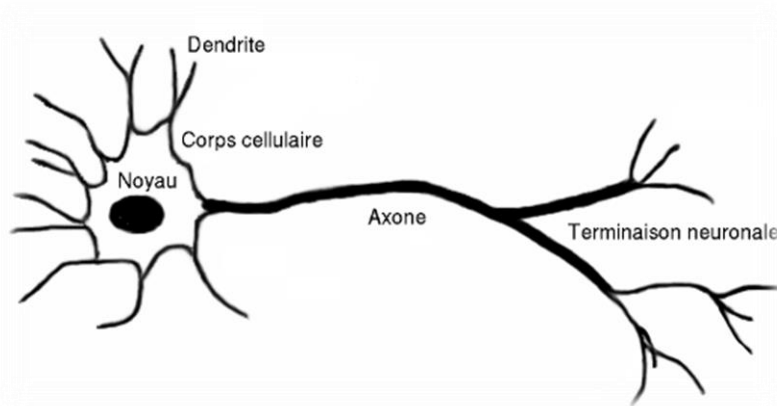


Figure 7 : Schéma d'un neurone humain (20)

Un neurone va recevoir ou non un signal électrique des neurones qui lui sont connectés, et en fonction des signaux, va décider ou non d'envoyer lui-même un signal à travers son axone. L'idée des neurones artificiels est de mimer ce comportement à l'aide d'une fonction mathématique.

Ces neurones artificiels sont des algorithmes qui vont mettre en relation des entrées X avec une sortie Y . Prenons l'exemple d'un neurone artificiel avec trois entrées X_1 , X_2 et X_3 . Le neurone va faire la somme de ces trois entrées en donnant un coefficient (un poids) à chacune des entrées (21). Cela nous donne une fonction $p_1X_1 + p_2X_2 + p_3X_3$ qui sera supérieure ou inférieure à un seuil s . Si la somme des entrées est supérieure à ce seuil déterminé à l'avance, le neurone va envoyer 1 en sortie et déclenchera l'activation du neurone et la transmission du signal. Au contraire si la somme est inférieure à ce seuil, il enverra 0 et rien ne se passera (Figure 8).

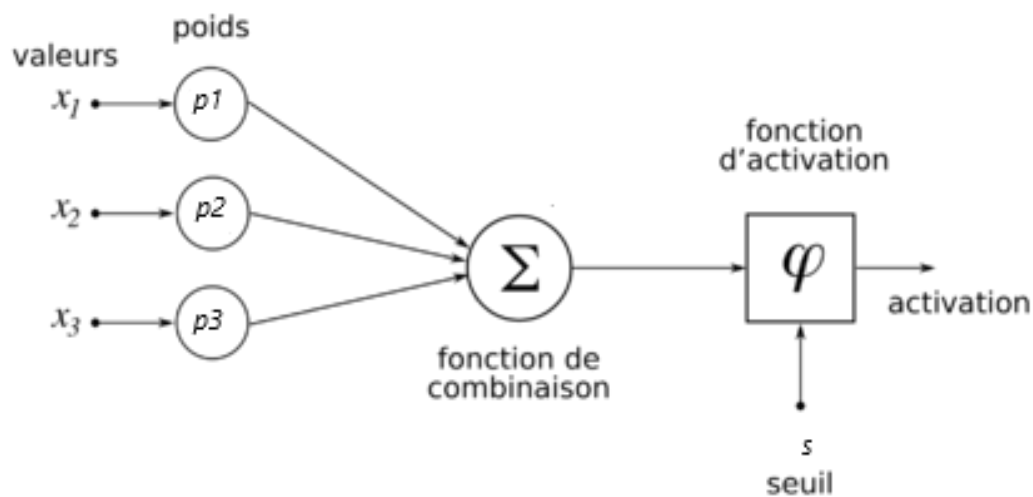


Figure 8 : Illustration du fonctionnement d'un neurone artificiel (22)

Un neurone seul ne suffira pas pour faire des exercices très compliqués, c'est pour cela que l'on pourra associer les neurones ensemble pour former des réseaux de neurones artificiels, capables de résoudre des problèmes beaucoup plus difficiles (Figure 9). Les réseaux de neurones sont polyvalents donc adaptables à de très nombreux types d'entrées ou de sorties. Lors de la phase d'apprentissage, on va présenter au réseau tout un tas d'entrées et de sorties, et on va faire varier leurs poids et leurs seuils jusqu'à ce qu'il fasse correctement le lien entre toutes les entrées et les sorties. Une fois notre réseau entraîné, il pourra alors faire des prédictions si on lui présente une nouvelle entrée (21).

Le cerveau humain contient plusieurs dizaines de milliards de neurones qui peuvent chacun avoir plusieurs milliers de synapses. Ceci n'est pas encore envisageable avec un réseau de neurones artificiels. Si le réseau contient trop de neurones, il y a alors beaucoup trop de poids et de seuils à faire varier afin de trouver les bons positionnements, la phase d'apprentissage devient alors presque impossible. En pratique, les scientifiques se limitent donc à des structures avec uniquement trois couches de neurones (les neurones d'entrées, les neurones de la couche intermédiaire, et les neurones de sortie).

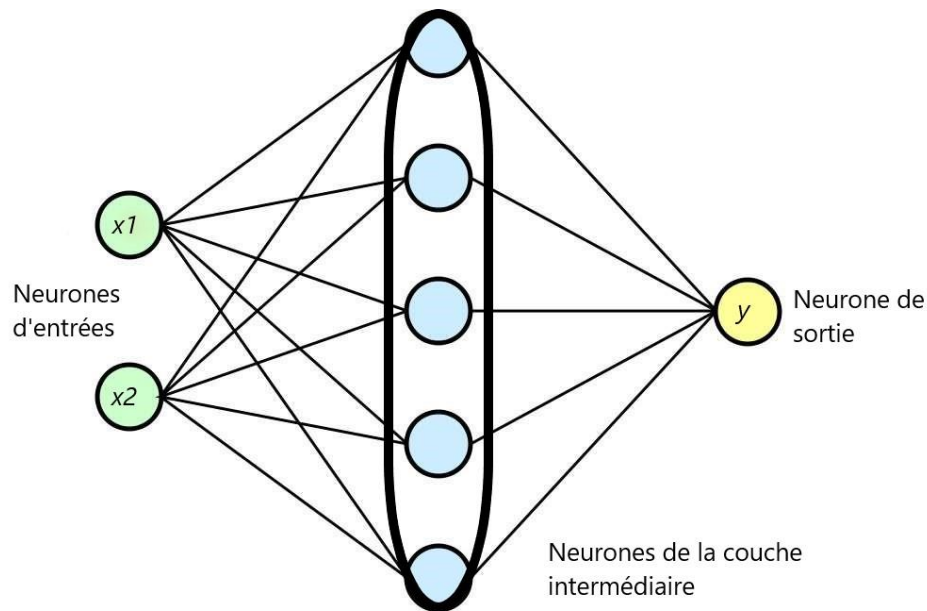


Figure 9 : Schéma d'un réseau de neurones (21)

Plus il y aura de neurones dans la couche intermédiaire, et plus le réseau deviendra puissant et polyvalent, mais il sera également plus compliqué à entraîner.

Les réseaux de neurones simples sont couramment utilisés dans la détection des fraudes sur Internet, mais en matière de reconnaissance d'image cela reste encore un peu limité car les données d'entrée sont trop importantes. Les chercheurs ont donc inventé une méthode simplifiée en créant des caractéristiques intermédiaires de l'image. Si on prend l'exemple de la reconnaissance de véhicules, on pourra regarder le nombre de roues, de surfaces vitrées, la couleur, le rapport hauteur/longueur pour déterminer s'il s'agit d'un bus, d'une voiture, d'une moto, d'un avion ou encore d'un train.

Les chercheurs ont donc créé un algorithme d'extraction d'images ayant pour objectif d'analyser des images brutes afin d'en retenir toutes les caractéristiques intéressantes, avant de transmettre ces données à un réseau de neurones. Le réseau entraîné sera ensuite capable de déterminer le véhicule en question puisque le nombre d'entrées ne sera pas trop importants (21). Il existe pourtant une possibilité de sauter cette étape d'extraction des caractéristiques de l'image ; c'est là que le deep learning entre en piste.

c) Le deep learning

Le deep learning ou apprentissage profond est réalisé avec un réseau de neurones contenant de nombreuses couches intermédiaires de neurones ce qui donne un réseau profond, d'où le nom de deep learning (23). C'est là encore un sous-ensemble du machine learning. Concernant toujours la reconnaissance d'image, on va donner l'image brute au réseau qui va l'analyser et la reconnaître. Un des premiers à avoir fait du deep learning est un français, Yann Le Cun qui a créé le premier réseau de neurones nommé LeNet et qui a reçu le prix Turing en mars 2019 pour ses recherches dans ce domaine.

L'apprentissage profond, sur lequel travaillaient peu de chercheurs, est sortie de l'ombre subitement au début des années 2010, notamment grâce à l'amélioration des algorithmes. La puissance de calcul a également son rôle dans cette explosion du deep learning avec le progrès des processeurs des ordinateurs. Mais aujourd'hui, l'acteur majeur de ce succès c'est l'importante disponibilité des données avec le Big Data qui permet de nourrir le réseau lors de la phase d'apprentissage. Cela a notamment permis aux réseaux de neurones avec plusieurs couches de se développer considérablement et d'améliorer la reconnaissance d'images. Même si il arrive aux réseaux d'aujourd'hui de faire quelques erreurs, leurs performances demeurent tout de même spectaculaires.

1- Architecture d'un réseau de neurones complexe

Pour utiliser un système d'intelligence artificielle faisant de la reconnaissance d'image, il faut d'abord le créer puis entraîner ce système avec toutes les images mises à disposition. Les chercheurs vont, en premier lieu, créer un modèle de réseaux de neurones ou utiliser un modèle déjà existant.

Un réseau neuronal possède une architecture assez complexe (Figure 10). Dans ce réseau, une image d'entrée va suivre plusieurs étapes. La première est celle de convolution, c'est-à-dire la mise en valeur de caractéristiques bien choisies de l'image afin poser des sortes de filtres sur cette image. Cette opération se fait en mettant une matrice prédéfinie sur la matrice source de l'image d'entrée. Il existe plusieurs matrices de convolutions et chacune d'elles vise une caractéristique particulière de l'image. Cela conduit à la création de plusieurs images distinctes les unes des autres au niveau de la forme (24).

La seconde étape de l'image dans le réseau de neurones est celle de pooling. C'est la réduction des dimensions des images tout en gardant le maximum d'informations utiles. Ces deux premières étapes sont répétées jusqu'à ce que toutes les caractéristiques de l'image soient classifiées (forme, couleur, etc...).

La dernière étape dite connectée est simplement la mise en place d'un réseau de neurones classique à chacune des caractéristiques classifiées dans les étapes précédentes. Le réseau pourra alors donner, selon une certaine probabilité, la classification de l'image (véhicule, personne, animal, plante, etc...).

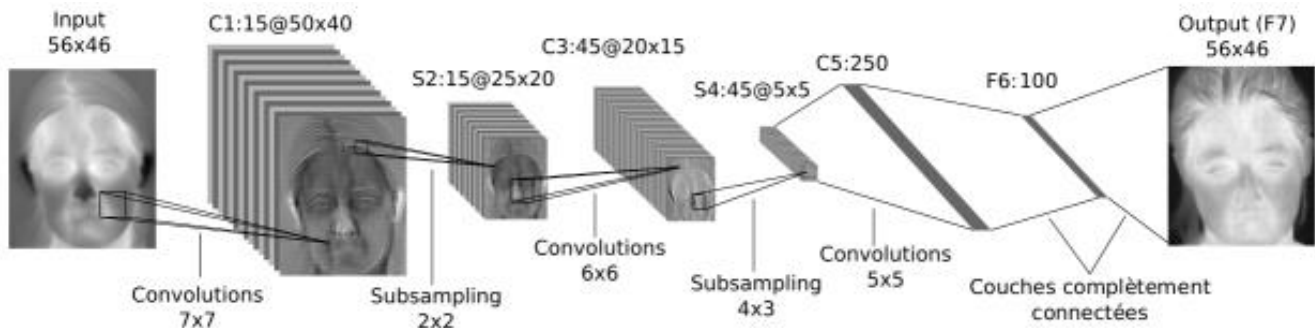


Figure 10 : Illustration de l'architecture du modèle de réseaux de neurones LeNet (24)

2- Entraînement d'un réseau de neurones complexe

L'entraînement d'un modèle de réseaux de neurones consiste à trouver puis à calculer la valeur de chacun de ses poids. Pour cela, on va présenter une image au réseau qui va dire à quelle classe cette image appartient. Les chercheurs connaissant la classe de toutes les images d'entraînement, ils peuvent alors vérifier la véracité du résultat et ensuite mettre à jour tous les poids du réseau avec une fonction perte appelée rétropropagation du gradient de l'erreur(24). Si l'on pose Y et Y' respectivement la sortie réelle et la sortie attendue du réseau, la fonction perte s'écrit : $E(Y, Y') = (1/2) * \text{square}(|Y - Y'|)$

Ce processus est répété avec chaque image de la base de données d'entraînement (25).

Une fois la mise à jour des poids terminée, on évalue le modèle avec des images appartenant à la base de données de validation, et que le modèle n'a jamais vu. Il est ensuite possible de calculer le taux de bonne classification et de déterminer la précision du modèle. Ce dernier peut être aussi performant sur les données d'entraînement que sur celles de validation, c'est le meilleur cas de figure. Il peut aussi très bien reconnaître les images d'entraînement et moins celles de validation, il faudra donc ajouter davantage d'images en entraînement. On parle alors de surentraînement. Le dernier cas de figure est celui où le modèle ne reconnaît ni les images d'entraînement, ni celles de validation, on parle alors de sous entraînement et il faudra alors changer de modèle car celui-ci n'est probablement pas adapté (25).

En plus de la reconnaissance d'images, le deep learning est également utilisé dans de nombreux autres domaines comme la conduite autonome. Il est en effet très important pour une voiture autonome de reconnaître ce qui l'entoure. On peut aussi l'utiliser pour la création d'images (23). En effet si on prend le réseau de neurones dans l'autre sens et que l'on part des caractéristiques essentielles que l'on veut avoir sur l'image, le réseau sera capable de créer une image brute, unique avec toutes les caractéristiques que l'on souhaitait trouver. C'est également le deep learning qui est utilisé pour la création de sculptures, de musique, etc...

Cette dernière technique, qui appartient au machine learning, est sans aucun doute celle avec le plus d'avenir grâce notamment à l'ère du Big Data et à la constante augmentation de la puissance informatique (Figure 11).

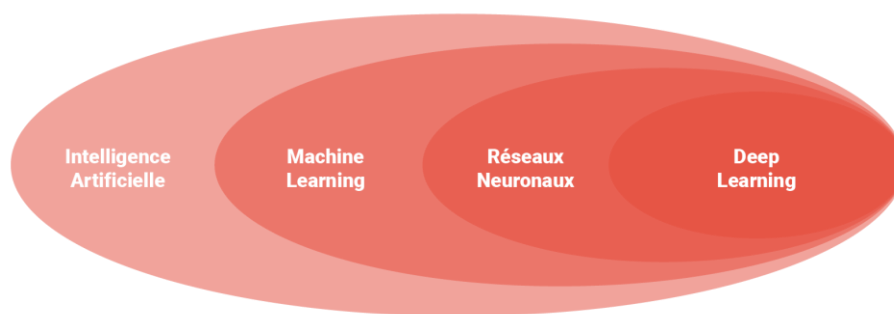


Figure 11 : Schéma récapitulatif des différentes techniques d'IA forte (18)

2) L'intelligence artificielle forte

A la différence de l'IA faible, l'IA forte ou ascendante commence à avoir une conscience de soi et de réels sentiments. L'intelligence artificielle forte a des capacités de réflexion. Elle peut raisonner et comprendre ses raisonnements. Le programme pourrait donc avoir une idée de ce qu'il est en train de faire. On considère aujourd'hui l'IA forte comme la forme d'intelligence artificielle la plus évoluée (26). Elle serait en mesure de résoudre des problèmes complexes, dans tous les domaines, de manière égale ou supérieure à l'intelligence de l'être humain. Elle est souvent associée aux robots avec des capacités d'autonomie très importantes.

L'atout le plus important de ce type d'IA est l'apprentissage. Elle pourra emmagasiner de très nombreuses informations et même, parfois, modifier son comportement. L'IA forte est encore peu présente aujourd'hui car très compliquée à développer mais les chercheurs estiment que ce type d'intelligence artificielle sera plus commun d'ici la fin du XXIème siècle. En effet, les approches actuelles, même si elles fonctionnent très bien pour créer des IA faibles, ne permettent pas encore de donner des IA fortes.

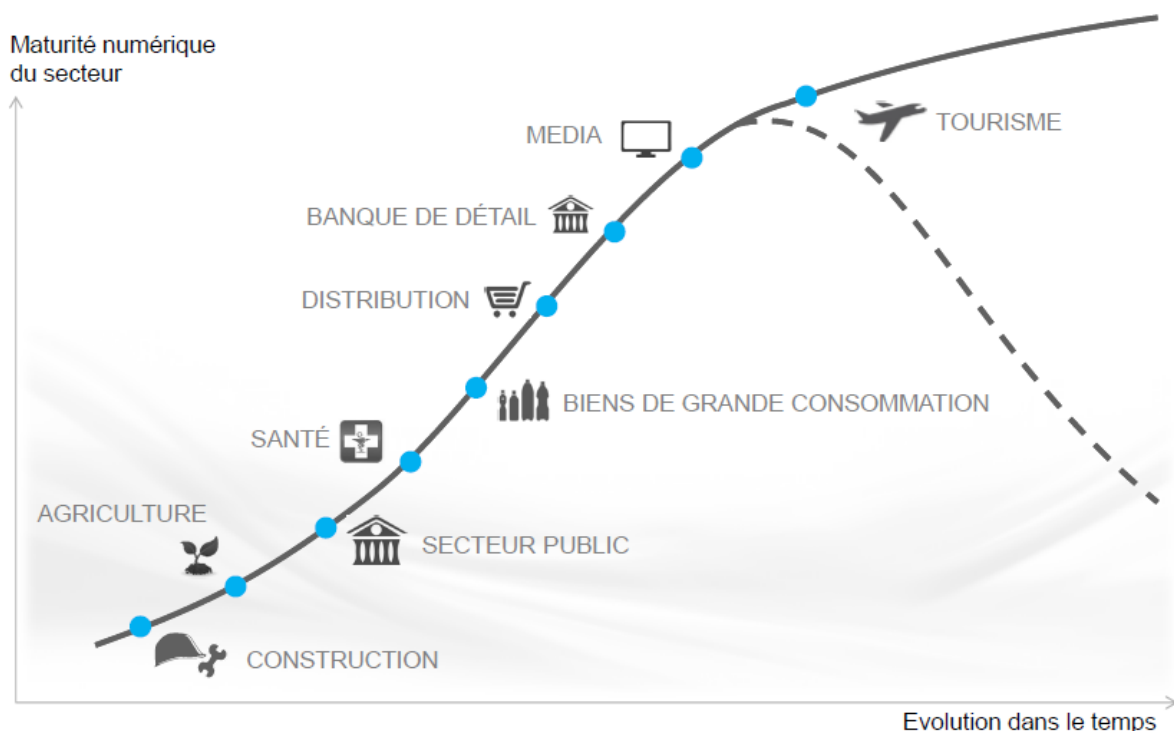
C) Application de l'intelligence artificielle dans notre vie quotidienne

Différentes « vagues » vont ou sont déjà en train de bouleverser le monde tel que nous le connaissons selon Kaï-Fu Lee, l'expert chinois en intelligence artificielle. Il y a tout d'abord l'IA en ligne, avec les monstres tels que Google ou Amazon qui retiennent les informations fournies par les utilisateurs afin de leur proposer des contenus personnalisés (27).

La seconde vague est celle de l'IA professionnelle qui concernera les compagnies d'assurance, les banques, ou encore les services de soins qui utilisent de grands volumes de données. Elle permettra de digitaliser de manière quasi-totale certains processus de ces secteurs d'activité.

La vague suivante est celle de l'intelligence artificielle perceptive qui permettra, à l'aide de capteurs, de numériser le monde physique puis de voir les choses de façon plus efficace que l'être humain. Cela permettra à l'Homme d'optimiser sa manière de vivre et de mieux appréhender le monde qui l'entoure.

La quatrième et dernière vague est celle de l'IA autonome qui permettra de se mouvoir et de manipuler des choses. C'est l'ère des véhicules autonomes ou des robots intelligents qui va bouleverser les emplois manuels, mais cette dernière sera cependant plus lente à se développer car les progrès en matière de robotisation et d'ingénierie sont plus lents que l'évolution des algorithmes.



Tous les domaines sont ou seront affectés par la transformation numérique, comprenant l'arrivée de l'IA. Cette transformation a déjà débuté et se trouve à des degrés différents selon les secteurs (Figure 12). Certains comme le tourisme ont totalement changé de physionomie alors que d'autres comme l'agriculture en sont encore aux prémices(29).

1) L'agriculture

L'intelligence artificielle est encore peu développée dans ce domaine alors qu'elle pourrait beaucoup lui apporter. En effet, elle peut aider les agriculteurs à maximiser leurs récoltes et leurs revenus. Pour cela, l'IA peut identifier les variétés qui s'adapteront le mieux aux conditions locales de sol et de climat, de même que les traitements phytosanitaires les plus appropriés. De plus, des capteurs dans le sol peuvent renseigner en temps réel sur la croissance des semis et détecter précocement des anomalies (29).

Si l'on s'intéresse aux machines agricoles, l'intelligence artificielle permet de diagnostiquer rapidement de possibles défaillances mécaniques ce qui permet de réduire les coûts de réparation et d'entretien. Pour finir, l'IA est également capable de prévoir l'offre et la demande agricole. Ainsi, les agriculteurs peuvent ajuster leur production en réduisant le gaspillage.

2) Le transport

Ce domaine est confronté à deux exigences : améliorer la sécurité et faciliter la mobilité. En termes de sécurité, l'intelligence artificielle peut alerter en cas d'accident et aider à la localisation d'un véhicule pour permettre une prise en charge rapide. L'IA permet également de suivre la pression pneumatique et de lancer un regonflement automatique en cas de sous-pression. En ce qui concerne le transport ferroviaire, le groupe SNCF, par exemple, utilise des drones afin de sécuriser ses infrastructures. Ces derniers vont capter et analyser des images afin de vérifier le bon état des voies ferrées. Cette technologie permet de réaliser les opérations de maintenance avec un impact moindre sur la circulation des trains et avec un maximum de sécurité pour les opérateurs (30).

Pour ce qui est de la mobilité, la voiture autonome comme celle de la firme Tesla, capable d'interagir de manière intelligente avec son environnement et les autres voitures autonomes, représente le futur de l'automobile (29).

La réservation via Internet des billets de train ou d'avion se trouve également facilitée grâce à l'IA avec les chatbots présents pour informer les voyageurs ou avec les services de reconnaissance vocale afin de commander uniquement avec le son de sa voix. Il est également intéressant de noter la fluctuation des prix des billets (train, avion) en fonction des recherches des voyageurs. Les prix vont, en effet, augmenter avec l'accroissement de la demande.

3) L'éducation

L'intelligence artificielle permet de révolutionner les pratiques éducatives, et ce, à tous les stades de l'apprentissage. Il existe, en effet, des applications capables d'identifier les facteurs de décrochage scolaire et d'apporter des correctifs personnalisés. Dans une école américaine, l'application PowerBi a pu exploiter les données pédagogiques de tous les étudiants afin d'anticiper les signes de décrochage. Ceci a permis d'augmenter le pourcentage de diplômés de près de 30% en 6 ans (31).

L'IA permet aussi de personnaliser les contenus des cours donnés à l'élève en s'adaptant aux compétences de cet élève à un instant donné et donc d'individualiser son rythme d'apprentissage.

La traduction instantanée, notamment chez les étudiants suivant des cursus internationaux, est une autre application de l'IA. Il existe également des outils de sous-titrage instantané pour les personnes malvoyantes ou malentendantes.

L'intelligence artificielle peut aussi préparer l'arrivée sur le marché du travail. En effet, en analysant de très nombreuses offres d'emploi, elle met en évidence des mots-clés permettant de comprendre les compétences attendues de la part des entreprises. Il suffira alors aux postulants de connaître et d'utiliser ces fameux mots-clés qui feront que leur curriculum vitae apparaîtra sur ce genre de site (comme LinkedIn).

4) L'armée

La défense est très friande des applications utilisant l'intelligence artificielle. Les drones sont particulièrement utilisés, notamment dans les zones sensibles qu'ils peuvent survoler, y repérer une cible et pourront, peut-être un jour, déterminer de manière autonome s'ils doivent ouvrir le feu ou non. Cette technologie contenant de nombreux programmes de calculs pourra dans un futur proche permettre aux avions et drones d'observer, évaluer puis d'agir après réalisation d'une simulation en une fraction de seconde (32).

5) Les finances

Le monde de la finance utilise aussi de nombreux algorithmes d'intelligence artificielle, principalement afin de prendre des décisions commerciales et d'automatiser les négociations, c'est le trading algorithmique. Les décisions d'investissements, dans les grosses entreprises comme chez les particuliers, sont prises après analyse de l'actualité, des flux de médias et des rapports de courtiers.

En ce qui concerne les finances des particuliers, les applications basées sur l'intelligence artificielle les aident à optimiser leurs dépenses et faire des économies à partir de leurs habitudes, revenus et objectifs personnels. Un système d'IA peut ainsi transférer de l'argent sur un compte d'épargne s'il juge cela possible après analyse des habitudes de dépenses de la personne (33).

Un crédit peut aussi être attribué après analyse des données d'un consommateur en utilisant un algorithme de deep learning. Ce dernier peut alors créer des modèles de risque prédisant la probabilité d'une défaillance du consommateur.

6) Autres domaines

Au niveau artistique, l'intelligence artificielle est capable, après analyse de milliers de morceaux de musique, de composer elle-même une musique. Il en est de même en ce qui concerne la peinture.

L'IA est énormément utilisée dans les jeux en tout genre, notamment les jeux vidéo. C'est d'ailleurs avec l'aide de ces jeux qu'elle s'est le plus développée. Elle permet, entre autre, de créer des joueurs fictifs capables de jouer aux échecs ou encore des personnages artificiels évoluant dans des mondes virtuels et prenant des décisions de façon autonome (29).

On retrouve également l'intelligence artificielle dans les médias (pour créer de nouveaux concepts d'émissions par exemple), dans les ressources humaines (afin de trier de très nombreux profils à l'aide de critères prédéfinis) ou encore dans le marketing (pour prévoir les prochaines tendances et ainsi définir les promotions à venir).

L'IA et le monde numérique, dont les développements fluctuent selon les domaines, vont continuer à évoluer considérablement dans les années à venir et changeront de façon significative le monde tel que nous le connaissons.

II) Atouts de l'intelligence artificielle en santé

En France, les dépenses en santé représentent aux alentours de 12% du PIB (29). Aujourd'hui, ce secteur évolue fortement. En cause, le vieillissement de la population mais aussi la plus forte attente des patients en ce qui concerne leur bien-être. Face à ces nouvelles tendances, l'évolution vers l'ère numérique et l'IA peut apporter de nouvelles solutions et réduire les coûts de santé.

L'intelligence artificielle est aujourd'hui utilisée dans de très nombreux domaines dont la santé, que ce soit en médecine (chez le médecin généraliste ou dans le secteur hospitalier) ou dans tous les domaines de la pharmacie (officine, industrie ou à l'hôpital) (Figure 13).

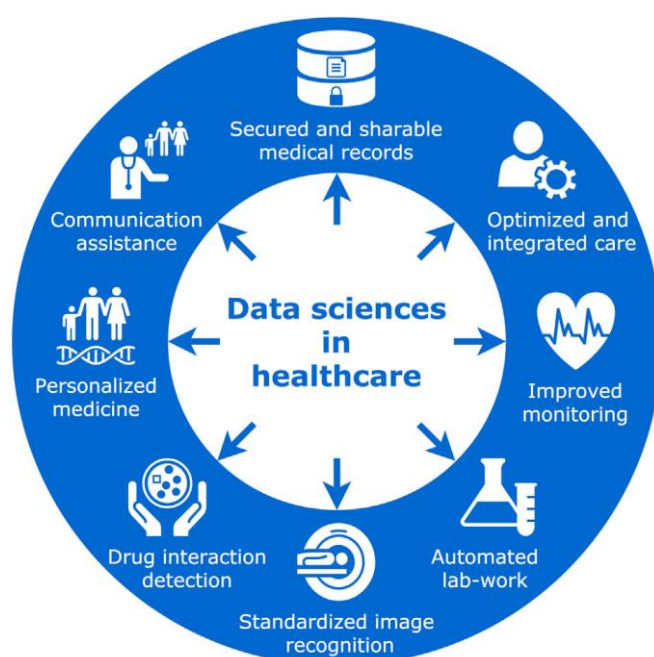


Figure 13 : Illustration des différentes applications de l'IA en santé (34)

En analysant de très grandes quantités de données, des logiciels sont désormais capables d'assister les médecins dans leurs prises de décisions. A l'hôpital, certains logiciels peuvent également identifier les patients avec un fort risque de mortalité ou encore prédire l'affluence et le temps d'attente des patients aux urgences (35).

Plus généralement dans le domaine médical, l'intelligence artificielle permet d'optimiser les traitements des patients, de diagnostiquer des maladies de manière très précise et d'établir un pronostic, ou encore de rechercher les interactions entre un principe actif et une cible permettant ainsi la découverte de nouvelles molécules et d'éviter des interactions médicamenteuses indésirables.

L'intelligence artificielle ouvre de nombreuses perspectives innovantes au monde médical et a une place à se faire aux côtés des différents professionnels de santé.

A) L'intelligence artificielle du cabinet médical à l'officine

1) Outil de consultation médicale

L'intelligence artificielle trouve son premier rôle lors de la consultation médicale, ou plutôt de la téléconsultation. Cette nouvelle façon de s'entretenir à distance avec son médecin traitant ou un médecin spécialiste est principalement développée par la plateforme Doctolib. La téléconsultation et la téléexpertise (pratique consistant pour un médecin à demander l'avis d'un autre médecin) qui sont deux branches de la télémédecine, s'ancrent toutes les deux dans la démarche d'amélioration de l'organisation du système de santé et de l'accès aux soins (36).

Pour pouvoir faire une téléconsultation, le médecin doit connaître le patient et ce dernier doit respecter le parcours de soins, c'est-à-dire que le patient doit avoir été orienté par son médecin traitant vers le médecin téléconsultant. Certaines situations permettent néanmoins de faire exception à ces règles comme pour les patients âgés de moins de 16 ans, les situations d'urgence, les patients n'ayant pas de médecin traitant ou pour avoir accès aux spécialistes en direct.

Une prescription sera rédigée, si nécessaire, à la fin de la téléconsultation, sous format papier ou électronique. Le compte rendu de la consultation pourra être inscrit dans le Dossier Médical Partagé (carnet de santé numérique permettant la conservation sécurisée des informations de santé et le partage avec les professionnels de santé choisis par le patient) du patient si ce dernier l'a ouvert ou sera directement transmis au médecin traitant dans le cas échéant. Le patient règle ensuite la consultation au même tarif qu'une consultation en face à face avant d'être remboursé de manière identique par l'assurance maladie.

La téléconsultation est avantageuse pour les patients en réduisant le temps avant une consultation notamment pour certains spécialistes ou en simplifiant le procédé de consultation pour les personnes ayant des difficultés pour se déplacer. Cet outil est également à l'avantage des médecins qui peuvent consulter plus de patients et cela depuis n'importe quel endroit.

L'IA intervient ici au début des téléconsultations proposées par certaines plateformes comme MédecinDirect (37). L'intelligence artificielle réunit des informations précises et pertinentes sur le patient à l'aide d'une série de questions définie à l'avance. Les systèmes d'IA permettent ainsi l'identification du motif de consultation du patient et proposent ensuite des questions au médecin qui lui permettront d'identifier au mieux les symptômes et antécédents médicaux du patient, de faciliter le diagnostic et d'éliminer les signes de gravité. Une seconde IA vient ensuite aider le médecin pour réaliser la prescription médicale en tenant compte des informations fournies par le patient.

2) Aide à la prescription médicale

Les interactions médicamenteuses qu'elles soient pharmacodynamiques (prévisibles car liées aux mécanismes des médicaments) ou pharmacocinétiques (imprévisibles car liées à la physiologie du patient), sont un fléau dans le domaine médical. Ces interactions peuvent provoquer des effets indésirables pour le patient, ou encore entraîner un changement dans l'efficacité des traitements par augmentation ou diminution de l'activité. La plupart de ces interactions étant évitables, l'IA peut largement trouver sa place dans le processus de prescription, notamment chez les sujets âgés polymédiqués (38).

Avec l'aide de l'intelligence artificielle, deux médecins et un ingénieur informatique ont créé une plateforme, nommée C-NAPPS, qui permet d'aider les médecins généralistes au moment de rédiger leurs prescriptions. C-NAPPS s'appuie sur l'analyse de plus de 55 millions d'ordonnances fournies par des pharmaciens (39).

Auparavant, lorsque les médecins généralistes avaient une interrogation à propos d'un médicament, ils devaient appeler le centre de pharmacologie où un spécialiste devait trouver l'information dans la littérature, et ce, sans moteur de recherche. Désormais, ce programme permet de déterminer instantanément s'il existe des interactions médicamenteuses entre les différents médicaments prescrits par le médecin. Il peut également estimer les risques encourus selon les pathologies du patient.

Une deuxième intelligence artificielle, Decagon, créée par des chercheurs de l'université de Stanford, aux Etats-Unis, peut prédire les risques d'interactions médicamenteuses à l'aide du deep learning. Cette IA est capable de modéliser les interactions protéine-médicament afin de prévenir les interactions. Ce système se base sur un énorme réseau capable de modéliser par un graphe comment près de 19 000 protéines du corps humain peuvent interagir entre-elles et comment les principes actifs des médicaments peuvent affecter ces protéines.

Il existe plus de 900 effets secondaires connus et plus de 5 000 médicaments sur le marché, cela représente près de 125 milliards d'effets secondaires possibles entre toutes les paires de médicaments possibles. En effet, pour l'instant, Decagon analyse uniquement les effets secondaires associés à des paires de médicaments. Avec l'aide du deep learning, l'intelligence artificielle apprend au fur et à mesure et peut ainsi prédire des effets secondaires jusqu'alors inconnus. L'objectif futur est d'obtenir des résultats avec des schémas plus complexes de combinaisons de médicaments et de partager cet outil avec les médecins qui pourront déterminer s'il est intéressant ou non de prescrire un médicament afin de réduire de manière conséquente les risques liés aux interactions médicamenteuses (40) (41).

3) Conseils aux patients

Le conseil du pharmacien peut également évoluer avec l'arrivée de l'intelligence artificielle, notamment avec les chatbots (42). Ces agents conversationnels représentent une solution numérique permettant de dialoguer de manière orale ou bien écrite. Les chatbots sont capables de répondre aux questions des patients. Ils offrent donc à ces derniers un moyen de conversation automatisé mais personnalisé. Cet outil est donc tout à fait en mesure de proposer aux patients des solutions afin de répondre à tel ou tel symptôme (toujours sous la surveillance du pharmacien bien sûr) ou même de rediriger le patient vers le médecin si cela est nécessaire. Le chatbot peut donc servir d'assistant au pharmacien d'officine.

La firme Pharmaseek a récemment développé des diagnostics en ligne, des smart tests (43). Ces derniers permettent de répondre immédiatement à un besoin ou un symptôme du patient en lui prodiguant un conseil contextualisé et personnalisé. Le logiciel pourra alors lui préconiser des produits de santé, de parapharmacie, de bien-être ou encore des conseils pouvant lui convenir.

Ces smart tests, faits à partir d'algorithmes d'intelligence artificielle, raisonnent de manière autonome, argumentent et expliquent de façon détaillée le conseil donné ainsi que la préconisation des différents produits. Ils fonctionnent donc comme le ferait un être humain, et ce, en plusieurs langues.

Toutes les données obtenues par les chatbots et autres systèmes d'intelligence artificielle sont anonymisées pour en extraire de la smart data. Cette dernière permet ensuite aux entreprises, comme les officines, d'optimiser leurs performances en répondant de manière plus précises aux attentes des patients.

4) Suivi des patients

Le suivi et l'accompagnement des patients font partie intégrante des rôles du pharmacien officinal. L'ère numérique permet justement de suivre à distance les patients dans leurs traitements ou dans des domaines aussi variés que certaines pathologies chroniques, l'observance ou la diététique.

Le LSO ou Logiciel de Suivi d'Observance créé par Pharmagest est un logiciel qui permet aux patients d'être suivis dans le cadre de plusieurs programmes (44). Il permet au pharmacien de suivre l'évolution de l'état de santé du patient à n'importe quel moment, grâce au suivi des constantes envoyées régulièrement depuis les appareils connectés (auto-tensiomètre, lecteur de glycémie, ...) du patient. Le logiciel peut alors analyser les données et avertir le pharmacien s'il repère une anomalie.

Avec l'aide de l'intelligence artificielle, on peut également suivre l'observance des patients, avec les piluliers intelligents capables de prévenir le patient en cas d'oubli ou de retard de prise (45). Il peut aussi avertir le pharmacien qui peut ainsi suivre les prises du patient et, s'il le faut, préparer un bilan de médication en cas de non-respect des posologies ou de la non-prise de certains médicaments afin de revoir les traitements avec le patient. La non-observance d'un traitement toucherait près d'une personne sur deux en France ce qui occasionnerait plusieurs milliers de décès, de nombreuses journées d'hospitalisation et un coût extrêmement important pour l'Etat. Il est donc primordial de repérer les premiers signes d'un manquement de prise d'un médicament afin de prévenir tout risque pour le patient.

Le système Noviacare permet d'assurer l'accompagnement et la sécurité des personnes âgées à leur domicile ou en établissement d'accueil (46). Ce système permet de répondre au vieillissement de la population en garantissant le maintien à domicile et l'autonomie des seniors. Cette box intelligente va apprendre les habitudes de vie de la personne âgée en analysant son sommeil, son hygiène, sa prise de repas ou de médicaments. Elle pourra alors détecter les premiers signaux de perte d'autonomie et prévenir la famille proche ou les professionnels de santé comme le pharmacien qui pourront alors tout mettre en œuvre afin de trouver des solutions.

Pour cela, les capteurs, placés de manière optimale dans le logement de la personne âgée, vont analyser l'activité de cette dernière et transmettre les informations à la box lors de la phase d'apprentissage. Le système pourra également repérer si une chute survient dans les zones sensibles du domicile de la patiente (toilettes, salle de bain, lit).

5) E-commerce

En France, le e-commerce progresse chaque année de manière significative avec une offre de plus en plus importante (182 000 sites marchands actifs en 2018). Et l'offre créant la demande, les français sont également de plus en plus à acheter en ligne. En pharmacie d'officine, le e-commerce ne représente pour l'instant qu'une infime partie des médicaments délivrés, mais il est amené à se démocratiser dans les années à venir. L'intelligence artificielle existe aujourd'hui à différents stades (Figure 14) :

- 1^{er} stade où l'intelligence artificielle va obéir en reconnaissant des caractères spécifiques, c'est de l'automatisation basique.
- 2^{ème} stade avec l'apprentissage d'un savoir à partir d'une base de données peu structurée.
- 3^{ème} stade, le raisonnement avec les analyses prédictives, la création d'hypothèses et l'apprentissage autonome.

Dans le e-commerce, l'intelligence artificielle est aujourd'hui assez simple et le passage aux stades 2 et 3 se construit actuellement à l'aide de techniques de deep learning (47).



Figure 14 : Graphique de l'état de l'intelligence artificielle dans le e-commerce en 2018 (47)

En attendant le shopping en réalité virtuelle ou encore la livraison instantanée par drones, l'IA se développe rapidement dans le e-commerce. C'est principalement chez les géants du web comme Amazon, Rakuten ou encore Alibaba que l'on va retrouver les algorithmes d'intelligence artificielle les plus importants, mais d'autres sites marchands utilisent également des solutions basées sur l'IA, c'est le cas notamment de certaines pharmacies en ligne.

Aujourd'hui, l'intelligence artificielle est principalement appliquée dans 5 catégories chez les e-commerçants (48) (49) :

- La logistique robotisée et intelligente notamment chez l'e-commerçant Ocado qui, avec ses algorithmes d'IA, peut accélérer les traitements des commandes et gérer plus efficacement ses stocks en réduisant les surfaces de ses entrepôts. Ce gain, en mètre carré, lui permet de s'implanter directement dans les centres-villes afin de toucher le plus de personnes possible. L'intelligence artificielle peut également imaginer plusieurs hypothèses et déterminer le meilleur lieu d'expédition afin de réduire les coûts de stockage et de transport. Cette technologie peut être utilisée par les grossistes répartiteurs en pharmacie, ce qui leur permettrait de fournir plus efficacement les officines.
- La recherche visuelle est une activité qui se développe très rapidement avec l'aide des images partagées sur les différents réseaux sociaux (Snapchat, Instagram, Facebook ou encore Pinterest). Les algorithmes d'IA de reconnaissance de formes s'améliorent alors très rapidement et permettent à un acheteur de prendre une image sur Internet et de retrouver le produit correspondant chez l'e-commerçant comme chez La Redoute. Cela pourrait être appliqué à la pharmacie avec certains produits de parapharmacie.

La marque L'Oréal, elle, utilise les réseaux sociaux pour déterminer les motifs ou couleurs en vogue pour aider les e-commerçants à compléter leurs gammes en fonction des tendances remarquées. Cette application peut aisément trouver sa place dans les officines, notamment pour prévoir à l'avance les produits à commander (en particulier les produits de parapharmacie). Tout ceci permet de rendre les achats plus rapides et interactifs.

- L'expérience client et le parcours du client sur le site de l'e-commerçant sont personnalisés et améliorés avec l'IA. L'intelligence artificielle est en mesure d'identifier les caractéristiques des clients (localisation, âge, genre, centre d'intérêts, ...) et leurs comportements sur le site (temps passé, produits visualisés, pages visitées, ...). En fonction du profil établi, la navigation deviendra alors personnalisée afin de répondre au mieux aux attentes du client comme cela est le cas dans la plupart des grandes enseignes commerciales.

L'intelligence artificielle permet aussi de gérer au mieux les campagnes marketing en prédisant la propension des clients à dépenser sur le site en fonction du profil établi précédemment. Un tel profil peut très bien être utilisé sur des sites de vente en ligne de produits pharmaceutiques pour proposer directement au patient ce qu'il cherche. Cela lui évitera de perdre du temps sur le site marchand en recherche. L'IA pourra également l'informer d'éventuels produits associés à sa recherche.

- Le travail colossal de la gestion des bases de données des marketplaces se fait avec l'aide de l'IA qui doit analyser correctement la nature de millions d'articles et les classer au bon endroit afin que le client puisse les trouver le plus facilement possible, et enfin décrire au mieux les produits à partir des informations données par les fournisseurs. L'intelligence artificielle permet également une gestion automatisée et en temps réels des prix. Seules les plus grandes marketplaces comme Amazon ou le géant chinois Alibaba utilisent actuellement l'IA pour gérer toutes leurs données mais on peut facilement penser que cela va se démocratiser dans les années à venir pour venir s'implanter dans des marketplaces de plus en plus petites comme des e-pharmacies.
- Les chatbots sont de plus en plus utilisés sur de nombreux sites marchands. Plus ou moins évolués, ils permettent de répondre aux questions des clients sur les différents produits avant et après la vente afin de guider au mieux les clients vers les produits qu'ils souhaitent. Certains sites ont même des assistants personnels intelligents avec lesquels il est possible de correspondre vocalement pour rechercher et commander un produit. On imagine aisément qu'une e-pharmacie puisse utiliser ce genre de technologie. Un chatbot serait capable de proposer le médicament adapté ou d'orienter vers un professionnel de santé en fonction des réponses du patient à des questions précises.

En pharmacie, certains distributeurs de produits pharmaceutiques ont déjà recours à l'intelligence artificielle. C'est le cas de Logista Pharma (50), un distributeur ibérique qui utilise Esker. Pour le distributeur, la solution Esker propose énormément de fonctionnalités telles que la gestion de très nombreuses lignes de commandes tout en distinguant les commandes hospitalières, de grossistes ou de pharmacies.

Cela permet au distributeur d'accélérer le rythme de gestion des commandes, de diminuer les erreurs liées à la saisie manuelle, une baisse des coûts de gestion, une amélioration de la relation avec les clients en augmentant le temps accordé à ces derniers. Tout ceci augmente la croissance de l'entreprise qui peut répondre à davantage de demandes de clients.

Toutes ces innovations représentent le futur de la vente en ligne de produits de parapharmacie mais également de nombreux médicaments. De plus, faciliter la vente de médicaments sur des sites agréés rendra cela plus sûr pour les patients puisque, aujourd'hui, de nombreux médicaments vendus sur internet sont faux et donc dangereux pour la santé.

6) Gestion des stocks

Bien que dans de nombreux domaines, l'intelligence artificielle n'en soit qu'à ses balbutiements, dans la Supply Chain (gestion de la chaîne logistique depuis le tout premier fournisseur jusqu'au client final), elle contrôle déjà de très nombreuses opérations. Selon CapGemini, première entreprise de services du numérique en France, la numérisation de la chaîne logistique montre des bénéfices bien supérieurs à la numérisation dans d'autres domaines, ce qui en fait une des principales priorités dans les projets de nombreuses entreprises (51).

C'est dans l'automatisation des processus que l'intelligence artificielle apporte les retombées les plus significatives. En effet, certaines tâches auparavant réalisées manuellement prenaient un temps considérable et représentaient une charge financière importante. Dans les très grandes entreprises qui traitent chaque jour des milliers de lignes de commandes, ceci peut rapidement devenir une source d'erreurs. Cette automatisation s'est faite notamment chez les grossistes pharmaceutiques afin d'améliorer les rendements et la fiabilité.

L'intelligence artificielle peut également avoir une autre application pour les grossistes de produits pharmaceutiques. Elle peut, en effet, être utilisée dans la livraison des produits, notamment pour déterminer le meilleur itinéraire d'expédition, optimiser au maximum la tournée d'un livreur ou encore, affecter les marchandises aux entrepôts intermédiaires sur le trajet vers les clients. Tout cela permet alors de réduire les délais de livraisons et donc d'améliorer la satisfaction du client.

En logistique, l'intelligence artificielle permet d'améliorer les prévisions et la planification des stocks ce qui apporte certains avantages (réalisation de flux tendus, diminution des coûts, ...). L'IA peut, en effet, repérer des tendances de vente afin de déterminer les produits qui se vendront plus rapidement ou au contraire plus difficilement que prévu. Un tel système trouve tout à fait sa place en officine afin de mieux gérer les stocks d'une année sur l'autre en réduisant les risques d'excédents de marchandises (cela évite d'avoir à brader certains produits) ou les pénuries trop nombreuses dans les officines. On retrouve également ces types d'algorithmes dans les enseignes de grande distribution pour lutter contre le gaspillage alimentaire (52).

Une numérisation de la pharmacie serait donc à prévoir afin de s'intégrer dans l'ère du temps. Cela apportera de nombreux bénéfices aux officines dont le plus important étant une diminution des charges financières. Un tel changement pourrait être réalisé par Vekia (53), une start-up lilloise qui a développé une solution basée sur l'IA permettant d'optimiser les stocks et les commandes. Cette start-up est déjà utilisée par de grandes entreprises françaises comme Engie.

7) Différentes applications de l'IA en officine

Il est possible de trouver des systèmes d'intelligence artificielle dans divers logiciels pouvant être utilisés pour la formation des nouveaux professionnels de santé, comme le serious game E-Caducée utilisé comme outil de simulation à la faculté de pharmacie de Nantes afin de vérifier les connaissances des futurs pharmaciens d'officine.

On peut également utiliser l'IA pour réduire les erreurs de délivrance. En effet, certains systèmes sont désormais capables de décrypter certaines ordonnances, parfois difficilement lisibles par les pharmaciens d'officine (54). Pour cela, un scanner de documents utilisant un système d'intelligence artificielle a été mis en place dans certaines officines. Ce système, entraîné avec des centaines d'ordonnances écrites manuellement, est désormais capable de lire les ordonnances presque mieux que les pharmaciens. Avec cette meilleure lecture des ordonnances, le risque de commettre une erreur de délivrance est diminué ce qui apporte davantage de sécurité pour le patient.

Cette lecture d'ordonnance par une IA pourrait également dégager plus de temps pour les pharmaciens. En effet, ce système, s'il était intégré aux logiciels des officines, pourrait aussi contrôler les médicaments délivrés et leur quantité. Après lecture de l'ordonnance, l'IA serait capable de dire si les bons médicaments ont été délivrés, au bon dosage et dans les bonnes quantités. Cela pourrait permettre aux pharmaciens de ne plus avoir à réaliser le double contrôle des ordonnances.

D'autres systèmes pourraient aider au conseil lorsque les patients se présenteraient à l'officine avec tel ou tel symptôme. Après une série de questions posées par l'IA, le système serait en mesure de prodiguer des conseils et de préconiser l'utilisation d'un médicament en particulier, et ce, en fonction du stock de la pharmacie ou encore des dates de péremption des médicaments. Tout ceci se ferait, bien sûr, sous le contrôle du pharmacien.

Ces derniers systèmes d'intelligence artificielle, bien qu'hypothétiques, pourraient néanmoins faire leur apparition dans nos officines dans les années à venir afin d'aider les préparateurs en pharmacies ainsi que les pharmaciens dans leur travail quotidien.

B) L'intelligence artificielle en industrie

La découverte et le développement des médicaments sont des processus compliqués et demandant beaucoup de temps et de ressources. C'est dans l'optique de faciliter ces recherches que de nouvelles approches informatiques sont régulièrement développées. Auparavant, les découvertes se faisaient souvent de manière fortuite. Aujourd'hui, cela se fait de façon plus ciblée. Les nouvelles méthodes utilisées sont l'exploration de données, la modélisation structurale, l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond avec les réseaux de neurones.

Les méthodes d'apprentissage automatique présentent un intérêt particulier puisqu'elles peuvent être appliquées à différents stades du processus de découverte des médicaments. Elles pourraient également prédire la structure de la cible ou encore les profils pharmacocinétique et toxicologique.

1) Les différentes étapes du développement d'un médicament

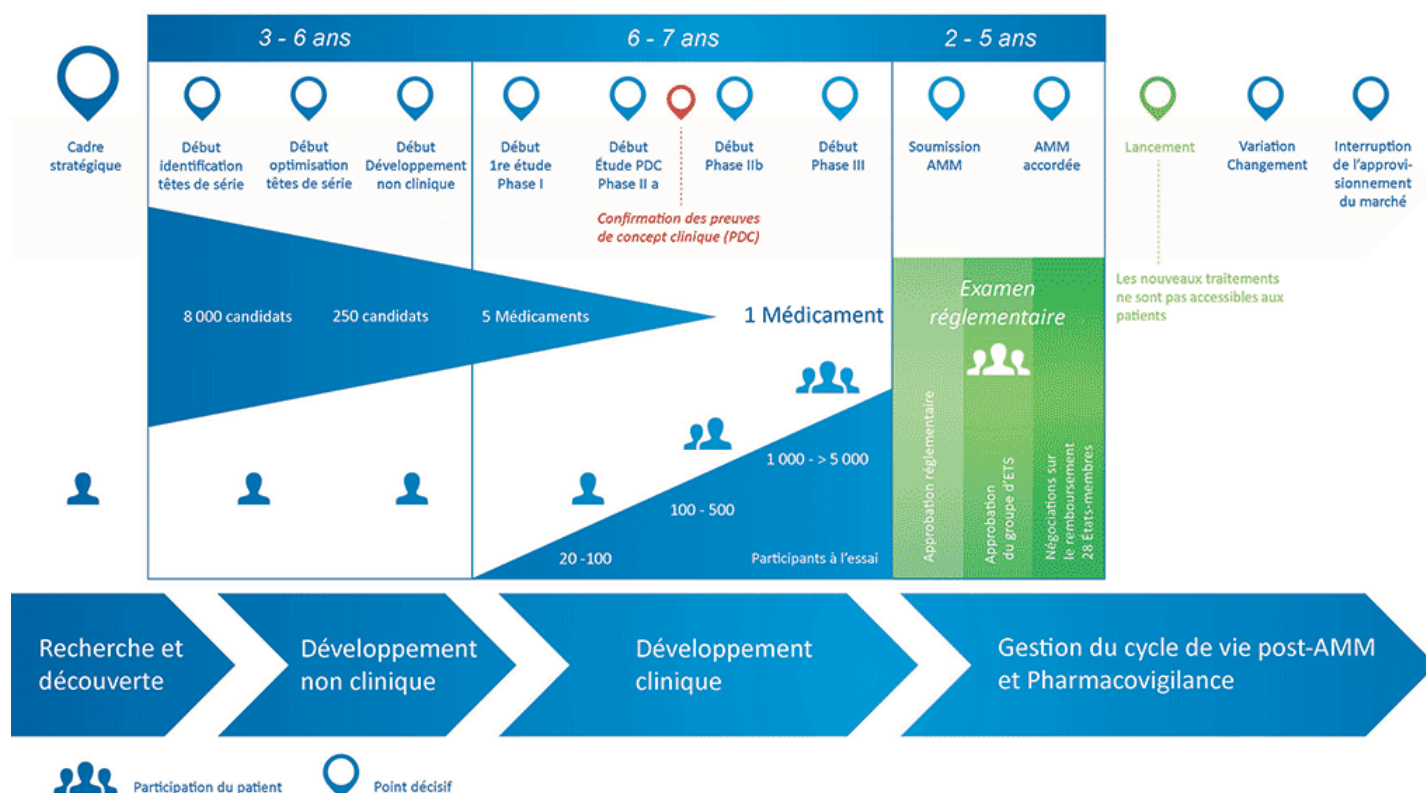


Figure 15 : Aperçu des points décisifs et des étapes du développement d'un médicament (55)

a) Compréhension de la maladie et sélection de la cible thérapeutique

La recherche et le développement d'un médicament prennent en général plus de 12 ans et coûtent plus d'un milliard d'euros (Figure 15). Avant la recherche, les industriels essaient de comprendre la maladie qui serait à traiter.

Cette première étape consiste aussi à l'identification de la cible thérapeutique. Une fois la maladie comprise, il faut rechercher la cible afin de pouvoir corriger ce qui ne va pas. La cible peut correspondre à diverses molécules produites en trop grandes ou trop petites quantités, ou dont la structure est anormale. Il est également nécessaire de déterminer s'il existe un besoin non satisfait (maladie pour laquelle il n'existe pas de traitement, effets secondaires trop importants d'un médicament déjà existant).

Pour valider cette première étape, il est nécessaire d'obtenir un accord avec le laboratoire concernant le financement de la recherche. C'est la décision d'investissement qui intervient à la fin de chaque étape du développement du médicament (55). En effet, à la fin de chaque phase, il est nécessaire de savoir s'il est utile ou non de continuer à financer la recherche et le développement du médicament.

b) Génération des têtes de série

La seconde étape correspond à la découverte des molécules qui vont interagir avec la cible déterminée. Pour cela, les industriels vont tester des milliers de candidats afin de trouver les têtes de série, les molécules qui interagissent avec la cible. Ces molécules peuvent être synthétiques ou d'origine naturelle. Cette étape est aussi appelée le criblage (55).

c) Optimisation des têtes de série

Après l'identification des têtes de série, il est nécessaire de les modifier. En effet, les molécules telles quelles ont des effets faibles sur la cible. Pour que l'effet sur la cible soit optimal, les chercheurs vont ajouter ou supprimer certains éléments de la molécule pour créer une gamme de molécules, toutes différentes. Il est également possible de modifier un médicament déjà existant afin d'en améliorer les effets.

Toutes les molécules modifiées sont ensuite testées pour déterminer les structures les plus efficaces et sûres (celles qui sont le mieux tolérées) qui deviendront alors des candidats potentiels pour devenir le médicament final. Cette étape permet de commencer à appréhender les différentes propriétés pharmacologiques des derniers candidats. Ces derniers sont généralement brevetés à ce stade afin d'être protégés en tant que propriétés intellectuelles (55).

d) Développement non clinique

C'est désormais le début du développement non clinique. Il est ici question de déterminer le profil de sécurité des potentiels médicaments (études de toxicité et d'hypersensibilité). Cela vise à déterminer si ces derniers peuvent être utilisés sans danger dans les études cliniques (sur l'être humain). Le procédé de fabrication ainsi que les essais de sécurité non cliniques (chez l'animal) doivent respecter les réglementations provenant des Bonnes Pratiques de Fabrication.

Ces tests, en plus de délivrer un profil de sécurité, permettent d'obtenir davantage d'informations sur la pharmacocinétique du médicament (absorption, distribution, métabolisme, élimination). Tout cela donne ainsi une idée des doses à utiliser lors des études cliniques pour les molécules qui passeront avec succès la phase non clinique (55).

e) Développement clinique

Pour débiter une étude clinique, il est nécessaire de faire une demande d'autorisation d'essai clinique auprès de l'autorité nationale compétente (Figure 16). Il faut pour cela fournir un dossier du médicament expérimental (données pharmacocinétiques, toxicologiques, et les informations sur le mode de fabrication du médicament), le protocole de l'étude (détaillant précisément la conduite de l'essai et l'évaluation des résultats), et la brochure de l'investigateur (résumant les informations nécessaires aux médecins conduisant l'étude afin que ces derniers puissent expliquer l'essai aux patients et obtenir leurs consentements éclairés). Un comité d'éthique doit aussi être sollicité.

La phase I de l'étude clinique se fait sur des personnes volontaires (20 à 100 personnes) et dans des unités spéciales. Elle permet de confirmer le comportement du médicament chez l'être humain après les études sur les animaux. Elle donne également des informations sur le mécanisme d'action du médicament et sur ses éventuels effets secondaires. L'essai débute avec une seule faible dose du médicament, puis le dosage et le nombre de prise augmentera si la prise du médicament n'occasionne pas d'effets secondaires dangereux pour les volontaires (55).

Les données pharmacocinétiques et pharmacodynamiques observées sont consignées dans un cahier d'observation. Dans cette première phase de l'étude clinique, les observateurs étudient également l'effet de l'alimentation sur la prise du médicament, ainsi que les effets d'autres médicaments administrés de manière concomitante et d'autres maladies.

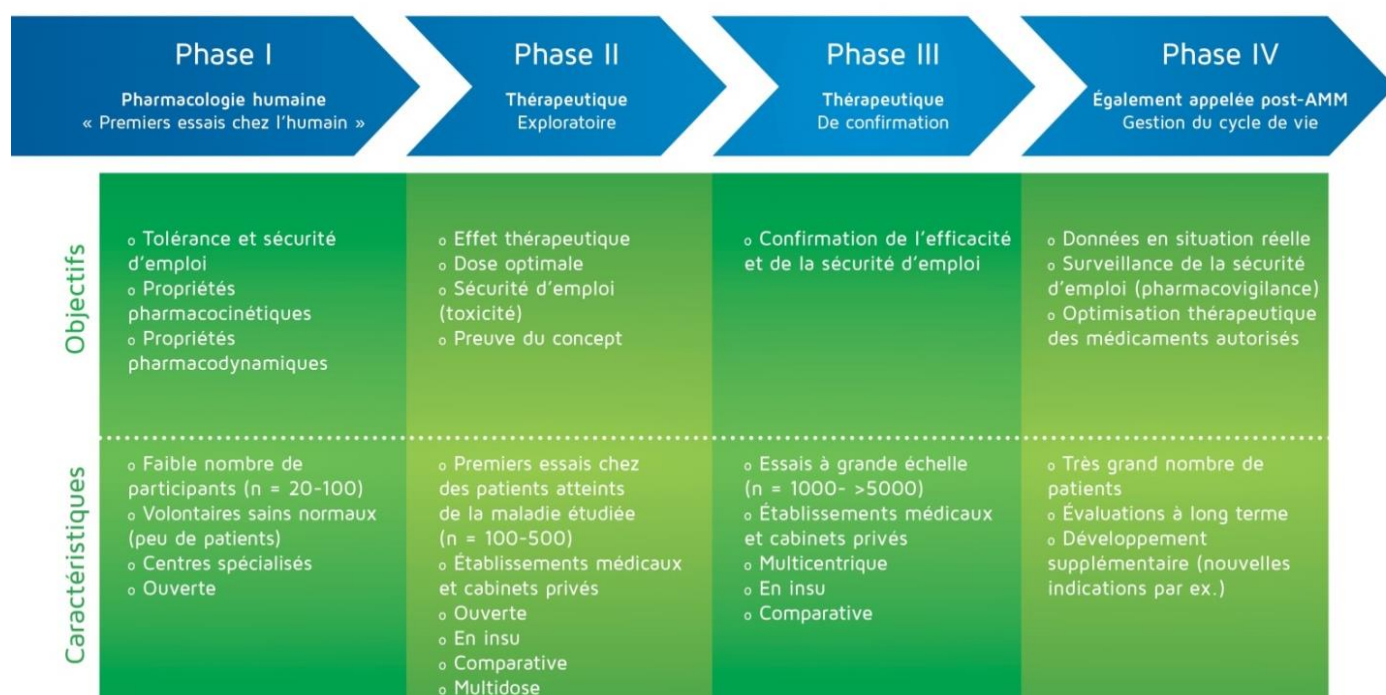


Figure 16 : Aperçu des différentes phases du développement clinique (55)

La phase II de l'essai clinique se fait avec des patients atteints de la maladie que l'on cherche à traiter. Dans les phases II et III de l'étude clinique, on répartit les patients dans deux groupes. Dans le premier groupe, les patients reçoivent le traitement que l'on souhaite tester, et dans le second, les patients sont traités par le meilleur traitement existant déjà ou par placebo (médicament factice qui permet, par exemple, de déterminer si des effets secondaires sont liés au médicament à tester ou si cela n'a rien à voir avec ce dernier). Les études sont généralement conduites en double aveugle (les médecins et les patients ne savent pas ce qui est administré aux patients) et de manière randomisée (les groupes sont constitués de façon aléatoire, souvent avec un ordinateur) (55).

Les essais de la phase II sont généralement menés chez quelques centaines de patients (100 à 500 patients) et dans différents hôpitaux. Ces essais de phase II sont conçus pour déterminer les effets du médicament sur la maladie (on cherche une preuve du concept) et pour savoir s'il est utile de continuer ou non. C'est dans ces études que l'on détermine la dose optimale en testant différentes doses du médicament.

C'est dans les études de phase III (développement en vue du lancement) que l'on va apporter toutes les preuves suffisantes de l'efficacité et de la sécurité du médicament. Sur la dizaine de médicaments testés dans les deux premières phases des essais cliniques, seuls deux (en moyenne) sont admis en phase III. Ces essais incluent des milliers de patients et sont essentiels afin de pouvoir faire une demande d'AMM (Autorisation de Mise sur le Marché) (55).

L'obtention de l'AMM prend plusieurs années. Elle est obtenue après analyse de tous les résultats des phases du développement clinique garantissant une efficacité et une sécurité du nouveau médicament. Il est également nécessaire d'avoir une approbation réglementaire afin de pouvoir commercialiser le médicament dans plusieurs pays. Enfin, il est très important de négocier le taux de remboursement du nouveau médicament avec les pays concernés.

Les derniers essais cliniques sont ceux de phase IV, après la mise du médicament sur le marché. Ils permettent de collecter les données en situation réelle (prise avec d'autres médicaments ou d'autres maladies, et parfois de manière non conventionnelle) et sur un très grand nombre de patients. Les effets secondaires sont, ici, reportés aux centres de pharmacovigilance et pourraient permettre de découvrir de nouvelles indications pour ce médicament (55).

2) Utilisation de l'intelligence artificielle dans le développement d'un médicament

a) Amélioration de la recherche primaire

Les données disponibles sont connues pour être très variables, de très grandes dimensions et proviennent très souvent de multiples plateformes de données souvent incompatibles. Ces données très importantes sont donc malheureusement sous-utilisées. C'est pour cela que les algorithmes de machine learning trouvent leur place dans l'industrie. Ils permettent de trouver des liens entre les données, de les catégoriser et ainsi d'améliorer les recherches biomédicales (56). C'est le cas du laboratoire Novartis qui utilise une plateforme d'intelligence artificielle médicale, BenevolentAI (57). Cette dernière permet d'évaluer le potentiel de certaines molécules afin de découvrir de futurs candidats pour traiter de nouvelles maladies.

Des algorithmes d'apprentissage profond permettent de classer les médicaments déjà existants en fonction de leurs données connues. Des médicaments qui seraient alors mal classés peuvent conduire à des découvertes inattendues. En effet, on peut donc imaginer que ces principes actifs pourraient avoir un potentiel dans un nouvel usage. Cela ouvre des perspectives pour la réutilisation des médicaments.

b) Réduction du temps de criblage des molécules

Les approches de deep learning ont aussi été utilisées pour prédire les interactions des médicaments avec leurs cibles afin de déterminer les réactions des molécules et leurs éventuelles toxicités (58).

L'entreprise Atomwise utilise AtomNet, un algorithme de réseaux de neurones qui peut prédire comment différentes molécules vont interagir entre-elles. Cette IA permet donc de déterminer quelles molécules vont se lier ensemble et avec quelle intensité (59). AtomNet donne ainsi de premières informations sur la pharmacocinétique des molécules et réduit les risques d'effets indésirables. Cela permet d'analyser des milliers de molécules naturelles ou synthétiques, de manière rapide et efficace, afin de réduire les recherches à quelques dizaines de molécules.

c) Optimisation des essais cliniques

D'autres logiciels d'apprentissage automatique sont capables d'estimer le volume de distribution dans le corps humain à l'équilibre (60). Cette propriété pharmacocinétique importante indique l'ampleur de la distribution du médicament dans les tissus du corps. Ces algorithmes permettent ainsi de réduire le temps de recherche de la dose optimale du médicament lors des phases d'études cliniques.

Dans ces essais cliniques, l'identification et le recrutement des patients représentent une nouvelle opportunité pour l'IA. Les systèmes d'apprentissage automatique permettent, après analyse de tous les dossiers médicaux, d'adresser les patients dans les essais cliniques les plus appropriés. C'est le cas de la plateforme Mendel.ai, qui se base sur les données des dossiers médicaux (pathologies, mutations génétiques, prise de médicaments, ...) et les dossiers d'essai clinique pour proposer une liste personnalisée d'essais cliniques aux patients à l'aide d'un pourcentage de concordance (61). Ceci est un gain de temps considérable puisque les professionnels de santé n'ont alors plus à vérifier tous les dossiers manuellement.

Pour éviter une potentielle non-observance du traitement des patients au cours de ces essais cliniques, AICure a mis au point un système de reconnaissance faciale qui permet d'identifier le visage du patient et le médicament qu'il prend, de confirmer la prise du médicament et de détecter l'apparition d'effets secondaires sur le visage (62). Les données sont ensuite envoyées au laboratoire pharmaceutique menant l'essai. Ce système, ne nécessitant que l'utilisation d'un smartphone, permet de garantir une bonne adhérence aux essais.

Il est également possible de suivre l'évolution du traitement chez les patients en proposant des assistants virtuels. Ces derniers peuvent aussi répondre aux questions des patients ou de leur envoyer des rappels au moment des prises.

d) Diminution des coûts de recherche et de développement

La réduction des temps passés à chaque étape de la recherche et du développement d'un nouveau médicament permet également de réduire considérablement les dépenses liées à ces étapes. Ceci pouvant entraîner, par la suite, une diminution du coût du médicament lors de sa mise sur le marché et donc un avantage pour le patient et pour l'Etat qui auront moins à déboursier pour se procurer le médicament.

C) L'intelligence artificielle à l'hôpital

C'est dans le secteur hospitalier que l'IA a apporté le plus de modifications. Même si elle a quelques applications dans la pharmacie hospitalière, c'est surtout auprès des médecins que l'intelligence artificielle trouve sa place. Elle permet, par exemple, d'aider le diagnostic des médecins, d'évaluer si le pronostic d'une maladie sera bon ou mauvais, de lire des radiographies de manière plus précise qu'un médecin afin de les aider dans leur travail ou d'analyser de la littérature médicale afin d'élaborer de nouveaux plans de traitement. Tout ceci, évidemment, permet aux médecins de passer plus de temps avec le patient et de personnaliser leurs traitements. La mise en place de tous cela aura bien sûr un coût pour l'hôpital mais représentera un bénéfice très important à long terme.

1) La pharmacie hospitalière à l'ère de l'IA

A l'hôpital, une des missions de la pharmacie hospitalière est la préparation des chimiothérapies, une mission très délicate et contrôlée. C'est pour sécuriser ce travail que le système Drugcam existe (63). Cette technologie basée sur l'intelligence artificielle, permet de contrôler, à l'aide de la vidéo, toutes les étapes de la préparation des traitements anticancéreux. Le système analyse toutes les manipulations effectuées par le technicien de laboratoire. Cela permet ensuite de valider la préparation ou d'identifier automatiquement les problèmes.

Cette innovation est donc une garantie de sécurité pour le patient bien sûr, mais aussi pour les professionnels de santé. En effet, les substances manipulées étant des médicaments cytotoxiques, il faut en préparer la dose exacte. Le système Drugcam permet également de réduire considérablement le temps de production d'une chimiothérapie par rapport à la méthode classique.

2) L'IA : un allié pour la validation biologique

Que ce soit dans les laboratoires hospitaliers ou dans les laboratoires de biologie médicale, l'interprétation et la validation de résultats biologiques représentent des activités chronophages.

C'est dans l'intérêt de libérer du temps au pharmacien biologiste que d'autres biologistes et spécialistes de l'intelligence artificielle ont créé Valab, un logiciel expert d'aide à la validation (64). Cet outil informatique permet donc un gain de temps de 40% à 80% pour le biologiste, puisque ce dernier n'aura à traiter que les dossiers litigieux, graves ou incluant des analyses spécifiques à validation humaine (Figure 17). C'est également une aide à la décision car Valab est capable de mettre en avant les éléments critiques dans les dossiers refusés (indication de la raison du refus).

Ce logiciel expert peut analyser de nombreux paramètres biochimiques (sodium, potassium, etc...), mais aussi des gaz du sang, les paramètres de la NFS (Numération Formule Sanguine) et de nombreux paramètres de l'hémostase (65). Les critères de validation de Valab sont les bornes extrêmes, l'antériorité (prise en compte des données présentes dans le dossier médical du patient comme ses antécédents) et la corrélation (prise en compte d'une pathologie décrite dans le dossier médical du patient).

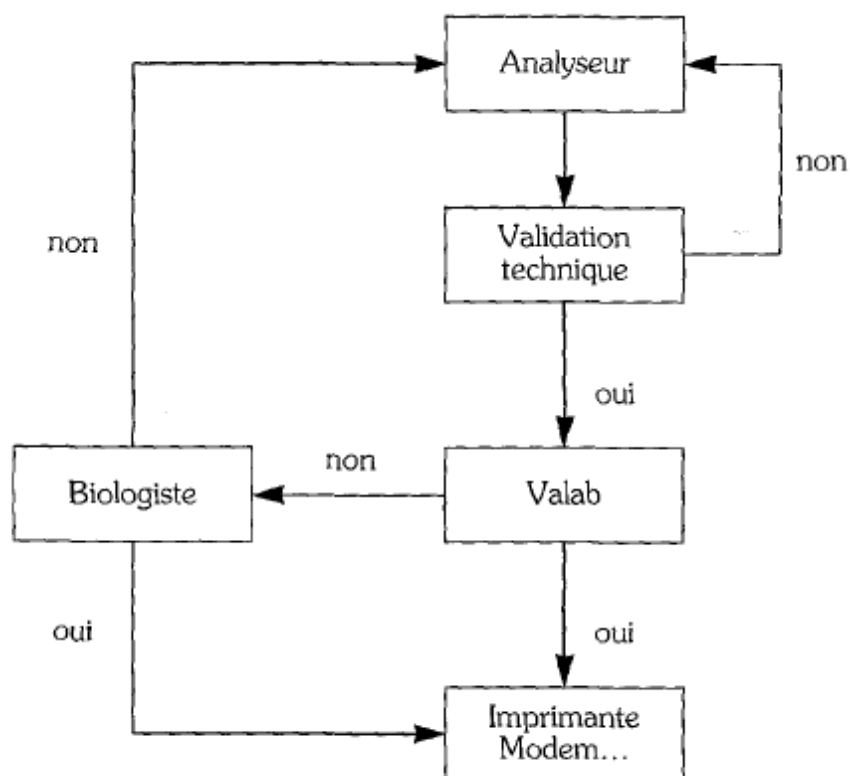


Figure 17 : Illustration du fonctionnement du logiciel expert Valab (65)

3) L'aide au diagnostic médical

Les premiers systèmes d'aide au diagnostic ont été créés par deux grosses entreprises américaines qui sont DeepMind Health et IBM Watson Health. Ces systèmes ont ensuite été entraînés à l'aide des données fournies par de gros complexes hospitaliers américains et britanniques (66). Ces derniers ont laissé l'accès à des millions de dossiers médicaux (un dossier médical représente approximativement 7 Go de données), soit des milliards de milliards d'octets de données médicales.

Ces algorithmes d'intelligence artificielle reposant sur des modèles prédictifs solides et dynamiques, doivent donc être continuellement mis à jour à chaque nouveau patient traité pour continuer à s'enrichir et à apprendre.

A partir de ce stade, le diagnostic médical peut être considérablement amélioré par l'intelligence artificielle. L'IA peut en effet être capable de lire et d'analyser des images médicales afin de poser un diagnostic. C'est le cas dans de nombreuses pathologies comme le diabète, le cancer, certaines maladies infectieuses et même pour certains troubles neurologiques ou cardiaques.

a) Endocrinologie

Pour toutes les personnes atteintes de diabète, quel que soit le type, un examen annuel de la rétine est nécessaire afin de permettre le dépistage précoce et la prise en charge rapide d'une rétinopathie diabétique.

Cet examen, réalisé classiquement avec un fond d'œil par un ophtalmologiste, est un moyen coûteux pour la sécurité sociale et qui prend du temps. Compte tenu de l'augmentation du nombre de personnes diabétiques et du manque de temps et d'effectif des spécialistes de l'œil, un système automatisé impliquant une analyse informatique d'une image rétinienne réduirait la charge des professionnels de santé.

Se basant sur un apprentissage profond avec une analyse d'immenses quantités d'images rétinienne chez les personnes atteintes de diabète, une IA permet, grâce aux smartphones, de dépister la rétinopathie diabétique de manière simple (67). Le logiciel informatique, après apprentissage, devient capable de repérer les anomalies et d'adresser les personnes concernées à un ophtalmologiste qui réalisera une évaluation plus poussée, voire une instauration de traitements.

Cette méthode de détection fiable, rapide et peu coûteuse est très pratique à utiliser puisque des milliards de personnes utilisent aujourd'hui un smartphone. Cela peut être d'autant plus important lorsqu'il s'agit de dépister des personnes dans des zones reculées de pays peu développés où le personnel qualifié est rare.

b) Oncologie

Dans certains cancers, l'interprétation juste d'une image médicale peut conférer un avantage certain en termes de mortalité. Il est, en effet, important de ne pas manquer un cancer présent ou débutant mais à croissance rapide. Il est également préférable d'éviter les faux positifs.

La mammographie, pour le dépistage du cancer du sein, permet de détecter des micro-calcifications pouvant révéler un début de cancer. Cet examen est à réaliser tous les 2 ans à partir de l'âge de 50 ans. Les chercheurs travaillent aujourd'hui à rendre la pratique du dépistage du cancer du sein plus intelligente et, de fait, plus efficace (68). L'IA, avec un algorithme de deep learning, va là encore être capable d'apprendre de manière avancée de grands ensembles de données complexes afin d'effectuer des tâches telles que l'interprétation d'images médicales. Avec sa capacité d'adaptation, l'intelligence artificielle pourra ensuite analyser de façon autonome une image qu'elle n'aura jamais vue et dire si des examens complémentaires, comme une biopsie, sont nécessaires.

L'incidence des cancers gastriques est en nette diminution dans la plupart des pays du monde mais reste tout de même la deuxième cause de décès par cancer, tout particulièrement dans les pays d'Asie de l'Est (69).

La classification TNM permet de classer les différents stades (I à IV) d'un cancer en fonction de la localisation de la tumeur primitive, des nodules voisins et de la présence ou non de métastases. Elle permet ainsi d'établir un pronostic sur les chances de survie du patient avec une précision relative. Néanmoins, les patients des stades intermédiaires ont montré des résultats pronostiques très différents les uns des autres, il est donc important de classer les cancers avec plus de précision. Cela est crucial afin d'adopter les bons conseils à transmettre aux patients et pour concevoir les stratégies thérapeutiques les plus adaptées.

Les méthodes classiques d'analyse ne permettant pas de prendre en compte tous les aspects biologiques et physiopathologiques des cancers, c'est pour cela que des réseaux de neurones artificiels ont été entraînés à classer les tumeurs cancéreuses et à pronostiquer avec plus de précision que la classification TNM, les prévisions de survie des patients.

L'opportunité de l'intelligence artificielle n'en est qu'à son commencement en oncologie. Des ensembles de données très volumineux sur l'imagerie médicale liée aux cancers seront encore nécessaires afin de former et de valider des modèles d'IA fiables pouvant être intégrés à la pratique clinique. Une collaboration interdisciplinaire entre professionnels de santé et monde informatique sera la clé de cet avenir prometteur. Cela permettra d'avoir des soins de meilleure qualité pour les patients cancéreux mais également pour les autres patients (70).

c) Infectiologie

La tuberculose est une maladie infectieuse causée par une mycobactérie, le bacille de Koch. C'est un problème de santé publique d'ordre mondial. En effet, après avoir été bien contrôlée pendant de nombreuses années, elle est en train de réapparaître dans le monde entier (71), notamment en Chine qui aurait le deuxième taux d'incidence de la tuberculose le plus élevé au monde, une situation grave dans un pays qui compte plus d'un milliard d'habitants.

Le diagnostic de la tuberculose se fait par détection des bacilles colorés au microscope et par identification de modifications morphologiques dans les tissus environnants. La très petite taille des bacilles et leur nombre généralement faible fait qu'il est compliqué de les observer au microscope. Il faut donc utiliser des champs de forte puissance ce qui laisse une zone visuelle limitée. Ce travail chronophage pour les pathologistes conduit souvent à un faible taux de détection et à des faux positifs.

Le développement d'un modèle de réseau neuronal a permis de détecter automatiquement les bacilles colorés et permet d'être très compétitif en termes de sensibilité et de spécificité. L'identification des modifications morphologiques est encore en apprentissage par le réseau neuronal mais ce système permet déjà de soulager les professionnels de santé d'une tâche longue et fastidieuse. Cela augmente le taux de détection et réduit les risques d'erreurs de diagnostic.

d) Neurologie

La maladie d'Alzheimer est le résultat d'une longue dégénérescence des neurones de l'hippocampe puis du reste du cerveau. Elle occasionne des troubles de la mémoire récente et des fonctions exécutives, ainsi que des troubles de l'orientation dans le temps et l'espace. Le patient atteint perd alors progressivement ses facultés cognitives et son autonomie. Avec le vieillissement croissant de la population mondiale, mieux comprendre et diagnostiquer cette maladie est un enjeu majeur. La détection de cette maladie se fait de manière plus ou moins précoce avec des tests des fonctions cognitives, l'imagerie cérébrale (IRM et TEP) et l'analyse des marqueurs biologiques.

Des réseaux de neurones, entraînés à l'analyse des résultats obtenus par tomographie par émission de positons, sont utilisés pour diagnostiquer les patients atteints de maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer (72). Cette nouvelle méthode de diagnostic assisté par ordinateur est très prometteuse et pourrait contribuer à une prise en charge précoce de la pathologie et ainsi garantir la meilleure qualité de vie possible pour le patient.

Un accident vasculaire cérébral ou AVC est dû à une interruption de l'apport sanguin causé généralement par un blocage des vaisseaux sanguins ou par une hémorragie. Des lésions irréversibles du tissu cérébral surviendront si elles ne sont pas détectées au cours des premières heures après la coupure des réserves en oxygène et nutriments. Aux Etats-Unis, les AVC représentaient 1 décès sur 19 en 2009 (73). Cette fréquence se vérifie dans la plupart des pays développés et en développement.

Le diagnostic se fait par TDM ou Tomodensitométrie et doit être fait précocement afin de réduire la morbidité et la mortalité. Aux premiers stades de l'AVC, les lésions sont difficiles à distinguer à l'œil nu. De plus, l'analyse précise des images cérébrales prend un temps considérable. Un algorithme d'intelligence artificielle, basé sur un réseau de neurones entraîné à reconnaître précisément des lésions de toutes tailles, a donc été créé afin d'aider le spécialiste à analyser les images et permettre ainsi une prise en charge rapide du patient. Cela permettra de répondre au nombre croissant de nouveaux accidents vasculaires cérébraux.

L'épilepsie est un trouble neurologique courant et détecter les crises est très compliqué puisque des signaux d'alerte ne surviennent pas à chaque fois qu'une crise va arriver. Des recherches visant à diminuer le temps de prise en charge des crises et à localiser les parties les plus touchées du cerveau ont été réalisées (74). L'utilisation d'un système d'intelligence artificielle utilisant des multitudes d'arbres décisionnels (une forêt de décision) a permis, après analyse de très nombreux électro-encéphalogrammes, de réduire considérablement le temps de détection des crises en gardant, tout de même, une précision de 100%.

e) Autres domaines médicaux

Il existe d'autres applications de l'intelligence artificielle pour diagnostiquer des pathologies. Il est en effet possible de pronostiquer des dysfonctions immunitaires chez les patients âgés. Avec Balascopy, un ordinateur assisté d'un système de reconnaissance de formes, les professionnels de santé sont désormais capables de détecter les lymphocytes T4, T8 et B et de les quantifier (75). L'algorithme d'intelligence artificielle peut alors comparer les valeurs observées avec des valeurs normales et remarquer si des déséquilibres apparaissent. Il peut aussi repérer des dysfonctionnements immunitaires précoces chez des sujets en parfaite santé. Ce système informatique peut servir d'outil pour évaluer les déséquilibres métaboliques, immunologiques et même comportementaux.

Certaines urgences permettraient d'être plus facilement diagnostiquées grâce à l'intelligence artificielle. C'est notamment le cas de maladies cardio-vasculaires comme l'infarctus du myocarde avec l'analyse des résultats lus sur l'électrocardiogramme et ceux de l'analyse biologique.

Il serait également possible de faciliter le diagnostic en orthopédie avec les systèmes d'apprentissage automatique. Ces derniers peuvent, en effet, repérer des traumatismes (comme des fractures), sur les radiographies.

Une dernière étude a mis en lumière un moyen de prédire la réadmission d'un patient après sa sortie de l'hôpital (76). En effet, les réadmissions après une sortie d'hôpital sont courantes et coûteuses pour les hôpitaux et les patients. Il a donc été créé un modèle afin de prédire les risques de réadmission dans les trente jours après un séjour hospitalier. Ce modèle, capable de prévenir les réadmissions après des infarctus du myocarde et des pneumonies, doit encore être entraîné en cas de première admission à cause d'autres pathologies.

4) L'analyse des clichés médicaux

Le rapide développement des technologies basées sur l'intelligence artificielle et sa mise en œuvre dans l'imagerie clinique de routine va entraîner une transformation dans la pratique de la radiologie. Les radiologues auront alors le nouveau rôle de clinicien augmenté et assureront la mise en place, dans le respect des normes de sécurité, des systèmes d'intelligence artificielle (77). La radiologie améliorée par l'IA aura un impact significatif qui est la réduction du coût global de l'imagerie en augmentant la productivité des radiologues grâce à l'automatisation de processus chronophages.

Les méthodes d'apprentissage des systèmes d'IA rendront également les résultats d'imagerie plus précis, plus sûrs et plus pratiques qu'aujourd'hui. Cela aura aussi pour conséquences de favoriser l'apparition de nouveaux postes, notamment en radiomique (correspond à l'utilisation de données quantitatives extraites des images radiologiques dans le but de générer des images de biomarqueurs utilisés pour le diagnostic de différentes maladies), en radiogénomique (équivalent de la pharmacogénétique en radiothérapie, utilisée pour déterminer les facteurs de risques de certaines pathologies), dans l'exploration de données et en recherche.

a) Automatisation de la détection et de la prédiction des maladies

D'une façon générale, plusieurs cas d'utilisation de l'intelligence artificielle peuvent être mis en place dans le cadre de la radiologie. En premier lieu, il y a l'automatisation de la détection et de la prédiction des pathologies et leurs évolutions. En effet, comme vu précédemment, les systèmes d'apprentissage sont sur le point d'automatiser la détection précoce de certains cancers ou encore de pneumonies à partir de scanners ou de radiographies thoraciques. Il convient ensuite d'augmenter les capacités des algorithmes d'IA afin de pouvoir prédire le comportement des lésions pour réduire les tests invasifs inutiles comme les biopsies.

Le système d'intelligence artificielle utilisé dans ce cas est un système de machine learning qui débute son développement avec une phase d'apprentissage où l'on va l'entraîner à reconnaître tous les détails importants contenus dans les images médicales. L'algorithme pourra alors classer chaque image dans un dossier précis.

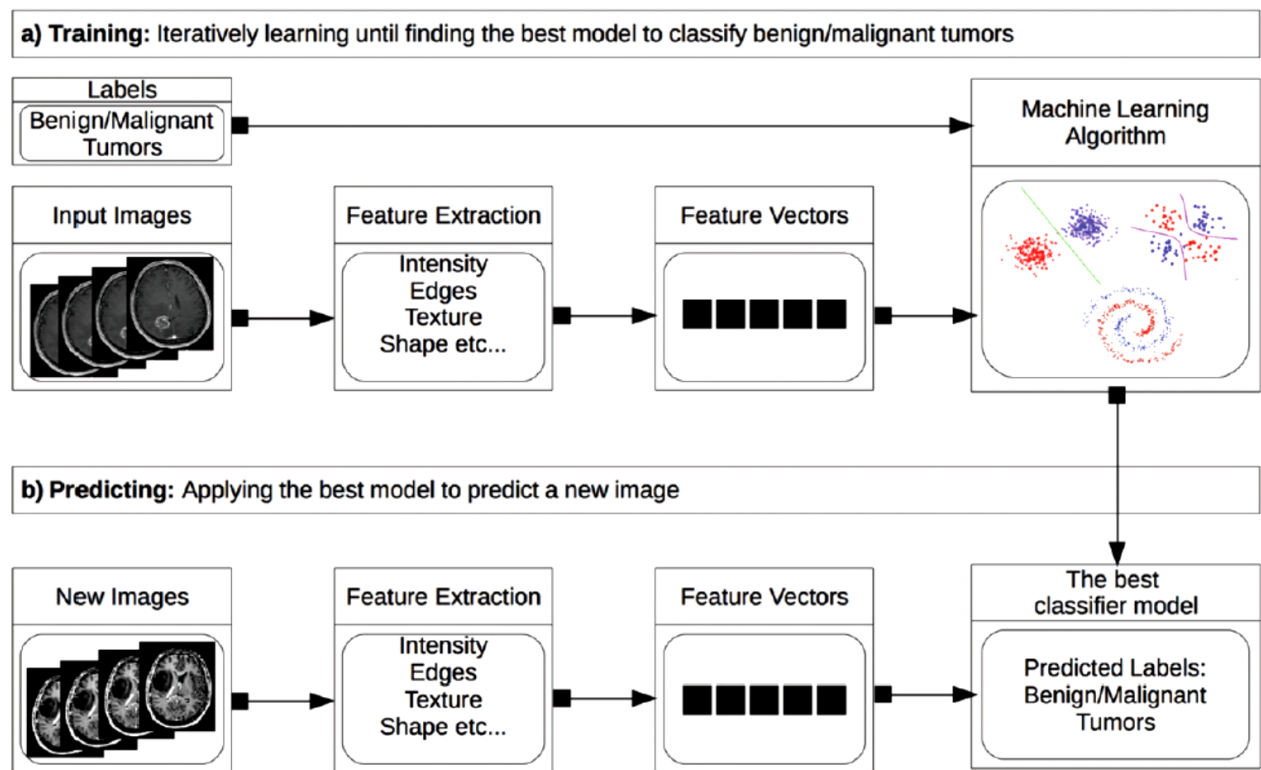


Figure 18 : Illustration du développement d'un système d'apprentissage automatique et de son application en radiologie (78)

Avec une nouvelle image médicale, le système d'algorithme d'apprentissage va prendre en compte les caractéristiques de l'image considérées comme étant essentielles pour le diagnostic (Figure 18). L'algorithme va ensuite identifier la meilleure combinaison de ces caractéristiques afin de pouvoir classer l'image dans une région précise qui permettra ensuite de donner un diagnostic sur une maladie et de prévoir son évolution. Ce système d'apprentissage automatique ou machine learning est en concurrence avec l'apprentissage profond ou deep learning (78) (79). Ce dernier n'a pas besoin d'identifier les informations importantes de l'image en premier lieu mais ce type d'algorithme est aussi beaucoup plus difficile à réaliser et plus long à entraîner.

En plus de nombreuses pathologies, l'intelligence artificielle peut repérer sur une radiographie, un os qui serait fracturé ou juste fêlé. Cela peut aider les chirurgiens orthopédiques qui peuvent ainsi déterminer si une opération est justifiée ou non (80).

b) Segmentation automatique des images

L'intelligence artificielle, et plus particulièrement l'apprentissage profond pourrait permettre la segmentation automatique des images, notamment du cerveau. Ceci étant une condition préalable à l'évaluation du cerveau à tous les âges, du nouveau-né au plus âgé. Il faut, pour cela, traiter les images afin d'éliminer les régions non cérébrales qui laisseront place à une image en trois dimensions permettant de mieux visualiser les tissus altérés pathologiquement (81).

c) Diagnostic de précision

Une troisième application est celle du diagnostic de précision. Au fur et à mesure des recherches sur l'expression génique et son lien avec l'imagerie des tumeurs, un système d'apprentissage deviendra obligatoire afin de pouvoir exploiter les énormes quantités de données issues de l'imagerie. Cela permettra d'évaluer la génétique et le comportement de la tumeur, ainsi que la réponse au traitement. Il sera également possible d'adapter ces diagnostics de précision aux maladies chroniques et dégénératives comme la maladie d'Alzheimer et les maladies coronariennes. Il sera en fait possible d'appliquer cette méthode à toutes les maladies présentant un lien entre biomarqueurs issus de l'imagerie et génétique (81).

d) Aide à la prise de décision

Le dernier domaine de l'imagerie médicale où l'intelligence artificielle sera applicable est celui des systèmes d'aide à la décision radiologique. Le machine learning peut, en effet, aider à la prise de décision en imagerie diagnostique. Cela peut aussi réduire la surcharge d'information chez les professionnels qui interprètent déjà de très nombreuses images par jour. Ces algorithmes peuvent également aider à une détection rapide dans des situations d'urgence comme les accidents vasculaires cérébraux (73).

5) Intelligence artificielle et littérature biomédicale

Au Centre Hospitalier Universitaire de Nantes, une unité de recherche nommée eHOP a été mise en place en mai 2015. Cette unité permet d'utiliser les données anonymisées des dossiers patients informatisés et de les interroger, qu'elles soient structurées ou non. L'unité de recherche concerne plusieurs millions de patients et sera tout d'abord alimentée par les six années de soins précédentes avant que les flux provenant du logiciel Millenium ne soient ajoutés en temps réel (82). Cette unité autorisée par la CNIL, garantit le respect éthique, réglementaire et scientifique de chaque demande d'exploitation des données.

Toutes ces données permettront d'alimenter la recherche, ainsi que des études épidémiologiques ou de santé publique. A partir d'unités de recherche comme celle-ci, des algorithmes d'intelligence artificielle pourront rechercher des informations précises afin d'améliorer la recherche médicale ou de générer des rapports.

a) Fouille textuelle

La littérature biomédicale permet de résumer toutes les connaissances scientifiques d'aujourd'hui. Malheureusement, la quantité de données disponible est beaucoup trop importante pour être analysée manuellement. Il devient donc urgent de mettre au point des méthodes d'analyse automatisées afin de pouvoir continuer les activités de recherche bibliographique (83).

C'est pour résoudre ce problème que des études ont été menées avec des logiciels fonctionnant avec des algorithmes de traitement du langage naturel. Ces systèmes, une fois entraînés, peuvent repérer des mots clés dans des milliers d'articles afin de ne sélectionner que les plus importants.

Cette fouille textuelle peut notamment être utilisée à l'hôpital pour rechercher de nouvelles techniques de prise en charge des patients, de nouveaux traitements récemment mis sur le marché ou encore expérimentaux qui permettraient de traiter au mieux un patient en fonction de sa pathologie ou de ses analyses. Elle peut également être appliquée au domaine de la pharmacovigilance afin de repérer précocement ou de prévenir la survenue de certains effets indésirables en se basant sur les dossiers médicaux (pathologies, traitements actuels, analyses biologiques) des patients (84).

Ces algorithmes de fouille textuelle des bases de données permettent un gain de temps considérable pour les professionnels de santé ce qui leur laisse plus de temps pour s'occuper des patients.

b) Génération de rapports médicaux

En plus de l'aide à la recherche bibliographique, l'intelligence artificielle pourra générer des rapports ou des études. En effet, l'assistance et la reconnaissance vocale pourront remplacer de longues heures de rédaction et de dictée de la part des professionnels de santé pour la confection de ces écrits qui se doivent d'être exacts sur le plan factuel et grammatical. Il serait aussi possible de créer des rapports à l'aide d'images comme en radiologie (77).

c) Détection d'erreurs

Les algorithmes d'apprentissage pourront également détecter les erreurs dans les écrits, notamment dans les rapports médicaux. L'IA pourrait agir en tant que second lecteur et avertir le professionnel de santé des erreurs sémantiques et de syntaxe avant que l'écrit ne soit finalisé. Ceci permettrait d'éviter des erreurs pouvant être considérées comme importantes (77).

6) La chirurgie 2.0

A l'hôpital, la chirurgie est un autre domaine dans lequel l'intelligence artificielle peut être utilisée. On y retrouvera notamment des systèmes d'apprentissage automatique et profond afin de prédire la réussite d'une chirurgie à partir d'images, des algorithmes de traitement naturel du langage pour se tenir informé à propos des études et techniques chirurgicales, et enfin, la vision par ordinateur qui permet la compréhension d'images et de vidéos et qui peut être appliquée dans l'aide au diagnostic ou la chirurgie guidée par ordinateur.

Avant certaines interventions plus ou moins invasives, l'analyse des clichés médicaux va influencer sur la décision d'intervenir ou non. C'est le cas pour les biopsies de certaines tumeurs. L'IA va analyser les images de la tumeur et dire si la biopsie est nécessaire.

Dans d'autres cas, comme en chirurgie bariatrique, l'intelligence artificielle peut être utilisée à toutes les phases opératoires (pré, intra et post-opératoires). En pré-opératoire, et à l'aide des données fournies par les applications mobiles permettant de suivre le poids, les repas, la glycémie ou encore l'activité physique, l'IA peut faire une évaluation globale des bénéfices et des risques d'une opération pour le patient (85).

En phase intra-opératoire, le chirurgien pourrait utiliser l'IA afin d'améliorer ses prises de décision en se basant sur une analyse en temps réel de l'avancée de l'opération en utilisant la vidéo, mais aussi l'analyse des signes vitaux du patient. La surveillance des différentes données fournies lors de l'opération pourrait permettre de prévoir et d'éviter les complications.

A la sortie de l'hôpital, les données des appareils personnels des patients pourraient continuer à être intégrées aux données de leur hospitalisation afin de maximiser la perte de poids et la résolution des comorbidités en relation avec l'obésité.

Toutes les données enregistrées pourraient ensuite aider d'autres chirurgiens dans leur travail, notamment pour l'intervention dans des cas peu communs. Cet exemple de chirurgie 2.0 pourrait être appliqué à de très nombreux types de soins chirurgicaux qui se retrouvent ainsi personnalisés afin de répondre au mieux aux habitudes et aux caractéristiques du patient.

7) Vers une médecine personnalisée

C'est probablement l'une des plus grandes avancées de l'intelligence artificielle dans le domaine médical. En effet, les techniques d'intelligence artificielle, et en particulier celles d'apprentissage automatisé, permettent aujourd'hui d'exploiter de manière optimale les bases de données massives qui existent afin de formuler des hypothèses qui permettront de personnaliser au mieux les traitements des patients.

Un des domaines médicaux où cela s'avère le plus utile est l'oncologie. La lutte contre le cancer utilise de très nombreuses approches, et parmi elles, la génomique et la radiomique (86). La génomique étudie le génome d'une tumeur en la cartographiant et en identifiant les gènes concernés ainsi que leurs séquençages et leurs expressions. La combinaison de ces deux approches permet d'améliorer le diagnostic, le pronostic et le suivi du patient (dès le diagnostic de la tumeur, puis au cours du temps, pour adapter en temps réel la prise en charge en fonction de l'évolution de la tumeur). Plusieurs études ont loué les bienfaits de ces systèmes d'intelligence artificielle en oncologie, notamment dans la prise en charge de patients atteints de glioblastomes, de carcinomes nasopharyngés ou cancers pulmonaires.

L'entreprise Sophia Genetics a récemment développé un nouveau système d'IA qui permet de détecter et de quantifier toutes sortes de molécules (notamment de l'ADN tumoral circulant) dans des échantillons liquides prélevés sur des patients (urine, sang, liquide cébrospinal, ...). Cela permet d'adapter de manière précise la prise en charge du patient en détectant de manière précoce le cancer puis en suivant sa progression, mais également l'efficacité d'un traitement (radiothérapie, chimiothérapie ou encore immunothérapie) et son éventuelle toxicité (87). Cette nouvelle façon de faire limite les biopsies sur certains tissus, beaucoup plus invasives pour les patients.

L'intelligence artificielle peut également prédire la réussite d'un traitement. En analysant le dossier médical d'un patient et en le comparant avec le génome de sa tumeur et sa signature radiomique, les systèmes d'IA seront en mesure de dire si un traitement médicamenteux sera efficace ou non chez ce patient. Il sera donc possible de déterminer quel traitement sera le plus efficace pour chaque patient, évitant par la même occasion des traitements inutiles, longs et souvent très coûteux (88).

Outre l'oncologie, ces nouvelles approches peuvent également être utilisées pour d'autres pathologies dans les systèmes cardiovasculaires (recherche de marqueurs pour détecter un infarctus du myocarde, une angine de poitrine ou tout simplement une atteinte cardiaque), endocriniens (atteinte de la thyroïde, ...) et d'autres encore.

Mais ces nouveaux systèmes d'IA ne permettent pas uniquement de prendre en charge les pathologies des patients. Ils peuvent aussi servir à donner la vie. Une étude a récemment démontré que l'intelligence artificielle, en l'occurrence un réseau de neurones, pouvait aider les cliniciens à adapter les traitements de couples peu fertiles afin d'améliorer le résultat d'une procréation médicale assistée (89).

Le réseau neuronal est alimenté à partir de toutes les informations pertinentes à propos du couple cherchant à faire une fécondation in vitro. Les données personnelles comme l'historique démographique et médical des deux partenaires sont insérées dans la base de données. S'en suit un examen clinique du couple. L'intelligence artificielle propose alors plusieurs scénarios de traitements alternatifs chacun étant accompagnés d'un pourcentage de risque d'échec. Les médecins peuvent alors sélectionner le scénario avec le risque le moins élevé d'échec.

Après insémination, la femme est alors surveillée de très près et les résultats (le dossier médical complet des deux partenaires ainsi que le scénario utilisé pour la procréation médicale assistée) vont alors nourrir le réseau de neurones, ce qui améliorera le potentiel prédictif du système.

L'intelligence artificielle peut donc permettre aux médecins d'améliorer considérablement les traitements des patients et leur qualité de vie en personnalisant leurs traitements. Ceci aura pour conséquences une optimisation des traitements (augmentation de l'efficacité et diminution de la durée de traitement), une diminution des échappements thérapeutiques dans le cas de certaines pathologies mais également une diminution des coûts non négligeable.

D) Utilisation de l'intelligence artificielle dans les institutions nationales de santé

1) Pharmacovigilance

Selon la définition de l'ANSM (Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des produits de santé), la pharmacovigilance est la surveillance des médicaments et la prévention de leur utilisation (90). Elle comprend un échelon national avec l'ANSM et des échelons régionaux avec les centres régionaux de pharmacovigilance. Les autres acteurs étant les professionnels de santé, les patients et les entreprises du médicament qui font des déclarations spontanées des effets indésirables observés avec une utilisation conforme du médicament, ou non conforme (mésusage, abus, surdosage ou exposition professionnelle).

Aujourd'hui, le système de pharmacovigilance est à bout de souffle. En effet, après les derniers scandales liés aux médicaments et largement médiatisés, les gens font moins confiance au système de pharmacovigilance. Cela s'observe avec un nombre de déclarations d'effets indésirables aux autorités compétentes en baisse, on a donc une sous-déclaration des incidents. Il est ici intéressant d'adopter de nouvelles technologies comme l'intelligence artificielle afin d'automatiser les opérations de pharmacovigilance ce qui permettrait d'aider les personnes en charge des déclarations de pharmacovigilance dans leur travail (91).

Un des systèmes pouvant être mis en place est un système de fouille des bases de données comme le RCP (Résumé des Caractéristiques du Produit). Il se développe, en effet, une méthode pour relier les effets indésirables, ceux connus dans le RCP, aux données des patients à l'hôpital afin de générer automatiquement des liens, et ce, avec une bonne sensibilité et spécificité (84). Un ordinateur va donc comparer les effets indésirables connus d'un ou plusieurs médicaments avec les résultats biologiques et cliniques d'un patient pour rechercher les possibilités de survenue de ces effets indésirables et alerter les professionnels de santé en cas de risque. Ce système de détection automatisée des effets indésirables au cours de la pratique clinique montre une qualité proche de celle obtenue par un examen intensif des dossiers des patients par un être humain. Cette méthode, basée sur l'intelligence artificielle, permettrait, si elle était généralisée dans tous les hôpitaux, de détecter précocement les effets indésirables et même de les prévenir.

Un deuxième système pouvant être mis en place en pharmacovigilance est la fouille textuelle sur les réseaux sociaux. La recherche des événements indésirables après la prise d'un médicament s'avère complexe. C'est pourquoi, la communauté informatique se penche sur le sujet avec une attention particulière. Ces dernières années, les données postées par les utilisateurs sur les réseaux sociaux (tels que Twitter ou Facebook, mais aussi les plateformes liées à la santé comme DailyStrength ou MedHelp) sont devenues des ressources très utiles pour la surveillance des effets indésirables, principalement en raison de leur très grand volume (92).

Les consommateurs de certains médicaments ont en effet tendance à partager leur expérience avec d'autres personnes confrontées à des problèmes similaires, à discuter et à mettre à jour leurs points de vue et leurs opinions. Ces données anonymes sont des sources non négligeables pour la pharmacovigilance, mais aussi l'addictovigilance et l'épidémiologie. Elles s'ajoutent aux données préexistantes dans le RCP et sont exploitées par les autorités compétentes mais aussi les industries pharmaceutiques.

Cette surveillance automatique des données doit tout de même être améliorée afin d'éviter les problèmes de crédibilité, de récence, d'unicité, de fréquence et de pertinence des données. Il faut choisir les bons réseaux sociaux et extraire les données les plus pertinentes. De plus, les utilisateurs des réseaux sociaux utilisent souvent des termes descriptifs non médicaux ce qui réduit la capacité d'un système d'intelligence artificielle (ici des algorithmes de machine learning) d'extraire automatiquement les termes du texte. A l'avenir, il faudra donc s'adapter en utilisant des mots-clés de recherche précis et même des filtres d'orthographe phonétiques capables de détecter des mots comportant des fautes d'orthographe communes.

2) Addictovigilance

De récentes études montrent également que l'intelligence artificielle pourra avoir une place importante en addictovigilance. Elle pourra surveiller l'apparition de nouvelles substances médicamenteuses ou non, ainsi que leurs effets psychoactifs, et ce, de la même manière que pour les systèmes de pharmacovigilance. Ainsi, en faisant des fouilles textuelles sur les réseaux sociaux, les autorités compétentes en addictovigilance pourront observer précocement l'arrivée des nouvelles molécules sur le marché ou le détournement de molécules déjà existantes.

Il sera aussi possible, à l'aide des nouvelles technologies (smartphone, ordinateur, ...), de dépister de façon précoce les patients à risque d'addiction ou de rechute (93). Il sera également possible de surveiller quotidiennement les symptômes et les traitements. En cas de problème, ces nouveaux systèmes pourront alerter les professionnels de santé qui seront alors en mesure d'agir de manière plus personnalisée.

3) Épidémiologie

L'épidémiologie est l'étude des problèmes de santé dans les populations humaines (fréquence, distribution dans le temps et dans l'espace, facteurs influençant la santé et les maladies). Cette discipline étant principalement une affaire de statistiques et de probabilités, l'intelligence artificielle peut tout à fait y trouver sa place. L'IA pourra être utilisée en microbiologie et notamment en virologie, ou encore dans l'étude de l'environnement.

Des études ont montré que des systèmes basés sur l'intelligence artificielle pouvaient être utilisés en microbiologie et plus particulièrement en virologie. L'un des exemples les plus probants est celui du virus de la grippe avec l'usage de l'intelligence artificielle pour déterminer la souche virale qui sera utilisée pour la fabrication du vaccin antigrippal.

Mais il est également habituel de retrouver des algorithmes d'apprentissage afin de prédire et de modéliser les risques d'éclosions de maladies transmissibles liées à différents facteurs (vecteurs, climat, ...) (94). De très nombreuses données sont alors étudiées afin de prévenir les transmissions de nouveaux virus dans certains pays pourtant non endémiques de ces virus. C'est le cas pour des viroses comme le Zika, la dengue ou encore le Chikungunya qui sont transmises par les moustiques.

Outre les risques d'éclosions de nouvelles maladies, l'intelligence artificielle peut aussi prédire la prolifération d'autres maladies comme pour les épidémies de grippe. Mais elle peut également être utilisée pour des pathologies beaucoup plus graves telles que le syndrome respiratoire aigu sévère ou Ebola pour lesquelles les scientifiques cherchent à déterminer les réservoirs primaires et secondaires (porteurs sains du virus) pour les éradiquer et ainsi, stopper la progression de la maladie (95).

Des algorithmes d'exploration de données et d'apprentissage automatique sont de plus en plus appliqués à l'épidémiologie de la pollution atmosphérique. Ces systèmes d'intelligence artificielle peuvent prévenir les pics de pollution dans les grandes métropoles, mais aussi donner des informations sur la qualité de l'air avec l'aide de nombreux capteurs présents un peu partout dans le monde (96). Cet important nombre de données associé à une grande capacité de stockage permet aujourd'hui de déterminer les causes de pollution atmosphérique et ainsi de diminuer les risques de survenue de certaines pathologies, notamment respiratoires.

E) Diverses applications de l'intelligence artificielle en santé

On peut aussi retrouver des systèmes d'intelligence artificielle dans de nombreux outils que les français peuvent utiliser au quotidien. On en retrouve notamment dans le domaine de la santé connectée ou encore dans celui de la robotique.

1) L'e-santé

a) Définir l'e-santé

La santé numérique ou e-santé représente les différents domaines de la santé qui utilisent les technologies de l'information et de la communication. L'e-santé se développe de manière exponentielle ces dernières années, grâce, notamment, à la création de très nombreuses start-up, que ce soit en France ou l'étranger.

La santé connectée se décline en multitude d'objets connectés ou d'applications utilisant, dans de nombreux cas, des algorithmes d'intelligence artificielle. Elle peut se trouver dans tout le parcours de santé du patient, de la prévention à l'observance des traitements. Les start-up d'e-santé créent aussi des outils pouvant être utilisés en télémedecine (consultations à distance), dans l'aide au maintien à domicile et dans de nombreux autres domaines (97).

En France, un pharmacien sur deux aurait déjà vendu des objets connectés dans son officine. Cela pourrait augmenter puisque 61% des français sont favorables à l'utilisation d'objets connectés pour leur santé, et seulement 19% en utilisent au moins un (98).

b) Quelques applications d'e-santé

De nombreuses start-up sont créées chaque année, en France, dans le domaine de la santé connectée (Figure 19). Ces nouvelles entreprises créent des outils pouvant être utilisés dans la recherche, l'aide au diagnostic ou la télémedecine. D'autres se spécialisent davantage dans la pharmacie avec la vente en ligne, le maintien à domicile, le suivi des soins ou la vente de dispositifs médicaux.

Ad Scientiam est une entreprise développant des solutions mesurant l'évolution d'une maladie ce qui permet ensuite d'accélérer la prise de décision thérapeutique et de prédire la réponse à un traitement (99). Ces solutions sont des biomarqueurs digitaux créés à partir des données de la vie réelle en observant l'impact de la maladie sur la santé du patient. Ces données, collectées à l'aide d'appareils connectés, sont ensuite analysées par des algorithmes de machine learning et donneront une bibliothèque de biomarqueurs digitaux propres à une pathologie en particulier. Cela va alors permettre de transformer la prise en charge des patients.

Utilisée dans certaines officines, la start-up Pharmarket est un réseau de pharmacies et de parapharmacies en ligne (100). Elle permet aux patients de commander des produits de parapharmacie sur internet et de se faire livrer à domicile par une pharmacie française partenaire. Il est également possible de passer commande de certains médicaments et d'obtenir les conseils d'un pharmacien sur tous les produits commandés. Cela permet de sécuriser les achats de médicaments sur internet puisque les commandes sont toutes traitées par des pharmaciens inscrits à l'ordre national des pharmaciens.

Une autre start-up, Biomouv, met quant à elle, la prévention au premier plan (101). En effet, une IA permet ici de générer des programmes thérapeutiques connectés et personnalisés (selon la pathologie, le profil, les objectifs et les préférences du patient) d'activité physique et de nutrition validés par des médecins. Ce programme sécurisé (les données sont protégées dans une infrastructure agréée en santé) permet de suivre de nombreuses pathologies comme les maladies cardiovasculaires, certains cancers, le surpoids et l'obésité ou encore l'arthrose.

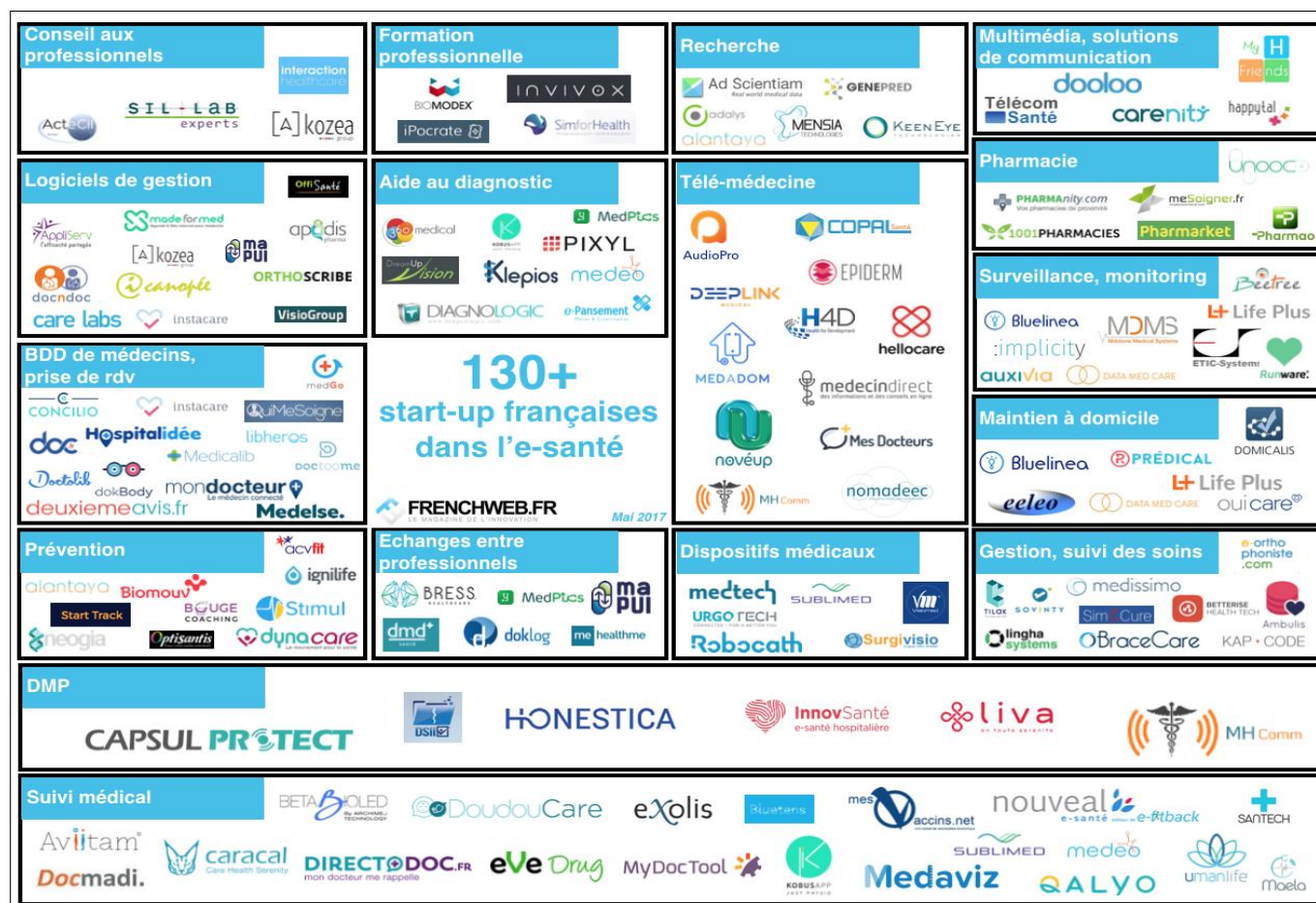


Figure 19 : Tableau montrant les principales start-up d'e-santé en France et leur domaine d'utilisation (102)

D'autres applications et objets connectés voient également le jour de manière régulière. Certaines start-up développent notamment des objets connectés permettant le suivi de la qualité du sommeil, de la pression artérielle ou encore du poids (29). C'est le cas d'Urgotech qui vend différents types d'appareils (103). Certains permettent de calmer les patients anxieux ou stressés à l'aide d'exercices de respirations guidés et personnalisés (capteur connecté à l'application Urgofeel), et d'autres permettent la rééducation du périnée en accompagnant les patientes avec des exercices simples et adaptés aux différentes problématiques (sonde périnéale connectée à l'application Urgomia).

Les données recueillies par ces objets sont ensuite analysées par des applications sur smartphones ou tablettes et permettent aux patients de suivre leur santé. Il ne faut pas non plus oublier les chatbots, ces agents conversationnels intelligents peuvent permettre aux patients d'avoir des réponses à leurs questions à propos de leurs traitements ou de leurs pathologies, ou encore de faire des diagnostics.

Un des enjeux de santé majeur est le vieillissement de la population. Pour faire face à cela, il existe des montres intelligentes pour détecter les chutes des personnes qui les portent afin d'alerter automatiquement les secours. Des piluliers intelligents peuvent aussi rappeler aux patients le moment de prise de leur traitement ou de signaler tout retard. Cela permet ainsi d'améliorer la qualité de vie des personnes dépendantes.

Pour les plus sportifs, certaines montres connectées permettent de mesurer les efforts fournis (fréquence cardiaque, ...) et de proposer des programmes d'entraînements personnalisés. Il existe même des polos et T-shirts intelligents développés par Ralph Lauren permettant de collecter des informations biométriques et d'optimiser la circulation sanguine afin d'améliorer les performances et la récupération du sportif.

Tous ces outils d'e-santé permettent de responsabiliser les patients vis-à-vis de leur santé. Ils peuvent ainsi devenir des acteurs majeurs de leur santé ce qui ne peut qu'améliorer leur prise en charge. Mais les patients peuvent aussi s'inquiéter de la sécurité et de l'usage qui sera fait de leurs données personnelles. Ces points épineux restent encore à approfondir.

2) La robotique

La robotique représente l'ensemble des techniques permettant de concevoir et de réaliser des machines automatiques ou des robots. On trouve de la robotique dans de nombreux domaines comme en industrie, dans la sécurité, le transport ou en santé. La robotique peut être considérée comme un sous-domaine de l'intelligence artificielle. L'IA vise ici à améliorer l'autonomie des machines en leur donnant des capacités perceptuelles, décisionnelles et d'action (104).

Une des applications les plus connues de la robotique en santé est la chirurgie assistée par ordinateur. Le rôle des algorithmes d'IA est ici d'aider le chirurgien à naviguer dans la zone à opérer en préparant l'opération de la meilleure des manières sur ordinateur (avec des images en trois dimensions très détaillées de la zone à opérer) et en améliorant la précision des gestes. Il est ainsi possible de simuler l'intervention pour être le plus efficace et précis possible le jour de l'intervention réelle, tout en étant le moins invasif possible. Cela permet également au chirurgien d'opérer à distance et parfois même en réalité augmentée (105).

Il existe également des prothèses intelligentes pouvant réparer ou augmenter le corps humain. Ces prothèses peuvent être des membres entiers (bras, jambe) ou seulement des organes artificiels (cœur). Les patients pourraient alors ne plus avoir à s'inquiéter de leur prothèse puisque cette dernière serait capable, à l'aide d'une puce intégrée, de donner l'alerte en cas d'anomalie comme une simple usure ou une infection.

La dernière utilisation de la robotique en santé serait l'assistance aux personnes âgées ou fragiles. Là encore, cette solution vise à répondre au vieillissement de la population en aidant le maintien à domicile des personnes possédant ces robots. Cette robotique domestique, en fort développement, cherche à imiter le vivant et à interagir avec les êtres humains. Certains robots, comme Mobiro de Toyota, aide les personnes à mobilité réduite ou handicapées à se déplacer, pendant que d'autres, comme Ifbot, peuvent tenir une conversation avec les personnes souffrant de solitude ce qui permettrait de lutter contre l'apparition de la démence (106). Le robot ROMEO, lui, permet de surveiller et de prendre soin des patients âgés et d'alerter si le besoin s'en fait ressentir.

Comme pour les systèmes d'e-santé, certains robots peuvent soulever des problèmes éthiques, en particulier sur la protection de la vie privée et des données personnelles. Là encore, il sera intéressant de voir quelles régulations vont être mises en place pour traiter ce problème.

III) Réglementation et limites de l'intelligence artificielle

A) Réglementation

Comment réguler l'intelligence artificielle ? Certaines personnes s'étaient déjà posés la question il y a une quarantaine d'années puisque la loi n°78-17 du 6 janvier 1978, intitulée « Informatique et libertés » et toujours appliquée malgré une révision entrée en vigueur le 1^{er} juin 2019, a posé des bases solides dans ce domaine, notamment sur la protection des données (107) (108). Mais aujourd'hui, de nouvelles questions se posent quant à la réglementation de l'intelligence artificielle avec l'avènement du Big Data. En effet, l'IA va, dans les années à venir, impacter de nombreuses facettes de notre société.

Il a toujours été nécessaire d'avoir des règles afin de réguler la conduite des êtres humains et leurs rapports sociaux, il en sera de même pour l'intelligence artificielle. L'Homme fait des erreurs dans sa vie personnelle, mais aussi professionnelle. L'IA en fera moins, mais en fera tout de même quelques-unes. Il s'agit alors de déterminer qui sera responsable en cas de dommages causés par une intelligence artificielle. Aucune règle existante ne peut s'appliquer à l'IA puisque cette dernière ne possède pas de conscience qui lui donnerait une perception de son existence et du monde qui l'entoure. Malgré cela, l'intelligence artificielle possède une liberté décisionnelle, on pourrait donc la considérer comme une personne électronique avec des droits et des devoirs, et qui pourrait prendre des décisions de manière indépendante. Il est donc important de trouver une réglementation de l'intelligence artificielle.

L'IA est aujourd'hui réglementée par la loi pour une République Numérique, promulguée en octobre 2016 et qui met au premier plan l'innovation et le développement d'un monde autour du numérique, tout en mettant en avant un droit à l'autodétermination informationnelle. La deuxième réglementation est le Règlement Général sur la Protection des Données qui est entré en application en mai 2018 et qui permet à l'Europe d'entrer dans cette ère numérique en créant un droit à l'oubli, un droit à la portabilité et à la minimisation de l'utilisation des données (109).

Ces deux réglementations mettent l'intelligence artificielle sous contrainte en prônant la protection de la vie privée par défaut et la protection de la vie privée dès la conception ce qui permet d'assurer un très haut niveau de protection aux personnes qui délivrent les données. Avec ces lois, les données ne peuvent plus être utilisées à tort et à travers pour alimenter les systèmes d'intelligence artificielle lors de leur phase d'apprentissage. Ces lois vont s'avérer très importantes et nécessaires dans les années à venir, du fait de l'augmentation exponentielle des IA créées par les entreprises des secteurs publics et privés, et pour lutter contre les IA malveillantes.

1) La Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés

a) Présentation de la CNIL

La CNIL ou Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés fut créée en 1978 à l'occasion de la sortie de la loi n°78-17. C'est une autorité administrative indépendante qui a pour objectif de veiller à la protection des données personnelles. Elle a également pour mission de faire en sorte que l'informatique ne porte pas atteinte aux droits de l'homme, à la vie privée, aux libertés individuelles ou publiques.

La CNIL est composée d'un collège de 18 personnes, nommées pour cinq ans et renouvelable une fois. On y retrouve deux membres du Conseil économique et social, quatre parlementaires (deux sénateurs et deux députés), six représentants des hautes juridictions de l'Etat (deux conseillers d'Etat, deux conseillers à la Cour de Cassation et deux conseillers à la Cour des Comptes), cinq personnalités qualifiées (trois sont désignées par décret ministériel, une par le président du Sénat et une par le président de l'Assemblée Nationale), et enfin, une dernière personne qui est le président de la Commission d'accès aux documents administratifs (110). La CNIL élit son président parmi tous ses membres. Ce dernier devient alors président à plein temps et ne peut pas avoir une autre activité professionnelle.

Cette commission ne reçoit d'instructions d'aucune autorité. Aucun ministre, aucune autorité publique et aucun dirigeant d'entreprise qu'elle soit privée ou publique, ne peuvent s'opposer à son action. Les délibérations de la CNIL peuvent néanmoins faire l'objet de recours devant le Conseil d'Etat.

La CNIL a six missions principales (111) :

- L'information des citoyens sur leurs droits et leurs obligations en ce qui concerne leurs données personnelles.
- La régulation des propositions de loi puisque la CNIL doit être consultée avant toute transmission d'une de ces propositions à l'Assemblée Nationale qui toucherait à la protection des données personnelles.
- La protection car la commission gère les plaintes des citoyens qui ne peuvent pas exercer leurs droits en ce qui concerne les données personnelles.
- Le contrôle en vérifiant le traitement informatique des données et leur sécurité. La CNIL peut envoyer une personne dans des locaux professionnels pour constater que toutes les mesures sont prises afin d'empêcher l'utilisation des données personnelles.
- La sanction en cas de manquement à la loi qui peut aller du simple avertissement à une amende pouvant aller jusqu'à 3 000 000€, ou encore à l'injonction de cesser toute activité.

- L'anticipation des développements des technologies de l'information afin d'être toujours en capacité d'apprécier les conséquences qui en découlent pour l'exercice des droits et des libertés. Elle proposera des mesures législatives ou réglementaires au gouvernement afin de s'adapter à ces évolutions.

b) Rôle d'information de la CNIL

Depuis le 25 mai 2018 et l'entrée en vigueur de la directive n°2016/679 de l'Union Européenne, autrement appelée le Règlement Général sur la Protection des Données ou RGPD, la CNIL a également un rôle d'accompagnement afin d'expliquer et d'aider les professionnels et les particuliers à se mettre en conformité avec cette nouvelle loi. En effet, pas loin de 8 000 000 de personnes ont visité le site de la CNIL en 2018 (soit une augmentation de la fréquentation de 80% par rapport à 2017) (112). Cette augmentation, après la mise en place du RGPD, est principalement due aux professionnels voulant se renseigner afin de se mettre en règle avec la loi. Mais elle est également due aux particuliers qui sont de plus en plus nombreux à se soucier de leurs données personnelles.

Chaque personne visitant le site Internet de la CNIL peut apprendre à maîtriser ses données en découvrant les bonnes pratiques et à agir en cas de problèmes en apprenant les moyens d'actions (113). Ces données peuvent servir à alimenter les systèmes d'intelligence artificielle, il est donc primordial que les citoyens français sachent les gérer. Tout le monde peut également comprendre et découvrir ses droits, qui sont les droits :

- D'information sur l'utilisation de ses données,
- D'opposition afin de refuser qu'un organisme utilise ses données,
- D'accès pour vérifier les données qu'un organisme détient sur soi,
- De rectification pour corriger les informations inexacts nous concernant,
- De déréférencement pour faire en sorte qu'aucun nom n'apparaisse plus comme étant liés à un contenu consultable dans un moteur de recherche,
- D'effacement pour effacer les données nous concernant,
- A la portabilité pour pouvoir emporter une copie de ses données afin de les utiliser ailleurs,
- Liés au profilage afin de n'être analysé que par un être humain et non par un automate,
- A la limitation des données afin de geler l'accès à ses données,
- D'exercer son droit d'accès au fichier des comptes bancaires et assimilés appartenant à l'utilisateur,
- D'exercer son droit d'accès aux fichiers de police, de gendarmerie et de renseignement dans lesquels la personne est inscrite.

c) L'intelligence artificielle et la CNIL

La CNIL a récemment publié le rapport de synthèse d'un débat public qu'elle a animé sur les enjeux éthiques des algorithmes et de l'intelligence artificielle. Les différents débats organisés ont débouché sur la mise en avant de deux principes fondateurs qui sont la loyauté et la vigilance (114).

Le principe de loyauté s'applique à tous les algorithmes, qu'ils traitent de données personnelles ou non. Ce principe intègre les impacts collectifs et personnels des algorithmes. Cette loyauté doit se faire envers tous les utilisateurs des systèmes d'intelligence artificielle, pas uniquement en tant que consommateurs, mais aussi en tant que citoyens. L'intérêt des utilisateurs doit passer avant toute autre chose. Ce principe pourrait, par exemple, s'appliquer à l'impact des algorithmes de police prédictive utilisés sur des communautés ou des quartiers, mais aussi l'impact des réseaux sociaux utilisés pour les débats publics.

Le principe de vigilance constitue une réponse aux exigences imposées par les systèmes d'IA du fait de leur nature imprévisible, du caractère compartimenté des chaînes algorithmiques et de la confiance excessive à laquelle ils donnent souvent lieu. C'est sur les maillons de la chaîne algorithmique qu'il faudra travailler pour donner corps à ce principe avec des procédures concrètes.

Ces deux principes se déclinent sous la forme de six recommandations opérationnelles destinées aux pouvoirs publics ainsi qu'à la société civile (entreprises, grand public, etc...) (114). Ces dernières préconisent de former à l'éthique tous les acteurs de la chaîne algorithmique (alphabétisation au numérique), de rendre les systèmes compréhensibles, de travailler le design des algorithmes au service de la liberté humaine (pour contrer l'effet « boîtes noires »), de constituer une plateforme nationale d'audit des algorithmes, d'encourager la recherche sur l'intelligence artificielle éthique et de renforcer la fonction éthique au sein des entreprises (comités d'éthiques, charte de déontologie, diffusion de bonnes pratiques, ...).

2) La Loi pour une République Numérique

Le numérique représente une incroyable opportunité de développement, de croissance, ainsi que de partage pour les entreprises et les citoyens français. Pour réaliser cette transformation numérique, le gouvernement français a pour objectifs de favoriser une politique d'ouverture des données et des connaissances, mais aussi de renforcer le pouvoir et les droits des individus dans le monde numérique (115). Le gouvernement a ainsi proposé un nouveau projet qui fut élaboré par un processus de construction à l'aide d'une concertation nationale à laquelle ont participé diverses entreprises, administrations et particuliers. Toutes les contributions, plus de 4000, ont été synthétisées et analysées par le Conseil national du numérique, puis transmises au gouvernement qui a ensuite écrit un projet de texte. Ce dernier a fait l'objet d'une relecture publique suscitant de nombreuses réactions et remarques qui furent prises en compte pour créer un projet de loi numérique.

La loi pour une République numérique n°2016-1321 fut promulguée le 7 octobre 2016 (116). Elle s'organise autour de trois axes visant à œuvrer pour la protection des individus dans la société du numérique, à favoriser la circulation des données et du savoir, à garantir l'accès au numérique pour tous. Cette loi permet d'accéder aux algorithmes publics et d'en connaître les principales composantes. Elle possède 15 points fondamentaux (117) (118) :

- L'ouverture par défaut des données publiques et d'intérêt général, en anonymisant et protégeant la propriété intellectuelle et les secrets industriels et commerciaux,
- L'accès sécurisé aux données pour les chercheurs et statisticiens publics,
- Le libre accès aux résultats des travaux de recherche publique et l'autorisation de la fouille de textes et de données,
- La neutralité du net qui garantit la non-discrimination d'accès au réseau en fonction des services par les fournisseurs d'accès,
- La portabilité des données en cas de changement de fournisseur,
- La loyauté de l'information à destination des consommateurs,
- La protection des données personnelles et notamment la confidentialité des correspondances électroniques,
- La pénalisation des revanches pornographiques,
- La mort numérique qui consiste à faire respecter la volonté d'un défunt sur le devenir de ses informations personnelles en ligne,
- Le droit au maintien de la connexion à Internet en cas de défaut de paiement des personnes les plus démunies,
- La facilitation des campagnes de dons par SMS,
- L'accélération de la couverture numérique du territoire en réseaux à très haut débit,
- L'accessibilité du numérique,
- Une stratégie de développement des usagers et des services numériques,
- La reconnaissance officielle de l'e-sport en tant que pratique professionnelle compétitive des jeux vidéo.

3) Le Règlement Général sur la Protection des Données

Le Règlement du Parlement européen et du Conseil relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données représente le texte de référence européen depuis le 25 mai 2018 en ce qui concerne la protection des données à caractère personnel. Ce règlement n°2016/679 ou RGPD (Règlement Général sur la Protection des Données) remplace la directive 95/46/CE (119) qui était jusqu'alors le document de référence en matière de protection des données personnelles. Le RGPD permet d'unifier et de renforcer la protection des données individuelles au sein des états membres de l'Union Européenne.

a) Les principales mesures du RGPD

Une des dispositions les plus importantes apportées par le Règlement Général sur la Protection des Données est le fait qu'il y a désormais un cadre unique avec une application extra-territoriale ; en effet, ce seul ensemble de lois s'applique même aux entreprises en dehors de l'UE qui traitent avec cette dernière. Il existe également des droits à l'oubli et à la portabilité des données personnelles, mais aussi le droit de ne pas faire l'objet d'une décision basée uniquement sur un traitement automatisé (profilage).

Les entreprises doivent maintenant avoir le consentement explicite et positif des concitoyens afin de leur donner plus de contrôle sur leurs données personnelles ; elles sont aussi tenues d'envoyer des notifications en cas de fuites de données. Chaque entreprise devra nommer un délégué à la protection des données personnelles qui devra recenser les fichiers, informer les personnes concernées et garantir la sécurité des traitements. De plus, toutes les actions pouvant impacter sur les données personnelles des individus doivent désormais être précédées d'études d'impact sur la vie privée.

Le RGPD a également mis en place les principes de protection des données dès la conception et de sécurité par défaut. Le Comité européen de la protection des données, créé pour l'occasion, a autorité pour tout ce qui touche de près ou de loin au RGPD. Les sanctions pour tout manquement aux exigences de ce règlement pourront faire l'objet de sanctions financières pouvant aller jusqu'à 20 millions d'euros ou pour une entreprise, jusqu'à 4% du chiffre d'affaires annuel mondial, le montant le plus élevé étant retenu (120) (121).

b) Le RGPD en officine

Dans nos officines, le Règlement Général sur la Protection des Données s'applique sur tous les traitements de données personnelles ; soit la collecte, l'enregistrement ou l'utilisation de n'importe quelle information liée à une personne physique identifiée ou identifiable (nom, prénom, date de naissance, numéro de sécurité sociale, numéro de téléphone, informations sur l'état de santé physique ou mentale passé, présent ou futur, ...) (122). Les données relatives à la santé des patients ne peuvent être utilisées que dans des conditions définies par la loi et uniquement dans l'intérêt des patients ou pour les besoins de la santé publique.

Le responsable du traitement des données personnelles ne peut être que le titulaire de l'officine (123). Face aux données, le pharmacien a plusieurs responsabilités et toute infraction l'emmènera au pénal. Tout d'abord, le pharmacien est tenu au secret professionnel, ce qui correspond à toutes les informations, venues à la connaissance du pharmacien dans sa pratique professionnelle, qui concernent un individu. Néanmoins, un pharmacien peut échanger des informations à propos d'un patient avec un ou plusieurs professionnels de santé, à condition qu'ils participent tous à la prise en charge de ce patient et que les informations échangées soient nécessaires à la coordination et à la continuité des soins, ainsi qu'à la prévention ou au suivi médical du patient. Un partage d'informations en dehors d'une équipe de soin devra se faire avec l'accord du patient.

Les données personnelles sont sous la protection du pharmacien. Les données recueillies doivent être pertinentes et nécessaires, et le sont pour un usage déterminé et légitime. Elles seront conservées pour une durée maximale de 3 ans. Toutes les personnes concernées par un enregistrement de leurs données doivent en être informées. Enfin, dans le cas d'une e-pharmacie, le dépôt et la conservation des données ne devront être effectués que sur des serveurs agréés de données de santé à caractère personnel et uniquement avec le consentement de la personne concernée.

Le dossier pharmaceutique ou DP est un dossier présent sur Internet et consultable avec la Carte Vitale, qui donne au pharmacien l'occasion d'avoir un accès à l'historique des traitements médicamenteux délivrés à une personne au cours des 4 derniers mois (21 ans pour les vaccins), et ce quelle que soit l'officine où les médicaments ont été délivrés. L'ouverture du DP est facultative et ne peut se faire qu'avec l'accord du patient et ce dernier pourra le faire fermer à tout moment. Le patient pourra choisir qui consulte son dossier pharmaceutique et les médicaments qu'il veut y faire figurer. Seuls les pharmaciens peuvent alimenter le DP d'un patient afin de sécuriser la délivrance des médicaments en prenant en compte les possibles interactions médicamenteuses à partir de la liste des médicaments déjà dispensés (dénomination, quantité et date) avec ou sans prescription.

Dans la vie quotidienne de l'officine, le pharmacien titulaire devra faire en sorte que chaque utilisateur du logiciel de la pharmacie n'accède qu'aux données nécessaires pour l'exercice de sa mission. Il doit donc remettre un identifiant unique à chaque utilisateur et devra mettre en place une gestion des habilitations en fonction de la catégorie d'utilisateurs. Il doit également protéger les postes de travail, notamment en installant des logiciels pare-feu afin d'éviter l'intrusion de programmes malveillants. Un pharmacien possédant une e-pharmacie doit aussi s'assurer que son site est sécurisé et hébergé sur des serveurs agréés pour l'hébergement de données de santé. Pour finir, le pharmacien porte la responsabilité de s'assurer de la conformité des prestataires qui traitent des données dont il est responsable (logiciel, groupement, éditeur de site web, ...) (124).

L'application du Règlement Général pour la Protection des Données en officine est susceptible de ralentir le développement et la mise en œuvre des systèmes d'intelligence artificielle. En effet, ces derniers, s'ils sont moins alimentés par les données des patients (ces dernières sont anonymisées), seront plus longs à entraîner et ne se retrouveront donc pas tout de suite dans les officines. L'anonymisation des données limite le développement d'une IA puisqu'une donnée anonymisée comporte des informations en moins qui auraient pu être utiles pour ce que l'on souhaitait réaliser.

4) Autres mesures de réglementation de l'intelligence artificielle

a) Charte éthique européenne d'utilisation de l'IA dans la justice

Outre les différentes lois et règlements français, des textes régulant les systèmes d'IA sont également mis en place au niveau européen. C'est le cas avec la Charte éthique européenne d'utilisation de l'intelligence artificielle dans les systèmes judiciaires et leur environnement adoptée par la Commission européenne pour l'efficacité de la justice du Conseil de l'Europe (125). Cette charte, appliquée ici aux systèmes judiciaires, est l'un des premiers textes européens énonçant des principes éthiques relatifs à l'utilisation de l'IA.

Ce cadre identifie les principes essentiels à respecter en matière d'intelligence artificielle qui sont ceux (125) :

- de respect des droits fondamentaux (conception et mise en œuvre des outils d'IA compatibles avec les droits fondamentaux),
- de non-discrimination (prévenir la création ou le renforcement de discriminations entre individus),
- de qualité et sécurité (sources certifiées alimentant des modèles conçus dans des environnements technologiques sécurisés),
- de transparence, neutralité et intégrité intellectuelle (rendre accessible et compréhensible les méthodologies de traitement des données),
- de maîtrise par l'utilisateur (permettre à l'utilisateur d'être un acteur éclairé et maître de ses choix).

b) La Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'IA

Cette déclaration vise les organismes et entreprises. En signant cette déclaration, ces derniers s'engagent envers un développement de l'IA au service du bien-être de tous. Les objectifs de cette charte sont l'élaboration d'un cadre éthique pour le développement et le déploiement de l'IA, d'orienter la transition numérique afin que tout le monde puisse en profiter, et d'ouvrir un espace de dialogue national et international pour réussir collectivement le développement de l'IA (126).

D'autres principes éthiques sont décrits dans cette charte comme le respect de l'autonomie, la solidarité (maintien des liens entre les personnes), la protection de la vie privée, la participation démocratique, l'inclusion de la diversité (maintien de la diversité culturelle et sociale), la prudence (anticipation des conséquences), la responsabilité (maintien de la responsabilité humaine lors des prises de décision), la soutenabilité environnementale ou l'équité (contribution à une société juste et équitable).

D'autres mesures existent déjà et d'autres encore sont susceptibles de voir le jour dans un futur proche afin de réguler les systèmes d'IA qui se développent un peu plus tous les jours.

B) Limites de l'intelligence artificielle

Ces limites représentent une grande part d'ombre dans la mise en œuvre de l'intelligence artificielle dans les soins de santé. Malgré les réglementations apportées au domaine de l'IA, les patients restent inquiets à l'idée qu'un système fait d'algorithmes puisse intervenir dans leurs parcours de soins.

1) Limites scientifiques

a) Causes économiques

La recherche et la mise en place de tous les systèmes d'intelligence artificielle représentent un coût considérable pour les structures. Etant un domaine extrêmement vaste et peu connu de l'être humain, il existe en plus, une incertitude d'obtenir le résultat escompté. Certaines équipes peuvent travailler pendant des années sur des projets ambitieux qui pourraient ne jamais aboutir. On peut donc aisément comprendre la réticence que peuvent avoir les investisseurs qui pourraient n'avoir aucun retour sur les millions d'euros (ou de dollars) investis dans la recherche en IA. Il faut également trouver des investisseurs qui s'intéressent au domaine de l'intelligence artificielle, ce qui n'est pas toujours chose aisée.

b) Causes techniques

L'informatique d'aujourd'hui représente aussi une des limites de l'intelligence artificielle. En effet, la puissance de calcul des logiciels actuels ne se développe pas aussi rapidement que les systèmes d'IA. L'impressionnante base de données utilisée lors du développement d'un algorithme d'IA nécessite une capacité de stockage monumentale, or, les disques durs existants ne possèdent pas tous la capacité nécessaire pour cela. Cela peut donc, là encore, ralentir la recherche en intelligence artificielle, même si de nouveaux ordinateurs comme Sycamore, l'ordinateur quantique développé par Google, représentent les prochains systèmes qui permettront de poursuivre le développement de l'IA (127).

Il va également falloir mettre au point de nouveaux appareils, plus petits, mais permettant d'assurer des fonctions similaires aux appareils existants. En effet, aujourd'hui, les matériaux commencent à devenir trop importants pour être incorporés dans les systèmes d'intelligence artificielle, qui sont eux, de plus en plus petits. Cette nano technologie devrait même être encore plus performante que la technologie d'aujourd'hui.

Une dernière limite technique concerne la formation des professionnels de santé aux outils utilisant des algorithmes d'intelligence artificielle. Il sera impossible de laisser du personnel non qualifié utiliser cette technologie. Et même si certains diplômes universitaires appliqués à l'IA existent déjà, les formations sont encore trop peu nombreuses dans notre pays.

2) Limites éthiques

a) Protection des données personnelles

Le domaine de la santé a été défini comme prioritaire dans le développement de l'intelligence artificielle, comme l'explique le rapport Villani (128). Le caractère sensible de ces données pose des interrogations éthiques sur leur collecte et leur traitement par les algorithmes d'IA. Le système national des données de santé français, créé par la loi sur la modernisation du système de santé, compte plus de 450 téraoctets (10^{12} octets) (129). Ce système permet d'analyser et d'améliorer la santé de la population française, en particulier chez les patients atteints de maladies chroniques. De plus, la mise en place du Règlement Général sur la Protection des données a pour but de rassurer les patients sur la gestion, la sécurité et la confidentialité de leurs données.

Les principaux organismes du système de soins français, comme la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie, qui stockent tous les jours un peu plus les données médicales des patients, se doivent donc d'être sécurisés afin de garantir la vie privée des patients. Cela est d'autant plus important aujourd'hui avec le DMP (Dossier Médical Partagé) et toutes les données dématérialisées qu'il contient (130).

La grande majorité des systèmes d'intelligence artificielle ont accès à de nombreuses données de santé protégées, ce qui pourrait entraîner des risques concernant la vie privée des patients. Les textes et lois rédigés autorisent les algorithmes d'IA à n'étudier que les informations les plus pertinentes à leur utilisation. La collecte des données de santé par d'autres sociétés doit être accordée par les autorités compétentes afin de garantir la protection des données et leur conformité en suivant le consentement du patient. On recherche, avec cela, à assurer les données contre un mésusage par des banques, assureurs et employeurs, mais également contre les risques de piratage.

Si toutes les données de santé sont encadrées par un régime de protection juridique précis, en raison de leur caractère sensible, ce n'est pas le cas des données issues des objets connectés. Une anomalie surprenante alors que ce sont ces données qui permettraient une meilleure prise en charge du patient ainsi qu'une personnalisation des soins. En effet, ces données sont parfois plus précises qu'un dossier médical et sont collectées de manière continue. Il est donc primordial de protéger au mieux ces données sensibles que sont les données médicales. Pour cela, plusieurs pistes sont envisagées ou sont en phase de test.

Dans le but de protéger un maximum de ces données médicales, l'ANSM a créé un comité scientifique spécialisé temporaire sur la cyber sécurité des logiciels et des dispositifs médicaux. Les experts de ce comité doivent proposer des recommandations afin de garantir un niveau de sécurité minimum des logiciels utilisés dans le domaine médical. Le nombre de dispositifs médicaux connectés est en constante augmentation.

Ils permettent d'échanger des données, de diriger le dispositif (comme la programmation des pompes à perfusion), de suivre le patient à distance ou de suivre la maintenance de certains produits (131). Ce comité doit donc prendre des mesures afin de prévenir les attaques malveillantes à l'encontre de ces dispositifs et ainsi, d'empêcher la compromission des données.

Les « blockchains » ou chaînes de blocs représentent une autre manière de protéger les données de santé. Cette technologie de stockage et de transmission d'informations fonctionne sans organe de contrôle central (dans le cloud). Elle est transparente et sécurisée. Une blockchain pourrait être comparée à un grand livre ouvert, anonyme et infalsifiable. Elle constitue une base de données contenant l'historique de tous les échanges effectués entre ses utilisateurs et, ce, depuis sa création (132).

Il serait alors possible de certifier les dossiers médicaux des patients sur une blockchain comme l'a fait le gouvernement estonien avec la start-up Guardtime en sécurisant ainsi plus d'un million de dossiers médicaux (133). Mais les patients pourraient également apprendre à mieux gérer leurs données médicales en autorisant l'accès (total ou partiel) aux personnes de leur choix (médecin traitant, pharmacien, famille, ...). En plus de sécuriser et de gérer les données des patients, la blockchain en santé pourrait servir à la traçabilité des médicaments afin d'éviter le développement des contrefaçons.

b) Sécurité des patients

Une des principales préoccupations éthiques est la sécurité, un impératif essentiel pour les systèmes d'IA médicaux qui influent sur la santé des personnes malades (77). L'éthique médicale impose aux médecins de protéger leurs patients. Ce principe se traduit par une exigence selon laquelle tous les systèmes d'intelligence artificielle doivent être validés par un comité d'éthique afin d'être considérés comme sûrs, précis et infaillibles avant de pouvoir être utilisés avec les patients.

Ainsi, lorsqu'il faudra prendre une décision pour un patient en manipulant des données confidentielles et très protégées, l'algorithme aura été audité avant d'être déployé. L'éthique devra être respectée à tous les stades de l'utilisation des données de santé, de la collecte aux résultats produits, tout cela en accord avec la finalité de la collecte.

Une autre question peut se poser à propos de la sécurité des patients. Quelle serait la procédure à suivre si un système d'intelligence artificielle venait à échouer dans sa tâche ou à causer un préjudice ? Il faudra alors déterminer le pourquoi du problème et si le système d'IA est directement impliqué dans la prise de décision à l'origine du problème. Il faudra donc expliquer de manière satisfaisante la procédure pour arriver à la décision finale et cette dernière devra tout de même se trouver sous l'autorité d'un être humain. Cela permet ainsi d'assigner la responsabilité légale à une autorité humaine pour faciliter les potentielles procédures judiciaires qui en découleraient.

Si l'on veut malgré tout laisser une responsabilité aux machines autonomes et intelligentes, il faudra alors apporter au moins quelques modifications aux algorithmes existants aujourd'hui. En effet, malgré leur haut niveau d'autonomie ainsi que leur capacité à apprendre, les systèmes d'intelligence artificielle restent des outils construits par des êtres humains dans le but d'atteindre des objectifs.

Des théories, méthodes et autres algorithmes sont alors indispensables pour intégrer les valeurs sociétales, juridiques et morales dans les futurs systèmes d'IA, et ce, à tous les stades de leur développement (analyse, conception, construction, déploiement et évaluation). Cette transformation doit être opérée sur le raisonnement autonome des machines à propos des questions que les scientifiques considèrent comme ayant un impact éthique (134).

En dépit de tout cela, aujourd'hui, une intelligence artificielle responsable représente plus que le fait de développer certaines fonctionnalités complémentaires. Cette responsabilité est cruciale pour une parfaite autonomie des systèmes et doit être une des principales recherches sur l'IA afin d'assurer les valeurs humaines.

En plus des algorithmes utilisés afin de développer les capacités de raisonnement des machines dans le cadre de leur comportement autonome, l'éthique doit également se retrouver dans la fabrication de la machine (méthodes réglementaires et d'ingénierie garantissant de bonnes analyses et évaluations) et dans son utilisation (normes et processus de certification garantissant l'intégrité des développeurs et des utilisateurs lors d'une bonne utilisation du système intelligent).

Comme vu précédemment, une défaillance inattendue d'une machine autonome intelligente peut, lors de cas graves, entraîner des blessures chez l'être humain. Mais elle peut également s'endommager, augmenter le temps de traitement ou réduire la qualité des produits s'il s'agit de machines de maintenance. En plus de tout ceci, le diagnostic puis la réparation de la machine, ainsi que tous les dommages occasionnés par la défaillance représentent un coût important pour le propriétaire.

C'est pour éviter cela que se développent des systèmes intelligents de diagnostic de panne, capables de prévenir des défaillances au moindre petit signe indiquant le début d'un problème (135) (136). Cela aura aussi pour but de prolonger la durée de vie des systèmes et d'améliorer leur utilisation. Mais il faut pour cela que ces systèmes soient performants et infaillibles, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui.

Une autre préoccupation importante à propos de la sécurité des patients concerne les algorithmes d'apprentissage et leur interprétation. En effet, certains systèmes, notamment en deep learning sont très difficiles, voire impossible à comprendre et à expliquer, même pour ceux qui les ont créés. Ce manque de transparence des algorithmes ne permet pas à l'être humain de garder la main sur la machine. Ce qui pose un problème en cas d'erreur de l'intelligence artificielle. Comprendre et justifier le raisonnement des algorithmes est donc un des axes majeurs de la recherche scientifique à l'heure actuelle.

La crainte de voir une IA échapper au contrôle de l'être humain devient alors bien réelle. C'est souvent cette opacité qui est soulignée quand on parle des véhicules autonomes, par exemple : faut-il sauver le piéton qui traverse la route au rouge au risque de mettre en danger le passager du véhicule ?

c) Fiabilité de l'intelligence artificielle

La fiabilité est la dernière limite de l'IA. En effet, par de nombreuses façons, les algorithmes d'intelligence artificielle peuvent en venir à échouer. Les causes sont nombreuses comme un système mal entraîné, un manque de données, etc...

En premier lieu, il faut prendre en compte la forte dépendance des systèmes d'IA à la quantité et à la qualité des données. Si l'on prend en compte les différences entre les hôpitaux du monde (techniques et technologies) et la prévalence des maladies à travers le monde, il est difficile de dire si les méthodes qui sont aujourd'hui développées pourront être utilisables partout. Cela nécessite donc de développer et de tester les performances de chaque technique dans différentes conditions (79).

Des biais peuvent survenir dans la collecte systématique des données cliniques et pourront alors influencer sur le comportement de l'intelligence artificielle ou sur ses prédictions. Cela pourra particulièrement affecter les femmes, ainsi que les minorités raciales en raison de leur sous-représentation dans les populations des essais cliniques et dans les registres de patients (85).

De plus, dans les systèmes d'apprentissage, les résultats dépendent des données ayant servi lors de la phase d'apprentissage. En effet, si les données apprises par l'IA sont mal étiquetées ou tout simplement fausses, cela génèrera des résultats faux à leur tour ou non exploitables. Il est donc nécessaire de fixer des limites à l'IA en cas de désaccord entre le professionnel de santé et la machine. Le système d'intelligence artificielle doit pouvoir assister le professionnel de santé pour garantir plus de rapidité et de précision, mais ce dernier doit donc rester autonome face à l'IA dans ses décisions.

Il est aussi possible de remettre en question les études sur l'IA appliquée à la santé. En effet, selon une analyse, moins d'une étude sur 1000 serait de bonne qualité. On manque donc encore de recul pour dire si l'IA fait preuve d'une efficacité suffisante pour faire son entrée définitive dans notre système de soins (137).

Conclusion

L'intelligence artificielle visant à imiter les fonctions cognitives de l'être humain a, ces dernières années, dépassé les performances humaines dans de nombreux domaines pour lesquels ils ont été entraînés. En plus d'être de plus en plus présente dans notre vie quotidienne, l'IA apporte un changement dans le secteur de la santé grâce à la disponibilité croissante des données (patients, pathologies) et la progression des techniques d'analyse. Les algorithmes des systèmes experts puis les techniques des systèmes de machine learning et de deep learning sont en train de révolutionner la pratique de la médecine, mais aussi celle de la pharmacie.

En effet, récemment et tout particulièrement au cours des cinq dernières années, l'intelligence artificielle s'est développée en pharmacie. Que ce soit à l'officine pour aider le pharmacien dans ses tâches quotidiennes (de la délivrance des médicaments au back office) ou dans les laboratoires pharmaceutiques pour améliorer la recherche et le développement de nouveaux médicaments, l'IA commence à changer les mœurs. En médecine, en revanche, c'est principalement à l'hôpital que l'intelligence artificielle trouve sa place où elle est appliquée dans de nombreuses spécialités (neurologie, endocrinologie, microbiologie, etc...) et surtout en radiologie afin d'établir des diagnostics ou des pronostics, parfois de manière plus précise que les médecins eux-mêmes, mais on peut également retrouver quelques algorithmes d'IA dans le cabinet médical du médecin généraliste. En plus de cela, des systèmes d'intelligence artificielle sont aussi utilisés dans certaines institutions nationales de santé.

Malgré ce développement exponentiel du nombre d'outils contenant une IA, les réglementations permettant de réguler ces algorithmes et les données des utilisateurs sont encore peu nombreuses. Les textes de lois et chartes existants auraient même tendance à ralentir la recherche dans le domaine de l'intelligence artificielle en voulant contrôler absolument tous les rouages de la chaîne algorithmique. Néanmoins, le contrôle des données par les utilisateurs est très important, ces réglementations sont donc indispensables pour continuer à développer ces outils. Outre cette nouvelle législation, des limites notamment éthiques et scientifiques, freinent toujours le développement de ces systèmes. Il va donc être important, en suivant les réglementations, de trouver une méthode permettant de concilier avancées scientifiques et éthiques

Ce travail montre tout de même l'énorme percée qu'a déjà faite l'intelligence artificielle dans le monde la santé ainsi que les très, très nombreuses perspectives qu'elle a encore à offrir à ce domaine. L'IA va considérablement modifier la pratique de nos futurs métiers, et même si elle ne remplacera probablement jamais les professionnels de santé, ceux qui ne voudront pas travailler avec ces nouveaux outils finiront probablement remplacés par ceux qui les utiliseront.

Table des illustrations

Figure 1 : Illustration du Test de Turing (7)	12
Figure 2 : Illustration du fonctionnement simplifié du GPS (11).....	14
Figure 3 : Graphique illustrant la loi de Moore au cours des dernières années (14)	16
Figure 4 : Illustration du fonctionnement d'un système d'apprentissage automatique (19) .	19
Figure 5 : Illustration du fonctionnement d'un système d'apprentissage par renforcement (20)	20
Figure 6 : Schéma illustrant les différents types d'apprentissage automatique et les principaux algorithmes utilisés.....	20
Figure 7 : Schéma d'un neurone humain (21)	21
Figure 8 : Illustration du fonctionnement d'un neurone artificiel (23).....	22
Figure 9 : Schéma d'un réseau de neurones (22).....	23
Figure 10 : Illustration de l'architecture du modèle de réseaux de neurones LeNet (25).....	25
Figure 11 : Schéma récapitulatif des différentes techniques d'IA forte (19)	26
Figure 12 : Courbe de l'évolution du numérique selon les secteurs dans le temps (28).....	28
Figure 13 : Illustration des différentes applications de l'IA en santé (34)	32
Figure 14 : Graphique de l'état de l'intelligence artificielle dans le e-commerce en 2018 (47)	37
Figure 15 : Aperçu des points décisifs et des étapes du développement d'un médicament (55)	42
Figure 16 : Aperçu des différentes phases du développement clinique (55)	45
Figure 17 : Illustration du fonctionnement du logiciel expert Valab (65).....	50
Figure 18 : Illustration du développement d'un système d'apprentissage automatique et de son application en radiologie (78).....	57
Figure 19 : Tableau montrant les principales start-up d'e-santé en France et leur domaine d'utilisation (102)	68

Bibliographie

1. Tout savoir sur l'intelligence artificielle [Internet]. Microsoft experiences. 2018 [cité 7 mars 2019]. Disponible sur: <https://experiences.microsoft.fr/business/intelligence-artificielle-ia-business/comprendre-utiliser-intelligence-artificielle/>
2. Larousse É. Encyclopédie Larousse en ligne - intelligence artificielle [Internet]. [cité 7 mars 2019]. Disponible sur: http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/intelligence_artificielle/187257
3. Biographie de Alan Turing [Internet]. [cité 3 févr 2019]. Disponible sur: <http://www.bibmath.net/bios/index.php?action=affiche&quoi=turing>
4. Alan Turing - Dossiers - Ressources en ligne - Chercher, trouver - Bibliothèque - Lieux ressources - Au programme - Cité des sciences et de l'industrie [Internet]. [cité 3 févr 2019]. Disponible sur: <http://www.cite-sciences.fr/>
5. Larousse É. Encyclopédie Larousse en ligne - Alan Mathison Turing [Internet]. [cité 3 févr 2019]. Disponible sur: http://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/Alan_Mathison_Turing/147690
6. COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE [Internet]. [cité 24 mars 2019]. Disponible sur: <http://cogprints.org/499/1/turing.html>
7. Test de Turing. In: Wikipédia [Internet]. 2019 [cité 24 mars 2019]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Test_de_Turing&oldid=156714820
8. Test de Turing – Un test pour mesurer l'intelligence artificielle [Internet]. Artificiel.net. 2017 [cité 24 mars 2019]. Disponible sur: <http://www.artificiel.net/test-de-turing>
9. Brève histoire de l'intelligence artificielle [Internet]. Siècle Digital. 2018 [cité 27 mars 2019]. Disponible sur: <https://siecledigital.fr/2018/08/20/histoire-intelligence-artificielle/>
10. Rétrospective de l'histoire de l'IA - TPE sur l'Intelligence Artificielle [Internet]. [cité 23 mars 2018]. Disponible sur: <https://sites.google.com/site/int3llig3nc3artifici3ll3/retrospective-de-l-histoire-de-l-ia>
11. General Problem Solver in Common Lisp [Internet]. [cité 18 nov 2019]. Disponible sur: <https://brudgers.github.io/general-problem-solver/>
12. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ? [Décryptage] [Internet]. [cité 23 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.ouest-france.fr/reflexion/point-de-vue/qu-est-ce-que-l-intelligence-artificielle-decryptage-5239115>
13. Fonctionnement de Mycin.
14. La nouvelle loi de Moore [Internet]. Groupe La Française. [cité 9 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.la-francaise.com/fr/nous-connaître/les-actualités/news-details/la-nouvelle-loi-de-moore/>
15. Deux types d'I.A. [Internet]. [cité 3 avr 2019]. Disponible sur: <http://tpe-2013-ia.e-monsite.com/pages/intelligence-artificielle/deux-types-d-intelligences-artificielles.html>

16. Computer Power and Human Reason.
17. L'intelligence artificielle faible : définition [Internet]. L'intelligence Artificielle. [cité 3 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.inprincipio.xyz/ia-faible/>
18. Qu'est-ce que le Machine Learning ? [Internet]. Mon IA et Moi. 2018 [cité 10 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.moniaetmoi.com/machine-learning/>
19. pioneers BA with. Le reinforcement learning et la conduite autonome : Nos essais sur AWS Deep racer [Internet]. Quantmetry. 2019 [cité 29 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.quantmetry.com/reinforcement-learning-conduite-autonome-essais-aws-deep-racer/>
20. neurone [Internet]. [cité 14 avr 2019]. Disponible sur: <http://physique.unice.fr/sem6/2011-2012/PagesWeb/PT/Modelisation/neruone.html>
21. L +Bastien. Réseau de neurones artificiels : qu'est-ce que c'est et à quoi ça sert ? [Internet]. LeBigData.fr. 2019 [cité 16 janv 2020]. Disponible sur: <https://www.lebigdata.fr/reseau-de-neurones-artificiels-definition>
22. Reprenons les bases : Neurone artificiel, Neurone biologique - Intelligence mécanique [Internet]. [cité 17 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.scilog.fr/intelligence-mecanique/reprenons-bases-neurone-artificiel-neurone-biologique/>
23. Qu'est-ce que le Deep Learning ? [Internet]. Mon IA et Moi. 2018 [cité 10 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.moniaetmoi.com/deep-learning/>
24. Introduction au Deep Learning [Internet]. Meritis. 2018 [cité 2 févr 2020]. Disponible sur: <https://meritis.fr/ia/deep-learning/>
25. Entraînement des réseaux de neurones convolutifs [Internet]. Agence Web et Mobile à Marseille : Natural Solutions. [cité 2 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.natural-solutions.eu/blog/entrainement-dun-rseau-de-neurones-convolutif>
26. L'intelligence artificielle forte [Internet]. L'intelligence Artificielle. [cité 3 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.inprincipio.xyz/ia-forte/>
27. OWDIN. Les 4 vagues de l'IA : à qui appartiendra l'avenir de la technologie ? [Internet]. OWDIN. 2018 [cité 16 janv 2020]. Disponible sur: <https://owdin.live/2018/09/21/les-4-vagues-de-lia-a-qui-appartiendra-lavenir-de-la-technologie/>
28. Marroncle D. web performance maturité numérique [Internet]. Quadran. [cité 16 janv 2020]. Disponible sur: <https://www.quadran.eu/etude-sites-e-tourisme/maturite-numerique-etourisme2/>
29. France M. Accélérer la mutation numérique des entreprises : :142.
30. Quand l'IA se met au service de la mobilité [Internet]. Microsoft experiences. 2019 [cité 2 oct 2019]. Disponible sur: <https://experiences.microsoft.fr/business/intelligence-artificielle-ia-business/ia-mobilite/>

31. Enseigner avec le numérique : ces innovations qui révolutionnent l'apprentissage [Internet]. Microsoft experiences. 2019 [cité 2 oct 2019]. Disponible sur:
<https://experiences.microsoft.fr/business/intelligence-artificielle-ia-business/enseigner-numerique-innovations-revolutionnent-apprentissage/>
32. L'Intelligence Artificielle dans tous les domaines [Internet]. [cité 1 oct 2019]. Disponible sur:
<http://ia-intellotpe.e-monsite.com/pages/l-ia-dans-differents-domaines/l-intelligence-artificielle-presente-dans-tous-les-secteurs.html>
33. IA dans le secteur banque et assurance : le défi du passage à l'échelle [Internet]. Microsoft experiences. 2019 [cité 2 oct 2019]. Disponible sur:
<https://experiences.microsoft.fr/business/intelligence-artificielle-ia-business/ia-data-banque-assurance/>
34. Frontiers | Revolution in Health Care: How Will Data Science Impact Doctor–Patient Relationships? | Public Health [Internet]. [cité 17 janv 2020]. Disponible sur:
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2018.00099/full>
35. Lerner I, Veil R, Nguyen D-P, Luu VP, Jantzen R. Revolution in Health Care: How Will Data Science Impact Doctor–Patient Relationships? Front Public Health. 3 avr 2018;6:99.
36. La téléconsultation [Internet]. [cité 13 déc 2019]. Disponible sur:
<https://www.ameli.fr/assure/remboursements/rembourse/telemedecine/teleconsultation>
37. REYNAUD A. Téléconsultation : un outil d'intelligence artificielle pour optimiser le temps médical [Internet]. [cité 14 déc 2019]. Disponible sur:
<https://web.babbler.fr/document/show/teleconsultation-un-outil-dintelligence-artificielle-pour-optimiser-le-temps-medical>
38. Interactions médicamenteuses [Internet]. [cité 3 juill 2019]. Disponible sur:
<https://www.ameli.fr/assure/sante/medicaments/interactions-medicamenteuses/interactions-medicamenteuses>
39. Une intelligence artificielle conçue pour éviter les erreurs de prescription [Internet]. CRIP. 2017 [cité 23 mars 2018]. Disponible sur: <http://lecrip.org/2017/09/21/intelligence-artificielle-concue-eviter-erreurs-de-prescription/>
40. Decagon: l'IA d'aide à la prescription de médicaments [Internet]. Techniques de l'Ingénieur. [cité 3 juill 2019]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/decagon-lia-daide-a-la-prescription-de-medicaments-57574/>
41. Decagon, l'intelligence artificielle qui prédit les interactions médicamenteuses [Internet]. Sciences et Avenir. [cité 3 juill 2019]. Disponible sur: https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/intelligence-artificielle/decagon-l-intelligence-artificielle-qui-predit-les-interactions-medicamenteuses_125757
42. Hélène. Un chatbot en pharmacie - Partie 1 : l'assistant professionnel [Internet]. La pharmacie digitale. 2017 [cité 4 oct 2019]. Disponible sur: <https://lapharmaciedigitale.com/chatbot-btob-pharmacie/>
43. Pharmaseek - Conseil expert [Internet]. Pharmaseek. [cité 4 oct 2019]. Disponible sur:
<https://pharmaseek.net/>

44. Logiciel de Suivi d'Observance [Internet]. Pharmagest. [cité 4 oct 2019]. Disponible sur: <https://pharmagest.com/solutions/logiciel-suivi-observance/>
45. Pillo, le robot pilulier intelligent [Internet]. Swiss Digital Health. [cité 17 janv 2020]. Disponible sur: <https://www.swissdigitalhealth.com/news/pillo-health-le-robot-pilulier-intelligent/>
46. Noviacare, une box santé au service du maintien à domicile des seniors — Silver Economie [Internet]. [cité 4 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.silvereco.fr/noviacare-une-box-sante-au-service-du-maintien-a-domicile-des-seniors/3195446>
47. IA et e-commerce.
48. Lolivier M. Etude KPMG/FEVAD : l'Intelligence Artificielle au service du e-commerce [Internet]. Fevad, la Fédération du e-commerce et de la vente à distance. 2018 [cité 22 juill 2019]. Disponible sur: <https://www.fevad.com/etude-intelligence-artificielle-au-service-du-e-commerce/>
49. Rol S. Intelligence Artificielle et e-commerce : applications et bénéfices [Internet]. MBA MCI. 2019 [cité 22 juill 2019]. Disponible sur: <https://mbamci.com/intelligence-artificielle-e-commerce/>
50. presse C de. Logista Pharma traite ses commandes 3 fois plus vite grâce à Esker [Internet]. Silicon. [cité 18 juill 2019]. Disponible sur: <https://www.silicon.fr/press-release/logista-pharma-traite-ses-commandes-3-fois-plus-vite-grce-esker>
51. SCM : avec l'Intelligence Artificielle, la logistique redevient un atout concurrentiel stratégique [Internet]. LeMagIT. [cité 9 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.lemagit.fr/conseil/SCM-avec-lIntelligence-Artificielle-la-logistique-redevient-un-atout-concurrentiel-strategique>
52. L'intelligence artificielle, une arme contre le gaspillage alimentaire [Tribune] [Internet]. Isa-conso.fr. [cité 9 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.isa-conso.fr/gaspillage-alimentaire-comment-agir-avec-l-intelligence-artificielle-tribune,325141>
53. Comment l'intelligence artificielle de Vekia aide Engie à mettre en place sa supply chain [Internet]. usine-digitale.fr. [cité 9 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.usine-digitale.fr/article/comment-l-intelligence-artificielle-de-vekia-aide-engie-a-mettre-en-place-sa-supply-chain.N835860>
54. La machine à lire les ordonnances [Internet]. Le Quotidien du Pharmacien. [cité 2 févr 2020]. Disponible sur: https://www.lequotidiendupharmacien.fr/actualite-pharmaceutique/article/2020/01/27/la-machine-lire-les-ordonnances_281933
55. Académie européenne des patients (EUPATI) [Internet]. EUPATI. [cité 23 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.eupati.eu/fr/>
56. Mamoshina P, Vieira A, Putin E, Zhavoronkov A. Applications of Deep Learning in Biomedicine. Mol Pharm. 02 2016;13(5):1445-54.
57. BenevolentAI® | From Data to Medicines [Internet]. BenevolentAI® | From Data to Medicines. [cité 27 nov 2019]. Disponible sur: <https://benevolent.ai>
58. Wen M, Zhang Z, Niu S, Sha H, Yang R, Yun Y, et al. Deep-Learning-Based Drug-Target Interaction Prediction. J Proteome Res. 07 2017;16(4):1401-9.

59. Our Technology [Internet]. Atomwise. [cité 27 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.atomwise.com/our-technology/>
60. Freitas AA, Limbu K, Ghafourian T. Predicting volume of distribution with decision tree-based regression methods using predicted tissue:plasma partition coefficients. *J Cheminformatics*. déc 2015;7(1):6.
61. Mendel [Internet]. Mendel.ai. [cité 27 nov 2019]. Disponible sur: <http://www.mendel.ai/>
62. AiCure – The link between patients, disease and treatment. [Internet]. [cité 27 nov 2019]. Disponible sur: <https://aicare.com/>
63. L'intelligence artificielle au service des médicaments anticancéreux - Sweet FM [Internet]. [cité 14 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.sweetfm.fr/news/l-intelligence-artificielle-au-service-des-medicaments-anticancereux-22692>
64. Mercier-Bataille D, Anglade E, Roig J-C, Rogari É, Meyer S. Fédérer la profession grâce au contrôle continu d'un logiciel expert de validation biologique : retour d'expérience. *Rev Francoph Lab*. 1 déc 2019;2019(517):24-8.
65. Cartron J-C. Validation biologique automatique dans Hpx par le système Valab Expert. *Rev Fr Lab*. 1 févr 1996;1996(282):173-82.
66. Bibault J-E, Burgun A, Giraud P. Intelligence artificielle appliquée à la radiothérapie. *Cancer/Radiothérapie*. mai 2017;21(3):239-43.
67. Rajalakshmi R, Subashini R, Anjana RM, Mohan V. Automated diabetic retinopathy detection in smartphone-based fundus photography using artificial intelligence. *Eye*. juin 2018;32(6):1138-44.
68. Houssami N, Lee CI, Buist DSM, Tao D. Artificial intelligence for breast cancer screening: Opportunity or hype? *The Breast*. déc 2017;36:31-3.
69. Oh SE, Seo SW, Choi M-G, Sohn TS, Bae JM, Kim S. Prediction of Overall Survival and Novel Classification of Patients with Gastric Cancer Using the Survival Recurrent Network. *Ann Surg Oncol*. mai 2018;25(5):1153-9.
70. Fessele KL. The Rise of Big Data in Oncology. *Semin Oncol Nurs*. mai 2018;34(2):168-76.
71. Xiong Y, Ba X, Hou A, Zhang K, Chen L, Li T. Automatic detection of mycobacterium tuberculosis using artificial intelligence. *J Thorac Dis*. mars 2018;10(3):1936-40.
72. Cascianelli S, Scialpi M, Amici S, Forini N, Minestrini M, Fravolini ML, et al. Role of Artificial Intelligence Techniques (Automatic Classifiers) in Molecular Imaging Modalities in Neurodegenerative Diseases. *Curr Alzheimer Res*. 2017;14(2):198-207.
73. Hajimani E, Ruano MG, Ruano AE. An intelligent support system for automatic detection of cerebral vascular accidents from brain CT images. *Comput Methods Programs Biomed*. juill 2017;146:109-23.
74. Siddiqui MK, Islam MZ, Kabir MA. A novel quick seizure detection and localization through brain data mining on ECoG dataset. *Neural Comput Appl*. sept 2019;31(9):5595-608.

75. Mahler EM, Schmidt RM, Kvitash VI. An artificial intelligence system to predict progression of immune dysfunction in healthy older patients. *J Med Syst.* août 1993;17(3-4):173-81.
76. Hebert C, Shivade C, Foraker R, Wasserman J, Roth C, Mekhjian H, et al. Diagnosis-specific readmission risk prediction using electronic health data: a retrospective cohort study. *BMC Med Inform Decis Mak.* déc 2014;14(1):65.
77. Liew C. The future of radiology augmented with Artificial Intelligence: A strategy for success. *Eur J Radiol.* mai 2018;102:152-6.
78. Erickson BJ, Korfiatis P, Akkus Z, Kline TL. Machine Learning for Medical Imaging. *RadioGraphics.* mars 2017;37(2):505-15.
79. Lee J-G, Jun S, Cho Y-W, Lee H, Kim GB, Seo JB, et al. Deep Learning in Medical Imaging: General Overview. *Korean J Radiol.* 2017;18(4):570.
80. Olczak J, Fahlberg N, Maki A, Razavian AS, Jilert A, Stark A, et al. Artificial intelligence for analyzing orthopedic trauma radiographs: Deep learning algorithms—are they on par with humans for diagnosing fractures? *Acta Orthop.* 2 nov 2017;88(6):581-6.
81. Shen D, Wu G, Suk H-I. Deep Learning in Medical Image Analysis. *Annu Rev Biomed Eng.* 21 juin 2017;19(1):221-48.
82. COUX DD. Unité recherche [Internet]. CHU de Nantes. [cité 27 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.chu-nantes.fr/unite-recherche-78095.kjsp?RH=1523351950262>
83. Pinaire J, Azé J, Bringay S, Landais P. Extraire semi-automatiquement des connaissances dans la littérature biomédicale. In: *IC: Ingénierie des Connaissances* [Internet]. Montpellier, France; 2016 [cité 6 nov 2019]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01333470>
84. Neubert A, Dormann H, Prokosch H-U, Bürkle T, Rascher W, Sojer R, et al. E-pharmacovigilance: development and implementation of a computable knowledge base to identify adverse drug reactions: E-Pharmacovigilance: ADR knowledge base. *Br J Clin Pharmacol.* sept 2013;76:69-77.
85. Hashimoto DA, Rosman G, Rus D, Meireles OR. Artificial Intelligence in Surgery: Promises and Perils. *Ann Surg.* juill 2018;268(1):70-6.
86. Zhang B, He X, Ouyang F, Gu D, Dong Y, Zhang L, et al. Radiomic machine-learning classifiers for prognostic biomarkers of advanced nasopharyngeal carcinoma. *Cancer Lett.* sept 2017;403:21-7.
87. L'intelligence artificielle dans la lutte contre le cancer [Internet]. Santé sur le net. 2018 [cité 6 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.sante-sur-le-net.com/lutte-contre-le-cancer/>
88. Immunothérapie : son efficacité prédite dans le traitement du cancer ! [Internet]. Santé sur le net. 2018 [cité 6 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.sante-sur-le-net.com/immunotherapie-efficacite-cancer/>
89. Siristatidis C, Vogiatzi P, Pouliakis A, Trivella M, Papantoniou N, Bettocchi S. Predicting IVF Outcome: A Proposed Web-based System Using Artificial Intelligence. *In Vivo.* 2016;6.

90. Organisation de la pharmacovigilance nationale - ANSM : Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé [Internet]. [cité 5 nov 2019]. Disponible sur: [https://www.anism.sante.fr/Declarer-un-effet-indesirable/Pharmacovigilance/Organisation-de-la-pharmacovigilance-nationale/\(offset\)/0](https://www.anism.sante.fr/Declarer-un-effet-indesirable/Pharmacovigilance/Organisation-de-la-pharmacovigilance-nationale/(offset)/0)
91. Price J. Pharmacovigilance in Crisis: Drug Safety at a Crossroads. Clin Ther. mai 2018;40(5):790-7.
92. Sarker A, Ginn R, Nikfarjam A, O'Connor K, Smith K, Jayaraman S, et al. Utilizing social media data for pharmacovigilance: A review. J Biomed Inform. avr 2015;54:202-12.
93. Ferreri F, Bourla A, Mouchabac S, Karila L. e-Addictology: An Overview of New Technologies for Assessing and Intervening in Addictive Behaviors. Front Psychiatry. 1 mars 2018;9:51.
94. Howard C, Huston P. Les effets du changement climatique sur la santé : Découvrez les risques et faites partie de la solution. Relevé Mal Transm Au Can. 2 mai 2019;45(5):126-31.
95. Kollars Jr. TM, Senessie C, Sunderland G. Identifying and modeling the distribution of cryptic reservoirs of Ebola virus using artificial intelligence. Afr J Clin Exp Microbiol [Internet]. 6 juin 2019 [cité 5 nov 2019];19(3). Disponible sur: <https://www.ajol.info/index.php/ajcem/article/view/172666>
96. Bellinger C, Mohamed Jabbar MS, Zaïane O, Osornio-Vargas A. A systematic review of data mining and machine learning for air pollution epidemiology. BMC Public Health. déc 2017;17(1):907.
97. 130 start-up françaises qui font passer la santé à l'ère du numérique [Internet]. FrenchWeb.fr. 2017 [cité 18 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.frenchweb.fr/e-sante-130-start-up-francaises-qui-font-passer-la-sante-a-lere-du-numerique/293288>
98. [Innovation] La e-santé et les objets connectés : les indispensables de demain [Internet]. Gomet. 2017 [cité 30 nov 2019]. Disponible sur: <https://gomet.net/e-sante-les-objets-connectes-indispensables-demain/>
99. Ad Scientiam [Internet]. [cité 25 janv 2020]. Disponible sur: <https://www.adscientiam.fr/>
100. Pharmarket - Pharmacie et Parapharmacie en ligne [Internet]. [cité 25 janv 2020]. Disponible sur: <https://www.pharmarket.com/>
101. home [Internet]. <http://www.biomouv.com>. [cité 25 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.biomouv.com/fr/>
102. 130 start-up françaises qui font passer la santé à l'ère du numérique [Internet]. FrenchWeb.fr. 2017 [cité 30 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.frenchweb.fr/e-sante-130-start-up-francaises-qui-font-passer-la-sante-a-lere-du-numerique/293288>
103. Urgotech, santé connectée - Gestion du stress et rééducation périnéale [Internet]. urgotech. [cité 25 janv 2020]. Disponible sur: <http://urgotech.fr/>
104. Intelligence artificielle et santé [Internet]. Inserm - La science pour la santé. [cité 30 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/intelligence-artificielle-et-sante>

105. Chirurgie assistée par ordinateur (CAO) [Internet]. Inserm - La science pour la santé. [cité 30 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/chirurgie-assistee-par-ordinateur-cao>
106. Robots pour le maintien à domicile [Internet]. [cité 30 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ea-lateleassistance.com/magazine/technologies/robots-pour-le-maintien-domicile>
107. Loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.
108. La loi « Informatique et Libertés » | CNIL [Internet]. [cité 20 juin 2019]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/fr/la-loi-informatique-et-libertes>
109. Intelligence artificielle : quelle réglementation en France et en Europe ? [Internet]. [cité 23 mars 2018]. Disponible sur: <http://visionarymarketing.fr/blog/2017/06/intelligence-artificielle/>
110. Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) - Annuaire des acteurs publics - vie-publique.fr [Internet]. 2018 [cité 25 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.vie-publique.fr/acteurs/commission-nationale-informatique-libertes-cnil.html>
111. CNIL [Internet]. [cité 25 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.novethic.fr/lexique/detail/cnil.html>
112. 39ème rapport annuel de la CNIL.
113. CNIL | [Internet]. [cité 25 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/>
114. Comment permettre à l'Homme de garder la main ? Rapport sur les enjeux éthiques des algorithmes et de l'intelligence artificielle | CNIL [Internet]. [cité 6 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/fr/comment-permettre-lhomme-de-garder-la-main-rapport-sur-les-enjeux-ethiques-des-algorithmes-et-de>
115. Dossiers législatifs - Exposé des motifs - LOI n° 2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique | Legifrance [Internet]. [cité 16 juin 2019]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/affichLoiPubliee.do;jsessionid=75369B9F779410176AF10DCD61877B57.tplgfr36s_1?idDocument=JORFDOLE000031589829&type=expose&typeLoi=&legislature=14
116. LOI n° 2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique. 2016-1321 oct 7, 2016.
117. La #LoiNumérique en 15 points clés [Internet]. Le portail des ministères économiques et financiers. [cité 16 juin 2019]. Disponible sur: <https://www.economie.gouv.fr/republique-numerique/15-points-cles>
118. La loi pour une République numérique [Internet]. Le portail des ministères économiques et financiers. [cité 16 juin 2019]. Disponible sur: <https://www.economie.gouv.fr/republique-numerique>
119. Directive 95/46/CE du Parlement européen et du Conseil du 24 octobre 1995 relative à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données.
120. L_2016119FR.01000101.xml [Internet]. [cité 20 juin 2019]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0679>

121. Textes adoptés - Mercredi 12 mars 2014 - Protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel ***I - P7_TA(2014)0212 [Internet]. [cité 20 juin 2019]. Disponible sur: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P7-TA-2014-0212+0+DOC+XML+V0//FR>
122. Le RGPD : ce qu'il faut retenir ! - Communications - Ordre National des Pharmaciens [Internet]. [cité 20 juin 2019]. Disponible sur: <http://www.ordre.pharmacien.fr/Communications/Les-actualites/Le-RGPD-ce-qu-il-faut-retenir>
123. Quelles obligations pour les titulaires d'officine ? - Qui sommes nous - Ordre National des Pharmaciens [Internet]. [cité 20 juin 2019]. Disponible sur: <http://www.ordre.pharmacien.fr/Qui-sommes-nous/Protection-des-donnees-personnelles2/Quelles-obligations-pour-les-titulaires-d-officine>
124. RGPD, Data et pharmacie d'officine [Internet]. La pharmacie digitale. 2017 [cité 20 juin 2019]. Disponible sur: https://lapharmaciedigitale.com/rgpd_en_pharmacie/
125. Diaz J. L'Europe se dote de sa première Charte éthique d'utilisation de l'IA dans les systèmes judiciaires [Internet]. Actu IA. 2018 [cité 6 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.actuia.com/actualite/leurope-se-dote-de-sa-premiere-charte-ethique-dutilisation-de-lia-dans-les-systemes-judiciaires/>
126. La Déclaration de Montréal en IA responsable [Internet]. declarationiaresp. [cité 7 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.declarationmontreal-iaresponsable.com/la-declaration>
127. Futura. Ordinateur quantique : IBM conteste la suprématie quantique clamée par Google [Internet]. Futura. [cité 7 déc 2019]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/ordinateur-quantique-ordinateur-quantique-ibm-conteste-suprematie-quantique-clamee-google-64234/>
128. Rapport Villani.
129. LOI n° 2016-41 du 26 janvier 2016 de modernisation de notre système de santé. 2016-41 janv 26, 2016.
130. Devillier N. Quelle éthique pour l'intelligence artificielle en santé ? [Internet]. The Conversation. [cité 7 déc 2019]. Disponible sur: <http://theconversation.com/quelle-ethique-pour-lintelligence-artificielle-en-sante-94852>
131. » E-santé : l'ANSM crée un comité scientifique sur la cybersécurité des logiciels dispositifs médicaux MyPharma Editions | L'Info Industrie & Politique de Santé [Internet]. [cité 10 déc 2019]. Disponible sur: <https://www.mypharma-editions.com/e-sante-lansm-cree-un-un-comite-scientifique-sur-la-cybersecurite-des-logiciels-dispositifs-medicaux>
132. Qu'est-ce que la blockchain ? [Internet]. Blockchain France. 2015 [cité 10 déc 2019]. Disponible sur: <https://blockchainfrance.net/decouvrir-la-blockchain/c-est-quoi-la-blockchain/>
133. France B. La blockchain et la santé [Internet]. Blockchain France. 2016 [cité 10 déc 2019]. Disponible sur: <https://blockchainfrance.net/2016/03/02/la-blockchain-et-la-sante/>
134. Dignum V. Ethics in artificial intelligence: introduction to the special issue. Ethics Inf Technol. mars 2018;20(1):1-3.

135. Zhou Q, Yan P, Liu H, Xin Y, Chen Y. Research on a configurable method for fault diagnosis knowledge of machine tools and its application. *Int J Adv Manuf Technol.* mars 2018;95(1-4):937-60.
136. Batareseh FA, Gonzalez AJ. Predicting failures in agile software development through data analytics. *Softw Qual J.* mars 2018;26(1):49-66.
137. L'intelligence artificielle ferait « au mieux, aussi bien que les médecins » [Internet]. *Sciences et Avenir.* [cité 7 févr 2020]. Disponible sur: https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/intelligence-artificielle/l-intelligence-artificielle-ferait-au-mieux-aussi-bien-que-les-medecins_137585

Vu, le Président du jury,

Vu, le Directeur de thèse,

Vu, le Directeur de l'UFR,

Nom: DE MEHERENC DE SAINT-PIERRE**Prénoms :** Arthur Bertrand Michel Marie**Titre de la thèse :** Intelligence artificielle en santé, état des lieux et perspectives

Résumé de la thèse :

L'intelligence artificielle visant à reproduire les fonctions cognitives humaines a aujourd'hui dépassé les performances humaines dans de nombreux domaines, elle apporte une nouvelle vision du monde de la santé, et tout particulièrement en médecine et en pharmacie. Ce développement est grandement aidé par la mise à disposition croissante des données et par la progression rapide des techniques d'analyse. Les différents systèmes de machine learning et de deep learning, ainsi que la faculté de l'intelligence artificielle d'exploiter les connexions dans un ensemble de données peuvent être utilisés pour aider au diagnostic du médecin ou au travail de tous les corps de métier des pharmaciens. Ce travail bibliographique cherche à présenter et expliquer cette nouvelle technologie, ainsi qu'à montrer ses innombrables applications dans de nombreux secteurs, et particulièrement dans le domaine médical. Il vise également à montrer la législation se mettant en place pour réguler ces nouveaux outils, mais aussi les limites encore nombreuses à surmonter avant de voir émerger de futurs systèmes plus performants. Au cours des prochaines années, l'intelligence artificielle prendra une part importante dans les décisions pharmaceutiques et médicales et même si elle ne remplacera pas les professionnels de santé, ceux qui utiliseront les outils contenant des algorithmes d'intelligence artificielle finiront inexorablement à remplacer ceux qui ne le feront pas.

MOTS CLÉS : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, SANTE, ALGORITHMES, DIAGNOSTIC, MACHINE LEARNING, DEEP LEARNING

JURY**Président du jury de thèse :** Mr Yves-François POUCHUS, Professeur Universitaire de Cryptogamie et Botanique, Faculté de Pharmacie de Nantes**Directeur de thèse :** Mr Tanguy LE NEEL, Maître de Conférence Universitaire de Pharmacie Galénique – Industrielle et Technologie Biomédicale, Faculté de Pharmacie de Nantes**Membres du jury :** Mme Anne HAIE et Mr Stéphane BOUTHOLEAU, Docteurs en pharmacie

Adresse de l'auteur : 136 Boulevard des Anglais, 44100, NANTES