

ACADÉMIE D'ORLÉANS-TOURS UNIVERSITÉ DE TOURS

FACULTE DE PHARMACIE « Philippe-Maupas »

Année 2022

N° 81

THÈSE D'EXERCICE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN  
PHARMACIE

**APERÇU ET ANALYSE DES SOLUTIONS D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE  
EN SANTÉ DISPONIBLES DANS LA REGION ASIE PACIFIQUE**

Par

Cindy Virginie Pelou

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 7 NOVEMBRE 2022

JURY

Présidente : Mme MAUPOIL-DAVID Véronique, Enseignant chercheur à l'UFR de Sciences Pharmaceutiques de Tours

Membres :

- M. LIGONIE Adrien, Délégué médical hospitalier en Oncologie, Pharmacien – NANTES
- M. MARC Jillian, Maître de Conférences, Enseignant chercheur, Faculté de Pharmacie - TOURS
- Mme BURGAUD Sylvie, Pharmacienne, Pharmacie Paillhou - TOURS

# Liste des enseignants



**ANNEE : 2022 - 2023**

**Directeur : Pr Denys BRAND**

**Directeur Adjoint : M. Matthieu JUSTE**

**Assesseurs : M. Gildas PRIE, Mme Mélanie BOUVIN PLEY, Mme Emilie ALLARD-VANNIER, M. Bruno GIRAUDEAU, Mme Claire POUPLARD**

## ENSEIGNANTS

### **12 PROFESSEURS D'UNIVERSITÉ**

ALLOUCHI	Hassan	CHIMIE PHYSIQUE
BOUDESOCQUE-DELAYE	Leslie	PHARMACOGNOSIE
BRAND	Denys	MICROBIOLOGIE-IMMUNOLOGIE-BIOEPIDEMIOLOGIE
CHEVALIER	Stéphane	BIOCHIMIE GENERALE & BIOTHERAPIE
CHOURPA	Igor	CHIMIE ANALYTIQUE & HYDROLOGIE
CLASTRE	Marc	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
DIMIER-POISSON	Isabelle	IMMUNOLOGIE PARASITAIRE
ENGUEHARD-GUEIFFIER	Cécile	CHIMIE THERAPEUTIQUE
MAHEO	Karine	PHYSIOLOGIE
MAUPOIL-DAVID	Veronique	PHARMACOLOGIE
MUNNIER	Émilie	PHARMACIE GALENIQUE
VAUD-MASSUARD	Marie-Claude	CHIMIE ORGANIQUE

### **6 PROFESSEURS D'UNIVERSITÉ ET PRATICIENS HOSPITALIERS**

ANTIER	Daniel	PHARMACIE CLINIQUE
ARLICOT	Nicolas	BIOPHYSIQUE & BIOINFORMATIQUE
EMOND	Patrick	BIOPHYSIQUE & BIOINFORMATIQUE
GIRAUDEAU	Bruno	SANTÉ PUBLIQUE, BIostatistiques & ÉPIDÉMIOLOGIE
LANOTTE	Philippe	MICROBIOLOGIE-IMMUNOLOGIE-BIOEPIDEMIOLOGIE
POUPLARD	Claire	HEMATOLOGIE

### **2 PROFESSEURS ÉMERITES**

BARIN	Francis	MICROBIOLOGIE-IMMUNOLOGIE-BIOEPIDEMIOLOGIE
THIBAUT	Gilles	MICROBIOLOGIE-IMMUNOLOGIE-BIOEPIDEMIOLOGIE

### **36 MAITRES DE CONFÉRENCES**

ALLARD-VANNIER	Emilie	PHARMACIE GALENIQUE
AUBREY	Nicolas	BIOCHIMIE GENERALE & BIOTHERAPIE
BESSON	Pierre	PHYSIOLOGIE
BIRER-WILLIAMS	Caroline	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
BONNIER (disponibilité)	Franck	CHIMIE ANALYTIQUE & HYDROLOGIE
BORDY	Romain	PHARMACOLOGIE
BOUVIN-PLEY	Mélanie	MICROBIOLOGIE-IMMUNOLOGIE-BIOEPIDEMIOLOGIE
BRAIBANT	Martine	MICROBIOLOGIE-IMMUNOLOGIE-BIOEPIDEMIOLOGIE
BREDELOUX	Pierre	PHARMACOLOGIE
DAVID	Stéphanie	PHARMACIE GALENIQUE
DEBIERRE-GROCKIEGO	Françoise	IMMUNOLOGIE PARASITAIRE
DELAYE	Pierre-Olivier	CHIMIE THERAPEUTIQUE
DENEVAULT	Caroline	CHIMIE THERAPEUTIQUE
DOUZIECH-EYROLLES	Laurence	AFFAIRE REGLEMENTAIRE ET MANAGEMENT DE LA QUALITE
DUMAS	Jean-François	BIOCHIMIE GENERALE ET BIOTHERAPIE
GERMON	Stéphanie	IMMUNOLOGIE PARASITAIRE
GLEVAREC	Gaëlle	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE

Mise à jour du 01/09/2022

HERVE-AUBERT	Katel	CHIMIE ANALYTIQUE & HYDROLOGIE
JUSTE	Matthieu	IMMUNOLOGIE PARASITAIRE
LAJOIE	Laurie	MICROBIOLOGIE-IMMUNOLOGIE-BIOEPIDEMIOLOGIE
LANOUE	Arnaud	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
MARC	Jillian	BIOMOLECULES ET BIOTECHNOLOGIES VEGETALES
MAVEL	Sylvie	CHIMIE THERAPEUTIQUE
ODIN	Audrey	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
POUPET	Cyril	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
PASQUALIN	Côme	PHARMACOLOGIE
PRIE	Gildas	CHIMIE ORGANIQUE
SOUCE	Martin	CHIMIE ANALYTIQUE & HYDROLOGIE
TAUBER	Clovis	BIOPHYSIQUE & BIOINFORMATIQUE
VELGE-ROUSSEL	Florence	IMMUNOLOGIE PARASITAIRE
VERCOILLIE	Johnny	BIOPHYSIQUE & BIOINFORMATIQUE
VERGOTE	Jackie	AFFAIRE REGLEMENTAIRE ET MANAGEMENT DE LA QUALITE
VIERRON	Emilie	SANTÉ PUBLIQUE, BIostatistiques & ÉPIDÉMIologie
ZHANG	Bei-Li	PHARMACOLOGIE

### 3 MAITRES DE CONFÉRENCES ET PRATICIENS HOSPITALIERS

FOUCAULT-FRUCHARD	Laura	PHARMACIE CLINIQUE
FOUCAULT	Amélie	HEMATOLOGIE
MARLET	Julien	MICROBIOLOGIE-IMMUNOLOGIE-BIOEPIDEMIOLOGIE

### 3 AHU (Assistant Hospitalier Universitaire)

POUPIN	Pierre	BIostatistiques ET SANTE PUBLIQUE
RAMDANI	Yanis	IMMUNOLOGIE
TULOUP	Vianney	PHARMACIE CLINIQUE

### 3 ATER (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche)

AMRANE	Dyhia	CHIMIE ORGANIQUE
MEHENNI	Lyes	CHIMIE ANALYTIQUE
VERGER	Alexis	PHARMACIE GALENIQUE

### 1 PRAG

WALTERS-GALOPIN	Susan	ANGLAIS
-----------------	-------	---------

### 1 contrat d'enseignement

GERBIER (contrat enseig)	Soledad	ANGLAIS
--------------------------	---------	---------

### 3 CHARGÉS DE RECHERCHE

EPARDAUD	Mathieu	INRAE
MEVELEC	Marie-Noëlle	INRAE
MOIRE	Nathalie	INRAE

Mise à jour du 01/09/2022

# Serment de Galien



## SERMENT DE GALIEN

*En présence des Maîtres de la Faculté, je fais le serment :*

*D'honorer ceux qui m'ont instruit(e) dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle aux principes qui m'ont été enseignés et d'actualiser mes connaissances ;*

*D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de Déontologie, de l'honneur, de la probité et du désintéressement ;*

*De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers la personne humaine et sa dignité ;*

*En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels ;*

*De ne dévoiler à personne les secrets qui m'auraient été confiés ou dont j'aurais eu connaissance dans l'exercice de ma profession ;*

*De faire preuve de loyauté et de solidarité envers mes collègues pharmaciens ;*

*De coopérer avec les autres professionnels de santé ;*

*Que les Hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert(e) d'opprobre et méprisé(e) de mes confrères si j'y manque.*

Date : 20 octobre 2022

L'étudiant  
Cindy Virginie Pelou

Le Doyen de la Faculté  
Professeur Denys BRAND

## Remerciements

La rédaction de cette thèse a été possible grâce à plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de thèse Mr Jillian MARC, Enseignant-chercheur à l'Université de Tours, pour sa patience, sa disponibilité et ses conseils qui ont grandement contribué à améliorer la structure et la rédaction de ma thèse.

Je remercie Madame Sylvie BURGAUD, qui m'a beaucoup appris sur le monde des affaires. Elle a partagé ses connaissances et expériences dans ce milieu, me donnant le courage et la motivation de changer de voie professionnelle, de m'inscrire en école de commerce et de partir vivre à l'étranger.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Madame Roberta SARNO, qui a su m'accorder sa confiance et une large indépendance dans la réalisation de mes projets et missions. Merci d'avoir été une si bonne manager et mentor durant ces deux dernières années.

Merci également à Monsieur Adrien LIGONIE, sans qui je n'aurai probablement jamais pris l'initiative de venir vivre en Asie. Je te remercie pour ton soutien sans faille durant toutes ces années, ta bonne humeur inébranlable et tes conseils précieux qui me poussent à croire en moi et me dépasser.

Je remercie également Monsieur Gauthier DELBARRE de qui j'apprends toujours beaucoup. Merci pour ta patience, ton œil critique et tes conseils avisés, qui me permettent de m'épanouir personnellement et professionnellement.

Enfin, je me dois de remercier mes parents, pour m'avoir si souvent rappelé de travailler sur cette thèse, que j'aurais probablement mis bien plus de temps à écrire. Merci pour votre amour, votre soutien constant et vos encouragements.

## Table des matières

<b>Liste des enseignants .....</b>	<b>2</b>
<b>Serment de Galien.....</b>	<b>4</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>5</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>6</b>
<b>Liste des figures / tableaux.....</b>	<b>7</b>
<b>Liste des abréviations et acronymes .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>10</b>
<b>2. L'intelligence artificielle (IA).....</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Définition d'Intelligence Artificielle.....</b>	<b>11</b>
2.1.1. Machine Learning .....	12
2.1.2. Deep Learning.....	12
2.1.3. Différences entre machine learning et deep learning .....	14
<b>2.2. Le développement de l'intelligence artificielle en santé.....</b>	<b>16</b>
2.2.1. Les premiers pas de l'intelligence artificielle : des années 50 aux années 70 .....	16
2.2.2. Des années 1970 aux années 2000 .....	17
2.2.3. De 2000 à 2020 : des avancées majeures en IA .....	18
<b>2.3. Le développement de l'intelligence artificielle en APAC.....</b>	<b>18</b>
<b>3. Utilisations de l'intelligence artificielle en santé .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Application de l'IA dans les infrastructures de soin .....</b>	<b>20</b>
3.1.1. Management opérationnel .....	20
3.1.2. Découverte de principes actifs .....	21
3.1.3. Développement des principes actifs et médicaments .....	23
3.1.4. Avancement des essais cliniques .....	23
<b>3.2. Application de l'IA dans les soins directs aux patients.....</b>	<b>26</b>
3.2.1. Analyse d'imageries médicales automatisée .....	26
3.2.2. Assistant virtuel .....	27
3.2.3. Chirurgie robotique .....	29
3.2.4. Conclusion .....	30
<b>3.3. Intelligence artificielle et SARS-CoV-2 .....</b>	<b>30</b>
3.3.1. Diagnostic des patients atteints du SARS-CoV-2 .....	30
3.3.2. Gestion des dossiers de patients atteints du SARS-CoV-2 .....	31
3.3.3. Triage des patients atteints du SARS-CoV-2.....	31
3.3.4. Recherche et développement de vaccins et médicaments .....	32
3.3.5. Conclusion .....	34
<b>4. Les défis de l'adoption de l'intelligence artificielle en santé .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1. Le paradigme de la boîte noire.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2. Cybersécurité &amp; confidentialité des données.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3. La qualité des données .....</b>	<b>38</b>
<b>4.4. Interopérabilité des données .....</b>	<b>39</b>
<b>4.5. Pertes d'emplois.....</b>	<b>40</b>

4.6.	Conclusion .....	40
4.7.	Perspectives pour le développement de l'IA.....	41
5.	<b>Cartographie des solutions d'intelligence artificielle commercialisées en APAC .....</b>	<b>43</b>
5.1.	Critères d'inclusion et lecture de la cartographie.....	43
7.	<b>Analyse de base de données.....</b>	<b>58</b>
7.1.	Évaluation des données .....	58
7.2.	Analyse par date .....	60
7.3.	Analyse par pays .....	60
7.3.1.	Par pays d'émission .....	60
7.3.2.	Par pays de commercialisation en APAC.....	64
7.4.	Analyse par application de la solution d'IA.....	65
7.5.	Analyse par entreprise.....	68
7.6.	Limites méthodologiques .....	71
	<b>Conclusion .....</b>	<b>73</b>
	<b>Signatures du Directeur de thèse et du Doyen.....</b>	<b>75</b>
	<b>Non plagiat.....</b>	<b>73</b>
	<b>Résumé de la Thèse.....</b>	<b>73</b>

## Liste des figures / tableaux

Image 1 – Deep Learning : un réseau neuronal artificiel .....	13
Image 2 – Drug Discov Today. 2021 Jan; 26(1): 80–93. ....	25
Graph 1 – Nombre cumulé de solutions d'IA de santé commercialisées en APAC, par année .....	60
Graph 2 – Nombre de solutions par pays d'émission .....	61
Graph 3 – Répartition des applications Santé.....	65
Graph 4 – Répartition des applications Santé par pays .....	67
Graph 5 – Nombre d'applications par entreprise .....	69
Graph 6 – Nombre d'applications de santé par solution d'IA, par pays .....	70



## Liste des abréviations et acronymes

ADC	Aide à la Décision Clinique
ADME	Absorption Distribution Métabolisme Excrétion
AGI	Intelligence Générale Artificielle
IA	Intelligence Artificielle
ANI	Artificial Narrow Intelligence
ANN	Artificial Neural Network
APAC	Asie Pacifique
APACMed	Asia-Pacific Medical Association
ARN	Acide RiboNucléique
ASI	Super-Intelligence Artificielle
CAPE	Community Acquired Pneumonia and COVID-19 AI Predictive Engine
CDC	Centre for Disease Prevention and Control
COVID-19	CoronaVirus Disease 2019
CT	Computed Tomography
CTV	Clinical Target Volum
CV	Curriculum Vitae
CXR	Chest X-Ray
DES	Dossiers de Santé Électroniques
DL	Deep Learning
DL50	Dose Létale 50
DME	Dossiers Médicaux Électroniques
DNN	Deep Neural Network
DoS	Denial Of Service
DPI	Droits de Propriété Intellectuelle
EAU	Émirats Arabes Unis
EMA	Agence Européenne des Médicaments
FDA	Food and Drug Administration
GTV	Gross Tumor Volum
HAS	Haute Autorité de Santé
HLA	Human Leukocyte Antigen
HSA	Health Science Authority
IA	Intelligence Artificielle
ICO	Information Commissioner's Office
IdO	Internet des Objets
IHiS	Integrated Health Information Systems
IIC	Infrastructure d'Information Critique
IND	Interface Neuronale Directe
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
MHC	Major Histocompatibility Complex
ML	Machine Learning
NHS	National Health Services
NOAEL	NO Observable Adverse Effect Level



NOEL	NO Effect Level
NSP3	Non-Structural Protein 3
OAR	Organes A Risque
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PIB	Produit Intérieur Brut
PIF	Péritonite Infectieuse Féline
PNL	Precisiated Natural Language
RDA	Robotic Desktop Automation
R&D	Rechercher & Développement
RM	Résonnance Magnétique
RSI	Retour Sur Investissement
SARS-CoV-2	Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2
TALN	Traitement Automatique du Langage Naturel
TDM	TomoDensitoMétrie
UE	Union Européenne
US	United States
USD	United States Dollar
UTR	UnTranslated Region
VRV	Vaccine Record Verification
VS	Virtual Screening

## 1. Introduction

Au cours de ces dernières années, l'intelligence artificielle (IA) est passée d'une promesse futuriste à un point central pour l'innovation et est indéniablement devenue un élément de transformation incontournable du XXI<sup>e</sup> siècle. Qu'il s'agisse d'agents conversationnels, de voitures sans chauffeur ou de serveurs robotisés dans les restaurants, l'intelligence artificielle redéfinit en profondeur nos modes de vie et la façon dont les entreprises fonctionnent et établissent des relations avec leurs clients.

Bien que l'adoption de l'IA dans le secteur de la santé soit encore à un stade initial, ce dernier n'est pas en marge, et de nombreuses entreprises santé déploient désormais des solutions basées sur l'IA partout dans le monde. L'IA offre la capacité de répondre à ces demandes de services de santé avec les avantages d'être très évolutive et abordable pour un nombre critique de patients. En étant associée à des instruments d'analyse basés sur des programmes pré-codés et en aidant les professionnels de la santé, les cliniques, les hôpitaux, les industries pharmaceutiques et autres à relever leurs défis quotidiens, l'IA peut - et a su - se montrer innovante dans le domaine médical.

Face à des géants démographiques tels que les États-Unis ou la Chine, la région Asie Pacifique (APAC) fut longtemps peu considérée, mais sa population grandissante atteint dorénavant environ 4,3 milliards d'habitants<sup>i</sup> et rencontre de nouveaux défis face à des besoins croissants en matière de soins de santé. En effet, cette rapide croissance démographique, le vieillissement de la majorité des populations de l'Asie de l'Est (Japon et Chine principalement) et l'augmentation du niveau de vie dans de nombreux pays en développement s'accompagnent d'une demande de services de santé augmentant extrêmement rapidement. Selon Protiviti<sup>ii</sup>, les entreprises de la région APAC sont plus enclines à l'adoption de l'IA, avec 43% des entreprises asiatiques voyant l'IA comme un outil important au développement de leurs affaires, contre seulement 33% et 18% respectivement pour l'Amérique du Nord et l'Europe. Il est donc intéressant d'étudier le développement de l'IA et l'impact sur le secteur de la santé dans cette région.

De plus, la vague médiatique croissante que le terme « IA » génère et les investisseurs qu'elle attire rendent difficile la distinction des entreprises qui utilisent réellement l'IA de celles qui utilisent de simples feuilles de calcul automatisées. Il est donc nécessaire d'identifier et de classer les produits actuellement disponibles et réglementés. Avec l'aide de l'association des technologies médicales de l'Asie Pacifique (*Asia-Pacific Medical Association* - APACMed), une base de données a été créée, recensant les solutions d'Intelligence Artificielle pour la santé disponibles dans la région Asie Pacifique.

APACMed représente les principales parties prenantes associées à l'industrie des technologies médicales (medtech) dans la région Asie Pacifique. APACMed vise à améliorer les normes de soins pour les patients grâce à un partenariat entre ses membres, pour façonner l'avenir des soins de santé dans la région APAC. Le Comité de la santé numérique d'APACMed (*digital health committee*) a été créé au début de l'année 2020, pour aider ses membres à faciliter le partage des connaissances et à plaider en faveur de politiques qui facilitent l'innovation en santé numérique dans la région APAC.

La cartographie des solutions santé utilisant l'IA dans la région APAC pourrait permettre de comprendre la dynamique actuelle, qui pourrait profondément façonner les industries de la santé dans les années à venir. De plus, cette cartographie permet de mieux appréhender les priorités et les stratégies des acteurs dominants dans le marché de l'IA. Enfin, elle permet de démontrer une tendance et un intérêt croissants pour la région APAC qui va au-delà des soins de santé.

## 2. L'intelligence artificielle (IA)

### 2.1. Définition d'Intelligence Artificielle

Cette thèse est basée sur la définition de l'intelligence artificielle (IA) proposée par le groupe d'experts de haut niveau sur l'IA, mis en place par la Commission Européenne<sup>iii</sup>. C'est une définition qui est largement utilisée, non seulement en Europe mais aux États-Unis et en APAC également.

*« L'intelligence artificielle fait référence aux systèmes qui affichent un comportement intelligent en analysant leur environnement et en prenant des mesures - avec un certain degré d'autonomie - pour atteindre des objectifs spécifiques. »*

*Les systèmes basés sur l'intelligence artificielle peuvent être entièrement basés sur des logiciels, agissant dans le monde virtuel (par exemple : assistants vocaux, logiciels d'analyse d'images, moteurs de recherche, outils de reconnaissances vocale et faciale) où l'intelligence artificielle peut être intégrée dans des instruments matériels (par exemple : robotique, voitures autonomes, drones ou applications de l'internet des objets (IdO ou the Internet of Things (IoT)). »*

Selon le livre *Super-Intelligence*, du philosophe et expert en IA Nick Bostrom, il existe trois différents niveaux d'IA<sup>iv</sup> :

- **Intelligence artificielle étroite** (*Artificial Narrow Intelligence (ANI)*), autrement appelée IA faible : l'IA est programmée pour effectuer une tâche singulière bien définie (par exemple jouer aux échecs, repérer certains objets sur des images...) et est le seul type d'IA existant à ce jour. Ce type d'IA a connu de nombreuses découvertes et améliorations au cours de ces dernières années, notamment grâce à l'augmentation des performances en machine learning et en deep learning.
- **Intelligence générale artificielle** (AGI) ou IA forte ou profonde : cette IA n'est encore que théorique à ce jour, mais selon sa définition, l'algorithme serait capable d'imiter l'intellect et/ou le comportement humain, avec la capacité d'apprendre et d'exécuter son intelligence pour répondre aux requêtes. Pour réaliser cette AGI, les chercheurs auraient besoin de rendre les machines conscientes, en codant un ensemble complet de capacités cognitives.
- **Super-intelligence artificielle** (ASI) : est une IA hypothétique qui dépasse largement les performances intellectuelles des humains, tous domaines d'expertise confondus.

L'IA a une capacité d'auto-apprentissage par utilisation des données et deux principaux types d'apprentissage seront retenus, l'apprentissage automatique - ou *machine learning* - (ML) et l'apprentissage en profondeur – ou *deep learning* (DL) -.

### 2.1.1. Machine Learning

Le **machine learning** (ML)<sup>v</sup> est une science de programmation informatique, permettant aux ordinateurs d'acquérir des informations à partir de données. Le ML est impliqué dans des algorithmes de codage capables de se modifier sans intervention humaine, en s'alimentant de données structurées, afin de produire le résultat demandé. Généralement, il peut être considéré que plus l'algorithme a accès à de grandes plages de données, mieux il apprendra à exécuter une tâche.

Une des premières utilisations du ML s'étant largement répandue est le filtre anti-spam, apparu dans les années 1990. Le filtre anti-spam peut être technologiquement considéré comme un apprentissage automatique, apprenant de manière si adéquate que les signalements manuels d'e-mail comme spam se font de plus en plus rares. Cette application de ML nécessite cependant de nombreux ajustements du code de l'algorithme, ainsi que de longues listes de règles pour l'IA. Pour ce type d'IA, les données vont être pré-organisées avant d'être présentées à l'algorithme, on parle donc de « données structurées ».

Les données structurées<sup>vi</sup> sont des informations conformes à un modèle de données prédéterminé et sont donc faciles à étudier. Ce type de données correspond à un format de tableur avec relation entre différentes colonnes et lignes. Les tableurs Excel sont un exemple fréquent de données structurées car ils contiennent lignes et colonnes qui peuvent être organisées.

En opposition aux données structurées, nous trouvons les données non structurées, ces dernières ne sont pas organisées de manière prédéterminée. Ces données contiennent généralement beaucoup de texte, mais peuvent également inclure nombres, équations, sons ou images par exemple. Il est donc facile de comprendre que ce type de données puisse produire de nombreuses incohérences, rendant l'analyse à l'aide de programmes conventionnels bien plus difficile qu'une simple analyse de texte ou d'une base de données Excel. Les exemples les plus fréquents de données non structurées sont les enregistrements audio ou les fichiers vidéo.

### 2.1.2. Deep Learning

Selon les définitions, le **deep learning**<sup>vii</sup> (DL) peut être identifié comme une subdivision du machine learning (une de ses sous parties les plus évoluées), mais également comme une entité à part entière, tant son fonctionnement peut se différencier du fonctionnement de certains algorithmes de machine learning.

La création et le comportement des algorithmes de DL sont similaires à ceux du ML ; cependant pour le deep learning, on retrouve de nombreuses couches d'algorithmes et chacune de ces couches fournit une interprétation des données d'entrée. Un tel réseau d'algorithmes est appelé

réseau neuronal artificiel (*Artificial Neural Network* - ANN) ou réseau neuronal profond (*Deep Neural Network* - DNN), car il est inspiré du réseau neuronal d'un cerveau biologique<sup>viii</sup>.

Pour cette thèse il sera retenu que le deep learning est la version évoluée du machine learning, et tout algorithme d'IA ne rentrant pas dans la classification de deep learning, sera retenu comme appartenant à la classification de machine learning.

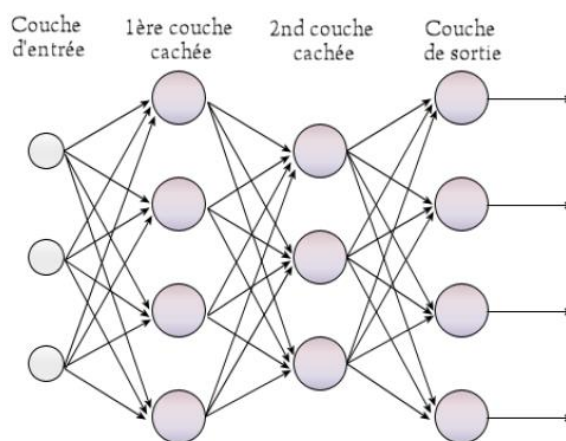


Image 1 – Deep Learning : un réseau neuronal artificiel<sup>ix</sup>

L'objectif principal de l'ANN est de gérer la résolution de problèmes de la même manière que le ferait un cerveau humain. Un ANN est établi sur une sélection de centaines ou de milliers d'unités connectées, également appelées neurones artificiels, qui correspondent quelque peu aux neurones d'un cerveau humain. De la même manière que les synapses de notre cerveau, chaque connexion peut transférer un signal vers d'autres unités. Les neurones traiteront ce signal et le produit de chaque neurone est calculé et analysé par différentes fonctions de l'ANN.

Différentes couches effectuent généralement diverses transformations sur les données reçues (aussi appelées données d'entrées). Les informations voyagent de la couche d'entrée (elles sont envoyées par un périphérique à un processeur) traversent les différentes couches d'algorithmes de nombreuses fois, puis atteignent la couche de sortie, où les données seront émises par une unité centrale vers un périphérique.

L'application de l'IA en l'imagerie médicale a été suggérée pour améliorer la précision, la cohérence et l'efficacité des rapports de soin. Arterys est devenue la première application de deep learning basée sur le cloud clinique approuvée par la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis dans le domaine de la santé en 2017<sup>x</sup>.

Arterys Cardio AIMR combine l'apprentissage en profondeur et le cloud computing pour automatiser l'analyse des images de résonance magnétique (IRM) cardiaques. En éliminant de nombreuses tâches manuelles fastidieuses, Arterys Cardio AI permet aux cliniciens d'identifier, de déterminer le traitement et de suivre rapidement et facilement les problèmes cardiaques. Cette application s'est depuis étendue pour inclure l'imagerie hépatique et pulmonaire, les images

radiographiques thoraciques et musculo-squelettiques et les images tomodensitométriques de la tête sans contraste.

Le deep learning peut être appliqué pour détecter les lésions, créer des diagnostics différentiels et rédiger des rapports médicaux automatisés. En 2017, Gargeya et Leng<sup>xi</sup> ont utilisé le DL pour dépister la rétinopathie diabétique. De même, Esteva et al<sup>xii</sup> ont formé un algorithme pour différencier les carcinomes cutanés (cancers non mélanocytaires), des cancers mélanocytaires avec des résultats indiquant des performances de l'IA comparables à celles de dermatologues.

### 2.1.3. Différences entre machine learning et deep learning

#### 2.1.3.1. *Ingénierie des fonctionnalités*

L'ingénierie des fonctionnalités (aussi appelée ingénierie des caractéristiques) permet la transformation de données brutes en caractéristiques. Cette méthode peut être considérée comme une méthode d'extraction puis de réduction de la complexité des données. Elle permet de rendre les données plus accessibles et utilisables pour les algorithmes de ML et de DL, et permet d'améliorer les performances du modèle<sup>xiii</sup>.

La manière de différencier DL et ML provient de la manière dont les données sont transmises au système. Par exemple, la plupart des fonctionnalités dont les algorithmes de ML ont besoin doivent être déterminées par un expert, puis codées par domaine et par type de données. La fonctionnalité peut prendre plusieurs formes, il peut s'agir de formes de valeur de pixel, d'une texture, d'une position... L'efficacité de la majorité des algorithmes ML repose sur la précision avec laquelle les fonctionnalités seront reconnues et utilisées.

Les « données propres » n'existent pas naturellement, donc pour être utilisées pour le ML, les données doivent être intensivement affinées (par exemple dans une base de données, une colonne avec beaucoup de données manquantes devra être exclue, toutes les fautes de frappe doivent être corrigées pour fusionner les réponses équivalentes, etc.). Enfin, le texte doit être encodé sous une autre forme. Il existe deux types d'encodages courants :

- **Étiquetage** : c'est un processus de reconnaissance des données brutes fournies qui leur attribuera des étiquettes pertinentes et informatives aux données. Par la lecture de ces étiquettes, l'algorithme de ML analysera le contexte associé aux données et pourra en tirer des conclusions. L'algorithme pourra par exemple transformer [image de carcinomes, image de cancers mélanocytaires, image saine] en [1,2,3].
- **Encodage à chaud** : chaque étiquette est convertie en une liste associée à une valeur binaire (1 ou 0). Généralement la plupart des algorithmes d'apprentissage automatique sera codée pour se convertir automatiquement en langage binaire.

### 2.1.3.2. Apprentissage supervisé et non-supervisé

- Apprentissage supervisé

Les algorithmes d'intelligence artificielle sont programmés pour apprendre à faire des prédictions en reconnaissant les données étiquetées, puis en appliquant ces données pour générer des sorties supplémentaires lorsque des données supplémentaires sont entrées. Néanmoins, lorsque la sortie obtenue n'est pas celle souhaitée, les algorithmes ML doivent être recodés par un expert. On parle dans ce cas d'apprentissage supervisé<sup>xiv</sup>. Ce premier type d'apprentissage est généralement utilisé pour les problèmes de classification et est le type d'apprentissage automatique le plus populaire dans le domaine médical, particulièrement pour assister l'analyse d'imagerie médicale en radiologie<sup>xv</sup>.

Une autre fonction d'intelligence artificielle, touchant cette fois la pharmaco épidémiologie, est la prédiction des événements de santé en fonction de diverses données d'entrée. Cette technologie est encore peu exploitée à ce jour, bien que l'on puisse observer une récente augmentation de son utilisation<sup>xvi</sup>. Par exemple, à partir des statistiques sur les taux de vaccination contre la rougeole et les flambées de maladies détectées par les centres de protection de la santé publique (par exemple les différents *Centre for Disease Prevention and Control* (CDC) existant dans chaque pays / région du monde), et par les données de santé non traditionnelles, y compris les données présentes sur les réseaux sociaux, un algorithme peut fournir une carte fiable des futurs points chauds d'épidémie de rougeole<sup>xvii</sup>.

- Apprentissage non-supervisé

A l'inverse de l'apprentissage supervisé, les réseaux d'apprentissage en profondeur n'ont pas besoin de l'intervention humaine lorsque la sortie obtenue n'est pas la bonne. Le programme informatique est invité à rechercher la structure et les modèles inhérents à l'erreur détectée qui se trouvent dans les données, et finalement, l'IA va automatiquement apprendre à éviter la répétition de ses erreurs. On parle dans ce cas d'apprentissage non-supervisé. Contrairement au cas de l'apprentissage automatique supervisé, les ensembles de données ne sont ni étiquetés ni structurés. Ainsi, l'algorithme doit constituer ses propres groupes, clusters et catégories en fonction des similitudes trouvées dans d'énormes ensembles de données. L'apprentissage non supervisé est généralement utilisé pour prédire des résultats inconnus et pour déterminer comment découvrir des modèles cachés. L'apprentissage non-supervisé est souvent associé au deep learning et est notamment mis en application pour la production de véhicules autonomes (équipé d'un système de pilotage automatique), la locomotion des robots, ainsi que dans des applications de reconnaissance vocale et de reconnaissance de formes (Google Lens par exemple). En santé on le retrouvera notamment pour l'Interface neuronale directe (IND), la chémo-informatique, et la bio-informatique.



### 2.1.3.3. Quantité de données

Il est essentiel de souligner que la qualité des résultats obtenus par l'IA dépend directement de la qualité des données utilisées à la fois pour le ML et le DL. Cependant, les performances de l'algorithme DL augmentent avec la quantité d'entrées de données dans le système et ne fonctionnent pas très bien avec de petites quantités de données. Au contraire, le ML peut facilement fonctionner avec de plus petits ensembles de données.

Les deux sous-types (ML et DL) ont un vaste potentiel dans le domaine de la santé. Les algorithmes d'apprentissage automatique, parce qu'ils nécessitent des données étiquetées (un travail laborieux), ne seront pas le premier choix pour résoudre des requêtes complexes. Cependant, ils peuvent aider à automatiser de nombreux processus métier, y compris l'authentification d'identité, la détection de fraude, le marketing sur les réseaux sociaux, l'automatisation des demandes courantes des patients<sup>xviii</sup>... Ces exemples illustrent quelques utilisations du ML mais les opportunités futures sont encore plus grandes. En médecine, le deep learning sera particulièrement nécessaire lors de l'analyse d'images complexes, telles que la tomodensitométrie informatisée (TDM) ou l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ; lorsqu'un médecin essaiera de différencier un grain de beauté d'un mélanome ; lors du traitement de textes et de discours pour les dossiers de santé électroniques (DSE) ; et bien d'autres tâches encore qui seront plus amplement développées dans la suite de la thèse.

## 2.2. Le développement de l'intelligence artificielle en santé

L'intelligence artificielle a été décrite pour la première fois en 1950 ; cependant, plusieurs limitations dans les premiers modèles ont empêché une acceptation et une application généralisées en médecine. On peut par exemple citer la puissance de calcul limitée : à l'époque, il n'y avait pas assez de mémoire ou de vitesse de traitement pour accomplir des tâches que l'on considérerait maintenant basiques ; ou encore la quantité de données : de nombreuses applications telles que langage naturel nécessitent d'énormes quantités de données, données qui n'étaient alors pas, ou peu, disponibles et collectionnables.

Au début des années 2000, bon nombre de ces limitations ont été surmontées par l'avènement du machine learning. Dorénavant les systèmes d'IA sont capables d'analyser des algorithmes complexes et d'auto-apprentissage, nous entrons dans une nouvelle ère de la médecine où l'IA peut être appliquée à la pratique clinique grâce à des modèles d'évaluation des risques, améliorant la précision du diagnostic et l'efficacité du flux de travail.

### 2.2.1. Les premiers pas de l'intelligence artificielle : des années 50 aux années 70

Le concept de l'utilisation d'ordinateurs pour simuler un comportement intelligent et une pensée critique, a été décrit pour la première fois par Alan Turing en 1950<sup>xix</sup>. Dans le livre *Computers and Intelligence*, Turing a décrit un test simple, plus tard connu sous le nom de « test de Turing », pour déterminer si les ordinateurs pouvaient avoir certaines capacités de l'intelligence humaine.

L'IA en médecine a considérablement évolué au cours des 5 dernières décennies. Depuis l'avènement du ML et du DL, les applications de l'IA se sont développées, créant des opportunités pour une médecine personnalisée plutôt que pour une médecine basée uniquement sur des algorithmes. Les modèles prédictifs peuvent être utilisés pour le diagnostic des maladies, la prédiction de la réponse thérapeutique et la médecine potentiellement préventive à l'avenir<sup>xx</sup>. L'IA peut améliorer la précision du diagnostic, améliorer l'efficacité du flux de travail des prestataires et des opérations cliniques, faciliter une meilleure surveillance de la maladie et du traitement thérapeutique, et améliorer la précision des procédures et les résultats globaux pour les patients. La croissance et le développement progressifs de la plateforme d'IA en médecine sont décrits ci-dessous et organisés par périodes de temps spécifiques de transformation fondamentale.

La première IA était axée sur le développement de machines capables de faire des inférences ou de prendre des décisions que seul un humain pouvait prendre auparavant. Le premier bras de robot industriel (Unimate) a rejoint la chaîne de montage de General Motors en 1961 et a effectué un moulage sous pression automatisé<sup>xxi</sup>, en suivant des commandes étape par étape. Quelques années plus tard (1964), Eliza a été présentée par Joseph Weizenbaum. En utilisant le traitement du langage naturel, Eliza a pu communiquer en utilisant une méthodologie d'appariement et de substitution de modèles pour imiter la conversation humaine<sup>xxii</sup>, servant de cadre pour les futurs *chatbots* (agents conversationnels). Mais malgré ces innovations en ingénierie, la médecine a mis du temps à adopter l'IA.

Le premier programme de résolution de problèmes, ou système expert, apparaît en 1965 et est connu sous le nom de Dendral<sup>xxiii</sup>. Bien qu'il ait été conçu pour des applications en chimie organique, il a fourni la base d'un système ultérieur MYCIN<sup>xxiv</sup>, considéré comme l'une des premières utilisations les plus importantes de l'intelligence artificielle en médecine. Sur la base des informations fournies par les patients et les médecins, et à partir d'une base de connaissances d'environ 600 règles, MYCIN pouvait fournir une liste de pathogènes bactériens potentiels, puis recommander des options de traitement antibiotique adaptées, par exemple adapté au poids corporel du patient. INTERNIST-1 a ensuite été développé en utilisant le même cadre qu'EMYCIN et une base de connaissances médicales plus large pour aider le médecin de soins primaires à diagnostiquer. MYCIN et INTERNIST-1 n'ont cependant pas été utilisés en routine par les praticiens.

### 2.2.2. Des années 1970 aux années 2000

L'un des premiers prototypes à démontrer la faisabilité de l'application de l'IA à la médecine a été le développement d'un programme de consultation pour le glaucome à l'aide du modèle CASNET. Ce modèle pouvait appliquer des informations sur une maladie spécifique à des patients individuels et fournir aux médecins des conseils sur la gestion de ces patients.<sup>xxv</sup>

À la fin des années 1990, l'intérêt pour le ML a été renouvelé, en particulier dans le monde médical, qui, avec les développements technologiques présentés ci-dessus, a ouvert la voie à l'ère moderne de l'IA en médecine.

### 2.2.3. De 2000 à 2020 : des avancées majeures en IA

En 2007, IBM a créé un système de questions-réponses nommé Watson, qui a rivalisé avec des participants humains et a remporté la première place dans le jeu télévisé Jeopardy! en 2011. En 2017, Bakkar et al<sup>xxvi</sup> ont utilisé IBM Watson pour identifier avec succès de nouvelles protéines de liaison à l'ARN qui ont été modifiées dans la sclérose latérale amyotrophique.

Le traitement du langage naturel a significativement transformé les chatbots, passant de communications superficielles (comme Eliza) à des interfaces capables de communications basées sur la conversation. Cette technologie a été appliquée à l'assistant virtuel d'Apple, Siri, et à l'assistant virtuel d'Amazon, Alexa. Un chatbot, Pharmabot, fut développé en 2015 pour aider à fournir une éducation thérapeutique aux patients pédiatriques et leurs parents. Mandy fut créée en 2017 en tant que processus d'accueil automatisé des patients pour un cabinet de soins primaires.<sup>xxvii</sup>

## 2.3. Le développement de l'intelligence artificielle en APAC

Depuis des dizaines d'années, la région APAC est à l'origine de nombreuses innovations et découvertes technologiques. Selon l'organisation mondiale de la propriété intellectuelle, les grandes entreprises technologiques Japonaises et Sud-Coréennes détiennent le plus grand nombre de dépôts de brevets en matière d'IA<sup>xxviii</sup>. En 2019, l'Union Européenne dépensait autour de 85 milliards de dollars US (soit 0,5% de son PIB) en recherche et développement. Les Asiatiques mettent l'accent sur le développement de la robotique industrielle et domestique, les voitures autonomes et les projets de villes intelligentes. La Chine est le leader mondial en termes de dépenses annuelles de R&D avec près de 275 milliards de dollars US<sup>xxix</sup> (un peu plus de 2% de son PIB), et d'autres pays asiatiques dépassent également ces 2%, notamment le Japon (176 milliards de dollars)<sup>xxx</sup>, la Corée du Sud (70 milliards de dollars)<sup>xxxi</sup> et Singapour (13 milliards de dollars)<sup>xxxii</sup>. En comparaison, les dépenses américaines en R&D s'élèvent à environ 131 milliards de dollars<sup>xxxiii</sup>. Bien que ces chiffres couvrent un large éventail d'industries, de la biotechnologie aux matériaux, en passant par l'informatique, une grande partie de ces dépenses est liée à l'automatisation des tâches et à l'IA.

L'intelligence artificielle s'appuie sur des ensembles de données précis et minutieusement préparés pour augmenter la précision et les performances de son programme. L'énorme population de la région APAC offre l'avantage d'un génome diversifié qui pourrait fournir une quantité importante de données à l'IA. Cela explique pourquoi de nombreuses entreprises d'IA des États-Unis et d'Europe investissent dans le marché APAC ces dernières années pour concevoir, développer et commercialiser leurs solutions d'IA<sup>xxxiv</sup>. Alors que les investissements étrangers dans l'industrie manufacturière se déplacent de la Chine vers l'Asie du Sud-Est<sup>xxxv</sup>, les entreprises Chinoises semblent également suivre cette transition<sup>xxxvi</sup>. Les pays tels que l'Indonésie, la Malaisie, la Thaïlande et le Vietnam abritent d'importants investissements des géants technologiques chinois, qui ont ouvert des laboratoires d'IA dans la région.

L'adoption rapide de l'intelligence artificielle au sein de l'APAC est aussi en partie due aux opportunités disponibles, la région accueillant par exemple de nombreuses start-ups qui utilisent l'internet des objets (IdO), la traçabilité numérique et la réalité augmentée pour offrir aux clients un

service plus attractif. Un autre fait intéressant, est que de nombreux gouvernements de l'APAC sont en faveur de l'utilisation de l'IA et ont élaboré des initiatives pour préparer leur main-d'œuvre locale à une nouvelle ère technologique. Singapour prépare le terrain pour que professionnels de l'industrie et étudiants disposent des compétences nécessaires pour travailler efficacement avec l'intelligence artificielle. La Chine continue de promouvoir l'intégration de l'IA dans son système éducatif afin de faciliter l'enseignement et l'apprentissage dans les écoles<sup>xxxvii</sup>.

Cette analyse du paysage asiatique montre une industrie de l'IA en plein essor et suggère que les acteurs majoritairement chinois, japonais et sud-coréens contribuent énormément au développement de ces nouvelles technologies.

### 3. Utilisations de l'intelligence artificielle en santé

L'IA a parcouru un long chemin depuis le test initial de Turing jusqu'à son avatar actuel. Cependant, les algorithmes d'IA et leurs applications nécessitent désormais une étude et une validation plus approfondies qu'autrefois. De nombreuses données cliniques sont nécessaires pour démontrer l'efficacité d'une IA, sa valeur et son impact sur les soins aux patients et les résultats médicaux. Actuellement, l'industrie de la santé connaît de nombreuses transformations de par la croissante adoption de l'intelligence artificielle. Cette partie 3 couvre de nombreux, et pertinents, exemples des applications de l'IA en santé. Les emplois de l'IA peuvent être catégorisés de différentes façons. Pour cette thèse, ces emplois seront différenciés en deux catégories : l'utilisation de l'IA dans les infrastructures de santé et les IA liées directement aux soins des patients. La première catégorie met en évidence les applications d'IA d'un point de vue organisationnel et opérationnel, ayant un lien indirect avec le patient ; tandis que la seconde se concentre sur les applications ayant un impact plus direct sur les patients et leur santé.

#### 3.1. Application de l'IA dans les infrastructures de soin

##### 3.1.1. Management opérationnel

L'une des applications les plus acceptées de l'IA dans les soins de santé par les praticiens concerne les tâches administratives et opérationnelles souvent répétitives, qui absorbent un temps considérable au personnel de santé. Certaines études suggèrent que ces tâches chronophages peuvent prendre jusqu'à 70% du temps d'un médecin et 60% du temps d'une infirmière<sup>xxxviii</sup>. Les solutions d'IA peuvent alléger une grande partie de ce fardeau administratif, donner plus de temps aux professionnels de la santé avec leurs patients et augmenter leur satisfaction au travail.

Prenons le cas d'un examen d'échantillons de tissus, l'étiquetage des données est une étape qui prend du temps, en particulier dans le cas où plusieurs milliers d'images d'échantillons de tissus peuvent être nécessaires pour former un modèle précis. Astra Zeneca (société pharmaceutique et biotechnologique multinationale anglo-suédoise) utilise Amazon SageMaker Ground Truth, un service d'étiquetage et d'annotation de données basé sur l'intelligence artificielle pour automatiser certaines des parties les plus fastidieuses de ce travail. Cette utilisation a permis la réduction d'au moins 50%<sup>xxxix</sup> du temps passé à cataloguer les échantillons de tissu.

L'utilisation de l'IA dans les soins de santé a déjà prouvé de nombreux avantages. Elle permettrait par exemple l'amélioration du flux de travail, la réduction des déchets, la diminution des erreurs liées à des facteurs humains, et le déplacement de l'attention du travail humain de la saisie manuelle des données vers des tâches plus complexes nécessitant un savoir-faire humain. L'IA avec le Traitement automatique du Langage Naturel (TLN) a également été adoptée dans de nombreux hôpitaux et cliniques pour la reconnaissance vocale et la prise de notes cliniques. En associant des processus tels que l'automatisation robotique du bureau (*Robotic Desktop Automation* - RDA), la vision par ordinateur et l'apprentissage automatique, l'IA peut automatiser la plupart des procédures de contrôle d'admissibilité et d'approbation préalable qui ralentissent la gestion des soins de santé

de nos jours. Grâce à son accès aux dossiers médicaux électroniques (DME), l'IA peut vérifier les informations d'assurance, vérifier si une autorisation préalable est nécessaire, vérifier le statut du patient, automatiser les soumissions de dossiers...

Voici un exemple concret de ces applications par une start-up singapourienne UCARE.AI<sup>xi</sup>, dont la solution d'IA a été mise en œuvre à Parkway Pantai, le géant de la santé en Asie du Sud-Est. En 2018, quatre hôpitaux de Singapour se sont associés à la startup et ont mis en œuvre la fonction d'estimation des factures personnalisées. Ainsi, les factures de soins sont déterminées en fonction de l'état de santé des patients, des pratiques médicales et de la politique de l'hôpital<sup>xii</sup>. L'objectif étant de fournir des estimations plus précises des coûts, pour améliorer la transparence des frais d'hospitalisation. En plus d'améliorer son efficacité opérationnelle, Parkway Pantai a par la suite lancé un programme de garantie des facturations, qui a permis une amélioration de la satisfaction de ses patients et une augmentation des revenus de l'hôpital<sup>xiii</sup>.

### 3.1.2. Découverte de principes actifs

Aux premiers stades de développement d'un médicament, des milliers de composés peuvent être candidats potentiels pour un traitement médical. Après avoir passé plusieurs séries de tests, en général, une seule molécule atteindra l'étape de développement.

Les chercheurs commencent alors à recueillir des informations sur la molécule lors d'études précliniques :

- **Pharmacocinétique** : étude de l'absorption, distribution, métabolisme et excrétion du médicament après son administration dans l'organisme (études ADME).
- **Pharmacodynamique** : étude détaillée de l'interaction entre la substance active et sa cible dans l'organisme.
- **Efficacité** : l'efficacité et le mode d'action de la molécule doivent être connus. Les chercheurs déterminent alors les propriétés principales du médicament et recherchent d'éventuels effets secondaires. Pour cela, des tests sont effectués au préalable in vitro, sur des cultures cellulaires, puis in vivo.
- **Toxicité** : des études toxicologiques sont nécessaires pour déterminer de potentiels effets secondaires mutagènes, cancérogènes, sur la reproduction et de potentiels effets périnataux. On détermine aussi les doses auxquelles les molécules sont létales (DL50, dose à laquelle 50% des animaux sur lesquels la molécule est testée sont tués), n'ont aucun effet ni pharmacologique ni secondaire (NOEL, *no effect level*) et n'ont aucun effet secondaire (NOAEL, *no observable adverse effect level*). La forme galénique est ensuite optimisée pour assurer la meilleure stabilité possible pour la molécule active.

Les processus de découverte et de développement d'un médicament peuvent prendre plus d'une décennie et coûter plusieurs milliards d'euros. A l'issue des essais de phase 1, moins de 10%

des candidats médicaments arrivent sur le marché<sup>xliii</sup>. Pour éviter les premières étapes de criblage, les approches basées sur l'étude de la structure de la molécule sont de plus en plus courantes. Cependant, les chercheurs doivent encore concevoir, synthétiser et évaluer de nombreux composés chimiques.

Plusieurs entreprises pharmaceutiques, telles que Bayer, Roche et Pfizer, se sont associées à des sociétés informatiques. Ensemble elle développent une plate-forme pour la recherche de thérapies dans des domaines tels que l'immuno-oncologie et les maladies cardiovasculaires<sup>xliv</sup>. Les aspects de *virtual screening* (VS) auxquels l'IA a été appliquée sont discutés ci-dessous<sup>xlv</sup>.

- **Prédiction des propriétés physico-chimiques**

Les propriétés physicochimiques, telles que la solubilité, le coefficient de partage (logP), le degré d'ionisation et la perméabilité intrinsèque du médicament, affectent indirectement ses propriétés pharmacocinétiques et sa famille de récepteurs cibles. Ces propriétés physicochimiques doivent donc être prises en compte lors de la conception d'un nouveau médicament.

- **Prédiction de la bio-activité**

L'efficacité des molécules médicamenteuses dépend de leur affinité pour la protéine ou le récepteur cible. Les molécules médicamenteuses qui ne montrent aucune interaction ou affinité envers la protéine ciblée ne pourront pas fournir la réponse thérapeutique. Dans certains cas, il est également possible que les molécules de médicament développées interagissent avec des protéines ou des récepteurs non intentionnels, entraînant une toxicité. Les méthodes basées sur l'IA peuvent mesurer l'affinité de liaison d'un médicament en tenant compte des caractéristiques ou des similitudes du médicament et de sa cible.

- **Prédiction de la structure de la protéine cible**

Lors du développement d'une molécule médicamenteuse, il est essentiel d'attribuer la bonne cible pour un traitement réussi. De nombreuses protéines sont impliquées dans le développement de la maladie et, dans certains cas, elles sont surexprimées. Par conséquent, pour le ciblage sélectif de la maladie, il est essentiel de prédire la structure de la protéine cible pour concevoir la molécule médicamenteuse. L'IA peut aider à la découverte de médicaments basés sur la structure en prédisant la structure 3D de la protéine car la conception est conforme à l'environnement chimique du site protéique cible, aidant ainsi à prédire l'effet d'un composé sur la cible ainsi que les considérations de sécurité avant leur synthèse.

Spaya<sup>xlvi</sup>, un outil d'IA commercialisé par Iktos, est un premier exemple d'utilisation de l'IA pour la découverte de nouveaux médicaments. Spaya est programmé pour découvrir et prioriser les voies de synthèse, il peut designer de nouvelles molécules qui suivent des exigences prédéfinies (telles qu'un manque de toxicité spécifique, une certaine solubilité ...). Pfizer a par exemple déployé cette technologie de modélisation générative d'Iktos dans certains de leurs programmes de recherches.<sup>xlvii</sup>



La plateforme informatique avancée de Schrödinger<sup>xlviii</sup> est un second exemple d'emploi de l'IA. Elle est utilisée par plusieurs laboratoires pharmaceutiques pour créer des pools de données et aider à accélérer les efforts de découverte de médicaments.

### 3.1.3. Développement des principes actifs et médicaments

Une fois la nouvelle molécule médicamenteuse découverte, elle nécessite son incorporation ultérieure dans une forme galénique appropriée avec les caractéristiques de délivrance souhaitées. Divers outils de calcul peuvent résoudre les problèmes rencontrés dans le domaine de la conception de la formulation, tels que les problèmes de stabilité, de dissolution, de porosité... Une intelligence artificielle peut être programmée pour sélectionner le type, la nature et la quantité des excipients en fonction des attributs physico-chimiques du médicament. Elle fonctionne grâce à un mécanisme de rétroaction lui permettant de surveiller l'ensemble du processus et le modifier par intermittence.

L'équipe de Guo et ses collaborateurs ont par exemple créé un système hybride pour le développement d'un remplissage direct de capsules de gélatine dure par du piroxicam, conformément aux spécifications de son profil de dissolution. Le model expert system (MES) prend des décisions et des recommandations pour le développement de la formulation galénique sur la base des paramètres d'entrée. La combinaison de ces modèles mathématiques avec l'IA pourrait s'avérer d'une aide immense dans la production rapide de produits pharmaceutiques.<sup>xlix</sup>

De nombreuses collaborations entre laboratoires pharmaceutiques et les « big-tech companies » ont vu le jour ces dernières années. BenevolentAI et AstraZeneca se sont associés depuis 2019 pour identifier de nouveaux principes actifs contre l'insuffisance rénale et la fibrose pulmonaire idiopathique. Toujours en 2019, Novartis s'est allié à Microsoft pour développer de nouvelles thérapies grâce à leurs IA. En 2020, pour découvrir de nouveaux principes actifs en cardiologie et en oncologie, Bayer a commencé une collaboration avec Exscientia, possédant une plateforme (Centaur Chemist) de découverte de médicaments basée sur l'intelligence artificielle.

### 3.1.4. Avancement des essais cliniques

Les essais cliniques visent à établir l'innocuité et l'efficacité d'un médicament chez l'homme pour une maladie particulière. Ils se déroulent généralement sur 6 à 7 ans et nécessitent un investissement financier substantiel. Cependant, seule une molécule sur dix entrant dans ces essais cliniques obtient une autorisation réussie, ce qui représente une perte massive pour l'industrie pharmaceutique. Ces échecs d'obtention d'une autorisation peuvent résulter d'une sélection inappropriée des patients, d'un manque d'exigences techniques et/ou d'une mauvaise infrastructure. En plus de travailler sur la conception des médicaments et de trouver des combinaisons de médicaments efficaces, les chercheurs travaillent également à développer des essais cliniques moins chers et plus rapides ; et avec les vastes données médicales numériques disponibles, ces échecs peuvent être réduits avec la mise en œuvre de l'intelligence artificielle.

Le recrutement des patients prend un tiers de la chronologie des essais cliniques. Le succès de ces essais nécessite des patients adaptés, ce qui conduit sinon à environ 86% des cas d'échec<sup>i</sup>. L'IA peut aider à sélectionner uniquement une population malade spécifique pour le recrutement dans les phases II et III des essais cliniques en utilisant une analyse du profil génome-exposome spécifique au patient. Cela peut aider à prédire précocement les cibles médicamenteuses disponibles chez les patients sélectionnés<sup>ii</sup>. En utilisant d'autres aspects de l'IA, tels que l'apprentissage automatique prédictif et d'autres techniques de raisonnement, la découverte préclinique de molécules aide à la prédiction précoce de composés phares qui passeraient les essais cliniques en tenant compte de la sélection de patients adaptés.

L'abandon des patients pendant les essais cliniques est responsable de l'échec de 30% ces essais. Cela crée des exigences de recrutements supplémentaires pour l'achèvement des essais entraînant une perte de temps et d'argent. Cela peut être évité en surveillant plus étroitement les patients et en les aidant à suivre le protocole souhaité des essais cliniques<sup>iii</sup>. Un logiciel mobile alimenté par l'intelligence artificielle a été développé par AiCure<sup>liii</sup>. Il surveille la prise régulière de médicaments par les patients atteints de schizophrénie dans un essai de phase II. L'application mobile a permis une augmentation du taux d'adhésion des patients de 25%, participant à la réussite de l'essai clinique.

Pour commercialiser un nouveau médicament, les essais cliniques nécessitent généralement des milliers de patients et de tests pour identifier les effets secondaires et déterminer l'efficacité du traitement à long terme. Déjà adopté dans de nombreuses industries, la recherche et le développement du « jumeau numérique » a récemment démarré dans le secteur de la santé, mais nécessite encore probablement plusieurs années de recherche avant d'être plus largement adopté.

Un jumeau numérique (*digital twin*), pour le définir en termes simples, est une réplique d'un corps matériel ou d'une structure immatérielle, créée artificiellement. Le jumeau numérique peut être testé séparément de son équivalent dans le monde réel afin que les décideurs puissent prendre une décision raisonnée. *In fine*, l'objectif serait que le jumeau numérique soit capable de prendre en compte la variabilité biologique inhérente à l'humain.

Plusieurs entreprises ont déjà développé des modèles de jumeaux numériques d'organes humains. Par exemple, Philips crée un cœur virtuel. Le modèle HeartModel<sup>liv</sup> est alimenté avec des milliers d'images échographiques de cœurs pour intégrer les connaissances préalables sur la disposition structurelle générale, les formes et les tailles du cœur. Lorsque les professionnels de santé ajoutent une nouvelle image à partir de l'échographie cardiaque d'un patient, le modèle générique créé est adapté en un modèle 3D personnalisé. En entraînant leurs algorithmes sur une base de données comptant plus de 250 millions d'images annotées, de rapports médicaux et de données opérationnelles, Siemens Healthineers a conçu un modèle cardiaque numérique<sup>lv</sup>. Le professionnel de la santé est alors en mesure de tester les médicaments sur le jumeau numérique, d'observer les conséquences et éventuellement de choisir le traitement le plus adapté à ce patient en particulier.

Au lieu de tester des composés chimiques sur des milliers de patients, l'IA effectuera des milliers de simulations sur des patients virtuels. Le développement de jumeaux numériques nécessite

de nombreuses données ainsi que des analyses logicielles avancées. Bien que possible en théorie, la mise en œuvre de modèles Digital Twin nécessite :

- une collaboration interdisciplinaire étendue sur la collecte de données de qualité
- l'intégration de données provenant de diverses sources
- la sécurité des données
- le développement de modèles mathématiques et virtuels
- des simulations informatiques avancées

Les jumeaux numériques ne remplaceront probablement pas le processus de développement de médicaments existants, mais ils peuvent améliorer les essais cliniques et permettre d'augmenter le retour sur investissement (RSI)<sup>vi</sup>. Selon Bekryl, une société d'études de marché, les différentes utilisations de l'intelligence artificielle ont le potentiel d'économiser plus de 70 milliards USD en processus de découverte de médicaments d'ici 2028<sup>vii</sup>.

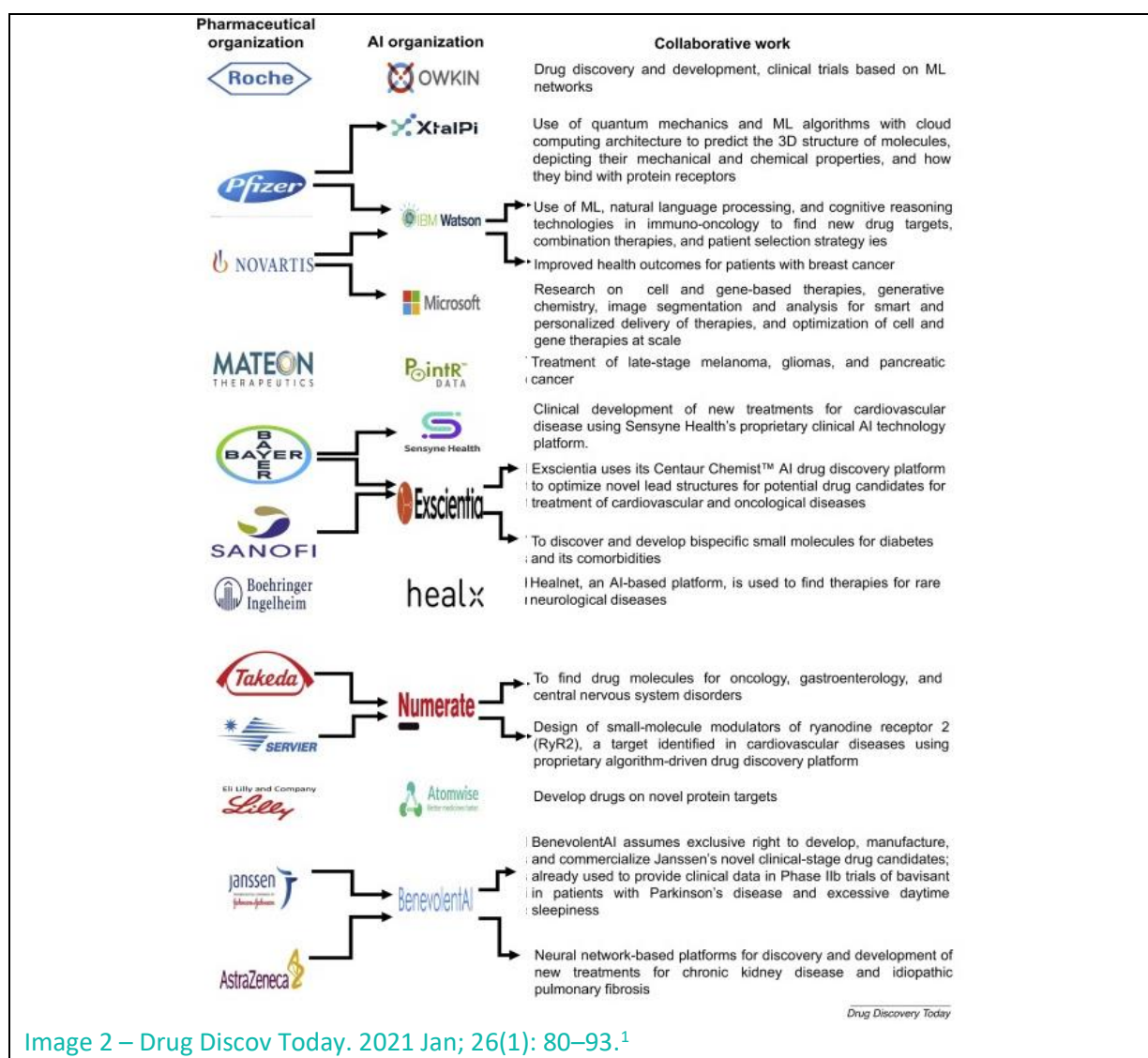


Image 2 – Drug Discov Today. 2021 Jan; 26(1): 80–93.<sup>1</sup>

L'image ci-dessus présente différentes collaborations existantes entre des laboratoires pharmaceutiques et des entreprises commercialisant des solutions d'intelligence artificielle.

<sup>1</sup><https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.10.010>.

De nos jours, les industries pharmaceutiques nécessitent de nombreuses années et des milliards de dollars pour développer de nouveaux médicaments, identifier de nouveaux principes actifs et de nouvelles cibles médicamenteuses. La diversité des applications d'IA actuellement explorées pourrait aider à dépasser ces limitations. Reconnaisant ce potentiel et espérant que ces nouvelles technologies pourront également les aider à développer des médicaments plus efficaces et mieux ciblés, les industries pharmaceutiques constituent de plus en plus leurs propres équipes d'IA internes.

## 3.2. Application de l'IA dans les soins directs aux patients

### 3.2.1. Analyse d'imageries médicales automatisée

Les cadres de radiothérapie basés sur l'image, les données et l'assurance qualité constituent une excellente base pour le développement d'algorithmes d'IA et leur intégration dans les flux de travail de radiothérapie. Il y a eu un vif intérêt pour l'exploration de l'IA pour faciliter la radiothérapie pour la délimitation du volume cible et des organes à risque (OAR) et pour la planification automatisée du traitement. En oncologie, la délimitation des organes à risque est une étape indispensable de la prise en charge en radiothérapie. Cette étape chronophage est réalisée par le dosimétriste et le médecin radiothérapeute. Elle présente donc une importante variabilité humaine nuisant à l'homogénéité des prises en charge. Compte tenu de la variété des formes, des emplacements et des morphologies internes des tumeurs, le contourage automatisé des cibles tumorales par l'IA reste un grand défi. Néanmoins, le contourage automatique accélère le processus et améliore la cohérence entre les radiooncologues. La délimitation automatisée du volume tumoral brut (*gross tumor volume* GTV) et du volume cible clinique (*clinical target volume* CTV) a été étudiée dans de nombreux cancers. Dans un test multicentrique impliquant huit radiooncologues de sept hôpitaux, l'outil d'IA a surpassé la moitié des médecins et était égal aux quatre autres. Avec l'aide d'IA, une amélioration substantielle de la précision du contourage chez cinq des huit médecins ainsi que des réductions significatives de la variation inter-observateur (de 54,5 %) et du temps de contourage (de 39,4%) ont été observées. En automatisant ce contourage de nombreux hôpitaux ont amélioré la précision de leurs outils diagnostics<sup>lviii</sup>.

De nombreuses entreprises commercialisent déjà des logiciels alimentés par l'IA qui aident les professionnels de santé à interpréter l'imagerie radiologique.

Les intelligences artificielles comme TrueFidelity<sup>lix</sup>, commercialisée par GE Healthcare, ou 3DQuorum<sup>lx</sup>, la technologie d'imagerie commercialisée par Hologic, créent des images intelligentes et minimisent les textures de bruit et les artefacts dans les images de tomodensitométrie (CT). Cela facilite leur préparation par les médecins spécialistes. En réduisant le temps d'analyse, ces logiciels ont prouvé une économie d'en moyenne une heure par jour aux radiologues (sur une base d'environ huit heures d'analyse d'images par jour)<sup>lxi</sup>.

D'autres exemples comme le compagnon AI-Rad<sup>lxii</sup>, commercialisé par Siemens Healthineers, permettent une analyse d'image encore plus poussée. Cet algorithme est programmé avec un

algorithme d'apprentissage en profondeur qui permet une mise en évidence automatique des anomalies présentes sur des images de radiologie. Il les segmente en images médicales et compare les résultats obtenus à des valeurs de référence. Ce genre d'algorithme permet d'aider les radiologues à automatiser leur flux de travail de routine, limitant le temps dédié à ces tâches répétitives.

Tamis médical<sup>[xiii]</sup>, un *IBM Research Grand Challenge*, vise à aller encore plus loin et à développer un système d'assistant cognitif pour les radiologues et les cardiologues. Le programme filtrerait et détecterait rapidement les anomalies en utilisant des valeurs de référence, mais aussi en intégrant des informations cliniques empruntées à l'imagerie, au texte et aux données cliniques, provenant de l'historique du patient. Cet algorithme peut également prioriser les cas en attribuant un score à un examen entier. Si l'IA détecte une anomalie jugée urgente, les radiologues analyseront cet examen en priorité. Ce phénomène peut être observé actuellement, en période de crise sanitaire. les services de radiologie doivent examiner de nombreuses radiographies pulmonaires et, pour un grand nombre d'hôpitaux et de cliniques, les services radiologiques sont surchargés. Les algorithmes peuvent aider à la classification et priorisation des cas cliniques, les patients présentant des cas plus urgents pourront alors être traités en priorité par les personnels soignants.

L'IA peut cibler différents domaines de la radiologie pour faciliter la lecture des images et les flux de travail, rendre les processus plus efficaces, réduire les coûts et l'épuisement du personnel. Pour ces raisons, la radiologie est un des domaines médicaux qui connaît actuellement une augmentation exponentielle rapide des applications d'IA.

### 3.2.2. Assistant virtuel

Les algorithmes d'intelligence artificielle exécutant des opérations répondant à des entrées parlées ou écrites ont progressivement gagné du terrain dans les hôpitaux et cliniques ces dernières années. Dans l'idée de réduire le fardeau administratif que représente la transcription médicale pour les cliniciens, les scientifiques ont développé des assistants virtuels alimentés par l'IA. Parmi toutes les opérations actuelles et émergentes que les assistants virtuels peuvent réaliser dans le secteur de la santé les opérations de machine learning se démarquent. Ces assistants se répartissent en quatre catégories.

- Outil d'aide au diagnostic
- Outil d'aide à la décision clinique
- Transcription médicale
- Recherche d'informations médicales

#### 3.2.2.1. Outil d'aide au diagnostic

De nombreuses entreprises de dispositifs médicaux exploitent l'IA et les méga-données pour augmenter la précision et l'efficacité du processus de diagnostic et de traitement clinique. Le portefeuille d'offres comprend principalement le dépistage par tomodensitométrie des nodules pulmonaires, l'évaluation de l'AVC ischémique, l'examen par rayons X des maladies thoraciques, la détection et l'évaluation rapides du cancer à l'aide d'images pathologiques, etc.

Les praticiens de la santé utilisent l'intelligence artificielle pour rechercher et examiner des informations cliniques, mais aussi pour sauvegarder des données de santé dans le dossier de santé électronique (DSE) d'un patient. Cette technologie permet aux praticiens de prescrire des traitements, d'obtenir des résultats de laboratoire ou de planifier des consultations à l'aide de la reconnaissance vocale. La navigation du DSE est une autre application de l'intelligence artificielle IBM Watson<sup>lxiv</sup>, précédemment citée ; son programme d'oncologie peut concevoir des plans de traitement. Après avoir extrait et analysé les données des rapports médicaux, le programme a la capacité de les combiner avec des données sélectionnées dans les dossiers du patient, des recherches externes et l'expertise clinique des soignants pour recommander le plan de soins le plus adapté et personnalisé pour le patient.

#### 3.2.2.2. *Logiciel d'aide à la décision clinique*

Les logiciels d'aide à la décision clinique (ADC) basés sur l'IA ont la capacité d'analyser de gros volumes de données pour suggérer les prochaines étapes pour les traitements et indiquer les problèmes potentiels. Cela améliore l'efficacité et facilite le travail des prestataires de soins de santé. L'IA ADC peut exploiter les informations collectées à partir des données de santé du patient, comme par exemple les données collectées via les dossiers de santé électroniques (DSE).

L'un des problèmes les plus critiques affectant les organisations de soins est le risque de diagnostic erroné des patients. L'IA peut aider au diagnostic précoce des maladies potentiellement mortelles chez les patients et informer les médecins à temps, afin que les patients puissent obtenir une attention immédiate.

Les systèmes d'aide à la décision clinique d'IA peuvent améliorer le diagnostic, le traitement et le pronostic d'une condition médicale particulière, en prédisant la probabilité d'un résultat médical ou le risque d'une certaine maladie sur la base de données d'imagerie biomédicale. Leur capacité à prédire avec une grande précision conduit à de nouvelles façons d'optimiser les soins aux patients<sup>lxv</sup>.

#### 3.2.2.3. *Transcription médicale*

La deuxième catégorie d'assistant virtuel est la transcription médicale. Les transcriptions précises sont essentielles pour une prestation de soins efficace, cependant, leur écriture peut consommer un temps considérable aux professionnels de santé. Dans de nombreux hôpitaux, les docteurs et infirmières utilisent des enregistreurs pour dicter des notes et les envoyer à une tierce partie pour retranscription manuelle.

En développant et en utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique et de traitement automatique du langage naturel (TALN), *Amazon comprend medical* a permis la création d'une reconnaissance vocale automatique précise adaptée aux cliniciens. Lors des visites de patients, le service peut être utilisé pour capturer la conversation patient-médecin, la transcrire et l'envoyer directement dans le DSE du patient pour une analyse plus approfondie. Ce type de programme peut également faciliter le flux de travail de l'hôpital, après avoir reconnu une demande vocale de la part du praticien, le programme peut directement envoyer une prescription médicamenteuse électronique à la pharmacie. En enregistrant avec précision les noms des médicaments par lesquels

un patient est traité, ces technologies peuvent également profiter aux pharmaciens, qui détecteront et analyseront plus efficacement les problèmes de sécurité liés aux médicaments.

#### 3.2.2.4. Recherche d'informations médicales

La dernière catégorie d'assistant virtuel est la recherche d'informations médicales, souvent présentée comme un robot conversationnel, aussi appelé chatbot médical. Cette intelligence artificielle peut fournir une réponse personnalisée à certaines requêtes spécifiques sur les informations médicales des patients et des professionnels de santé en fonction des données des patients. Les avantages de l'utilisation d'un chatbot dans le domaine de la santé sont nombreux. Ils permettent aux patients de pouvoir poser des questions sur leurs symptômes, réduire les visites à l'hôpital, réduire les traitements et procédures inutiles et augmenter l'observance aux traitements médicamenteux. Cela permet ainsi de réduire considérablement la charge de travail des professionnels de la santé, d'économiser au patient le temps de trajet jusqu'au cabinet médical, et de réduire le coût des soins pour des prises en charges non-nécessaires.

Le moteur de recherche le plus utilisé en Chine, Baidu, commercialise un robot conversationnel alimenté par l'IA appelé Melody<sup>lxvi</sup>, il permet d'interagir directement avec les patients, répondre aux questions liées à la santé et recommander un diagnostic aux professionnels de la santé. Une autre compagnie, Babylon Health, propose des consultations basées sur l'IA avec des « médecins virtuels » (intelligence artificielles) et réels. Les patients décrivent leurs symptômes au chatbot médical et l'application recherche dans une base de données de milliers de pathologies pour trouver un diagnostic potentiel.

#### 3.2.3. Chirurgie robotique

L'économie mondiale est en train d'être complètement remodelée par la robotique et l'automatisation, le domaine de la santé n'est pas en marge. Alors que la chirurgie robotique véritablement autonome restera hors de portée pendant un certain temps, en ajoutant toujours plus de données aux systèmes informatiques et en incorporant les apprentissages acquis dans les différentes industries, les capacités de l'IA pour assister les soins chirurgicaux sont constamment accrues.

Les robots dotés de l'IA assistent de plus en plus les procédures microchirurgicales pour aider à réduire le risque d'erreur humaine qui pourrait affecter le rétablissement des patients. Google et Johnson & Johnson ont commencé à travailler sur de nouveaux robots chirurgicaux, cependant, seuls quelques robots programmés avec l'IA sont actuellement commercialisés et utilisés en chirurgie. L'un d'eux, le système chirurgical Da Vinci, d'Intuitive Surgical, peut informer sur les nouvelles techniques chirurgicales et est conçu pour faciliter la chirurgie en utilisant une méthode mini-invasive en utilisant des données d'opérations antérieures.

Motion2Vec, un modèle d'IA développé par Google Brain, Intel AI Lab et UC Berkeley, a la capacité d'apprendre à effectuer des tâches telles que des points de sutures. Le modèle a été testé en laboratoire avec le robot Da Vinci. Grâce au visionnage et analyse de 78 vidéos de chirurgiens,



l'intelligence artificielle a été capable de reproduire les mouvements observés affichant un taux de performance de 85,5%<sup>lxvii</sup>.

### 3.2.4. Conclusion

Les principales applications de l'IA dans les soins de santé observées aujourd'hui concernent le diagnostic, la prise de décision clinique, la gestion des données et la gestion opérationnelle. Au cours des cinq à dix prochaines années, les experts s'attendent à ce que d'autres domaines se développent, tels que les soins personnels, la prévention et le bien-être, le triage et diagnostic, ou les applications liées à la prestation de soins, dans et hors des hôpitaux. Afin de tirer le meilleur parti de l'abondance des données de santé disponibles, les systèmes de soin vont devoir travailler collectivement, pour normaliser les formats de collection de ces données. Il faudrait également créer des infrastructures interconnectées, permettant de faciliter l'échange de données entre systèmes de soins et parvenir à un modèle de santé interopérable.

## 3.3. Intelligence artificielle et SARS-CoV-2

Le SARS-CoV-2 a changé de nombreux aspects de la vie des populations, notamment leur relation aux soins de santé. De nombreuses technologies sont devenues largement acceptées et intéressantes non seulement pour les professionnels de la santé, mais également pour le grand public.

Bluedot est une start-up canadienne utilisant l'IA. Leur algorithme a analysé des données fournies par des compagnies aériennes, de nouveaux rapports sur les cas de soulèvement de maladies, ainsi que des rapports portant sur les maladies animales, afin de trouver de potentielles tendances. Ils furent un des premiers à émettre des avertissements sur la propagation du SARS-CoV-2. D'autres organisations ont commencé à utiliser des solutions similaires à mesure que le virus se propageait. Les chercheurs ont commencé à alimenter l'algorithme avec des données de voyage aérien anonymes et des données de mouvement de smartphone pour analyser comment la maladie pourrait proliférer de Wuhan vers d'autres villes. Une autre équipe a utilisé un modèle d'IA pour identifier la propagation de la pandémie par analyse poussée des rapports de cas, des mouvements aériens et des informations sur la santé publique<sup>lxviii</sup>. Ces études ont aidé à démontrer la manière dont les restrictions de voyage ont contribué à limiter la propagation du SARS-CoV-2. Depuis, et pour limiter la dissémination du virus, de nombreuses autres applications de l'IA dans les soins de santé ont émergé. Elles s'appliquent à toutes les étapes, du flux de gestion du patient, à leur diagnostic, leur triage et à leur prise en charge. En voici quelques exemples.

### 3.3.1. Diagnostique des patients atteints du SARS-CoV-2

À l'hôpital Mount Sinai, situé aux Etats-Unis, les équipes de recherche ont été parmi les premières à utiliser l'intelligence artificielle (associée à l'imagerie, au texte et aux données de santé) pour examiner les personnes touchées par le coronavirus<sup>lxix</sup>. En développant un algorithme capable de détecter rapidement le virus en combinant l'apparence des poumons obtenue par tomodensitométrie (TDM) des thorax des patients et les informations du patient (comprenant âge,

symptômes, analyses sanguines et contact éventuel avec une personne infectée par le virus). L'étude qu'ils ont menée portait sur les analyses de plus de 800 scans de patients<sup>lxx</sup>, comptant plus de 410 cas confirmés positifs au coronavirus, provenant de collaborateurs d'hôpitaux en Chine. Après avoir intégré les données de ces CT-scans avec les informations cliniques, les équipes ont développé un algorithme d'IA donnant une prédiction finale concernant le diagnostic. En évaluant les images et les données cliniques, l'algorithme a montré une sensibilité significativement plus élevée (84%) pour détecter les cas positifs, contre 75% pour les radiologues. L'algorithme a également prouvé pouvoir améliorer la détection de cas faux-négatifs.

Cette étude est utile pour démontrer qu'un outil d'IA peut être programmé pour assister à l'identification précoce des pandémies, ou des maladies infectieuses en général. L'IA peut également être utile pour le diagnostic rapide des cas les plus graves, grâce à la hiérarchisation des patients en cas d'admission hospitalière.

### 3.3.2. Gestion des dossiers de patients atteints du SARS-CoV-2

A Singapour, un outil alertant les médecins sur les patients susceptibles de devenir gravement malades et permettant leur hiérarchisation pour accéder aux ressources de traitement a été créé. L'hôpital général de Changi, en partenariat avec le système intégré d'information sur la santé (IHIS), a travaillé sur le développement d'un moteur de prédiction des cas de pneumonie et de coronavirus d'origine communautaire (*Community Acquired Pneumonia and COVID-19 AI Predictive Engine CAPE*)<sup>lxxi</sup>. Cet outil permet d'aider à diagnostiquer la gravité de la pneumonie d'un patient en fonction des résultats de l'analyse de leurs images de radiographie pulmonaires. CAPE a été formé pour générer un score indiquant la gravité de la pneumonie à partir d'images CXR (*Chest X-Ray*). Le logarithme a été formé à l'aide de plus de 3 000 images scannées et de 200 000 données de patients, comprenant également leurs antécédents médicaux et résultats de laboratoire. Cet outil sert d'aide à la prise de décision pour les médecins. Dans les périodes où les ressources cliniques sont limitées, CAPE aide à la hiérarchisation des cas selon leur gravité. Cette hiérarchisation permet d'améliorer les résultats des patients, en priorisant les cas présentant de plus grandes chances de développer une pneumonie sévère.

### 3.3.3. Triage des patients atteints du SARS-CoV-2

Étant donné que le mode de transmission et l'origine réelle du SARS-CoV-2 dans les hôpitaux n'ont pas encore été entièrement élucidés, la minimisation des infections nosocomiales dans les hôpitaux reste une tâche difficile mais urgente pour les professionnels de la santé. De nombreux hôpitaux ont ouvert une ligne directe dans un effort pour répondre aux préoccupations liées au SARS-CoV-2 et pour limiter les visites non nécessaires des centres de soin par des patients non atteints par le virus. Un grand nombre de ces lignes a pu tirer parti de l'apprentissage automatique et du traitement du langage naturel (chatbot) pour développer et lancer un outil interactif pour aider les patients à obtenir des réponses à leurs questions et une évaluation des symptômes liés au coronavirus.

Providence Health & Services, une organisation à but non lucratif qui travaille avec plus de 50 hôpitaux et autres établissements médicaux, utilise un chatbot basé sur l'IA nommé Grace, développé

par Microsoft, pour aider à gérer l'afflux massif de personnes cherchant des conseils médicaux. Ces personnes peuvent utiliser le chatbot pour répondre à une série de questions aidant à déterminer si elles ont voyagé à l'extérieur du pays, identifier les symptômes qu'elles présentent et si elles sont entrées en contact avec d'autres personnes atteintes du COVID-19<sup>lxxii</sup>... Cet exemple de collaboration entre Microsoft et Providence permet un triage en ligne capable de séparer les patients présentant réellement des symptômes de coronavirus, des patients souffrant d'autres maladies. Au cours de sa première semaine, l'outil de Providence a servi plus de quarante mille patients, limitant la visite de centres médicaux et la potentielle contamination de milliers de patients.

### 3.3.4. Recherche et développement de vaccins et médicaments

L'étude de la pathogenèse du SARS-CoV-2 pourrait aider les scientifiques dans leur découverte d'un traitement. Pour se faire, nous avons vu précédemment que l'utilisation des méthodes de calcul se répandait. L'apprentissage automatique est mis à profit pour découvrir de nouveaux candidats médicaments et vaccins in silico. Comme ils sont entraînés sur une biomolécule cible, ils peuvent prédire les candidats inhibiteurs en se basant sur leurs structures.

#### 3.3.4.1. Recherche et développement de traitements médicamenteux

Les applications récentes de l'intelligence artificielle pour SARS-CoV-2 incluent le criblage virtuel de candidats médicaments déjà commercialisés, ainsi que le criblage virtuel de nouvelles entités chimiques. Pour ces médicaments déjà commercialisés, l'objectif a été de prédire et d'exploiter rapidement les voies biologiques interconnectées ou la biologie hors cible de médicaments déjà commercialisés qui se sont avérés sûrs et peuvent donc être facilement testés dans de nouveaux essais cliniques.

Grâce à l'amarrage moléculaire, il a été rapporté que de nombreuses molécules s'adaptent au site de liaison de diverses protéines du SARS-CoV-2 essentielles à la réplication virale et à l'infection. 3CLpro, Spike Protein, RdRP et PLpro sont parmi les protéines qui ont été sélectionnées, ainsi que le récepteur ACE2 de l'hôte et la protéase TMPRSS2<sup>lxxiii</sup>.

Il a été démontré que les éléments structurés conservés jouent des rôles fonctionnels critiques dans les cycles de vie des coronavirus. Grâce à des interactions directes avec les protéines de liaison à l'ARN hôte et les hélicases, les éléments structurels du SARS-CoV-2 ajoutent une couche de complexité à l'information régulatrice qui est codée dans l'ARN viral. La perturbation ciblée des fonctions régulatrices de ces éléments structuraux peut limiter les charges virales, en ayant un impact minimal sur la biologie des cellules normales<sup>lxxiv</sup>.

Certaines des boucles dans les extrémités 5'UTR et 3'UTR du SARS-CoV-2 sont conservées dans les bêta-coronavirus et sont connues pour avoir un impact sur la réplication virale. Rangan et al. a identifié 106 régions structurellement conservées qui seraient des cibles biologiques appropriées pour des agents antiviraux inexplorés<sup>lxxv</sup>.

L'étude des changements dans l'information de l'ARN permet également l'identification de nouvelles cibles. Dans une approche différente, Wu et al ont montré que le Remdesivir pouvait se lier

au canal de liaison à l'ARN du SARS-CoV-2<sup>lxxvi</sup>. Le Remdesivir (Veklury®) a été le premier traitement à obtenir une autorisation de mise sur le marché en France par la Haute Autorité de Santé (HAS) le 3 juillet 2020, pour la prise en charge des formes sévères du COVID-19. Il a reçu une autorisation de mise sur le marché à Singapour par la Health Sciences Authority (HSA) le 10 juin 2020.

#### 3.3.4.2. *Découverte du vaccin contre le SARS-CoV-2*

L'identification des meilleures cibles possibles pour le développement d'un vaccin est cruciale afin de contrer le taux d'infection élevé d'un virus. Le système immunitaire de l'hôte combat les cellules infectées par le virus soit par la production d'anticorps par les cellules B, soit par l'attaque directe des cellules T. Le gène HLA code pour les protéines MCH-I et MCH-II, qui présentent des épitopes comme déterminants antigéniques. Ces protéines aident les anticorps des cellules B et T dans leur capacité à se lier et à attaquer les envahisseurs. Les approches d'apprentissage automatique ont été des outils de base pour identifier les antigènes à partir de séquences protéiques<sup>lxxvii</sup>.

Depuis l'apparition du SARS-CoV-2, différentes approches basées sur l'IA ont été utilisées pour prédire des épitopes potentiels afin de concevoir des vaccins<sup>lxxviii</sup>. De nombreux chercheurs ont intégré différentes stratégies, la vaccinologie inverse, la bio-informatique, l'immuno-informatique et l'apprentissage en profondeur, pour construire un cadre informatique capable d'identifier des vaccins candidats probables et construire un vaccin à base d'épitopes contre le SARS-CoV-2. Le criblage des séquences du protéome viral a permis de sélectionner la protéine Spike (glycoprotéine de surface du SARS-CoV-2) comme cible protéique potentielle qui peut être utilisée pour concevoir le vaccin. Les propriétés physico-chimiques de la protéine ont été examinées plus en détail et les résultats ont montré que la protéine est le principal responsable de la physiopathologie de SARS-CoV-2. Les chercheurs ont utilisé une analyse in-silico pour concevoir un puissant vaccin peptidique multi-épitopes contre le SARS-CoV-2.

D'autres chercheurs ont utilisé Vaxign, un outil de vaccinologie de réserve (VRV), et Vaxign-ML, un outil de prédiction de candidat vaccin basée sur l'apprentissage automatique, pour prédire et évaluer les candidats vaccins potentiels pour SARS-CoV-2<sup>lxxix</sup>. Les résultats ont montré qu'en plus de la protéine S couramment utilisée, la protéine non structurale (nsp3) s'est avérée être la deuxième protéine, en termes d'antigénicité protectrice. Après une enquête plus approfondie sur la conservation de la séquence et l'immunogénicité de la protéine nsp3, les chercheurs ont conclu que la nsp3 peut être une cible vaccinale sûre contre SARS-CoV-2.

Dans ce troisième exemple, des chercheurs ont utilisé des réseaux de neurones profonds (DNN) et ont établi une plate-forme d'IA pour identifier d'anciens médicaments qui pourraient potentiellement être utilisés contre le SARS-CoV2<sup>lxxx</sup>. Différents ensembles de données d'apprentissage constitués de composés signalés ou prouvés actifs contre le SARS-CoV, le SARS-CoV-2, le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) et le virus de la grippe ont été générés et utilisés pour prédire les médicaments potentiellement actifs contre le coronavirus parmi les médicaments commercialisés. Les médicaments prédits étaient alors testés et vérifiés pour servir de retour à la plateforme d'IA pour le réapprentissage et ainsi générer un modèle d'IA. Le cadre basé sur l'IA mis en œuvre a permis d'identifier huit médicaments avec des activités contre Coronavirus de la péritonite infectieuse féline (PIF). Les auteurs ont suggéré qu'avec des expériences d'utilisation antérieures sur

des patients, il pourrait être prouvé que ces anciens médicaments identifiés ont une activité anti-SARS-CoV-2 et donc être appliqué pour lutter contre la pandémie de COVID-19.

### 3.3.5. Conclusion

Le SARS-CoV-2 a signifié une impulsion significative pour la recherche sur l'intelligence artificielle en santé. On pourra notamment citer l'analyse, la surveillance et le triage des patients COVID-19, la poursuite de la découverte de médicaments et le développement de vaccins, ainsi que le soutien des infrastructures hospitalières dans l'allocation des ressources.

La pandémie a stimulé la recherche sur l'IA, mais a aussi permis d'augmenter l'acceptation de l'IA parmi les patients et les organismes médicaux. Bien que les industries de santé ne soient pas traditionnellement les premiers à adopter les nouvelles technologies, les développements récents et les perspectives prometteuses offertes par l'IA attirent énormément d'attention et d'intérêt pour ce domaine. Le COVID-19 représente en effet une crise sanitaire très rare qui nécessite de nouvelles méthodes et outils pour y faire face. Dans des moments aussi difficiles, l'IA fait partie des réponses pouvant fournir des résultats plus rapides et à une échelle beaucoup plus importante, qui pourraient aider une grande partie des millions de patients atteints du SARS-CoV-2.

## 4. Les défis de l'adoption de l'intelligence artificielle en santé

L'adoption de l'IA devient de plus en plus importante dans les soins de santé. Selon une récente enquête de KPMG<sup>lxxxix</sup>, même si 91% des professionnels de la santé interrogés pensaient que la mise en œuvre de l'IA pourrait améliorer l'accès des patients aux soins, 75% craignaient que l'IA puisse menacer la sécurité et la confidentialité des données des patients.

De nombreuses questions concernant la sécurité et la fiabilité des outils d'IA sont soulevées. Que se passe-t-il si un algorithme d'IA fournit un diagnostic erroné, que celui-ci est accepté par le médecin et qu'un patient en subit les répercussions ? Ou que se passe-t-il si un robot chirurgical nuit à un patient pendant une intervention ? Actuellement, il semblerait que si une IA produit des résultats erronés, la personne tenue responsable dépendra de l'utilisation qui en aura été faite par le professionnel de santé et si celui-ci a utilisé l'outil dans le cadre de son agrément réglementaire.<sup>lxxxii</sup> Si l'outil n'est utilisé que dans les limites de ses instructions, la responsabilité retombera sur le fabricant d'outils et les entreprises derrière l'algorithme<sup>lxxxiii</sup>.

Pour réaliser le potentiel de l'IA, les parties prenantes doivent s'assurer de la fiabilité, de la validité et de la transparence des ensembles de données de santé utilisées. Dans ce chapitre seront évoqués les principaux défis qui ralentissent l'adoption de l'IA en santé à ce jour.

### 4.1. Le paradigme de la boîte noire

En science et en informatique, une « boîte noire » est un appareil, ou un programme, qui fonctionne sans aucune connaissance ou compréhension de son fonctionnement interne. Le paradigme de la boîte noire de l'intelligence artificielle fait référence au fait qu'avec la plupart des outils basés sur l'IA, le fonctionnement et les schémas d'exploitation sont inconnus. Il est tout particulièrement nécessaire de disposer d'algorithmes d'IA explicables dans le secteur de la santé où la vie de patients peut être en jeu. Actuellement, programmeurs et ingénieurs sont confrontés à un dilemme, faut-il prioriser l'augmentation des performances des algorithmes ou étudier et améliorer les processus permettant de fournir des résultats interprétables pour satisfaire l'éthique et la réglementation ?

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont composés de couches d'unités (également appelées nœuds). Chaque unité traite l'entrée soumise et transfère sa sortie à la couche d'unité suivante. L'apprentissage profond est un gigantesque ANN composé de nombreuses couches, et il « apprend » indépendamment en identifiant des modèles. Le problème actuel est que nous n'avons accès qu'à la conclusion, pas aux apprentissages des nœuds ni aux sorties existantes entre les couches. Pour faire simple, l'IA délivre des résultats avec un processus de décision qu'il n'est pas possible - pour l'instant - d'expliquer. Cela viole en partie l'éthique de la médecine et de la science qui nécessitent d'expliquer l'origine de ces résultats.

Alors qu'un nombre croissant d'outils médicaux sont équipés des fonctionnalités d'intelligences artificielles, leurs résultats ont de plus en plus d'impact. Avec un nombre croissant de

préoccupations éthiques, le paradigme de la boîte noire de l'intelligence artificielle ne peut plus être ignoré et doit devenir une priorité. Pour contrer ce problème, de nouveaux programmes appelés « intelligences artificielles explicables » voient le jour. Ces programmes sont conçus pour être interprétables par les scientifiques, permettant à la fois de hautes performances et un respect des spécifications éthiques et réglementaires.

Par exemple Babylon Health, un fournisseur de services de santé qui propose des consultations à distance avec des professionnels de santé via son application mobile, fournit un modèle entièrement explicable. La conclusion déduite par le programme n'étant publiée qu'une fois les résultats et les changements spécifiques ont été interprétés et approuvés par les cliniciens.

## 4.2. Cybersécurité & confidentialité des données

Les données de santé sont des cibles lucratives, et les dossiers de santé sont évalués jusqu'à 250 USD par enregistrement sur le marché noir ; un chiffre 40 fois plus élevé que les données de cartes bancaires. En 2019, une augmentation des dossiers médicaux compromis s'est élevée à plus de 41 millions de violations de dossiers patients<sup>lxxxiv</sup>.

La sécurité informatique, ou cybersécurité, a misé sur une approche réactive. Une violation de données doit se produire, de sorte que la sécurité détecte les programmes malveillants et empêche de futures attaques en reconnaissant son empreinte numérique spécifique. Cependant, ce système doit évoluer et détecter les failles avant qu'une violation de données ne se produise.

Selon l'un des rapports d'Accenture<sup>lxxxv</sup>, la cybersécurité est l'une des 10 meilleures applications de l'IA en santé. Les systèmes de cybersécurité basés sur l'IA peuvent acquérir des informations à jour sur les menaces mondiales, ou des menaces plus spécifiques, pour aider à prendre des décisions cruciales de hiérarchisation en fonction de ce qui est susceptible d'être ciblé pour une cyberattaque d'une entreprise. En répondant de manière proactive aux menaces, l'apprentissage automatique peut aider à protéger les données de santé<sup>lxxxvi</sup>.

Les menaces de cybersécurité sont un problème majeur auquel sont confrontés les industries, et en particulier l'industrie de la santé. En effet, la majorité des produits, services et processus liés aux soins de santé fonctionneront dans l'Internet des objets dans un avenir proche. Néanmoins, les cyber-menaces (virus informatiques, violations de données et violations de déni de service (DoS)) et les menaces physiques sont des préoccupations majeures pour les systèmes actuels. Les cybercriminels peuvent par exemple exploiter les vulnérabilités du système pour voler, endommager ou perturber les données de santé. Dans le secteur de la santé, les cibles peuvent inclure des serveurs d'hôpitaux, des outils de diagnostic, des appareils portables, des appareils intelligents et des appareils médicaux. De nombreuses menaces peuvent les affecter, des virus logiciels, des chevaux de Troie aux vers, et elles peuvent mettre en danger la vie privée et la santé des patients<sup>lxxxvii</sup>.

Additionnellement, l'IA est vulnérable à la manipulation des données qu'il collecte, Finlayson et al<sup>lxxxviii</sup> a récemment démontré que la sortie de l'algorithme pouvait être entièrement modifiée



pour classer un grain de beauté comme cancéreux, uniquement en effectuant des changements mineurs dans le formatage des données.

A Singapour les données personnelles de 1,5 million de patients et les dossiers des médicaments dispensés en ambulatoire appartenant à 160 000 patients ont été volés durant la violation de données SingHealth de 2018 (2018 SingHealth data breach)<sup>lxviii</sup>. La cyberattaque mondiale « *WannaCry Ransomware* » a démontré la nécessité d'accroître la cybersécurité. Les instruments de piratage utilisés ont ciblé différents organismes tels que le National Health Service (NHS) du Royaume-Uni, la multinationale de services de livraison FedEx, et ont infecté plus de 300 000 ordinateurs dans le monde<sup>xc</sup>. Ce genre d'événements a provoqué de nombreuses réactions par les patients et utilisateurs de ces services (comme au Royaume-Uni<sup>xc</sup>), et a également motivé la rédaction d'une nouvelle loi sur la cybersécurité [le règlement UE 2019/881] publiée en juin 2019. L'objectif de cette loi est d'atteindre un haut niveau de cybersécurité et d'accroître la confiance des populations dans l'intelligence artificielle.

Nous avons déjà vu que les algorithmes d'IA doivent être alimentés par de grande quantités de données pour améliorer, apprendre et identifier continuellement de nouveaux modèles. Les intelligences artificielles médicales ont besoin d'accéder aux données des hôpitaux, des cliniques ou des individus. La source de ces données peut être des dossiers médicaux, des capteurs de santé (ex : capteurs connectés et objets intelligents), des applications mobiles ou toutes autres sources d'informations dont l'algorithme d'apprentissage en profondeur pourrait tirer des leçons.

En juillet 2017, le Royal Free NHS Foundation Trust a partagé les données personnelles de plus de 1,5 million<sup>xcii</sup> de patients avec Google DeepMind. La Fondation a indiqué que les données avaient été fournies afin de tester la sécurité clinique de « Streams », une application mobile conçue pour aider au diagnostic des lésions rénales graves. Néanmoins, les patients n'ayant pas été informés de l'utilisation de leurs données personnelles pour l'alimentation de DeepMind, l'Information Commissioner's Office (ICO) du Royaume-Uni a estimé que la loi britannique de 1998 sur la protection des données avait été violée. Cet exemple souligne que pour pouvoir développer de nouvelles technologies, les patients vont souvent doivent renoncer à une partie de leur vie privée. Même si les centres médicaux anonymisent les données des patients, de nombreux exemples ont démontré dans le passé qu'avec les technologies actuelles, les profils individuels pouvaient être retracés.

Bien que l'application mobile de Google n'utilise pas d'intelligence artificielle, cet exemple met aussi en évidence la possible invasion du droit à la vie privée qui peut découler du développement d'outils technologiques. Si les patients et les professionnels de la santé ne font pas confiance aux solutions d'IA, leur intégration dans la pratique clinique échouera. Il est fondamental d'informer adéquatement les patients de la possession de leurs données, de leurs utilisations potentielles, et de maintenir un dialogue ouvert pour instaurer la confiance en l'IA.

La valeur des données sur la santé peut atteindre des milliards de dollars sur le marché noir et de nombreuses sources indiquent que le grand public n'est pas favorable à la vente de leurs données personnelles, par des gouvernements ou des entreprises privées, à des fins lucratives<sup>xciii</sup>. Traduire l'IA en produits et services du monde réel, fiables, sécurisés et efficaces est une tâche coûteuse. Par conséquent, la protection commerciale de l'IA dans les soins de santé est devenue un

sujet extrêmement important. Les outils d'IA alimentant les données peuvent être couverts par divers droits de propriété intellectuelle (DPI), et différents DPI peuvent être appliqués pour protéger la mention de certaines données de santé. Les brevets sont un outil de protection des différentes fonctions des technologies, les droits d'auteur peuvent concerner le code source de l'IA et le droit de propriété de la base de données – et d'autres outils juridiques peuvent protéger et permettre l'accès, la confidentialité, la sécurité et le contrôle des données de santé<sup>xciv</sup>. D'autres questions fondamentales sont à clarifier – par le biais du droit des contrats ou de la législation – sur la façon dont la propriété intellectuelle créée par les technologies elles-mêmes sera traitée. La WIPO<sup>2</sup> conduit des sessions pour discuter l'impact de l'IA sur les DPI depuis 2019, mais les questions concernant les définitions de l'inventeur, de l'auteur et du propriétaire de l'IA sont encore d'actualité<sup>xcv</sup>. Néanmoins, peu de directives et d'informations sont encore disponibles sur ce sujet de chevauchement de droits de propriété intellectuelle, alors, de nombreux malentendus concernant le type de DPI à appliquer et les conséquences juridiques de ce chevauchement continuent d'émerger à ce jour.

### 4.3. La qualité des données

Les performances délivrées par une intelligence artificielle seront aussi justes que la qualité des données qui ont permis sa programmation. Une illustration de ce principe peut être retrouvée chez IBM. IBM Watson for Oncology est un outil d'IA qui utilise un algorithme d'apprentissage automatique pour évaluer les données des dossiers médicaux des patients et aider les professionnels de la santé à examiner les options de traitement du cancer. L'algorithme a été commercialisé en 2013, cependant, des critiques croissantes ont commencé à le signaler comme donnant des suggestions risquées et inexactes pour le diagnostic et les traitements de certains cancers. Après plusieurs recherches sur les causes potentielles de ces inexactitudes, il fut démontré que l'origine du problème provenait des données d'apprentissage de l'algorithme. En effet, au lieu d'utiliser des données de patients réels, l'outil d'intelligence artificielle avait été formé avec des cas de cancer synthétiques, non basés sur de réelles observations.

Une intelligence artificielle se nourrit de données. Les paramètres quantitatifs et qualitatifs sont d'une importance majeure. En effet, plus il y a de données ajoutées au système, et plus ces données sont de bonne qualité, meilleures seront les performances de l'algorithme. Ainsi, les limites de l'intelligence artificielle seront définies par la qualité et la quantité des données présentées. Les entreprises doivent intégrer, nettoyer, lier et organiser des données afin de disposer de bases solides et précises sur lesquelles construire et entraîner leurs algorithmes d'IA. Cela rend l'apprentissage automatique difficile, voire impossible, pour un grand nombre d'entreprises.

Les algorithmes avancés ne peuvent pas fonctionner sans données étiquetées et organisées. Certains métiers sont par ailleurs dédiés à cet étiquetage, pour optimiser le temps passé avec le patient, la conversation avec le médecin est enregistrée, puis traitée humainement ou par ordinateur par la suite. Cependant, cette tâche est longue et monotone, d'autant plus que l'intelligence artificielle nécessite des milliers de données étiquetées pour fonctionner au mieux.

---

<sup>2</sup> World Intellectual Property Organization

De nombreux exemples montrent l'importance de disposer de données qualitatives lors de la conception d'une solution d'IA. Certaines études ont conclu que les algorithmes de reconnaissance faciale de certaines entreprises étaient moins précis de 15% sur les personnes à la peau plus foncée<sup>xcvi</sup>. Ceux-ci ont produit des résultats très inexacts lors de l'identification d'une personne de couleur. On peut également évoquer que l'intelligence artificielle a été exécutée dans le système judiciaire américain comme pour prédire la récidive chez certains criminels. Les résultats ont montré que l'IA prévoyait une probabilité disproportionnellement élevée que des personnes de couleur commettent une infraction future, quelle que soit la gravité de leur crime d'origine<sup>xcvii</sup>. Les algorithmes d'IA ont également discriminé les femmes, les minorités, les idéologies ou d'autres cultures dans le passé. Par exemple, les ressources humaines d'Amazon ont travaillé sur le développement d'un algorithme alimenté par l'intelligence artificielle pour les aider à sélectionner les meilleurs curriculum vitae. Cette utilisation n'a été que de courte durée car il est vite devenu évident que l'IA favorisait les CV des candidats masculins<sup>xcviii</sup>. Nous avons vu précédemment que les résultats de l'intelligence artificielle dépendent des données saisies, l'informaticien ne peut ignorer la question de la tendance dans les algorithmes et doit protéger et maintenir les ensembles de données en les adaptant de manière appropriée.

#### 4.4. Interopérabilité des données

L'adoption de processus numérisés et automatisés est une condition essentielle pour assister à une utilisation efficace de l'IA dans les soins de santé. La collecte, le stockage, la normalisation et le suivi du lignage des données sont essentiels pour révolutionner les systèmes de santé. À mesure que de nouveaux outils numériques sont introduits auprès des travailleurs de la santé, la fragmentation des données augmente. Comme les algorithmes doivent être alimentés en données, la lenteur de l'adoption des dossiers de santé électroniques (DSE) et le manque de processus standards pour la collecte de données sont des défis importants pour l'adoption des solutions d'IA. La mise en œuvre de la collecte de données électroniques, une infrastructure de données interconnectée, ainsi que des normes pour les formats de données sont essentielles pour permettre une meilleure interopérabilité et normalisation de l'IA en santé.

En combinant des données du patient, des données internes de l'hôpital et des données externes (par exemple les données météorologique, épidémiologiques), l'IA peut optimiser le flux des patients et les ressources en personnel. Amazon Comprehend Medical<sup>xcix</sup>, l'API Healthcare Natural Language<sup>c</sup> et l'extraction d'entités AutoML pour les soins de santé<sup>ci</sup> par Google cloud, sont trois exemples d'outils d'IA programmés pour aider les organisations de soins de santé. Ils stockent d'énormes quantités de données standardisées, qu'ils peuvent scanner et analyser pour extraire et organiser les informations pertinentes. Les actions entreprises peuvent ainsi réduire la durée moyenne de séjour en unité de soin et d'attente du patient, optimiser l'utilisation des lits hospitaliers, éviter les retards de sortie ou mieux répartir les ambulances, par exemple.

## 4.5. Pertes d'emplois

L'adoption croissante de l'intelligence artificielle dans les différentes industries s'accompagne souvent de la peur des travailleurs de perdre leur emploi. Cela ne fait pas exception dans le domaine de la santé, ce qui entraîne un ralentissement de l'adoption de l'IA. La plupart des gouvernements et des décideurs ont une fausse-idée de l'IA selon laquelle, avec une adoption croissante des outils d'apprentissage automatique, de nombreux emplois deviendraient inutiles, nuisant à la création d'emplois des entreprises et aurait donc un impact économique défavorable. Les statistiques montrent une réalité bien différente<sup>cii</sup>, avec la généralisation de l'adoption de l'intelligence artificielle, de nombreuses opportunités d'emploi devraient apparaître, accompagnées d'une demande de compétences différentes.

Les chercheurs sont encore loin du développement d'une intelligence artificielle reproduisant les émotions et attentions humaines. Par conséquent, il semblerait que les emplois liés à la prestation de soins aient encore de nombreuses années à vivre. Idéalement l'objectif de développement l'IA, et en particulier dans le domaine de la santé, serait d'aider les professionnels dans leurs tâches quotidiennes et non de les remplacer. Alors que l'adoption de l'intelligence artificielle continue de croître dans les centres médicaux, de nouvelles professions et de nouvelles tâches seront développées pour de nouveaux ensembles de compétences. Cela pourrait offrir l'avantage de réduire les coûts de traitement et d'augmenter les performances, donc d'augmenter les volumes de soins. À terme, il semblerait que l'utilisation de l'IA pourrait se traduire par plus de possibilités d'emploi et plus d'économies pour l'industrie.

## 4.6. Conclusion

Un nombre croissant de programmes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond sont utilisés pour prédire et modéliser les pathologies et pour soutenir la prise de décision clinique. Cependant, l'un des principaux défis auxquels l'intelligence artificielle est aujourd'hui confrontée est la confiance et l'acceptation du public. De nombreuses personnes ont du mal à faire confiance aux décisions fournies par des outils basés sur l'IA. Même si ces programmes améliorent continuellement leurs performances, chercheurs et ingénieurs ne sont actuellement pas en mesure de démontrer le mécanisme d'obtention de toutes les suggestions de l'IA.

Il y a déjà eu plusieurs cas très médiatisés de machines faisant preuve de biais et à mesure que l'IA devient plus omniprésente, il est important de savoir comment nous pouvons être sûrs qu'elle reflète des valeurs humaines clairement définies et universellement acceptées. Les scientifiques travaillent actuellement à inculquer des principes éthiques aux systèmes d'IA. L'une des méthodes les plus prometteuses est l'apprentissage par renforcement inverse, impliquant de laisser le système observer des comportements humains dans diverses situations et de déterminer lesquels sont réellement appréciés, permettant au système de prendre des décisions conformes à nos principes éthiques sous-jacents<sup>ciii</sup>.

Renforcer la confiance dans l'IA nécessitera un effort important pour lui inculquer un sens de moralité, résoudre le problème de boîte noire et fournir une éducation sur les opportunités qu'elle créera pour les entreprises, les disciplines scientifiques, les gouvernements et les individus. Cet effort devra être collaboratif entre tous ces acteurs.

#### 4.7. Perspectives pour le développement de l'IA

Que ce soit en termes d'améliorations techniques (chirurgie robotisée), d'automatisation des tâches les plus répétitives (réécriture des notes de visite dans le dossier patient), ou par l'assistance des professionnels de santé dans leurs tâches quotidiennes (diagnostic d'image automatisé), le potentiel d'amélioration que l'intelligence artificielle peut apporter à notre société est incontestable. Cependant, pour pouvoir profiter pleinement de tout ce que l'IA pourrait nous apporter, plusieurs limitations restent à surmonter.

Tout le succès de l'IA dépend de la disponibilité d'une quantité substantielle de données, car ces données sont utilisées pour la formation ultérieure fournie au système. L'accès aux données de divers fournisseurs de bases de données peut entraîner des coûts supplémentaires pour une entreprise, elles doivent également être fiables et de haute qualité pour garantir une prévision précise des résultats. D'autres défis qui empêchent l'adoption à part entière de l'IA dans l'industrie de santé incluent le manque de personnel qualifié pour exploiter les plateformes basées sur l'IA, le budget limité pour les petites organisations, l'appréhension de remplacer les humains entraînant une perte d'emploi, le scepticisme quant aux données générées par l'IA, et le phénomène de la boîte noire.

Dans le futur, l'IA pourra non seulement aider à l'identification rapide des composés à succès, mais également contribuer à des suggestions de voies de synthèse de ces molécules ainsi qu'à la compréhension des interactions médicament-cible. L'automatisation de certaines tâches dans le développement de médicaments, la fabrication, les chaînes d'approvisionnement, les essais cliniques et les ventes aura lieu avec le temps, et cette automatisation dépend du fait que l'IA doit être entraînée à l'aide d'un grand volume de données. Cependant, l'intervention humaine restera obligatoire pour la mise en œuvre, le développement et le fonctionnement réussis des plateformes d'IA. De nouveaux postes d'analystes de données et d'ingénieurs logiciels nécessiteront par exemple d'être développés pour utiliser tout le potentiel de la plate-forme d'IA. Ces professions nécessitent une solide connaissance de la technologie de l'IA, des sciences pharmaceutiques, et une compréhension claire des objectifs commerciaux et de R&D de l'entreprise. Il est également à noter que l'IA n'assume actuellement que des tâches répétitives et n'est destinée qu'à faciliter le travail de l'homme, tout en lui laissant la possibilité de développer de nouvelles idées et une créativité plus complexe.

Le secteur de la santé actuel est confronté à plusieurs défis complexes, tels que l'augmentation du coût des médicaments et des thérapies. Avec l'inclusion de l'IA dans la fabrication de produits pharmaceutiques, des médicaments personnalisés avec la dose souhaitée, les paramètres de libération et d'autres aspects requis peuvent être fabriqués en fonction des besoins individuels du patient. L'utilisation des dernières technologies basées sur l'IA accélérera non seulement le temps nécessaire pour que les produits arrivent sur le marché, mais améliorera également la qualité des

produits et la sécurité globale du processus de production, et permettra une meilleure utilisation des ressources disponibles.

L'IA peut également apporter une contribution majeure à la poursuite de l'incorporation du médicament développé dans sa forme posologique correcte ainsi qu'à son optimisation. De plus, l'IA va aider à une prise de décision rapide, conduisant à une fabrication plus rapide de produits de meilleure qualité ainsi que la consistance des lots.

L'IA peut également contribuer à établir la sécurité et l'efficacité du produit dans les essais cliniques, ainsi qu'à assurer un positionnement et une tarification appropriés sur le marché grâce à une analyse et à des prévisions complètes du marché. Bien que la mise en œuvre de cette technologie fait face à de nombreux défis spécifiques, il est fortement probable que l'IA deviendra un outil inestimable dans l'industrie de santé dans un proche avenir.

## 5. Cartographie des solutions d'intelligence artificielle commercialisées en APAC

### 5.1. Critères d'inclusion et lecture de la cartographie

Les autorités réglementaires, par exemple l'Agence européenne des médicaments (EMA) et la Food & Drug Administration (FDA) des États-Unis, réglementent massivement le paysage médical en ce qui concerne les solutions basées sur l'IA. Dans la région Asie-Pacifique, les réglementations sont généralement établies au niveau national. Cependant, même les principales autorités, comme la FDA ou l'EMA, ne fournissent pas une base de données complète de ces solutions d'IA existantes et réglementées.

Le marché de l'IA est en plein essor et la taille de ce marché devrait atteindre 28 milliards USD en 2025<sup>civ</sup>. Même si l'impact croissant des technologies numériques de santé, et de l'IA en particulier, a été identifié, sa cartographie spécifique et l'évaluation de son impact en Asie-Pacifique n'ont été étudiées que sporadiquement.

L'objectif de cette étude vise à revoir et synthétiser systématiquement les solutions d'IA dédiées aux soins de santé, approuvées et commercialisées dans la région APAC.

Dans une première étape, les critères d'inclusion des solutions basées sur l'IA ont été définis et seules les technologies dont le développement comprend une forme d'apprentissage automatique ont été prises en compte. Dans une seconde étape, uniquement les entreprises dont les revenus annuels dépassent les 50 millions de dollars (USD) ont été rapportées. Dans une troisième étape, seules les solutions déjà commercialisées sur les marchés de l'Asie-Pacifique ont été incluses. Enfin, une revue des publications scientifiques abordant le sujet de l'IA en santé a été réalisée afin d'identifier les publications les plus appropriées pour étudier les défis et opportunités auxquels l'IA peut faire face dans la région APAC.

Dans cette analyse, pour chaque solution d'IA identifiée, plusieurs informations seront fournies :

- Le nom de l'entreprise commercialisant la solution d'IA
- Une brève description de la technologie de la solution et / ou de son utilisation
- La ou les applications de santé fournies par la solution (comme présentées dans le chapitre [« utilisation de l'intelligence artificielle en santé »](#)) :
  - L'application de l'IA par les infrastructures de soin
    - Management opérationnel
    - Découverte des médicaments
    - Développement des médicaments
    - Avancement des essais cliniques
  - L'application de l'IA dans les soins directs aux patients
    - Analyse d'imageries médicales automatisée
    - Assistant virtuel
      - Outil d'aide au diagnostic

- Outil d'aide à la décision clinique
  - Transcription médicale
  - Recherche d'informations médicales
- Chirurgie robotique
- La date de commercialisation de la solution (si disponible)
- Le premier pays de commercialisation de la solution (si disponible)
- La disponibilité de la solution dans la région APAC (si disponible)



## 6. Cartographie des solutions d'intelligence artificielle en santé en APAC

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
Alibaba Cloud	ET Medical Brain	ET Medical Brain est une suite de solutions d'intelligence artificielle programmées pour alléger la charge de travail des professionnels de la santé.	Analyse d'imageries médicales automatisée	2017	Chine	APAC (non détaillé)
			Découverte des médicaments	2017	Chine	APAC (non détaillé)
			Développement des médicaments	2017	Chine	APAC (non détaillé)
			Management opérationnel	2017	Chine	APAC (non détaillé)
			Outil d'aide au diagnostic	2017	Chine	APAC (non détaillé)
Alibaba Health	Doctor You	Solution de diagnostic intelligente principalement utilisée en oncologie ou elle permet la reconnaissance d'images pour le diagnostic précoce de certains cancers.	Analyse d'imageries médicales automatisée	2017	Chine	Chine
Amazon	Amazon Comprehend Medical	Ce service d'Amazon est un outil de traitement du langage naturel (PNL) qui facilite l'extraction de données cliniques pertinentes à partir des dossiers des patients, en utilisant l'intelligence artificielle.	Transcription médicale	2018	US	Hong Kong, Bombay, Osaka, Séoul, Singapour, Sydney, Tokyo

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
<b>Babylon Health</b>	Babylon Health	Les patients peuvent envoyer des questions ou des photos à un chatbot, qui analysera les éléments reçus et pourra mettre le patient en contact avec les professionnels de santé appropriés.	<i>Chatbot médical</i>	2013	Royaume-Uni	Cambodge, Chine, Hong Kong, Inde, Indonésie, Laos, Malaisie, Philippines, Singapour, Taïwan, Thaïlande et Vietnam
			<i>Transcription médicale</i>	2013	Royaume-Uni	Cambodge, Chine, Hong Kong, Inde, Indonésie, Laos, Malaisie, Philippines, Singapour, Taïwan, Thaïlande et Vietnam
<b>Baidu</b>	Melody	Ce chatbot permet aux patients de saisir des informations médicales, des symptômes et des requêtes, afin de leur donner une réponse liée à leur état de santé.	<i>Chatbot médical</i>	2015	Chine	Chine
			<i>Transcription médicale</i>	2015	Chine	Chine
	AI Fundus Camera	IA capable de dépister les maladies oculaires du fond de l'œil (rétinopathie diabétique, la dégénérescence maculaire et le glaucome).	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2018	Chine	Chine
<b>Biomerieux</b>	Vitek MS	Vitek 2 est composé d'instruments, de logiciels et de cartes de réactifs, et est conçu pour l'identification et les tests de sensibilité aux anti-microbiens des bactéries et des levures. Le système permet l'analyse des profils MIC et détecte les phénotypes de résistance pour la plupart des organismes testés.	<i>Management opérationnel</i>	2012	France	APAC (non détaillé)

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
Biotronik	SMART Detection®	Cet AI permet de différencier des discriminateurs qui aident à distinguer les différents types de tachycardie, aidant à réduire le nombre d'insuffisances cardiaques.	<i>Chatbot médical</i>	2011	US	APAC (non détaillé)
			<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2011	US	APAC (non détaillé)
			<i>Transcription médicale</i>	2011	US	APAC (non détaillé)
Biotronik	BD HealthSight™ Diversion Management	Cet outil d'aide à la gestion des stocks permet de faciliter les enquêtes sur le détournement de drogues opioïdes.	<i>Management opérationnel</i>	2018	US	APAC (non détaillé)
Canon Medical	Advanced intelligent Clear-IQ Engine (AiCE)	AiCE est un outil innovant de reconstruction d'images, utilisant le raisonnement par IA. Il est programmé pour réduire le bruit dans les images médicales et augmenter le signal afin de produire des images et de fournir un diagnostic précis.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2019	Japon	APAC (non détaillé)
Canon Medical	Aquilion ONE / PRISM Edition Deep Learning Spectral imaging system	L'Advanced intelligent Clear-IQ Engine (AiCE) a été combiné avec DL Spectral, afin d'aider à la reconstruction et l'analyse des images de tomodensitométrie.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2019	Japon	APAC (non détaillé)
Change Healthcare	InterQual AutoReview™	Un outil d'automatisation aidant les prestataires de soins de santé souhaitant tirer parti de leurs dossiers de santé électroniques (DSE) à rédiger leurs examens médicaux automatiquement et avec précision. La version 2020	<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2018	US	APAC (non détaillé)

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
		est la dernière en date et comprend les critères InterQual COVID-19, aidant au diagnostic des cas de coronavirus.				
	Care Select Imaging	CareSelect Imaging est un outil d'aide à la décision clinique pour les professionnels de santé. L'outil s'appuie sur les données électroniques (DSE) des patients pour aider à la prise de décisions médicales.	<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2019	US	APAC (non détaillé)
GE Healthcare	Critical Care Suite 2.0 - Thoracic Care Suite	Aide au bilan radiographique pulmonaire pneumo-thoracique Critical Care Suite rassemble plusieurs outils d'intelligence artificielle, programmés sur un système à rayons X, permettant par exemple l'automatisation des mesures et la hiérarchisation des cas.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2018	US	Corée, Chine, Thaïlande
			<i>Management opérationnel</i>	2018	US	Corée, Chine, Thaïlande
	TrueFidelity	Reconstruction d'images de tomographie.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2019	US	APAC (non détaillé)
Google	DeepMind	De nombreuses applications, notamment la compréhension du repliement des protéines et l'aide aux médecins pour détecter et identifier certaines maladies.	<i>Découverte des médicaments</i>	2010	Royaume-Uni	APAC (non détaillé)
	Healthcare Natural Language (NLP) Application Programming Interface (API)	L'API Healthcare Natural Language fournit des solutions d'apprentissage automatique	<i>Transcription médicale</i>	2020	US	APAC (non détaillé)

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
		pour retranscrire facilement des informations médicales.				
<b>HeartFlow</b>	HeartFlow FFRct Analysis (FFRct: fractional flow reserve)	Technologie non invasive utilisée en plus de la tomodensitométrie pour créer une image 3D des artères coronaires des patients.	Outil d'aide au diagnostic	2018	US	APAC (non détaillé)
<b>Hologic, Inc.</b>	Genius AI Detection	Logiciel basé sur l'IA détectant les cancers potentiels dans les images de tomodensitométrie du sein.	Outil d'aide au diagnostic	2020	US	APAC (non détaillé)
<b>IBM Watson health</b>	Watson Oncology	Watson for Oncology permet une étude précise des données de rapports cliniques structurés et non structurés. En étudiant les données écrites et leur contexte, puis en les associant au dossier du patient, cet outil proposera des plans de traitement potentiels aux cliniciens qui auront alors toutes les clés en main pour choisir le traitement le plus adapté à un patient donné.	<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2012	US	APAC (non détaillé)
	Watson for Clinical Trial Matching	L'acceptation d'un patient à un essai est une étape critique de la recherche clinique. Jusqu'à présent, l'acceptation des patients se faisait manuellement, l'analyse des dossiers et les conditions d'acceptation devant correspondre à un protocole d'étude bien précis. L'IA de Watson peut aider à examiner et à sélectionner les essais cliniques	<i>Avancement des essais cliniques</i>	2014	US	APAC (non détaillé)

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
		existants, garantissant que les patients seront systématiquement liés à des essais cliniques prometteurs adaptés à leur état.				
	Medical Sieve	Cet assistant médical utilisé dans des spécialités telles que la radiologie et la cardiologie permet la détection rapide d'anomalies à partir de données cliniques issues d'images médicales ou de dossiers médicaux.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2017	US	APAC (non détaillé)
			<i>Outil d'aide à la décision clinique</i>	2017	US	APAC (non détaillé)
Intel	Xeon® Scalable Processors	Ce processeur est utilisé dans de nombreuses industries, y compris les industries de la santé. Son programme d'intelligence artificielle permet le traitement du langage naturel.	<i>Transcription médicale</i>	2018	US	APAC (non détaillé)
Intuitive surgical	Da Vinci surgical system	Grâce à l'IA, les systèmes chirurgicaux robotisés peuvent utiliser les données d'opérations passées pour informer de nouvelles techniques chirurgicales.	<i>Chirurgie robotique</i>	2000	US	APAC (non détaillé)
Medtronic & Medtronic	UNiD™ ASI (Adaptive Spine Intelligence)	Medtronic est spécialisé dans l'utilisation de l'IA pour la planification chirurgicale, ainsi que dans les implants rachidiens construits numériquement et la chirurgie assistée par robot.	<i>Chirurgie robotique</i>	2017	US	APAC (non détaillé)
			<i>Management opérationnel</i>	2017	US	APAC (non détaillé)
Medtronic	Guardian Connect System	Moniteur de glycémie en continu, l'analyse prédictive par l'IA	<i>Outil d'aide à la décision clinique</i>	2018	US	APAC (non détaillé)

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
		permet d'alerter les patients en cas d'hypoglycémie.				
	GI Genius™	Module d'endoscopie intelligent.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2019	US	APAC (non détaillé)
<b>Medtronic &amp; IBM</b>	Sugar.IQ	L'application IQ joue le rôle d'assistant personnel, son intelligence artificielle combinera plusieurs informations (liste des aliments ingérés, traitement médicamenteux suivi, données reçues de la pompe à insuline et du capteur de glucose) et assistera les patients diabétiques dans la gestion de leur maladie.	<i>Management opérationnel</i>	2016	US	APAC (non détaillé)
<b>Nuance</b>	Dragon Medical Virtual Assistant	Dragon Medical Virtual Assistant est un outil permettant la transcription écrite de données orales, exprimées lors d'une visite effectuée par le médecin, ou lors d'une réunion, et leur transcription dans le DSE du patient.	<i>Transcription médicale</i>	2019	US	APAC (non détaillé)
<b>Olympus</b>	ENDO-AID	Cette plateforme permet une détection automatique des lésions suspectes résultant des données issues de l'endoscopie.	<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2020	Japon	APAC (excepté le Japon et la Chine)
<b>Philips Healthcare</b>	SmartExam	Ce programme permet l'automatisation et la standardisation des processus d'examen IRM par les radiologues. Cette standardisation permet un	<i>Management opérationnel</i>	2005	Allemagne	APAC (non détaillé)

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
		meilleur suivi du dossier pour un même patient, mais aussi une meilleure interopérabilité entre patients.				
	Illumeo System	Illumeo s'appuie sur l'IA pour l'analyse d'imageries médicales, pour aider les cliniciens à trier les données et à automatiser les tâches manuelles pour résumer et présenter les données (offrant par exemple aux radiologues un moyen plus rapide de trouver tous les ensembles d'études similaires et de les comparer côte à côte pour voir si les lésions grossissent avec le temps)	<i>Management opérationnel</i>	2018	Allemagne	APAC (non détaillé)
	VitalEye	VitalEye utilise la détection sans contact du patient et des algorithmes avancés pour détecter la respiration, ce qui permet la mise en place d'un examen IRM de routine, tout en les aidant à garder un œil attentif sur le patient.	<i>Management opérationnel</i>	2018	Allemagne	APAC (non détaillé)
	Qlab Advanced Quantification Software	Le logiciel automatise de nombreuses tâches d'analyse complexes permettant une amélioration du flux de travail des radiologues, tout en minimisant la dépendance de l'opérateur et améliorer la reproductibilité des investigations radiologiques.	<i>Management opérationnel</i>	2019	Allemagne	APAC (non détaillé)



Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
	eCare Manager	eCareManager est une plateforme logicielle basée sur l'intelligence artificielle et permettant à la fois la gestion opérationnelle des structures de soins, mais aussi une aide à la décision clinique en soumettant des diagnostics et en interprétant les données des patients.	<i>Management opérationnel</i>	2017	Allemagne	APAC (non détaillé)
			<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2017	Allemagne	APAC (non détaillé)
	EPIQ CVx and CVxi with 3D Auto RV	Cet outil permet l'enregistrement et l'interprétation de diverses données quantifiées issues de la mesure de divers paramètres cardiaques. L'outil s'appuiera sur des modèles anatomiques et enregistrera les mesures des ventricules et de l'oreillette cardiaque, ou leur fraction d'éjection, par exemple. Ces données peuvent ainsi permettre de détecter des anomalies cardiaques.	<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2017	Allemagne	APAC (non détaillé)
	Ingenia Ambition X 1.5T MR with BlueSeal Magnet	L'intelligence artificielle a été ajoutée à l'aimant du MR. Si l'analyse est interrompue, cet ajout permet un meilleur contrôle et un retour à la situation précédente en cas d'interruption.	<i>Management opérationnel</i>	2018	Allemagne	APAC (non détaillé)
	MRCAT Brain	Outil qui permet une intégration et une analyse presque immédiates des données d'IRM, transmettant rapidement des	<i>Imagerie médicale automatisée</i>	2019	Allemagne	APAC (non détaillé)

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
		informations anatomiques détaillées aux cliniciens.				
Ping An Insurance	Ping An Healthcare and Technology	La société chinoise propose une plate-forme mobile pour les consultations en ligne, la gestion de la santé, les références et les rendez-vous hospitaliers et les services d'interaction en matière de bien-être mental. De plus, il permet la connexion entre les consommateurs individuels et les ressources de soins de santé.	<i>Outil d'aide à la décision clinique</i>	2014	Chine	Chine, Indonésie, Dubai, Japon
			<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2014	Chine	Chine, Indonésie, Dubai, Japon
			<i>Transcription médicale</i>	2014	Chine	Chine, Indonésie, Dubai, Japon
Samsung	S-Detect™	S-Detect™ for Breast est un outil programmé par l'intelligence artificielle qui permet d'analyser les lésions mammaires à l'aide d'images échographiques. Plateforme de télémédecine, utilisant la reconnaissance vocale et le traitement du langage naturel	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2018	Corée	APAC (non détaillé)
Schrodinger	Schrodinger platform	Cette plate-forme informatique permet la découverte de nouveau médicaments, en modélisant et simulant des liaisons principe actif-cible thérapeutique.	<i>Découverte de médicament</i>	2018	US	APAC (non détaillé)
			<i>Développement des médicaments</i>	2018	US	APAC (non détaillé)
Siemens Healthineers	ALPHA	Cette technologie permet aux professionnels de santé de charger un protocole spécifique à la maladie et de laisser le scanner définir des plages de protocoles, permettant la standardisation et	<i>Management opérationnel</i>	2014	Allemagne	APAC (non détaillé)

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
		la personnalisation de chaque test d'imagerie médicale, indépendamment l'utilisateur.				
	AI-Rad Companion	AI-Rad Companion fournit un post-traitement automatique des ensembles de données d'imagerie, aidant à augmenter la précision du diagnostic lors de l'interprétation des images médicales. Il permet également l'automatisation des flux de travail de routine avec des tâches répétitives et des volumes de cas élevés, aidant à prioriser le flux de travail.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2019	Allemagne	APAC (non détaillé)
			<i>Management opérationnel</i>	2019	Allemagne	APAC (non détaillé)
	AI-Pathway Companion	Le compagnon numérique accompagne les équipes médicales dans leur prise de décision. La suite de produits rassemble des données sur la maladie et l'état du traitement d'un patient et recommande des traitements appropriés en fonction du statut de traitement actuel du patient.	<i>Outil d'aide à la décision clinique</i>	2018	Allemagne	APAC (non détaillé)
			<i>Transcription médicale</i>	2018	Allemagne	APAC (non détaillé)
Tencent	Oncology Assistant	Système de triage permettant de jumeler les patients cancéreux aux oncologues appropriés.	<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2016	Chine	Chine
	WeChat Intelligent Healthcare	Outil de reconnaissance vocal et de traitement du langage naturel.	<i>Chatbot médical</i>	2016	Chine	Chine

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
	Miyiing platform	Miyiing (aussi appelé AI Medical Innovation System (AIMIS)) est un système de diagnostic auxiliaire, aidant les médecins à dépister les cancers de l'œsophage, les nodules pulmonaires, le cancer du col de l'utérus, etc. par repérage et identification rapide des lésions cancéreuses.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2017	Chine	Chine
			<i>Outil d'aide au diagnostic</i>	2017	Chine	Chine
	Oncology Assistant	Système de triage permettant de jumeler les patients cancéreux aux oncologues appropriés.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2018	Chine	Chine
	Trusted Doctors	Plateforme de télémedecine, utilisant la reconnaissance vocale et le traitement du langage naturel.	<i>Chatbot médical</i>	2018	Chine	Chine
	TH_COVID19_International	Cet outil vise à aider les utilisateurs présentant des symptômes tels que la fièvre et la toux à effectuer rapidement une auto-évaluation préliminaire de leurs maladies et à consulter un médecin de manière appropriée. En ayant des séries de conversations virtuelles avec les utilisateurs pour recueillir des informations telles que l'historique des contacts avec les patients COVID-19, les symptômes et les caractéristiques des maladies, et l'historique des problèmes de santé sous-jacents, l'assistant virtuel évaluera la	<i>Chatbot médical</i>	2019	Chine	Chine

Nom de l'entreprise	Nom de la solution d'IA	Brève description	Application en santé	Date de commercialisation	Premier pays de commercialisation	Commercialisation en APAC
		possibilité d'infection au COVID-19 et fournira des suggestions sur le traitement ou l'auto-quarantaine du patient.				
Varian	Edge	Cet outil de radiothérapie joue le rôle d'assistant, accompagnant le personnel soignant dans le ciblage et traitement des tumeurs de leur patients.	<i>Management opérationnel</i>	2019	US	APAC (non détaillé)
	Ethos™ therapy	La thérapie Ethos™ est conçu pour fournir des soins personnalisés contre le cancer. Ses technologies permettent aux cliniciens de visualiser les changements quotidiens de l'anatomie du patient directement sur la console de traitement et donc de créer un traitement hautement personnalisé.	<i>Analyse d'imageries médicales automatisée</i>	2019	US	APAC (non détaillé)
			<i>Management opérationnel</i>	2019	US	APAC (non détaillé)

## 7. Analyse de base de données

### 7.1. Évaluation des données

Pour construire la base de données il a fallu lister les entreprises et solutions d'intelligence artificielle commercialisées en Asie Pacifique, répondant aux critères suivants :

- Tout d'abord, l'entreprise commercialisant la solution d'intelligence artificielle doit déclarer un revenu annuel supérieur à > 50 millions USD
- Ensuite, la solution d'intelligence artificielle qu'elle commercialise, doit être disponible dans au moins un pays d'Asie Pacifique
- Enfin, la solution d'intelligence artificielle doit être au service du secteur de la santé et doit répondre à une des applications de santé figurant sur la liste des applications présentées dans le chapitre [« utilisation de l'intelligence artificielle en santé »](#)

51 solutions d'intelligences artificielles ont été retenues et analysées

- |   |   |   |
|---|---|---|
| • Aquilion ONE / PRISM Edition                  | • ET Medical Brain  | • Oncology Assistant                      |
| • Deep Learning Spectral imaging system         | • Ethos™ therapy  | • Ping An Healthcare and Technology       |
| • Babylon Health                                | • Genius AI Detection                                       | • Qlab Advanced Quantification Software   |
| • BD HealthSight™ Diversion Management          | • GI Genius™  | • Schrodinger platform                    |
| • Care Select Imaging                           | • Guardian Connect System                                   | • S-Detect™                               |
| • Critical Care Suite 2.0 - Thoracic Care Suite | • Healthcare Natural Language (NLP) Application             | • SMART Detection®                        |
| • Da Vinci surgical system                      | • HeartFlow FFRct Analysis (FFRct: fractional flow reserve) | • SmartExam                               |
| • DeepMind                                      | • Illumeo System  | • Sugar.IQ                                |
| • Doctor You                                    | • Ingenia Ambition X 1.5T MR with BlueSeal Magnet           | • TH_COVID19_International                |
| • Dragon Medical Virtual Assistant              | • InterQual   | • TrueFidelity                            |
| • eCare Manager                                 | • AutoReview™   | • Trusted Doctors                         |
| • Edge  | • Medical Sieve   | • UNiD™ ASI (Adaptive Spine Intelligence) |
| • ENDO-AID                                      | • Melody  | • VitalEye                                |
| • EPIQ CVx and CVxi with 3D Auto-RV             | • Miying platform   | • Vitek MS                                |
|   | • MRCAT Brain   | • Watson for Clinical Trial Matching      |
|   |   | • Watson Oncology                         |
|   |   | • WeChat Intelligent Healthcare           |
|   |   | • Xeon® Scalable Processor                |

24 entreprises répondent à ces critères et sont listées ci-dessous :

- Alibaba
- Amazon
- Babylon Health
- Baidu
- Biomerieux
- Biotronik
- Canon Medical
- Change Healthcare
- GE Healthcare
- Google
- HeartFlow
- Hologic, Inc
- IBM Watson Health
- Intel
- Intuitive surgical
- Medtronic
- Nuance
- Olympus
- Philips Healthcare
- Samsung
- Schrodinger
- Siemens Healthineers
- Tencent
- Varian

Si l'information indiquant le pays d'émission de la solution d'intelligence artificielle (premier pays de commercialisation) n'a pas été trouvée, le pays où se trouve le siège social sera indiqué dans la base de données. Les solutions d'AI ont été émises dans les pays suivants :

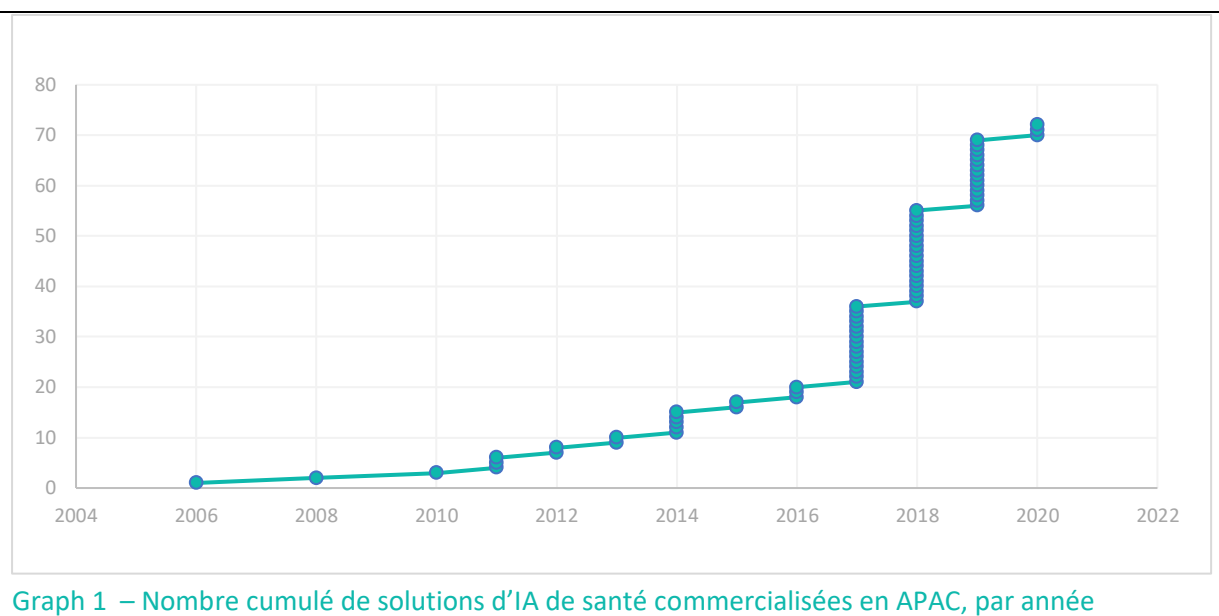
- Allemagne
- Chine
- Corée
- France
- Japon
- Royaume-Uni
- Etats-Unis

Dans la majorité des cas (pour 68% des solutions), si la solution d'intelligence artificielle est commercialisée en région APAC, le détail des pays de commercialisation n'est pas fourni sur le site marchand. Dans ce cas il est indiqué « APAC (non détaillé) » dans la base de données.

71 applications en sante ont été trouvées, appartenant à la liste ci-dessous :

- Analyse d'imageries médicales automatisée
- Avancement des essais cliniques
- Chatbot médical
- Chirurgie robotique
- Découverte de médicament
- Développement des médicaments
- Management opérationnel
- Outil d'aide au diagnostic
- Transcription médicale

## 7.2. Analyse par date



Pour la plupart des solutions il a été difficile de retrouver la première date de commercialisation dans les pays d'Asie pacifique. Généralement, ce sera la date de commercialisation de la solution d'AI par l'entreprise qui sera conservée dans la base de données. Cependant, le robot chirurgical Da Vinci fut la première solution appartenant à la liste à être commercialisé. Il sortira en 2000 aux États-Unis, et 6 ans plus tard, en 2006, en Chine, devenant la première solution d'IA de la liste à être commercialisée en Asie Pacifique. Il faudra attendre 8 ans de plus, en 2014, pour voir une solution d'IA commercialisée par un pays asiatique (Ping An Healthcare par Ping An Technology en 2014). Ces dernières années, le nombre de solutions d'IA en santé disponibles en Asie Pacifique a drastiquement augmenté. Il est passé de 20 solutions commercialisées entre 2006 et 2016 (en moyenne 2 solutions commercialisées par an), à 72 solutions commercialisées dans la région en 2020 (en moyenne 16 solutions commercialisées par an). Le rapide développement démographique de la région amenant à une augmentation des besoins de santé des populations locales, ainsi que les améliorations technologiques mondiales expliquent cette nette augmentation.

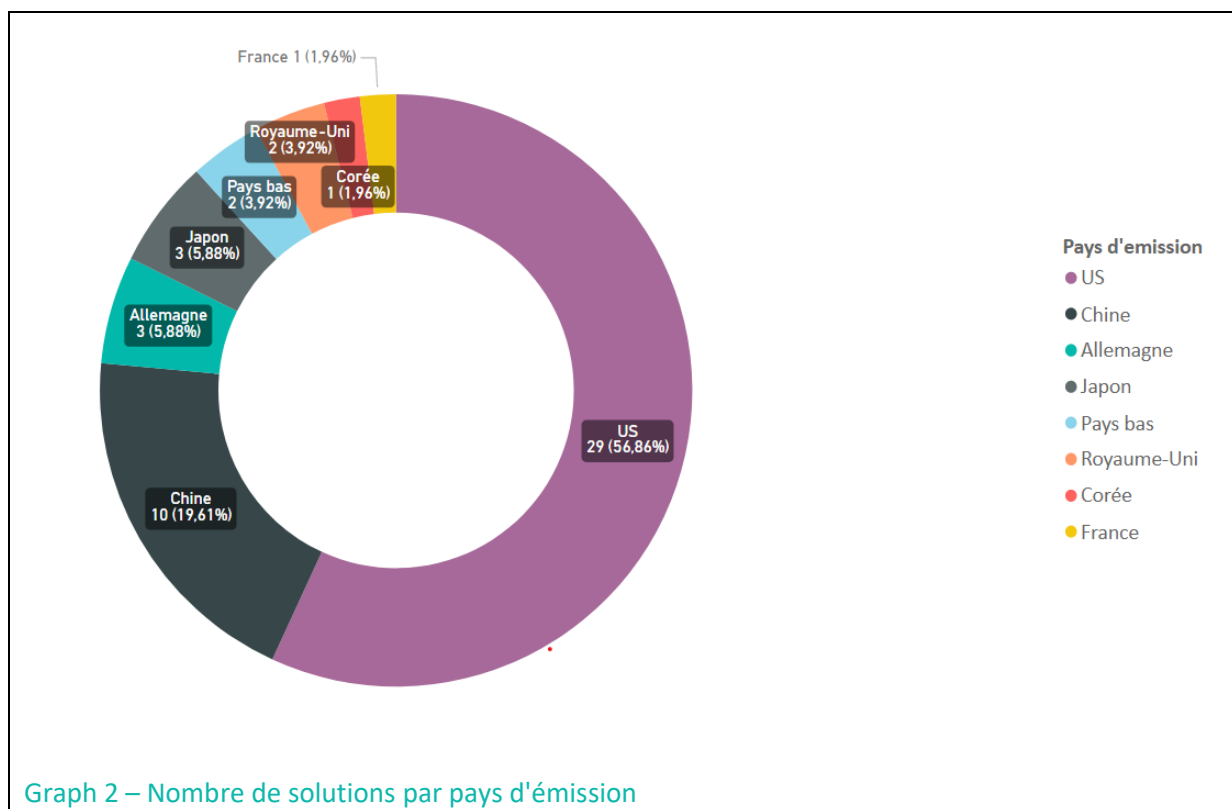
## 7.3. Analyse par pays

### 7.3.1. Par pays d'émission

Le diagramme ci-dessous montre qu'en terme de nombre de pays d'émission, les États-Unis sont en tête avec un total de 29 solutions commercialisées en APAC. Ils sont suivis par la Chine, commercialisant 10 solutions, puis par l'Europe avec 8 solutions (3 par L'Allemagne, 2 par les Pays-Bas, 2 par l'Angleterre, 1 par la France). Enfin la région de l'Asie du Sud Est, avec 4 solutions (3 par le Japon et 1 par la Corée du sud).



Depuis plusieurs années, la Chine a pour ambition de devenir la première superpuissance mondiale en intelligence artificielle. Compte tenu de cette aspiration, le Conseil d'État de la République populaire de Chine, présidé par le Premier ministre Li Keqiang, a déclaré vouloir atteindre un objectif de 150 milliards de dollars (USD) de chiffre d'affaires lié à la commercialisation de l'IA d'ici 2030<sup>cv</sup>. Il a détaillé une série de jalons prévus dans la recherche et le développement de l'IA dans un « Plan de développement de l'intelligence artificielle de nouvelle génération ». L'objectif semble réalisable car la Chine est déjà en train de devenir un leader mondial de la recherche en IA<sup>xxxiii</sup>, en particulier dans les domaines de l'agriculture et de la finance.



Alors que les dirigeants chinois cherchent des moyens d'alléger le poids qu'une population qui s'urbanise et vieillit rapidement met sur leur système de santé, l'application de l'IA dans les soins de santé est également une priorité eux.

Les États-Unis livrent une concurrence rude à la Chine pour devenir une superpuissance de l'IA. La culture technologique est bien établie aux États-Unis et le pays investi massivement dans le développement de l'IA. En 2020, les investissements privés en IA en provenance des États-Unis se sont élevés à près de 23,6 milliards de dollars<sup>cvi</sup>. Cependant, certains facteurs vont limiter la commercialisation des solutions américaines d'IA en Asie. Le plus grand facteur d'imprévisibilité en APAC pour les entreprises américaines est l'ouverture des gouvernements asiatiques, et particulièrement des gouvernements Chinois, à la participation étrangère sur leur marché intérieur de l'IA. Cela va se ressentir sur le nombre de solutions d'IA en provenance des États-Unis, commercialisées dans la région.

Pékin met de grandes quantités de ressources à disposition pour le développement de l'IA par les entreprises nationales Chinoises<sup>cvii</sup>. La Chine a sélectionné une « équipe nationale » pour diriger le développement de l'IA. Par exemple, Tencent est l'une de ces sociétés désignées pour devenir un leader du diagnostic médical assisté par IA. Cependant, les données montrent que seules quatre entreprises chinoises commercialisent des solutions de soins de santé d'IA en APAC, Alibaba, Baidu, Ping An Technology et Tencent. Alors que les États-Unis en comptent seize, Amazon, Biotronik, Change Healthcare, Hologic, GE Healthcare, Google, Heartflow, Intuitive surgical, IBM Watson health, Intel, Intuitive chirurgicale, Medtronic, Nuance, Philipps, Schrodinger, et Varian. En termes de nombre de solutions de santé basées sur l'IA commercialisées en APAC, la Chine est également loin derrière les États-Unis, ne comptant que 19,61 % des solutions répertoriées dans la base de données, contre 56.869% pour les US.

Le gouvernement fédéral allemand a adopté des points clés pour la stratégie d'IA en 2018 et a défini un cadre pour une politique holistique sur le développement et l'application futurs de l'IA dans le pays. De fortes inquiétudes concernant la confidentialité des données ont bloqué les efforts visant à numériser les soins de santé dans le plus grand pays de l'UE. Mais Jens Spahn, son ministre fédéral de la Santé, en a fait l'une de ses priorités absolues, visant à créer un dossier de santé électronique pour tous les patients assurés. Le gouvernement rédige actuellement des législations sur la protection des données de santé dans le DSE. A partir de 2021, les caisses maladie obligatoires seront obligées de proposer à leurs assurés un dossier patient électronique (ePA)<sup>cviii</sup>. L'Allemagne commercialise 3 solutions d'IA en APAC, « AI-Pathway Companion », « AI-Rad Companion » et « ALPHA », toutes trois proposées par la branche santé de Siemens, Siemens Healthineers.

Le président français Emmanuel Macron a élaboré une stratégie nationale pour le développement de l'IA. En 2018, il a déclaré qu'au cours des cinq prochaines années, le pays investirait plus de 1,6 milliard de dollars (US) dans la recherche en IA et soutiendrait les startups émergentes pour rivaliser avec d'autres puissances mondiales<sup>cix</sup>. En 2021, le premier ministre Jean Castex a annoncé vouloir continuer de déployer la dynamique d'innovation française et le développement du quantique et de l'IA sur le territoire français. On retrouve une solution commercialisée par ce pays en APAC, « Vitek MS » par BioMérieux, une entreprise française spécialisée dans le diagnostic in vitro.

En Europe, l'Allemagne et la France sont deux pôles d'IA en pleine croissance, mais le Royaume-Uni a été nommé la puissance européenne de l'IA<sup>cx</sup>. La recherche suggère que cela vient d'une variété de facteurs, allant des universités de médecine de renommée mondiale à ce qui est décrit comme l'effet « volant d'inertie » d'entreprises comme DeepMind ou Babylon, qui sont censées attirer et recycler les talents, les ressources, et l'engagement commercial dans l'écosystème britannique. La « Mission IA et données » a été annoncée comme l'un des grands défis de la stratégie industrielle du gouvernement britannique. La mission vise à placer le Royaume-Uni à l'avant-garde de l'utilisation de l'IA dans le diagnostic et le traitement précoces.

Outre la Chine, deux pays asiatiques émergent également en tant que leaders de l'IA en région APAC : le Japon et la Corée du Sud.

En Corée du Sud, peu de temps avant l'épidémie de COVID-19, le ministère des Sciences et des Technologies de l'information et de la communication (TIC), mené par le ministre Choi Yanghee, a

annoncé la « Stratégie nationale pour l'IA » lors d'une réunion, présidée par le président Moon Jae-in. D'ici 2030, le gouvernement vise à faire de la Corée le troisième pays le plus compétitif du monde sur le plan numérique, à créer un effet économique d'une valeur de 390,8 milliards de dollars grâce aux industries basées sur l'IA et à se classer parmi les 10 premiers au monde en termes de qualité de vie<sup>cxii</sup>. Alors que les exportations élevées de kits de test de coronavirus sud-coréens ont suscité un intérêt croissant pour l'industrie des dispositifs médicaux (DM), le ministère MOHW<sup>3</sup> sud-coréen a lancé un projet visant à sélectionner les sociétés de DM les plus innovantes. Ces sociétés ont le potentiel de guider l'industrie sud-coréenne de DM, industrie basée sur une capacité technologique innovante et une expertise spécifique. Le développeur sud-coréen d'IA, VUNO Inc., est entré dans le premier groupe d'entreprises de DM innovantes certifiées par le MOHW en décembre 2020. Cependant, actuellement, seul Samsung, le plus grand chaebol sud-coréen, semble avoir trouvé sa place sur le marché international de l'IA en soins de santé.

Certains des plus grands cabinets de conseil numérique à travers le monde (Deloitte, Publicis Sapient, Cognizant, Appen, Dataiku et DataRobot) se sont réunis pour évaluer l'état de l'IA mondial, pour comprendre et appréhender la taille et l'impact des initiatives d'IA dans le monde<sup>cxiii</sup>. Le rapport a révélé que les marchés japonais sont en tête en matière d'adoption de l'IA (tous secteurs confondus). Divers facteurs se combinent et donnent au Japon de nombreux avantages à l'utilisation de l'IA.

« Society 5.0 » est une initiative japonaise qui vise à utiliser la technologie pour réinventer la société et soutenir la productivité dans un pays vieillissant<sup>cxiii</sup>. Afin de faire émerger davantage d'entreprises et de solutions prometteuses, le gouvernement japonais soutient des réformes dans des domaines allant de l'éducation, à la politique financière et réglementaire. Parmi les initiatives du pays on peut retrouver différentes initiatives :

- Le gouvernement vise à augmenter l'interopérabilité des formats et de la collection des données afin d'améliorer la capacité du pays de déployer le Big Data dans les différentes industries.
- Le pays prévoit de créer de nouveaux outils pour aider les start-ups à trouver des financements, au Japon et à l'étranger, permettant le développement et la commercialisation de solutions innovantes.
- Au Japon, la majorité des entreprises et de la population reçoit positivement l'intégration de l'IA dans leur quotidien. Le gouvernement japonais accordant de plus en plus de certifications et de subventions aux universités offrant une formation en IA, le nombre de japonais éduqués à l'IA va augmenter, accentuer d'autant plus cette tendance.

Additionnellement aux pays cités précédemment, de nombreux autres pays considèrent l'IA comme une initiative stratégique au niveau national et investissent massivement dans la R&D en IA. Ces pays comprennent l'Australie, le Canada, l'Inde, Israël, l'Italie, la Russie, Singapour et les Émirats Arabes Unis (EAU)<sup>cxiv</sup>.

---

<sup>3</sup> Ministère de la Santé et du Bien-être

### 7.3.2. Par pays de commercialisation en APAC

Peu de données sont disponibles concernant la disponibilité des solutions d'intelligence artificielle en Asie Pacifique. Certaines entreprises publient une liste de pays de commercialisation sur leur site internet, d'autres listes ne sont disponibles que dans des revues de presses. Bien que certaines entreprises aient accepté de fournir ou compléter les listes de pays de commercialisation pour cette étude, le détail précis des pays de commercialisation des solutions d'IA n'a été établi que pour seulement 13 solutions d'IA. Ce chiffre n'étant pas assez élevé pour faire ressortir des tendances particulières et avoir des résultats d'analyse significatifs, la colonne « Commercialisation en APAC » ne sera pas détaillée dans cette étude.

On peut cependant remarquer une tendance nette. Bien que de nombreuses solutions d'IA américaines et européennes sont en grande partie disponibles dans de nombreux pays de l'APAC, les solutions chinoises ne sont commercialisées qu'en Chine (excepté pour « Ping An Healthcare and Technology » de Ping An, qui a récemment été commercialisé dans d'autres pays d'Asie du sud-est).

Depuis plusieurs années le gouvernement chinois exprime sa volonté d'avoir une plus grande libéralisation de son marché. Dans les faits, cette ouverture tarde à apparaître clairement. Alors que les récentes réductions des restrictions dans le catalogue national des investissements étrangers et les dernières listes négatives de la zone de libre-échange peuvent sembler positives<sup>cxv</sup>, la plupart des réductions n'apportent que des améliorations marginales à l'accès au marché Chinois. Le gouvernement a par exemple de vastes politiques industrielles, telles que Made in China 2025, qui visent à créer des champions nationaux dans des industries importantes pour l'avenir. Cette politique a permis aux entreprises nationales chinoises d'acquérir à la fois de l'expérience et des parts de marché<sup>cxvi</sup>. Un manque de transparence réglementaire désavantage également les entreprises étrangères par rapport à leurs concurrents nationaux. L'exclusion des entreprises étrangères de certaines phases du processus d'élaboration des normes dans différents secteurs (incluant les soins de santé) se traduit par des normes créées principalement pour favoriser les entreprises nationales.

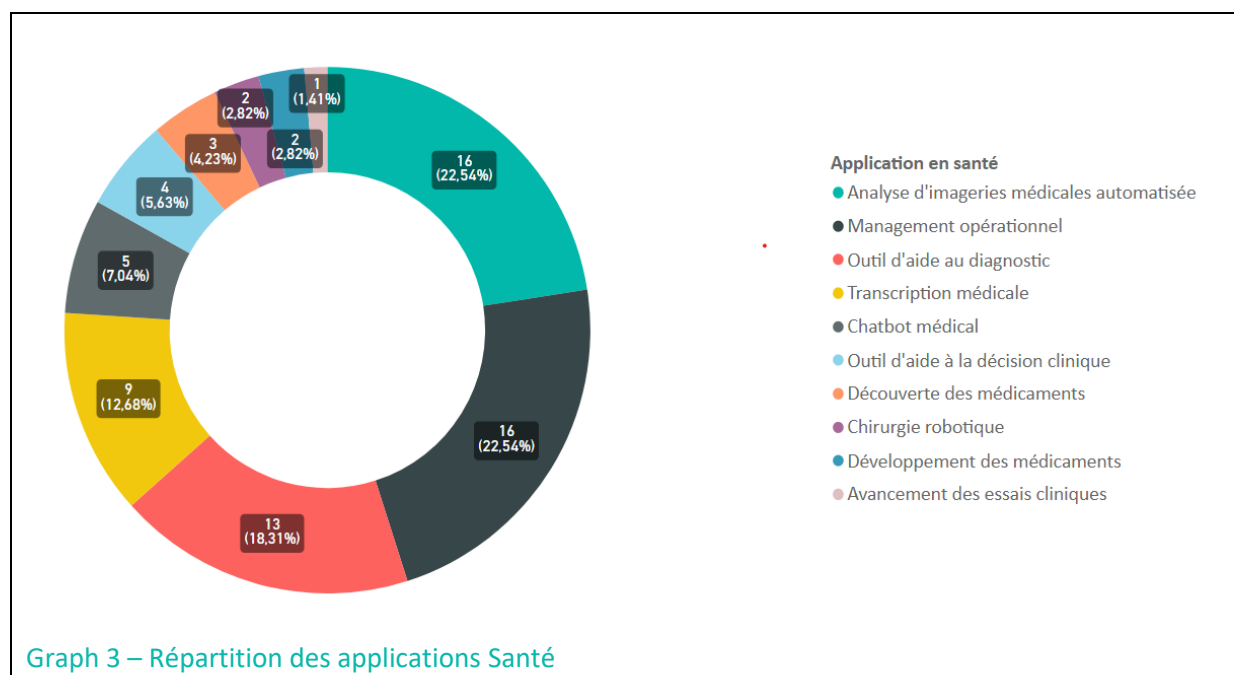
De plus, l'incertitude quant à la manière dont certaines politiques seront mises en œuvre, telles que les exigences de localisation des données en vertu de la nouvelle loi chinoise sur la cybersécurité, pourrait entraîner une augmentation soudaine des coûts pour les entreprises étrangères sans beaucoup de préavis.

Enfin, la nouvelle loi visant à améliorer cybersécurité des données du pays exige de pouvoir localiser les données utilisées et contrôler les données transfrontalières<sup>cxvii</sup> : les sociétés dites d'infrastructure d'information critique (IIC) sont tenues de stocker localement les informations personnelles et les données importantes qui sont collectées et produites au cours des opérations commerciales en Chine. Ces exigences signifient que les entreprises doivent établir de nouveaux serveurs de données en Chine, tandis que les contrôles de données transfrontaliers peuvent ralentir ou arrêter le transfert d'informations. Cette exigence a un impact particulier sur les entreprises étrangères, qui devraient avoir la possibilité d'héberger des données là où cela a un sens commercial.

## 7.4. Analyse par application de la solution d'IA

Les applications de santé développées dans le chapitre [« utilisation de l'intelligence artificielle en santé »](#) ont été utilisées pour déterminer les différentes utilisations des solutions d'IA. Les dix catégories suivantes ont été identifiées :

- Analyse d'imageries médicales automatisée
- Avancement des essais cliniques
- Chatbot médical
- Chirurgie robotique
- Découverte de médicament
- Développement des médicaments
- Management opérationnel
- Outil d'aide au diagnostic
- Outil d'aide à la décision clinique
- Transcription médicale



Certaines tendances apparaissent dans la région. Les 3 principales applications mises en évidence par la base de données sont :

- L'analyse d'imageries médicales automatisée : dans les chapitres précédents il a été noté que la radiologie connaissait actuellement une augmentation exponentielle des applications d'IA dans le monde, en particulier avec l'analyse d'imageries médicales automatisée. Avec 23% des solutions commercialisées en APAC, la région semble suivre la tendance mondiale.
- Le management opérationnel : il a été vu précédemment que la gestion opérationnelle est l'une des utilisations les plus acceptées de l'IA dans la santé de nos jours. Elle se retrouve

naturellement dans les principales utilisations des applications de santé proposées par les entreprises en APAC, comptant 23% des solutions.

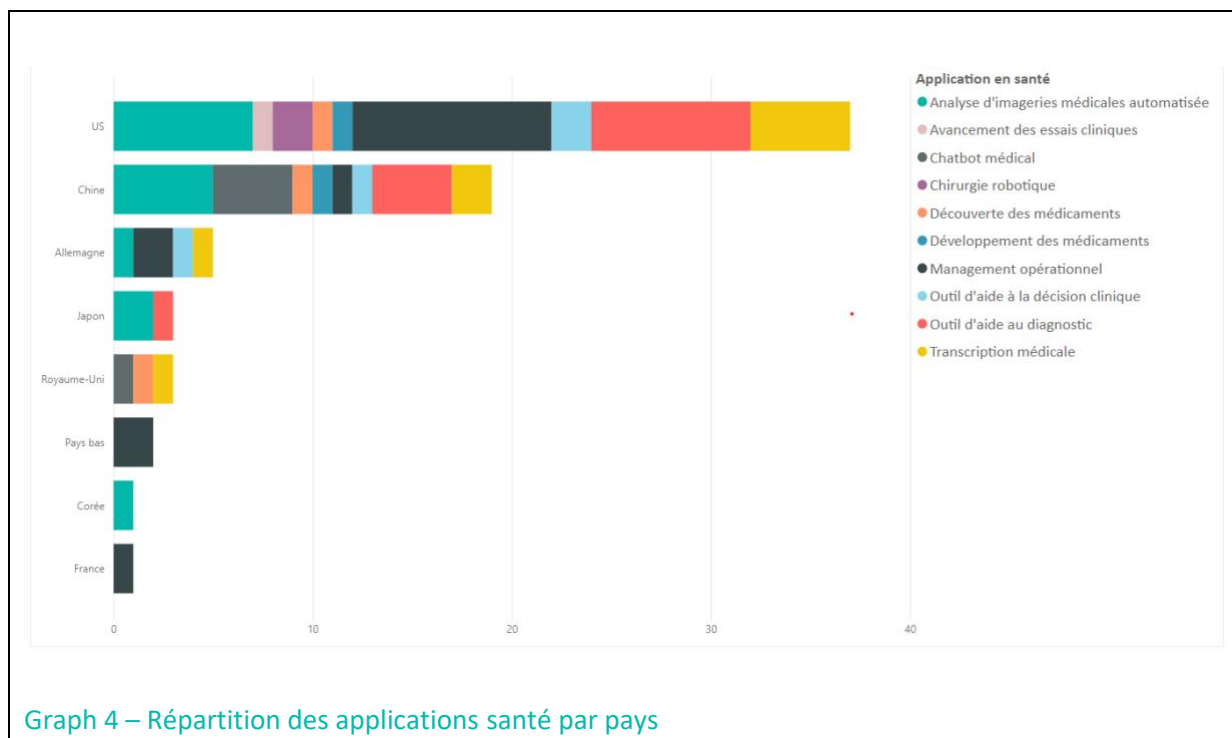
- Les outils d'aide au diagnostic sont proposés comme approche pour améliorer la prise de décision des professionnels de la santé et sont souvent utilisés en oncologie. 18% des solutions incluses dans la base de données appartiennent à cette catégorie.

En termes de spécialités médicales touchées par la croissance de l'IA, une autre tendance semble se distinguer (détail dans la description des solutions d'IA listées). La radiologie et l'oncologie semblent être en tête des applications de l'IA en santé. L'IA est utilisée dans le domaine de la radiologie pour détecter et diagnostiquer les maladies chez les patients grâce à la tomodensitométrie (CT) et à l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Grâce à cette utilisation, l'IA, et l'apprentissage en profondeur en particulier, ont été en mesure de bien servir deux facteurs clés de l'imagerie médicale : la détection des anomalies et la surveillance des changements dans le temps. L'histoire de l'IA en imagerie médicale montre une tendance à l'avancement rapide de la capacité et de la fiabilité des nouveaux systèmes<sup>cxviii</sup>. 14 solutions vont avoir une fonction thérapeutique ou diagnostique directe en radiologie et/ou en cancérologie : Doctor You par Alibaba Health, AiCE et Aquilion ONE par Canon Medical, Care Select Imaging par Change Healthcare, SIGNA Premier, Critical Care Suite 2.0 et TrueFidelity par GE Healthcare, Genius AI Detection par Hologic, Watson Oncology par IBM Watson health, S-Detect par Samsung, AI-Rad Companion par Siemens Healthineers, Miying platform par Tencent et Ethos therapy par Varian.

De nombreuses entreprises non traditionnelles du milieu médical (les « big tech », Amazon, Canon, Google, IBM, Intel, Olympus, Philips, Samsung, Siemens, Tencent) ont ouvert une branche dédiée à la santé (Alibaba Health, Amazon Health, Canon Medical, Google Health, IBM Watson health, Philips Healthcare, Siemens Healthineers). Cinq critères motivent particulièrement ces entreprises à entrer sur le marché de la santé<sup>cxix</sup> :

- Le consumérisme des soins de santé crée des opportunités pour les nouveaux entrants de surpasser les opérateurs historiques du secteur.
- La forte augmentation du nombre de données de santé : les big tech créent les outils nécessaires pour aider les consommateurs et les organisations de soins de santé à les utiliser ces données.
- La demande croissante d'automatisation des tâches : les charges administratives ont créé des opportunités pour les big tech de normaliser certains processus d'utilisation de l'IA et leur automatisation.
- L'intérêt des entreprises pour les appareils intelligents trouvent également leur place dans les soins de santé. Elles commencent à recevoir des subventions des opérateurs historiques de l'industrie.
- Enfin, employeurs et consommateurs subissent la hausse des coûts des soins de santé et investissent dans des stratégies de maîtrise de ces coûts.

Les revenus de la santé poursuivent leur marche de plusieurs décennies hors de l'hôpital et vers les marchés des soins ambulatoires, où la barrière à l'entrée est bien plus faible. Alors que les consommateurs recherchent des soins dans un marché ambulatoire de plus en plus saturé, les big tech se positionnent pour posséder une partie du nouvel écosystème numérique de la santé.



Comme le montre le graphique en barre ci-dessus, dans la région APAC :

- Les États-Unis commercialisent tous les types d'applications de santé que l'on trouve dans les solutions d'IA, à l'exception d'un chatbot médical
- La Chine commercialise également tous les types d'applications d'IA en santé à l'exception d'une IA pour la chirurgie robotique et pour les avancements des essais cliniques
- L'Allemagne commercialise 4 types de solutions : une IA pour l'analyse d'imageries médicales automatisée, un outil d'aide au management opérationnel, un outil d'aide à la décision clinique et un outil d'aide à la transcription médicale
- Le Japon commercialise 2 types de solutions : une IA pour l'analyse d'imageries médicales automatisée et un outil d'aide au diagnostic
- Le Royaume-Uni commercialise 3 types de solutions : un chatbot médical, une IA pour la découverte des médicaments et un outil d'aide à la transcription médicale
- La Corée du sud ne commercialise qu'une IA pour l'analyse d'imageries médicales automatisée
- Les Pays-Bas et la France ne commercialisent qu'un outil d'aide au management opérationnel

En Asie Pacifique, les chatbots de santé ne sont fournis que par la société britannique Babylon Health et par les 2 géants chinois Baidu et Ping An Technology (tous deux disponibles uniquement en Chine). De nos jours, l'accès aux appareils mobiles est plus répandu dans certains pays que l'accès aux soins de santé à proximité. Cela peut expliquer pourquoi l'utilisation des chatbots médicaux augmente massivement, les utilisateurs pouvant utiliser cet outil pour recevoir des conseils et des recommandations personnalisées directement sur leur smartphone. En raison de la nature

sophistiquée et précise de la langue dans les soins de santé, les chatbots médicaux sont quasi inutilisables s'ils ne peuvent pas communiquer dans la langue maternelle d'un utilisateur. Cependant, la création de chatbots multilingues est coûteuse, laborieuse, complexe et difficilement évolutive. Chaque modification d'un bot doit être répliquée dans chaque langue prise en charge par le bot. Ainsi, les fabricants de chatbots médicaux choisissent de produire leurs produits dans une seule langue, souvent en anglais.

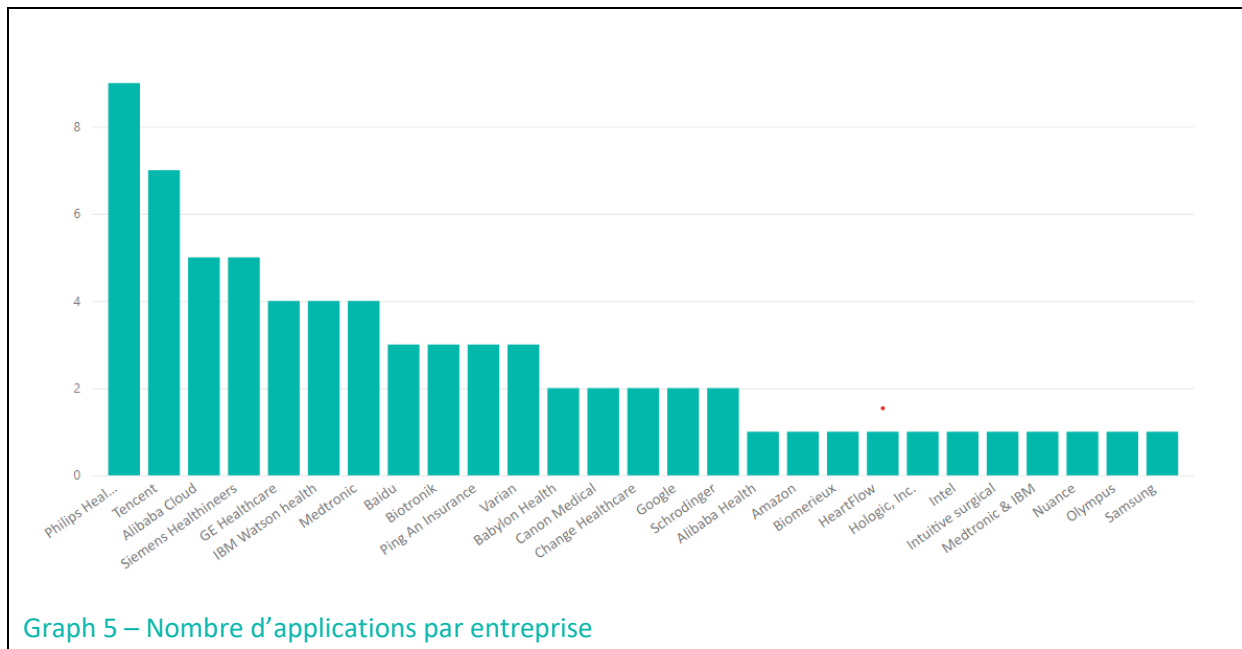
Le marché des chatbot médicaux est en plein essor globalement et devrait atteindre la valeur de 703,2 millions de dollars (USD) d'ici 2025<sup>cxix</sup>. En regardant le marché mondial, la part de marché, les avancées les plus récentes de l'industrie, les lancements de produits innovants, les partenariats, les fusions ou les acquisitions par les principales sociétés du marché des chatbots de soins de santé, les principaux acteurs sont Baidu, Sensely, Ada Digital Health Ltd., Babylon Health, Tencent, HealthTap, Infermedica, Buoy Health, Your.MD (Healthily) et Woebot Labs<sup>cxixi</sup>. Certaines de ces entreprises ne répondant pas aux critères d'inclusion de la base de données, elles n'ont pas été incluses dans cette thèse. C'est également le cas pour de nombreuses startups et petites et moyennes entreprises (PME), expliquant l'absence de plus d'entreprises locales (dont le siège social se situe en Asie Pacifique) dans cette base de données.

## 7.5. Analyse par entreprise

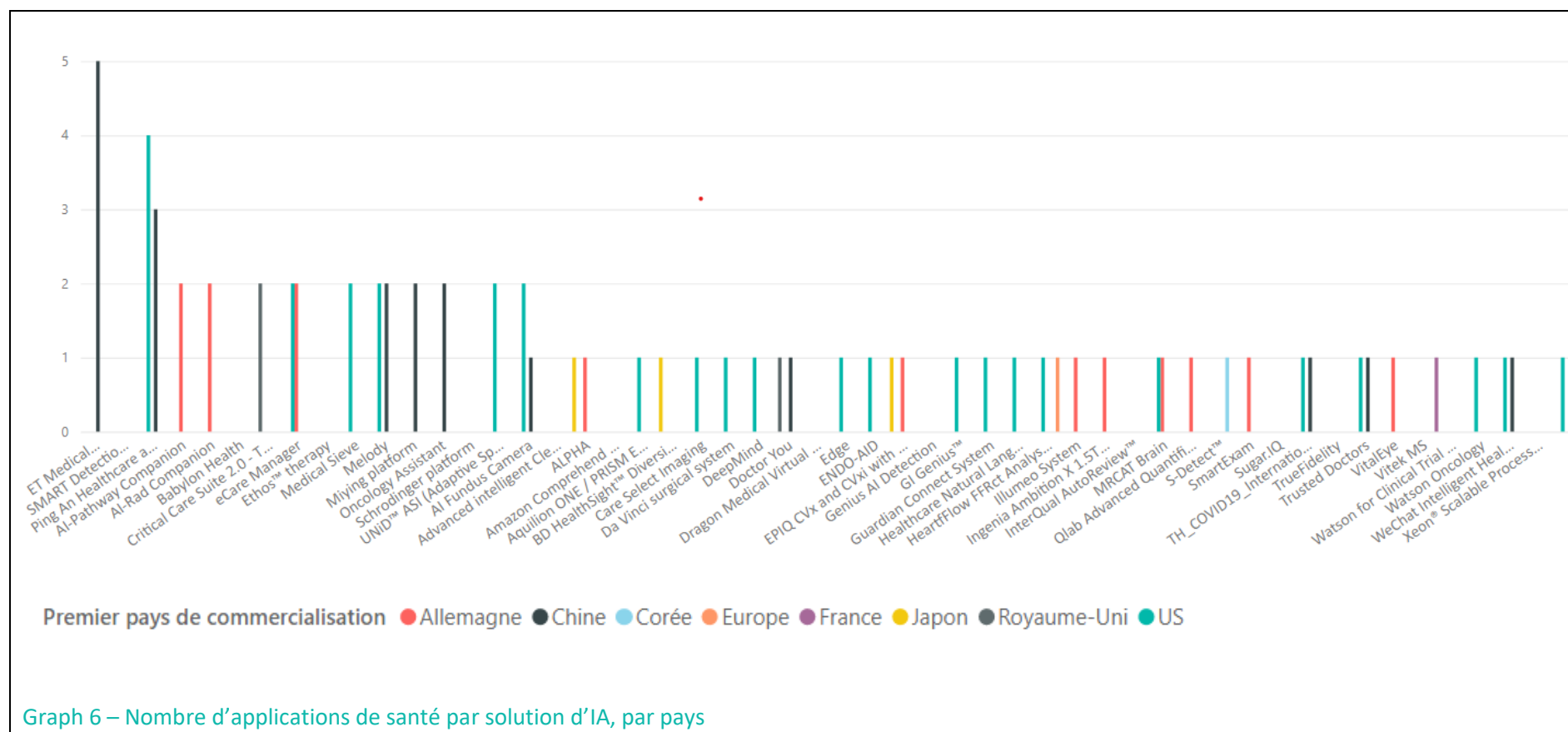
En 2017, Ping An Technology a conclu une collaboration avec deux Centers for Disease Control and Prevention. Les autorités chinoises ont ouvert un vaste ensemble de données de 20 millions de dossiers de santé à l'entreprise privée, qui a utilisé les données pour commercialiser une plate-forme d'IA<sup>cxixii</sup>. L'échelle des données disponibles à Ping An Technology lui a donné un avantage que peu d'entreprises internationales pouvaient égaler. À l'inverse, le National Health Service (NHS) du Royaume-Uni a signé un contrat avec la société d'intelligence artificielle DeepMind appartenant à Google en 2016, autorisant l'accès à seulement 1,6 million de dossiers de santé<sup>cxixiii</sup>.

Le ministère des Sciences et de la Technologie Chinois a reconnu une équipe nationale<sup>cxixiv</sup>, avec un groupe comprenant Baidu, Alibaba et Tencent pour diriger le développement des solutions d'IA de nouvelle génération du pays. L'annonce n'a pas détaillé le soutien spécifique aux entreprises et le montant d'argent qui serait disponible. Cependant, cela semble signifier que le gouvernement chinois est prêt à être le client principal des grands projets d'IA, créant ainsi un marché pour les applications avancées de la technologie.





En analysant les graphiques 5 (ci-dessus) et 6 (ci-dessous), nous pouvons remarquer qu'en moyenne, une solution d'IA propose 1,4 applications de santé. Alors que certaines solutions sont programmées pour une seule fonction (par exemple, S-Detect™ de Samsung, qui fournit uniquement une analyse d'imageries médicales automatisée), certaines solutions couvrent de nombreuses fonctions de soins de santé (par exemple, ET Medical Brain, d'Alibaba Cloud, fournit 5 applications, Analyse d'imageries médicales automatisée, Découverte des médicaments, Développement des médicaments, Management opérationnel et Outil d'aide au diagnostic). L'étude du nombre de solutions commercialisées par les entreprises européennes ne permet pas de ressortir de données significatives.



Les quatre géants chinois Baidu, Tencent, Alibaba et Ping An Technology, commercialisent en moyenne 4,75 applications de santé par entreprise, contre 2,2 pour les entreprises américaines. Généralement, une entreprise chinoise aura tendance à commercialiser plus de solutions d'IA et proposer plus de fonctions de soins de santé que son homologue américain. Pour la Chine, l'un des plus grands avantages est apporté par sa population utilisant Internet (environ 750 millions de personnes) générant une énorme quantité de données numériques à traiter. Par conséquent, les conglomérats chinois soumettent chaque année des centaines de demandes de brevet d'IA. En octobre 2020, Baidu avait par exemple déposé plus de 9 400 demandes de brevet d'IA en Chine, le plus élevé du pays, suivi de Tencent avec plus de 8 500 demandes<sup>CXXV</sup>. Il semble que si les États-Unis sont en tête en termes de nombre de solutions d'IA créées, choisissant d'avoir une solution centrée sur une ou deux applications de santé, la Chine préfère suivre une stratégie unificatrice, diversifiant leurs propositions d'IA.

## 7.6. Limites méthodologiques

Lors de la rédaction de cette thèse, plusieurs limites méthodologiques ont été rencontrées et ont rendu la détection de tendances plus difficile.

Le plus gros facteur limitant fut la taille de l'échantillon analysé. Pour pouvoir relever un maximum d'informations sur les solutions d'intelligence artificielles de santé disponibles en APAC, il a fallu limiter le nombre d'entreprises à inclure pour les recherches bibliographiques. Le principal facteur limitant étant de restreindre les recherches aux entreprises ayant un revenu annuel supérieur à 50 millions USD. Ce nombre est celui utilisé par l'association commerciale APACMed (*Asia Pacific Medical Technology Association*) pour différencier ses adhérents en tant que membres corporatifs (*corporate members*) avec un revenu annuel supérieur à 50 millions USD, de ses membres petites et moyennes entreprises (*small and medium enterprise members*) avec un revenu annuel inférieur à 50 millions USD. Les solutions commercialisées analysées sont issues de la R&D interne ou de l'acquisition d'une startup par la société. Il fut alors difficile de trouver des relations significatives à partir des données, car les analyses auraient nécessité une taille d'échantillon plus grande pour assurer une représentation fidèle des tendances de la région. Cette limitation permet d'analyser les tendances aux seins des plus grandes entreprises mondiales mais ne permet pas l'inclusion des milliers de start-ups disponibles dans la région. Dans de futures études, il serait intéressant d'avoir des critères d'inclusion plus larges, voire de se concentrer uniquement sur les plus petites et moyennes entreprises, afin de comparer les résultats et analyser les potentielles similitudes ou différences selon les tailles des entreprises.

Bien que des entreprises aient accepté de répondre à certaines questions visant à compléter les informations disponibles sur leur site internet, le manque de données disponibles fut un autre facteur limitant dans cette recherche. Pour de futures études il pourrait être intéressant d'avoir plus d'informations sur les détails de commercialisation de chaque solution d'IA dans les pays asiatiques, en accédant à des bases de données plus complètes ou en travaillant plus étroitement avec les entreprises incluses dans l'étude.

Enfin, plusieurs mois ont été nécessaires pour relever et analyser les données essentielles à cette étude. Durant ces recherches, de nombreux nouveaux articles et études sont apparus, apportant de nouvelles informations. Cette étude se voulait la plus exhaustive possible, et bien que ces informations n'aient pas drastiquement modifié les résultats des recherches, il a néanmoins fallu les ajouter à la base de données et à la rédaction du document. Étant donné que ce secteur est en plein essor et compte tenu de son évolution continue et rapide, cette base de données fait l'état des lieux d'un moment précis et est pertinente au moment de la publication de cette thèse. Elle nécessiterait une mise à jour fréquente pour recenser les nouvelles technologies, entreprises et solutions disponibles dans la région.

## Conclusion

Au cours des dernières années, nous avons assisté à une adoption grandissante de l'IA dans tous les secteurs de l'industrie, bénéficiant à tous les aspects de la vie quotidienne, mais surtout dans le domaine de la santé. En Europe, le Royaume-Uni, l'Allemagne et la France investissent massivement dans le développement de leur stratégie nationale pour l'intelligence artificielle (autour de 17,3 milliards de dollars US dépensés en investissements privés en IA en 2021<sup>cxxvi</sup>), tandis que les États-Unis se battent pour conserver leur première place dans la course à l'IA et à l'innovation (autour de 29,5 milliards de dollars US dépensés en investissements privés en IA en 2021<sup>cxxvii</sup>). / ». Même si plusieurs pays de la région Asie Pacifique se concentrent sur le développement d'applications basées sur l'intelligence artificielle, avec la Chine, le Japon et la Corée du Sud en tête ; Jusqu'à présent la région asiatique était en retard dans un grand nombre d'applications de santé par rapport à la puissance Nord-Américaine (29 solutions d'IA en sante commercialisées par les États-Unis, contre 14 solutions pour la région APAC).

Le délai de mise sur le marché est crucial, c'est pourquoi l'approche chinoise de l'IA consiste d'abord à expérimenter et à innover, tout en établissant des réglementations de soutien au fur et à mesure. Cela contraste totalement avec les économies occidentales, où les réglementations et les politiques précèdent généralement l'innovation. Il pourrait y avoir une place pour un terrain d'entente où la nouvelle IA peut être testée dans des environnements dit de « regulatory sandbox », permettant des tests à petite échelle dans un environnement contrôlé sous la supervision du régulateur. La réalité brutale d'une pandémie mondiale a mis en évidence un investissement accéléré de la Chine dans l'IA et certains processus impliqués dans la lutte contre le COVID-19. Les vastes quantités de données produites en permanence par les 1,4 milliard d'habitants de la Chine sont le carburant des algorithmes de l'IA. Les citoyens chinois sont également plus disposés que les pays occidentaux à partager des données en échange de commodité, d'une meilleure expérience et de services personnalisés<sup>cxxviii</sup>. Pour réduire le désavantage lié aux données, les Européens et les Nord-Américains devront peut-être trouver des moyens de gérer et de partager leurs ensembles de données tout en préservant la confidentialité de ces données, par exemple en utilisant de nouvelles approches du ML et du DL.

De nouveaux acteurs commencent également à entrer sur le marché de l'IA en santé. En tirant parti de leur large clientèle et de la maîtrise des nouvelles technologies, les entreprises technologiques telles que Apple, Google, ou Baidu, ont su développer des produits innovants adaptés aux patients. Grâce à leurs algorithmes avancés et leurs bases de données d'utilisateurs enrichies en permanence, ils ont également permis la commercialisation de solutions d'imagerie médicale d'IA, de systèmes de soutien clinique et de thérapies numériques.

Les pays Asiatiques devraient faire évoluer leurs stratégies d'IA car actuellement ce sont principalement les entreprises privées qui extraient et utilisent les données des patients à des fins lucratives et tirent parti de l'IA à des fins privées. Étant donné que les solutions de santé d'IA dépendent des données qu'elle contient, les entreprises doivent optimiser le processus de collecte et de nettoyage de ces données, afin de garantir une efficacité accrue des solutions et d'accorder une attention particulière à la confidentialité et à la sécurité des données des patients. Suivant l'exemple

britannique de partenariat entre le National Health Service (NHS) et Deep Mind, les gouvernements devraient s'unifier et se positionner pour guider les entreprises pour le bien social. Dans le futur, il sera important de créer un environnement politique favorable à la numérisation, pour assurer les collaborations des entreprises technologiques avec les industries de santé.

## Bibliographie

- <sup>i</sup> « Population Trends ». UNFPA Asiapacific, 2 décembre 2014, <https://asiapacific.unfpa.org/en/node/15207>. Consulté le 14 février 2021.
- <sup>ii</sup> Webcast - Competing in the Cognitive Age | Protiviti - United States. <https://www.protiviti.com/US-en/insights/webinar-competing-cognitive-age>. Consulté le 14 février 2021.
- <sup>iii</sup> Register of Commission expert groups and other similar entities. <https://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm>. Consulté le 16 février 2021
- <sup>iv</sup> Tannya D. Jajal. « Distinguishing between Narrow AI, General AI and Super AI ». <https://medium.com/mapping-out-2050/distinguishing-between-narrow-ai-general-ai-and-super-ai-a4bc44172e22>. Consulté le 16 février 2021.
- <sup>v</sup> Baştanlar, Yalin, et Mustafa Ozuysal. « Introduction to Machine Learning ». Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.), vol. 1107, 2014, p. 105-28. PubMed, doi :10.1007/978-1-62703-748-8\_7. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24272434/>. Consulté le 16 février 2021.
- <sup>vi</sup> Marr, Bernard. « What's The Difference Between Structured, Semi-Structured And Unstructured Data ? » Forbes, <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/10/18/whats-the-difference-between-structured-semi-structured-and-unstructured-data/>. Consulté le 20 Mars 2021.
- <sup>vii</sup> Marr, Bernard. « What Is Deep Learning AI ? A Simple Guide With 8 Practical Examples ». Forbes, <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/10/01/what-is-deep-learning-ai-a-simple-guide-with-8-practical-examples/>. Consulté le 16 février 2021.
- <sup>viii</sup> Eda Kavlakoglu. AI vs. Machine Learning vs. Deep Learning vs. Neural Networks: What's the Difference? <https://www.ibm.com/cloud/blog/ai-vs-machine-learning-vs-deep-learning-vs-neural-networks>. Consulté le 16 février 2021.
- <sup>ix</sup> Younès Bennani. M2 Deep Learning. [https://www.math.univ-paris13.fr/masters/M2\\_Deep\\_Learning\\_English.html](https://www.math.univ-paris13.fr/masters/M2_Deep_Learning_English.html). Consulté le 31 janvier 2022.
- <sup>x</sup> « Medical Imaging Cloud AI ». Arterys, <https://arterys.com/about-us>. Consulté le 10 avril 2021.
- <sup>xi</sup> « Automated Identification of Diabetic Retinopathy Using Deep Learning ». Ophthalmology, vol. 124, no 7, juillet 2017, p. 962-69. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), doi:10.1016/j.ophtha.2017.02.008. Consulté le 10 avril 2021.
- <sup>xii</sup> Esteva, Andre, et al. « Dermatologist-Level Classification of Skin Cancer with Deep Neural Networks ». Nature, vol. 542, no 7639, février 2017, p. 115-18. [www.nature.com](http://www.nature.com), doi:10.1038/nature21056. Consulté le 10 avril 2021.
- <sup>xiii</sup> « Ingénierie des caractéristiques — Apprentissage Automatique ». DATA SCIENCE, 19 mars 2021, <https://datascience.eu/fr/apprentissage-automatique/ingenierie-des-caracteristiques/>. Consulté le 30 Janvier 2022.
- <sup>xiv</sup> Sidey-Gibbons, Jenni A. M., et Chris J. Sidey-Gibbons. « Machine learning in medicine: a practical introduction ». BMC Medical Research Methodology, vol. 19, mars 2019. PubMed Central, doi:10.1186/s12874-019-0681-4. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6425557/>. Consulté le 20 Mars 2021.
- <sup>xv</sup> Beregi, J. P., et al. « Radiology and Artificial Intelligence: An Opportunity for Our Specialty ». Diagnostic and Interventional Imaging, vol. 99, no 11, novembre 2018, p. 677-78. PubMed, doi:10.1016/j.diii.2018.11.002. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30473436/>. Consulté le 20 Mars 2021.

- 
- <sup>xvi</sup> Abdulkareem, Musa, et Steffen E. Petersen. « The Promise of AI in Detection, Diagnosis, and Epidemiology for Combating COVID-19: Beyond the Hype ». *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 4, mai 2021, p. 652669. PubMed Central, <https://doi.org/10.3389/frai.2021.652669>. Consulté le 22 Juin 2021.
- <sup>xvii</sup> Shah, Sanket. « How Big Data And Machine Learning Can Predict, Prevent Isolated Cases Of Disease ». *Medical Daily*, 21 mai 2019, <https://www.medicaldaily.com/how-big-data-and-machine-learning-can-predict-prevent-isolated-cases-disease-435359>. Consulté le 20 Mars 2021.
- <sup>xviii</sup> « 10 Common Uses for Machine Learning Applications in Business ». *SearchEnterpriseAI*, <https://searchenterpriseai.techtarget.com/feature/10-common-uses-for-machine-learning-applications-in-business>. Consulté le 20 Mars 2021.
- <sup>xix</sup> « History of Artificial Intelligence in Medicine ». *Gastrointestinal Endoscopy*, vol. 92, no 4, octobre 2020, p. 807-12. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), doi:10.1016/j.gie.2020.06.040. Consulté le 30 Mars 2021.
- <sup>xx</sup> Ruffle, James K., et al. « Artificial Intelligence-Assisted Gastroenterology- Promises and Pitfalls ». *The American Journal of Gastroenterology*, vol. 114, no 3, mars 2019, p. 422-28. PubMed, doi:10.1038/s41395-018-0268-4. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30315284/>. Consulté le 30 Mars 2021.
- <sup>xxi</sup> Moran, Michael E. « Evolution of Robotic Arms ». *Journal of Robotic Surgery*, vol. 1, no 2, juillet 2007, p. 103-11. Springer Link, doi:10.1007/s11701-006-0002-x. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11701-006-0002-x>. Consulté le 30 Mars 2021.
- <sup>xxii</sup> Weizenbaum, Joseph. « ELIZA; a computer program for the study of natural language communication between man and machine ». *Communications of the ACM*, vol. 9, no 1, janvier 1966, p. 36-45. Jan. 1966, doi:10.1145/365153.365168. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/365153.365168>. Consulté le 30 Mars 2021.
- <sup>xxiii</sup> « DENDRAL: A Case Study of the First Expert System for Scientific Hypothesis Formation ». *Artificial Intelligence*, vol. 61, no 2, juin 1993, p. 209-61. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), doi:10.1016/0004-3702(93)90068-M. Consulté le 30 Mars 2021.
- <sup>xxiv</sup> Press, Gil. « 12 AI Milestones: 4. MYCIN, An Expert System For Infectious Disease Therapy ». *Forbes*, <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2020/04/27/12-ai-milestones-4-mycin-an-expert-system-for-infectious-disease-therapy/>. Consulté le 17 avril 2021.
- <sup>xxv</sup> « Glaucoma Consultation by Computer ». *Computers in Biology and Medicine*, vol. 8, no 1, janvier 1978, p. 25-40. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), doi:10.1016/0010-4825(78)90011-2. Consulté le 17 avril 2021.
- <sup>xxvi</sup> Bakkar, Nadine, et al. « Artificial Intelligence in Neurodegenerative Disease Research: Use of IBM Watson to Identify Additional RNA-Binding Proteins Altered in Amyotrophic Lateral Sclerosis ». *Acta Neuropathologica*, vol. 135, no 2, février 2018, p. 227-47. DOI.org (Crossref), doi:10.1007/s00401-017-1785-8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00401-017-1785-8>. Consulté le 17 avril 2021.
- <sup>xxvii</sup> Comendador, Benilda Eleonor V., et al. « Pharmabot: A Pediatric Generic Medicine Consultant Chatbot ». *Journal of Automation and Control Engineering*, vol. 3, no 2, 2015, p. 137-40. DOI.org (Crossref), doi:10.12720/joace.3.2.137-140. <http://www.joace.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=42&id=218>. Consulté le 17 avril 2021.
- <sup>xxviii</sup> The IP behind the AI Boom. [https://www.wipo.int/wipo\\_magazine/en/2019/01/article\\_0001.html](https://www.wipo.int/wipo_magazine/en/2019/01/article_0001.html). Consulté le 3 février 2022.



---

<sup>xxix</sup> « China's R&D Spending up 11.8 per Cent in 2018 to US\$275 Billion ». South China Morning Post, 1 septembre 2019, <https://www.scmp.com/economy/china-economy/article/3025268/chinas-spending-research-and-development-118-cent-us275>. Consulté le 3 février 2022.

<sup>xxx</sup> « Japan's Science and Technology Research Spending at New High ». Nippon.Com, 19 février 2019, <https://www.nippon.com/en/japan-data/h00388/japan's-science-and-technology-research-spending-at-new-high.html>. Consulté le 3 février 2022.

<sup>xxxi</sup> « S. Korea's R&D Spending to GDP Ratio Highest in the World ». Businesskorea, 28 novembre 2018, <http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=26955>. Consulté le 3 février 2022.

<sup>xxxii</sup> Record S\$19b set aside for R&D until 2020  
<https://www.businesstimes.com.sg/government-economy/singapores-future-economy/record-s19b-set-aside-for-rd-until-2020>. Consulté le 3 février 2022.

<sup>xxxiii</sup> Federal Research and Development (R&D) Funding: FY2019  
<https://sgp.fas.org/crs/misc/R45150.pdf>. Consulté le 3 février 2022.

<sup>xxxiv</sup> « AI in healthcare ». | MIT Technology Review | <https://mittrinsights.s3.amazonaws.com/ai-healthcare-asia.pdf>. Consulté le 20 mars 2021.

<sup>xxxv</sup> Supply Chain Transformation Underway In Southeast Asia —Production Shift Due To Us-China Conflict And Strengthened Resilience In Response To The Covid-19 Pandemic—  
[https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2020/09/18/2008c\\_fukuoka\\_e.pdf](https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2020/09/18/2008c_fukuoka_e.pdf). Consulté le 3 février 2022.

<sup>xxxvi</sup> May, Joe Devanesan |. 13 et 2020. « Southeast Asia Expansion Continues for China Tech like ByteDance, Alibaba ». Tech Wire Asia, 2 juin 2020, <https://techwireasia.com/2020/06/china-tech-firms-look-to-southeast-asia-as-us-rivalry-intensifies/>. Consulté le 3 février 2022.

<sup>xxxvii</sup> China's Education Modernisation Plan towards 2035.  
<https://internationaleducation.gov.au:443/international-network/china/PolicyUpdates-China/Pages/China's-education-modernisation-plan-towards-2035-.aspx>, <https://internationaleducation.gov.au:443/international-network/china/PolicyUpdates-China/Pages/China's-education-modernisation-plan-towards-2035-.aspx>. Consulté le 7 août 2021.

<sup>xxxviii</sup> OMS | Stratégie mondiale sur les ressources humaines pour la santé: Workforce 2030 ». OMS, [http://www.who.int/hrh/resources/pub\\_globstrathrh-2030/en/](http://www.who.int/hrh/resources/pub_globstrathrh-2030/en/). Consulté le 30 Mars 2021.

<sup>xxxix</sup> Francesca\_Cristiani. « Machine Learning Is Transforming Drug Discovery at AstraZeneca ». Wired, juillet 2019. [www.wired.com, https://www.wired.com/brandlab/2019/07/machine-learning-is-transforming-drug-development/](https://www.wired.com/brandlab/2019/07/machine-learning-is-transforming-drug-development/). Consulté le 7 août 2021.

<sup>xl</sup> Ucare.AI Empowers Parkway Pantai To Offer Patients Price Guaranteed Procedures; For Greater Cost Transparency And Informed-Decision Making On Healthcare Expenditure. <https://www.ucare.ai/wp-content/uploads/2020/01/FINAL-UCARE.AI-empowers-Parkway-Pantai-to-offer-patients-price-guaranteed-procedures-20191202.pdf>. Consulté le 7 août 2021.

<sup>xli</sup> Lago, Cristina. « Comment une start-up rend les soins de santé plus efficaces avec l'IA ». CIO, 31 mai 2019, <https://www.cio.com/article/3399005/how-ucareai-is-making-healthcare-more-efficient-with-ai.html>. Consulté le 7 août 2021.

- 
- <sup>xlii</sup> Price Guarantee Procedures | Cost & Financing | Parkway East Hospital. <https://www.parkwayeast.com.sg/cost-financing/price-guarantee>. Consulté le 7 août 2021.
- <sup>xliii</sup> Álvarez-Machancoses, Óscar, et Juan Luis Fernández-Martínez. « Using Artificial Intelligence Methods to Speed up Drug Discovery ». *Expert Opinion on Drug Discovery*, vol. 14, no 8, août 2019, p. 769-77. PubMed, doi:10.1080/17460441.2019.1621284. Consulté le 22 avril 2021.
- <sup>xliiv</sup> Mak, Kit-Kay, et Mallikarjuna Rao Pichika. « Artificial Intelligence in Drug Development: Present Status and Future Prospects ». *Drug Discovery Today*, vol. 24, no 3, mars 2019, p. 773-80. PubMed, doi:10.1016/j.drudis.2018.11.014. Consulté le 22 avril 2021.
- <sup>xlv</sup> Öztürk, Hakime, et al. « DeepDTA: deep drug–target binding affinity prediction ». *Bioinformatics*, vol. 34, no 17, septembre 2018, p. i821-29. PubMed Central, doi:10.1093/bioinformatics/bty593. Consulté le 22 avril 2021.
- <sup>xlvi</sup> Spaya AI. <https://spaya.ai/>. Consulté le 12 août 2021.
- <sup>xlvii</sup> Iktos Announces Collaboration With Pfizer in AI for Drug Design. 2 mars 2021, <https://www.businesswire.com/news/home/20210302005501/en/Iktos-Announces-Collaboration-With-Pfizer-in-AI-for-Drug-Design>. Consulté le 13 Aout 2021.
- <sup>xlviii</sup> Drug Discovery | Schrödinger. <https://www.schrodinger.com/drug-discovery>. Consulté le 12 août 2021.
- <sup>xlix</sup> Paul, Debleena, et al. « Artificial intelligence in drug discovery and development ». *Drug Discovery Today*, vol. 26, no 1, janvier 2021, p. 80-93. PubMed Central, <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.10.010>.
- <sup>l</sup> Fogel, David B. « Factors Associated with Clinical Trials That Fail and Opportunities for Improving the Likelihood of Success: A Review ». *Contemporary Clinical Trials Communications*, vol. 11, septembre 2018, p. 156-64. PubMed, <https://doi.org/10.1016/j.conctc.2018.08.001>.
- <sup>li</sup> Paul, Debleena, et al. « Artificial intelligence in drug discovery and development ». *Drug Discovery Today*, vol. 26, no 1, janvier 2021, p. 80-93. PubMed Central, <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.10.010>.
- <sup>lii</sup> Paul, Debleena, et al. « Artificial intelligence in drug discovery and development ». *Drug Discovery Today*, vol. 26, no 1, janvier 2021, p. 80-93. PubMed Central, <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.10.010>.
- <sup>liii</sup> AiCure – The link between patients, disease and treatment. <https://aicure.com/>. Consulté le 13 août 2021.
- <sup>liv</sup> HeartModel | Philips Healthcare ». Philips, <https://www.usa.philips.com/healthcare/resources/feature-detail/ultrasound-heartmodel>. Consulté le 13 août 2021.
- <sup>lv</sup> Séquence vidéo de Digital Twin of the Heart. <https://www.siemens-healthineers.com/press-room/press-videos/im-20181204001shs.html>. Consulté le 13 août 2021.
- <sup>lvi</sup> « Digital Twins – A Way Forward To Unlock the Pivotal Hidden Signals To Increase ROI in Drug Discovery? » DIA Global Forum, 31 mars 2020, <https://globalforum.diaglobal.org/issue/april-2020/digital-twins-a-way-forward-to-unlock-the-pivotal-hidden-signals-to-increase-roi-in-drug-discovery/>. Consulté le 13 août 2021.
- <sup>lvii</sup> bekryl. «Page d'accueil Bekryl Market Analysts». Analystes du marché de Bekryl, <https://bekryl.com/>. Consulté le 13 août 2021.
- <sup>lviii</sup> Chen, Zi-Hang, et al. « Artificial Intelligence for Assisting Cancer Diagnosis and Treatment in the Era of Precision Medicine ». *Cancer Communications*, vol. n/a, no n/a. Wiley Online Library, <https://doi.org/10.1002/cac2.12215>. Consulté le 13 août 2021.

---

lix TrueFidelity CT. <https://www.gehealthcare.com/products/truefidelity>.

lx Technologie d'imagerie 3DQuorumTM | Hologic. <https://www.hologic.com/hologic-products/breast-skeletal/3dquorum-imaging-technology>. Consulté le 13 août 2021.

lxii Compagnon AI-Rad. <https://www.siemens-healthineers.com/en-sg/digital-health-solutions/digital-solutions-overview/clinical-decision-support/ai-rad-companion> Consulté le 13 août 2021.

lxiii Grand défi de radiologie de tamis médical - IBM. 25 juillet 2016, [https://researcher.watson.ibm.com/researcher/view\\_group.php?id=4384](https://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_group.php?id=4384). Consulté le 13 août 2021.

lxiv IBM Watson Health - Oncologie et génomique ». IBM Watson Health, <https://www.ibm.com/watson-health/oncology-and-genomics/>. Consulté le 13 août 2021.

lxv Magrabi, Farah, et al. « Artificial Intelligence in Clinical Decision Support: Challenges for Evaluating AI and Practical Implications ». Yearbook of Medical Informatics, vol. 28, no 1, août 2019, p. 128-34. PubMed, <https://doi.org/10.1055/s-0039-1677903>. Consulté le 13 août 2021.

lxvi « La société chinoise de technologie Baidu lance un chatbot médical pour les médecins et les patients ». MobiHealthNews, 11 octobre 2016, <https://www.mobihealthnews.com/content/chinese-web-company-baidu-launches-medical-chatbot-doctors-and-patients>. Consulté le 13 août 2021.

lxvii Motion2Vec: Semi-Supervised Representation Learning from Surgical Videos. Ajay Kumar Tanwani, Pierre Sermanet, Andy Yan, Raghav Anand, Mariano Phielipp, Ken Goldberg. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). online (Paris, France). June 2020. [pdf] <https://goldberg.berkeley.edu/pubs/2020-ICRA-Tanwani-Motion2Vec.pdf>. Consulté le 21 Aout 2021.

lxviii Tian, Huaiyu et coll. « L'impact des mesures de contrôle de la transmission pendant les 50 premiers jours de l'épidémie de COVID-19 en Chine ». MedRxiv, mars 2020, p. 2020.01.30.20019844. [www.medrxiv.org](http://www.medrxiv.org), doi: 10.1101 / 2020.01.30.20019844. Consulté le 21 Aout 2021.

lxix « COVID-19 diagnostiqué avec précision par modèle d'IA ». GEN - Genetic Engineering and Biotechnology News, 26 mai 2020, <https://www.genengnews.com/news/covid-19-accurately-diagnosed-by-ai-model/>. Consulté le 21 Aout 2021.

lxx HealthITAnalytics. « L'outil d'Intelligence Artificielle identifie le COVID-19 dans les scans CT ». HealthITAnalytics, 19 mai 2020, <https://healthitanalytics.com/news/artificial-intelligence-tool-identifies-covid-19-in-ct-scans>. Consulté le 21 Aout 2021.

lxxi Outil d'intelligence artificielle développé pour prédire la gravité de la pneumonie chez les patients, y compris les patients COVID-19. [https://www.ihis.com.sg/Latest\\_News/Media\\_Releases/Pages/artificial-intelligence-tool-predict-severity-pneumonia-covid-patients.aspx](https://www.ihis.com.sg/Latest_News/Media_Releases/Pages/artificial-intelligence-tool-predict-severity-pneumonia-covid-patients.aspx). Consulté le 21 Aout 2021.

lxxii Votre hub pour les ressources Coronavirus. <https://coronavirus.providence.org/>. Consulté le 21 Aout 2021.

lxxiii Chen, Yu Wai, et al. « Prediction of the SRAS-CoV-2 (2019-NCoV) 3C-like Protease (3CL pro) Structure: Virtual Screening Reveals Velpatasvir, Ledipasvir, and Other Drug Repurposing Candidates ». F1000Research, vol. 9, 2020, p. 129. PubMed, <https://doi.org/10.12688/f1000research.22457.2>. Consulté le 21 Aout 2021.

lxxiv Zhang, Haiping, et al. « Deep Learning Based Drug Screening for Novel Coronavirus 2019-NCov ». Interdisciplinary Sciences, Computational Life Sciences, vol. 12, no 3, septembre 2020, p. 368-76. PubMed, <https://doi.org/10.1007/s12539-020-00376-6>. Consulté le 21 Aout 2021.

---

<sup>lxxxv</sup> Rangan, Ramya, et al. RNA Genome Conservation and Secondary Structure in SRAS-CoV-2 and SRAS-Related Viruses. 6 avril 2020, p. 2020.03.27.012906. bioRxiv, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.03.27.012906v2>. Consulté le 21 Aout 2021.

<sup>lxxxvi</sup> Rangan, Ramya, et al. RNA Genome Conservation and Secondary Structure in SRAS-CoV-2 and SRAS-Related Viruses. 6 avril 2020, p. 2020.03.27.012906. bioRxiv, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.03.27.012906v2>. Consulté le 21 Aout 2021.

<sup>lxxxvii</sup> Bowick, Gavin C., et Alan D. T. Barrett. « Comparative Pathogenesis and Systems Biology for Biodefense Virus Vaccine Development ». Journal of Biomedicine & Biotechnology, vol. 2010, 2010, p. 236528. PubMed, <https://doi.org/10.1155/2010/236528>. Consulté le 21 Aout 2021.

<sup>lxxxviii</sup> Keshavarzi Arshadi, Arash, et al. « Artificial Intelligence for COVID-19 Drug Discovery and Vaccine Development ». Frontiers in Artificial Intelligence, vol. 3, 2020, p. 65. Frontiers, <https://doi.org/10.3389/frai.2020.00065>. Consulté le 21 Aout 2021.

<sup>lxxxix</sup> Ong, Edison, et al. « COVID-19 coronavirus vaccine design using reverse vaccinology and machine learning ». bioRxiv, mars 2020, p. 2020.03.20.000141. PubMed Central, <https://doi.org/10.1101/2020.03.20.000141>. Consulté le 21 Aout 2021.

<sup>lxxx</sup> Ke, Yi-Yu, et al. « Artificial Intelligence Approach Fighting COVID-19 with Repurposing Drugs ». Biomedical Journal, vol. 43, no 4, août 2020, p. 355-62. ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.bi.2020.05.001>. Consulté le 21 Aout 2021.

<sup>lxxxi</sup> KPMG, vivre dans un rapport AI World 2020: <https://advisory.kpmg.us/content/dam/advisory/en/pdfs/2020/healthcare-living-in-an-ai-world.pdf>. Consulté le 21 Aout 2021.

<sup>lxxxii</sup> « AI Accountability: Who's Responsible When AI Goes Wrong? » SearchEnterpriseAI, <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/feature/AI-accountability-Whos-responsible-when-AI-goes-wrong>. Consulté le 20 mars 2022.

<sup>lxxxiii</sup> WHITE PAPER On Artificial Intelligence - A European approach to excellence and trust. [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/commission-white-paper-artificial-intelligence-feb2020\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/commission-white-paper-artificial-intelligence-feb2020_en.pdf). Consulté le 1 février 2022.

<sup>lxxxiv</sup> Mois de sensibilisation à la cybersécurité - APACMed. <https://apacmed.org/our-work/digital-health/cybersecurity-awareness-month/>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>lxxxv</sup> Intelligence artificielle dans les soins de santé | Accenture. <https://www.accenture.com/us-en/insight-artificial-intelligence-healthcare>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>lxxxvi</sup> Madhavan, Radhika. « IA en biométrie et sécurité - Applications métiers actuelles ». Emerj, <https://emerj.com/ai-sector-overviews/ai-in-biometrics-current-business-applications/>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>lxxxvii</sup> Madhavan, Radhika. « IA en biométrie et sécurité - Applications métiers actuelles ». Emerj, <https://emerj.com/ai-sector-overviews/ai-in-biometrics-current-business-applications/>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>lxxxviii</sup> Finlayson, Samuel G., et al. « Attaques contradictoires sur l'apprentissage machine médical ». Science (New York, NY), vol. 363, n° 6433, mars 2019, p. 1287-89. PubMed Central, doi: 10.1126 / science.aaw4399.

---

<sup>lxxxix</sup> « Singapore's Worst Cyber Attack: How It Unfolded ». The Straits Times, <https://graphics.straitstimes.com/STI/STIMEDIA/Interactives/2018/07/sg-cyber-breach/index.html>. Consulté le 20 mars 2022.

<sup>xc</sup>Graham, Chris. «NHS Cyber Attack: Tout ce que vous devez savoir sur la« plus grande offensive de Ransomware »de l'histoire». The Telegraph, 13 mai 2017. [www.telegraph.co.uk](http://www.telegraph.co.uk), <https://www.telegraph.co.uk/news/2017/05/13/nhs-cyber-attack-everything-need-know-biggest-ransomware-offensive/>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>xc<sup>i</sup></sup> Examen des leçons de Smart W. sur la cyberattaque WannaCry Ransomware, <https://www.england.nhs.uk/wp-content/uploads/2018/02/lessons-learned-review-wannacry-ransomware-cyber-attack-cio-review.pdf>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>xc<sup>ii</sup></sup>Gerke, Sara et coll. «Défis éthiques et juridiques des soins de santé basés sur l'intelligence artificielle». L'intelligence artificielle dans les soins de santé, 2020, p. 295-336. PubMed Central, doi: 10.1016 / B978-0-12-818438-7.00012-5. Consulté le 1 février 2022.

<sup>xc<sup>iii</sup></sup>Chambre des lords. L'IA au Royaume-Uni: prête, disposée et capable?, <https://publications.parliament.uk/pa/ld201719/ldselect/ldai/100/100.pdf>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>xc<sup>iv</sup></sup> Joseph Turcotte. Data Privacy and Cybersecurity Collides with the World of Intellectual Property in the New Decade. <https://www.cpmagazine.com/data-privacy/data-privacy-and-cybersecurity-collides-with-the-world-of-intellectual-property-in-the-new-decade/>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>xc<sup>v</sup></sup> Summary of Second and Third Sessions. [https://www.wipo.int/meetings/en/doc\\_details.jsp?doc\\_id=527540](https://www.wipo.int/meetings/en/doc_details.jsp?doc_id=527540). Consulté le 4 février 2022.

<sup>xc<sup>vi</sup></sup>Discrimination raciale dans la technologie de reconnaissance faciale ». Science in the News, 24 octobre 2020, <http://sitn.hms.harvard.edu/flash/2020/racial-discrimination-in-face-recognition-technology/>. Consulté le 4 février 2022.

<sup>xc<sup>vii</sup></sup> Duke Law Journal, Racial Equity In Algorithmic Criminal Justice, <https://scholarship.law.duke.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3972&context=dlj>. Consulté le 4 février 2022.

<sup>xc<sup>viii</sup></sup>Hamilton, Isobel Asher. «Amazon a construit un outil d'IA pour embaucher des gens mais a dû le fermer parce qu'il était discriminatoire envers les femmes». Business Insider, <https://www.businessinsider.com/amazon-built-ai-to-hire-people-discriminated-against-women-2018-10>. Consulté le 4 février 2022.

<sup>xc<sup>ix</sup></sup>«Amazon Comprehend Medical». Amazon Web Services, Inc., <https://aws.amazon.com/comprehend/medical/>. Consulté le 4 février 2022.

<sup>c</sup>Utiliser l'API Healthcare Natural Language | API Cloud Healthcare ». Google Cloud, <https://cloud.google.com/healthcare/docs/how-tos/nlp?hl=fr>. Consulté le 4 février 2022.

<sup>c<sup>i</sup></sup>Entraîner des modèles d'extraction d'entités pour le secteur de la santé ». Google Cloud, <https://cloud.google.com/natural-language/automl/docs/automl-healthcare?hl=fr>. Consulté le 4 février 2022.

<sup>c<sup>ii</sup></sup>Mohit Sharma (GAICD). Rapport sur l'intelligence artificielle dans les soins de santé. <https://www.slideshare.net/MohitSharma286/artificial-intelligence-in-healthcare-report>. Consulté le 4 février 2022.

---

<sup>ciii</sup> « Building Trust in AI ». IBM Cognitive - What's next for AI, 11 septembre 2015, <http://www.ibm.com/watson/advantage-reports/future-of-artificial-intelligence/building-trust-in-ai.html>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>civ</sup> « Prédiction mondiale 2025 de la taille du marché de l'IA de soins de santé ». Statista, <https://www.statista.com/statistics/826993/health-ai-market-value-worldwide/>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>cv</sup> Churchill, Owen. « Les rêves d'IA de la Chine ». *Nature*, vol. 553, n° 7688, janvier 2018, p. S10-12. [www.nature.com](http://www.nature.com), doi: 10.1038/d41586-018-00539-y. Consulté le 1 février 2022.

<sup>cvi</sup> « Private Investments in AI by Region 2020 ». Statista, <https://www.statista.com/statistics/1226538/ai-private-investments-by-area/>. Consulté le 6 octobre 2021.

<sup>cvi</sup> Kong, Xiangyi, et al. « Artificial intelligence: a key to relieve China's insufficient and unequally-distributed medical resources ». *American Journal of Translational Research*, vol. 11, no 5, mai 2019, p. 2632-40. Consulté le 1 février 2022.

<sup>cvi</sup> Covington, et al. L'Allemagne prépare une nouvelle loi pour la protection des données des patients et la numérisation accrue des soins de santé et pour les « dons de données » à des fins de recherche | Lexologie. <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=e042656c-5c9c-4b11-a9c0-97cd1ca18d7e>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>cix</sup> « France's New National Strategy for Artificial Intelligence - Speech of Emmanuel Macron ». Elysee.Fr, 29 mars 2018, <https://www.elysee.fr/en/emmanuel-macron/2018/03/29/frances-new-national-strategy-for-artificial-intelligence-speech-of-emmanuel-macron>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>cx</sup> « Entreprises MMC ». L'état de l'IA 2019, <https://www.stateofai2019.com/>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>cx</sup> Stangarone, Troie. COVID-19 souligne les avantages de la poussée d'intelligence artificielle de la Corée du Sud. <https://thediplomat.com/2020/12/covid-19-underscores-the-benefits-of-south-koreas-artificial-intelligence-push/>. Consulté le 1 mars 2022.

<sup>cxii</sup> Pas les États-Unis ou la Chine, mais le Japon est le leader mondial de l'IA. 6 octobre 2020, <https://www.consultancy.asia/news/3601/not-the-us-or-china-but-japan-leads-the-world-in-ai>. Consulté le 1 mars 2022.

<sup>cxiii</sup> <https://plus.google.com/+UNESCO>. « Le Japon va de l'avant avec la société 5.0 pour surmonter les défis sociaux chroniques ». UNESCO, 21 février 2019, <https://en.unesco.org/news/japan-pushing-ahead-society-50-overcome-chronic-social-challenges>. Consulté le 1 février 2022.

<sup>cxiv</sup> Schwalbe, Nina, et Brian Wahl. « Artificial Intelligence and the Future of Global Health ». *Lancet* (London, England), vol. 395, no 10236, mai 2020, p. 1579-86. PubMed, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30226-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30226-9). Consulté le 1 février 2022.

<sup>cxv</sup> China Introduces New Negative List 2020 and New FTZ Negative List 2020. [https://www.cms-lawnow.com/ealerts/2020/07/china-introduces-new-negative-list-2020-and-new-ftz-negative-list-2020?cc\\_lang=en](https://www.cms-lawnow.com/ealerts/2020/07/china-introduces-new-negative-list-2020-and-new-ftz-negative-list-2020?cc_lang=en). Consulté le 1 février 2022.

<sup>cxvi</sup> Made In China 2025 Explained. <https://projects.iq.harvard.edu/innovation/made-china-2025-explained>. Consulté le 1 février 2022.



---

cxvii « Critical Information Infrastructure - China's New Cybersecurity Regulations ». China Briefing News, 30 août 2021, <https://www.china-briefing.com/news/critical-information-infrastructure-chinas-new-regulations/>. Consulté le 1 février 2022.

cxviii Hosny, Ahmed et al. « Intelligence Artificielle en Radiologie ». Nature Reviews Cancer, vol. 18, n° 8, août 2018, p. 500-10. [www.nature.com](https://www.nature.com), doi: 10.1038/s41568-018-0016-5. Consulté le 1 février 2022.

cxix « The Big Tech In Healthcare Report: How Facebook, Apple, Microsoft, Google, & Amazon Are Battling For The \$8.3T Market ». CB Insights Research, <https://www.cbinsights.com/research/report/famga-big-tech-healthcare/>. Consulté le 1 février 2022.

cxix Ltd, Meticulous Market Research Pvt. « Healthcare Chatbots Market worth \$703.2 million by 2025 - Exclusive Report by Meticulous Research® ». GlobeNewswire News Room, 15 janvier 2020, <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2020/01/15/1970794/0/en/Healthcare-Chatbots-Market-worth-703-2-million-by-2025-Exclusive-Report-by-Meticulous-Research.html>. Consulté le 24 février 2022.

cxix Insights, UnivDatos Market. Healthcare Chatbot Market to Reach US\$ 967.7 Million by 2027, Globally | CAGR: 21.56% | UnivDatos Market Insights. <https://www.prnewswire.com/news-releases/healthcare-chatbot-market-to-reach-us-967-7-million-by-2027--globally-cagr-21-56univdatos-market-insights-301241493.html>. Consulté le 1 février 2022.

cxix 2020 Annual Report to Congress. Chapter 2 Section 3 - U.S.-China Links in Healthcare and Biotechnology, <https://www.uscc.gov/annual-report/2020-annual-report-congress>. Consulté le 1 février 2022.

cxix {author.fullName}. « Revealed: Google AI Has Access to Huge Haul of NHS Patient Data ». New Scientist, <https://www.newscientist.com/article/2086454-revealed-google-ai-has-access-to-huge-haul-of-nhs-patient-data/>. Consulté le 24 février 2022.

cxix « China's AI Champions ». China Experience, <https://www.china-experience.com/china-experience-insights/chinas-ai-champions>. Consulté le 1 février 2022.

cxix Inc, Baidu. Baidu Leads China in Artificial Intelligence Patents, Is Poised to Bring About Intelligent Transformation. <https://www.prnewswire.com/news-releases/baidu-leads-china-in-artificial-intelligence-patents-is-poised-to-bring-about-intelligent-transformation-301182591.html>. Consulté le 1 février 2022.

cxix « European Spending on Artificial Intelligence Will Reach \$22 Billion in 2022, Supported by Strong Investments Across Banking and Manufacturing, Says IDC ». IDC: The premier global market intelligence company, <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prEUR148297521>. Consulté le 4 février 2022.

cxix Williams, Joe. « Limitless Silicon Valley Cash Drives AI Hype Cycle to New Heights ». Protocol — The People, Power and Politics of Tech, 22 juillet 2021, <https://www.protocol.com/enterprise/ai-startup-funding-2021>. Consulté le 4 février 2022.

cxix « De meilleures données, de meilleurs services : les consommateurs chinois sont heureux de partager leurs détails ». South China Morning Post, 6 novembre 2018, <https://www.scmp.com/business/companies/article/2171907/nine-10-chinese-consumers-are-ready-share-data-better-services>. Consulté le 4 février 2022.

---

## Non plagiat



### ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné(e) Cindy Virginie Pelou

Déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. (*Décret n°92-657 du 13 juillet 1992*)

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Signature :

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Cindy Pelou', written over a horizontal line.



## Signatures du Directeur de thèse et du Doyen



université  
de TOURS

Faculté de pharmacie  
Philippe-Maupas

### SIGNATURES DU DIRECTEUR DE THESE ET DU DOYEN

N° Étudiant : 21103155

N° Thèse : 81

Nom et Prénom : Cindy Virginie Pelou

Sujet : APERÇU ET ANALYSE DES SOLUTIONS D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN SANTÉ DISPONIBLES DANS LA REGION ASIE PACIFIQUE

Tours, le : 17 mars 2023

Le(s) Directeur(s) de Thèse :

Jillian MARC

Vu et Transmis :  
Le Doyen

Le directeur de la Faculté  
des Sciences Pharmaceutiques

Pr Denys BRAND

## Résumé de la Thèse

NOM, PRÉNOM de l'étudiant : CINDY VIRGINIE PELOU <span style="float: right;">N° 81</span>	
<b>TITRE DE LA THÈSE</b>	
Aperçu et analyse des solutions d'intelligence artificielle en santé disponibles dans la région Asie Pacifique	
<b>RÉSUMÉ DE LA THÈSE</b>	
L'intelligence artificielle (IA) semble être devenue un élément incontournable de la transformation de notre époque. Au cours des dernières années, nous avons constaté une adoption croissante de l'IA dans tous les secteurs, y compris en santé. Cela est particulièrement vrai en Asie-Pacifique, en partie en raison du vieillissement rapide de sa population. Cette thèse cartographie les solutions de santé utilisant l'IA disponibles en APAC et analyse les priorités et les stratégies des acteurs dominants de ce marché.	
<b>MOTS-CLÉS SIGNIFICATIFS DE SON CONTENU, ATTRIBUÉS PAR LE CANDIDAT EN LIAISON AVEC LA BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE ET LES MEMBRES DU JURY</b>	
Intelligence artificielle, Asie-Pacifique, santé numérique, innovation, numérisation	
<b>JURY</b>	
PRÉSIDENT : Mme MAUPOIL Véronique, Enseignant chercheur à l'UFR de Sciences MEMBRES : M. LIGONIE Adrien, Délégué médical hospitalier en Oncologie, Pharmacien - NANTES M. MARC Jillian, Maître de Conférences, Enseignant chercheur, Faculté de Pharmacie - TOURS Mme BURGAUD Sylvie, Pharmacien, Pharmacie Paillhou - TOURS	
<b>DATE ET LIEU DE SOUTENANCE</b>	
Le 7 novembre 2022 10H00 Site Grandmont Visioconférence - Salle C 1010	