

**THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

**Soutenue publiquement le 18 novembre 2024
Par Mme Anaëlle DUCHEMIN**

Thèse réalisée en commun avec Thibault GOUPIL

**Utilisation de l'intelligence artificielle dans le
monde pharmaceutique**

L'intelligence artificielle dans l'industrie pharmaceutique

Membres du jury :

Président : Bertrand DÉCAUDIN, PU-PH, Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière

Assesseur : Claire PINÇON, MCU, Biomathématiques

Membre(s) extérieur(s) :

- Léa CAGNIEUX, Spécialiste Senior Performance Qualité Lyo à GSK Saint-Amand-les-Eaux
- Christophe KARAS, Pharmacien titulaire d'officine, Pharmacie des Terrils à Liévin

  Université de Lille	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 1/9

REDACTION	VERIFICATION	APPROBATION
Audrey Hennebelle Assistante de direction	Cyrille Porta Responsable des Services	Delphine Allorge Doyen

Université de Lille

Président
Premier Vice-président
Vice-présidente Formation
Vice-président Recherche
Vice-président Ressources humaines
Directrice Générale des Services

Régis BORDET
Etienne PEYRAT
Corinne ROBACZEWSKI
Olivier COLOT
Bertrand DÉCAUDIN
Anne-Valérie CHIRIS-FABRE

UFR3S

Doyen
Premier Vice-Doyen, Vice-Doyen RH, SI et Qualité
Vice-Doyenne Recherche
Vice-Doyen Finances et Patrimoine
Vice-Doyen International
Vice-Doyen Coordination pluriprofessionnelle et Formations sanitaires
Vice-Doyenne Formation tout au long de la vie
Vice-Doyen Territoire-Partenariats
Vice-Doyen Santé numérique et Communication
Vice-Doyenne Vie de Campus
Vice-Doyen étudiant

Dominique LACROIX
Hervé HUBERT
Karine FAURE
Damien CUNY
Vincent DERAMECOURT
Sébastien D'HARANCY
Caroline LANIER
Thomas MORGENROTH
Vincent SOBANSKI
Anne-Laure BARBOTIN
Valentin ROUSSEL

Faculté de Pharmacie

Doyen
Premier Assesseur et
Assesseur à la Santé et à l'Accompagnement
Assesseur à la Vie de la Faculté et
Assesseur aux Ressources et Personnels
Responsable des Services
Représentant étudiant
Chargé de mission 1er cycle
Chargée de mission 2eme cycle
Chargé de mission Accompagnement et Formation à la Recherche
Chargé de mission Relations Internationales
Chargée de Mission Qualité
Chargé de mission dossier HCERES

Delphine ALLORGE

Anne GARAT

Emmanuelle LIPKA
Cyrille PORTA
Honoré GUISE
Philippe GERVOIS
Héloïse HENRY
Nicolas WILLAND
Christophe FURMAN
Marie-Françoise ODOU
Réjane LESTRELIN

  Université de Lille	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 2/9

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers (PU-PH)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
Mme	ALLORGE	Delphine	Toxicologie et Santé publique	81
M.	BROUSSEAU	Thierry	Biochimie	82
M.	DÉCAUDIN	Bertrand	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	81
M.	DINE	Thierry	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	81
Mme	DUPONT-PRADO	Annabelle	Hématologie	82
Mme	GOFFARD	Anne	Bactériologie - Virologie	82
M.	GRESSIER	Bernard	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	81
M.	ODOU	Pascal	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	80
Mme	POULAIN	Stéphanie	Hématologie	82
M.	SIMON	Nicolas	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	81
M.	STAELS	Bart	Biologie cellulaire	82

Professeurs des Universités (PU)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
M.	ALIOUAT	El Moukhtar	Parasitologie - Biologie animale	87
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Biophysique - RMN	85
M.	BERLARBI	Karim	Physiologie	86
M.	BERTIN	Benjamin	Immunologie	87
M.	BLANCHEMAIN	Nicolas	Pharmacotechnie industrielle	85
M.	CARNOY	Christophe	Immunologie	87
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	86

	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 3/9

M.	CUNY	Damien	Sciences végétales et fongiques	87
Mme	DELBAERE	Stéphanie	Biophysique - RMN	85
Mme	DEPREZ	Rebecca	Chimie thérapeutique	86
M.	DEPREZ	Benoît	Chimie bioinorganique	85
M.	DURIEZ	Patrick	Physiologie	86
M.	ELATI	Mohamed	Biomathématiques	27
M.	FOLIGNÉ	Benoît	Bactériologie - Virologie	87
Mme	FOULON	Catherine	Chimie analytique	85
M.	GARÇON	Guillaume	Toxicologie et Santé publique	86
M.	GOOSSENS	Jean-François	Chimie analytique	85
M.	HENNEBELLE	Thierry	Pharmacognosie	86
M.	LEBEGUE	Nicolas	Chimie thérapeutique	86
M.	LEMDANI	Mohamed	Biomathématiques	26
Mme	LESTAVEL	Sophie	Biologie cellulaire	87
Mme	LESTRELIN	Réjane	Biologie cellulaire	87
Mme	LIPKA	Emmanuelle	Chimie analytique	85
Mme	MELNYK	Patricia	Chimie physique	85
M.	MILLET	Régis	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
Mme	MUHR-TAILLEUX	Anne	Biochimie	87
Mme	PERROY	Anne-Catherine	Droit et Economie pharmaceutique	86
Mme	RIVIÈRE	Céline	Pharmacognosie	86
Mme	ROMOND	Marie-Bénédicte	Bactériologie - Virologie	87
Mme	SAHPAZ	Sevser	Pharmacognosie	86
M.	SERGHERAERT	Éric	Droit et Economie pharmaceutique	86

  Université de Lille	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 4/9

M.	SIEPMANN	Juergen	Pharmacotechnie industrielle	85
Mme	SIEPMANN	Florence	Pharmacotechnie industrielle	85
M.	WILLAND	Nicolas	Chimie organique	86

Maîtres de Conférences - Praticiens Hospitaliers (MCU-PH)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
Mme	CUVELIER	Élodie	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	81
Mme	DANEL	Cécile	Chimie analytique	85
Mme	DEMARET	Julie	Immunologie	82
Mme	GARAT	Anne	Toxicologie et Santé publique	81
Mme	GENAY	Stéphanie	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	81
M.	GRZYCH	Guillaume	Biochimie	82
Mme	HENRY	Héloïse	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	80
M.	LANNOY	Damien	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	80
Mme	MASSE	Morgane	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	81
Mme	ODOU	Marie-Françoise	Bactériologie - Virologie	82

Maîtres de Conférences des Universités (MCU)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
Mme	ALIOUAT	Cécile-Marie	Parasitologie - Biologie animale	87
M.	ANTHÉRIEU	Sébastien	Toxicologie et Santé publique	86
Mme	AUMERCIER	Pierrette	Biochimie	87
M.	BANTUBUNGI-BLUM	Kadiombo	Biologie cellulaire	87
M.	BERTHET	Jérôme	Biophysique - RMN	85

  Université de Lille	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 5/9

M.	BOCHU	Christophe	Biophysique - RMN	85
M.	BORDAGE	Simon	Pharmacognosie	86
M.	BOSC	Damien	Chimie thérapeutique	86
Mme	BOU KARROUM	Nour	Chimie bioinorganique	
M.	BRIAND	Olivier	Biochimie	87
Mme	CARON-HOUDE	Sandrine	Biologie cellulaire	87
Mme	CARRIÉ	Hélène	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	86
Mme	CHABÉ	Magali	Parasitologie - Biologie animale	87
Mme	CHARTON	Julie	Chimie organique	86
M.	CHEVALIER	Dany	Toxicologie et Santé publique	86
Mme	DEMANCHE	Christine	Parasitologie - Biologie animale	87
Mme	DEMARQUILLY	Catherine	Biomathématiques	85
M.	DHIFLI	Wajdi	Biomathématiques	27
Mme	DUMONT	Julie	Biologie cellulaire	87
M.	EL BAKALI	Jamal	Chimie thérapeutique	86
M.	FARCE	Amaury	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
M.	FLIPO	Marion	Chimie organique	86
M.	FRULEUX	Alexandre	Sciences végétales et fongiques	
M.	FURMAN	Christophe	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
M.	GERVOIS	Philippe	Biochimie	87
Mme	GOOSSENS	Laurence	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
Mme	GRAVE	Béatrice	Toxicologie et Santé publique	86
M.	HAMONIER	Julien	Biomathématiques	26
Mme	HAMOUDI-BEN YELLES	Chérifa-Mounira	Pharmacotechnie industrielle	85

  Université de Lille	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 6/9

Mme	HANNOTHIAUX	Marie-Hélène	Toxicologie et Santé publique	86
Mme	HELLEBOID	Audrey	Physiologie	86
M.	HERMANN	Emmanuel	Immunologie	87
M.	KAMBIA KPAKPAGA	Nicolas	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	86
M.	KARROUT	Younes	Pharmacotechnie industrielle	85
Mme	LALLOYER	Fanny	Biochimie	87
Mme	LECOEUR	Marie	Chimie analytique	85
Mme	LEHMANN	Hélène	Droit et Economie pharmaceutique	86
Mme	LELEU	Natascha	Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol	86
M.	LIBERELLE	Maxime	Biophysique - RMN	
Mme	LOINGEVILLE	Florence	Biomathématiques	26
Mme	MARTIN	Françoise	Physiologie	86
M.	MENETREY	Quentin	Bactériologie - Virologie	
M.	MOREAU	Pierre-Arthur	Sciences végétales et fongiques	87
M.	MORGENROTH	Thomas	Droit et Economie pharmaceutique	86
Mme	MUSCHERT	Susanne	Pharmacotechnie industrielle	85
Mme	NIKASINOVIC	Lydia	Toxicologie et Santé publique	86
Mme	PINÇON	Claire	Biomathématiques	85
M.	PIVA	Frank	Biochimie	85
Mme	PLATEL	Anne	Toxicologie et Santé publique	86
M.	POURCET	Benoît	Biochimie	87
M.	RAVAUX	Pierre	Biomathématiques / Innovations pédagogiques	85
Mme	RAVEZ	Séverine	Chimie thérapeutique	86
Mme	ROGEL	Anne	Immunologie	

 	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 7/9

M.	ROSA	Mickaël	Hématologie	
M.	ROUMY	Vincent	Pharmacognosie	86
Mme	SEBTI	Yasmine	Biochimie	87
Mme	SINGER	Elisabeth	Bactériologie - Virologie	87
Mme	STANDAERT	Annie	Parasitologie - Biologie animale	87
M.	TAGZIRT	Madjid	Hématologie	87
M.	VILLEMAGNE	Baptiste	Chimie organique	86
M.	WELTI	Stéphane	Sciences végétales et fongiques	87
M.	YOUS	Saïd	Chimie thérapeutique	86
M.	ZITOUNI	Djamel	Biomathématiques	85

Professeurs certifiés

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement
Mme	FAUQUANT	Soline	Anglais
M.	HUGES	Dominique	Anglais
Mme	KUBIK	Laurence	Anglais
M.	OSTYN	Gaël	Anglais

Professeurs Associés

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
M.	DAO PHAN	Haï Pascal	Chimie thérapeutique	86
M.	DHANANI	Alban	Droit et Economie pharmaceutique	86

  Université de Lille	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 8/9

Maîtres de Conférences Associés

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
M.	COUSEIN	Etienne	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	
Mme	CUCCHI	Malgorzata	Biomathématiques	85
M.	DUFOSSEZ	François	Biomathématiques	85
M.	FRIMAT	Bruno	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	85
M.	GILLOT	François	Droit et Economie pharmaceutique	86
M.	MITOUMBA	Fabrice	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	86
M.	PELLETIER	Franck	Droit et Economie pharmaceutique	86

Assistants Hospitalo-Universitaire (AHU)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
M.	BOUDRY	Augustin	Biomathématiques	
Mme	DERAMOUDT	Laure	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	
Mme	GILLIOT	Sixtine	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	
M.	GISH	Alexandr	Toxicologie et Santé publique	
Mme	NEGRIER	Laura	Chimie analytique	

Hospitalo-Universitaire (PHU)

	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
M.	DESVAGES	Maximilien	Hématologie	
Mme	LENSKI	Marie	Toxicologie et Santé publique	

  Université de Lille	LISTE GEREE	LG/FAC/001
FACULTE DE PHARMACIE	Enseignants et Enseignants-chercheurs 2023-2024	Version 2.2 Applicable au 02/01/2022
Document transversal		Page 9/9

Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherche (ATER)

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement	Section CNU
Mme	BERNARD	Lucie	Physiologie	
Mme	BARBIER	Emeline	Toxicologie	
Mme	COMAPGNE	Nina	Chimie Organique	
Mme	COULON	Audrey	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique	
M.	DUFOSSEZ	Robin	Chimie physique	
Mme	KOUAGOU	Yolène	Sciences végétales et fongiques	
M.	MACKIN MOHAMOUR	Synthia	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière	

Enseignant contractuel

Civ.	Nom	Prénom	Service d'enseignement
M.	MARTIN MENA	Anthony	Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière
M.	MASCAUT	Daniel	Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique
Mme	NDIAYE-BOIDIN	Maguette	Anglais
M.	ZANETTI	Sébastien	Biomathématiques

CYCLE DE VIE DU DOCUMENT

Version	Modifié par	Date	Principales modifications
1.0		20/02/2020	Création
2.0		02/01/2022	Mise à jour
2.1		21/06/2022	Mise à jour
2.2		01/02/2024	Mise à jour

UFR3S-Pharmacie

L'Université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont propres à leurs auteurs.



Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier tout particulièrement le Docteur Bertrand DECAUDIN d'avoir accepté de présider notre jury de thèse.

Je remercie également le Professeur Claire PINÇON de nous avoir accordé sa confiance, de nous avoir guidé et conseillé tout au long de cette thèse.

J'adresse ensuite mes remerciements aux Docteurs Léa CAGNIEUX et Christophe KARAS qui nous font l'honneur de juger notre travail.

Je souhaiterais exprimer ma profonde gratitude à mon binôme de thèse et de vie pour son soutien sans faille et la synergie de notre équipe.

Je remercie l'ensemble des membres de ma famille et en particulier ma mère Stéphanie DUCHEMIN, ma sœur Margaux DUCHEMIN ainsi que mes grands-parents, Jean-Pierre et Nicole RYCKEMBUSCH qui m'ont toujours soutenue et encouragée dans mes études.

Et je remercie mes amis d'avoir été présents tout au long de mes études.

Enfin, je remercie l'ensemble des personnes que je n'ai pas citées mais qui se reconnaîtront.

Pour finir, je tiens à remercier mon père, Mickaël DUCHEMIN d'avoir toujours été une source d'inspiration, un modèle pour moi et de m'avoir enseigné la valeur du travail. Je lui dédie cette thèse.

Table des matières

Remerciements.....	11
Liste des figures.....	15
Liste des acronymes.....	17
I) Introduction.....	18
II) Généralités sur l'intelligence artificielle (partie commune)	19
1) L'histoire de l'intelligence artificielle	19
1.1) Emergence de l'IA.....	19
1.2) Progrès et 1 ^{er} hiver de l'IA.....	21
1.3) Nouvel essor et second hiver de l'IA.....	22
1.4) L'IA à l'aube du 21 ^{ème} siècle.....	23
2) L'intelligence artificielle actuellement	25
2.1) Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ?	25
2.2) L'IA de nos jours.....	31
2.3) Utilisation actuelle de l'intelligence artificielle en santé	32
2.3.1) Détection précoce des maladies	32
2.3.2) Aide au diagnostic.....	33
2.3.3) Utilisation dans la chirurgie	34
2.3.4) Utilisation hospitalière	35
III) L'industrie pharmaceutique 4.0 et l'intelligence artificielle.....	37
1) L'évolution de l'industrie pharmaceutique : du 1.0 à nos jours	37
1.1) L'industrie 1.0	37
1.2) L'industrie 2.0	38
1.3) L'industrie 3.0	39
1.4) Industrie 4.0.....	41
2) Concepts de l'IA dans l'industrie 4.0	44

2.1) La donnée au cœur de l'IA	44
2.2) Perspectives de l'intelligence artificielle en industrie pharmaceutique	46
2.2.1) Le lean management et la supply chain.....	46
2.2.2) La maintenance prédictive	49
2.2.3) Les jumeaux numériques	51
2.2.4) Les robots collaboratifs	53
2.2.5) La réalité virtuelle	56
3) Etude de cas : l'intelligence artificielle au sein de compagnies pharmaceutiques	57
3.1) Contexte	57
3.2) Cas d'utilisations	58
3.2.1) SANOFI	58
3.2.1.1) Présentation	58
3.2.1.2) « Plai »	59
3.2.1.3) Partenariats	60
3.2.2) GSK.....	62
3.2.2.1) Présentation	62
3.2.2.2) Concepts de l'IA	62
3.2.2.3) Partenariats	64
3.2.2.4) Mise en application	65
3.2.3) Exscientia	65
3.2.4) Insilico Medecine.....	66
IV) Enjeux de l'intelligence artificielle (partie commune).....	67
1) Enjeux de sécurité et économiques	67
1.1) Enjeux de sécurité : le deepfake	67
1.2) Enjeux économiques : la transformation des emplois	70

2) Enjeux juridiques	72
2.1) Première réglementation sur l'IA.....	72
2.2) Contours de l'utilisation de l'IA	73
3) Enjeux environnementaux	75
3.1) Stockage et matériel.....	75
3.2) Puissance de calcul.....	78
3.3) Déchets électroniques.....	79
3.4) Une intelligence artificielle durable ?.....	80
V) Conclusion.....	82
Bibliographie	83

Liste des figures

Figure 1 : Portrait d'Alan Turing

Figure 2 : Conférence de Dartmouth

Figure 3 : Hal 9000

Figure 4 : Match entre Garry Kasparov et Deeper Blue

Figure 5 : Match entre Lee Sedol et Alpha Go

Figure 6 : Evolution de l'intelligence artificielle

Figure 7 : Fonctionnement du Machine Learning

Figure 8 : Fonctionnement du Deep Learning

Figure 9 : Interactions IA/ML/DL

Figure 10 : Exemples d'utilisation de l'intelligence artificielle dans la vie quotidienne

Figure 11 : Algorithme élaboré par le MIT capable d'identifier une femme à haut risque de cancer du sein (à gauche) quatre ans avant l'apparition de lésions (à droite)

Figure 12 : Application de l'intelligence artificielle en chirurgie

Figure 13 : Lithographie de la Pharmacie Centrale de France vers 1877

Figure 14 : Concept PAT et QbB

Figure 15 : Concept de MES et de SCADA

Figure 16 : Photo d'un SCADA

Figure 17 : La chaîne de valeur pharmaceutique contrôlée, hyper-connectée, numérisée

Figure 18 : Le principe ETL

Figure 19 : Les étapes de la transformation des données vers l'industrie 4.0

Figure 20 : Les 8 "muda" du lean management

Figure 21 : La roue de Deming

Figure 22 : La méthode 5S

Figure 23 : Processus de maintenance prédictive

Figure 24 : Fonctionnement d'un jumeau numérique

Figure 25 : Programmation d'un cobot

Figure 26 : Applications cobot

Figure 27 : Top 10 du Pharma AI Readiness Index

Figure 28 : Phases de développement d'un médicament

Figure 29 : Comparatif des images du président Volodymyr Zelensky (à droite : l'image truquée, à gauche : l'image réelle)

Figure 30 : Résultats du rapport « Sumsb Research : Global Deepfake Incidents Surge Tenfold from 2022 to 2023

Figure 31 : Tâches moyennement et fortement exposées à l'IA générative, par groupe professionnel

Figure 32 : Classement des risques liés à l'utilisation de l'intelligence artificielle

Figure 33 : Photo d'un data center

Figure 34 : Graphique de l'empreinte carbone

Figure 35 : Nombre de millions de tonnes de déchets électroniques générés par année

Liste des acronymes

IA : Intelligence Artificielle
CNIL : Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés
IMC : Indice de Masse Corporelle
ECG : Electrocardiogramme
FA : Fibrillation Auriculaire
AVC : Accident Vasculaire Cérébral
UE : Union Européenne
IGAS : Inspection Générale des Affaires Sociales
EIG : Effet Indésirable Grave
CH : Centre Hospitalier
ALCOE+ : Attribuable, Lisible, Contemporain, Original et Exact +
CQA : Attributs Critiques de la Qualité
CPP : Paramètres Critiques des Procédés
FDA : Food and Drug Administration
ETL : Extraction, Transformation and Load
ICH : International Council for Harmonisation
INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité
IoT : Internet of Things (Internet des objets)
PAT : Process Analytical Technology
PDCA : Plan, Do, Check and Act
QbD : Quality by Design
R&D : Recherche et Développement
VR : Virtual Reality
SALA : Systèmes d'Armes Létales Autonomes
OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique
ILO : International Labor Organization
INSEE : Institut National des Statistiques et des Etudes Economiques
ICT : Information and Communication Technology
EEE : Equipements Electriques et Electroniques
UNITAR : United Nation Institute For Training and Research
ESSCA : Ecole Supérieure des Sciences Commerciales d'Angers

I) Introduction

L'intelligence artificielle aujourd'hui est de plus en plus présente dans notre société, voire même parfois dans notre vie de tous les jours, sans qu'on le sache.

L'IA a aujourd'hui intégré de nombreux domaines et le secteur pharmaceutique ne fait pas exception. De la recherche fondamentale aux applications cliniques, en passant par la production industrielle, l'intelligence artificielle est actuellement au centre des transformations qui s'opèrent dans ces différents secteurs. L'industrie pharmaceutique se dirige depuis quelques années déjà vers un nouveau modèle intégrant plusieurs concepts novateurs, l'industrie 4.0.

L'industrie 4.0 et l'intelligence artificielle sont aujourd'hui étroitement liées par la transition vers les usines du futur utilisant des outils tels que le machine learning, le deep learning, ou encore l'internet des objets. Bien que ces transformations arrivent progressivement, elles sont à surveiller notamment ce qui concerne la sécurité ou encore l'impact environnemental.

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à l'histoire de l'intelligence artificielle, de son émergence à nos jours, et à ses applications actuelles en santé. Dans un second temps, nous allons nous intéresser à l'ensemble des perspectives qu'elle peut offrir au sein de l'industrie pharmaceutique, suivi d'une étude de cas sur des entreprises travaillant actuellement avec. Enfin, nous aborderons les enjeux de l'utilisation de l'intelligence artificielle tant d'un point de vue juridique que d'un point de vue environnemental.

II) Généralités sur l'intelligence artificielle (partie commune)

1) L'histoire de l'intelligence artificielle

1.1) Emergence de l'intelligence artificielle

Les premières notions d'intelligence artificielle peuvent se retrouver avant même le début du XIX^{ème} siècle ; on peut les voir notamment dans le roman de science-fiction « *Erewhon* » de Samuel Butler (1). Il s'agit d'un roman utopique paru en 1872. On y suit les pérégrinations d'un personnage dans un monde différent du nôtre. Dans cette œuvre, chaque chapitre est une scénette différente dans laquelle le personnage se pose de nombreuses questions. Il y en a 3 (les chapitres XXIII, XXIV, XXV) qui portent le titre « Le Livre des Machines ». Dans ces chapitres le personnage, développe un raisonnement autour de l'évolution de la conscience et de l'intelligence des machines. Il évoque notamment « Le fait que les machines ne possèdent actuellement que peu de conscience ne nous autorise nullement à croire que la conscience mécanique n'atteindra pas à la longue un développement dangereux pour notre espèce ». Ces propos, bien qu'extraits d'une œuvre utopique et satirique, constituent en quelque sorte les prémices de questions que se poseront des scientifiques près de 80 ans plus tard.

Ce n'est qu'en 1950 que l'intelligence artificielle (bien que le terme n'existe pas encore) devient un concept grâce au mathématicien Alan Turing (2). Il est décrit comme l'un des pionniers de l'intelligence artificielle à la suite de la publication d'un article intitulé « *Computing Machinery and Intelligence* » (3). Dans cet article, Alan Turing (Figure 1) développe le concept « du jeu de l'imitation » qu'on appellera plus tard le test de Turing. Le but consiste à mesurer la capacité d'une machine à faire preuve de signes d'intelligence humaine (4). Le test est en réalité assez simple : un évaluateur humain doit juger une conversation entre un humain et une machine. Il est important de mentionner que l'évaluateur sait qu'une des 2 parties est une machine mais pas laquelle. Si, au bout de 5 minutes de conversation, l'évaluateur est dans l'impossibilité

de déterminer qui est l'homme et qui est la machine, alors la machine a passé le test avec succès.

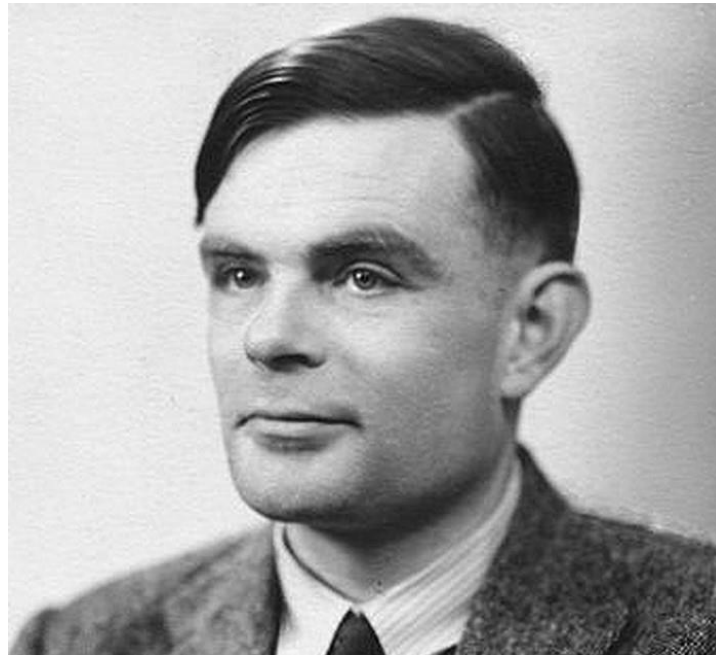


Figure 1 : portrait d'Alan Turing (5)

Le terme « intelligence artificielle » voit officiellement le jour en 1956, il est créé par le mathématicien John McCarthy lors de la conférence de Dartmouth (Figure 2). Cette conférence, presque anonyme (seulement 20 personnes dans l'auditoire) établit l'intelligence artificielle comme une nouvelle discipline scientifique à part entière.



Figure 2 : conférence de Dartmouth (1956) (6)

Toujours en 1956, un chercheur et un économiste, Allen Newell et Herbert Simon, créent un logiciel appelé « Logic Theorist ». Ce logiciel est capable de réaliser des démonstrations de théorèmes mathématiques sans l'aide d'un opérateur humain.

Si jusqu'alors on parlait d'algorithmes, à partir de 1957 on peut commencer à évoquer le terme de « machines ». Cette année-là, en effet, le psychologue Frank Rosenblatt développe le « Perceptron » qui détient la faculté de reconnaître une lettre de l'alphabet, ce qui constitue une forme très basique de Machine Learning. (2)

1.2) Progrès et 1^{er} hiver de l'intelligence artificielle

En 1965, on assiste à une nouvelle percée dans le domaine de l'intelligence artificielle. Joseph Weizenbaum, un informaticien, développe le programme informatique « ELIZA ». Ce programme a pour but de remplacer un psychothérapeute lors d'entretiens thérapeutiques avec des patients. La création de ce programme est un évènement important, car il s'agit du premier programme à réussir le test de Turing. Pour autant, cette expérimentation ne fonctionne que quelques minutes. (2)

Au cours des années 1960, on observe l'apparition progressive de l'intelligence artificielle au sein de la culture populaire. C'est le cas notamment dans la saga littéraire de science fiction « Dune » écrite par Frank Herbert dès 1965. Dans cette saga, les machines pensantes douées d'intelligence artificielle vont affronter les humains.

Au cinéma, on peut citer le film « 2001, l'Odyssée de l'Espace » de Stanley Kubrick sorti en 1968 et dans lequel on peut y voir l'ordinateur intelligent HAL (Figure 3) capable de piloter un vaisseau spatial. (2)



Figure 3 : HAL 9000 (« 2001, l'Odyssée de l'Espace ») (7)

A la fin de cette décennie, une période de crise arrive pour l'intelligence artificielle. La recherche et les investissements diminuent drastiquement du fait de la désillusion causée par le manque d'avancées et de progrès dans le domaine. A cette même époque, les premières critiques sur l'intelligence artificielle émergent également. Cette période est qualifiée de « premier hiver de l'IA ».

1.3) Nouvel essor et second hiver de l'IA

Dans les années 1980, les investissements dans l'intelligence artificielle repartent à la hausse. Les projets de recherche sont nombreux ; c'est l'époque des « systèmes experts ». On cherche désormais à développer des machines capables d'effectuer les mêmes analyses qu'un être humain dans un domaine spécifique, comme un diagnostic médical. On va également retrouver ces systèmes experts dans la finance ou encore dans la détection de fraudes aux cartes bancaires.

En revanche, à la fin de la décennie, une nouvelle période de crise commence, en raison notamment de l'émergence des ordinateurs personnels. Cette nouvelle technologie incite les investisseurs à prioriser leurs financements dans l'informatique conventionnelle plutôt que dans l'intelligence artificielle. Cette période constitue le « second hiver de l'IA ».

1.4) L'IA à l'aube du 21^{ème} siècle

Ce n'est que dans les années 90 que l'intelligence artificielle reviendra sur le devant de la scène, stimulée par les progrès de l'informatique et le début de l'ère du « big data ».

En 1996, on assiste à un évènement pivot dans l'histoire de l'intelligence artificielle. Un match d'échecs est organisé entre Garry Kasparov, champion du monde reconnu comme grand maître international, et Deep Blue, un ordinateur conçu par la société IBM. L'affrontement entre l'humain et la machine se fait en 6 parties et voit Kasparov sortir vainqueur de ce duel sur le score de 4-2. L'année suivante, un nouveau match a lieu (Figure 4) et cette fois-ci Deeper Blue, une version évoluée du précédent programme, sort vainqueur sur le score de 3,5-2,5. La victoire peut être nuancée car sur l'une des parties, l'ordinateur a joué un coup qui a complètement déstabilisé Kasparov. En effet, il sera révélé plus tard que ce coup était en réalité un bug et non une stratégie de l'ordinateur. Il est difficile de déterminer à quel point ce coup a pu influencer l'issue du match, mais la victoire a bien été attribuée à Deeper Blue.



Figure 4 : match entre Garry Kasparov et Deeper Blue (1997) (8)

Cette période va être marquée par l'essor progressif du Deep Learning grâce à des chercheurs tels que Yann LeCun (chercheur en intelligence artificielle et considéré comme l'un des inventeurs du Deep Learning), qui contribuent aux avancées dans la reconnaissance d'écriture et d'image.

Quelques années plus tard, l'intelligence artificielle fait de nouveau parler d'elle par le biais d'un programme appelé « Watson ». Ce programme créé par IBM réussit à remporter le jeu de culture générale « Jeopardy ! ».

En 2016, Google met au point le logiciel « AlphaGo » dont l'objectif est de jouer au jeu de go face à des adversaires humains. Le programme acquiert une certaine notoriété lorsqu'on le met à l'épreuve face au champion du monde du jeu de go Lee Sedol (Figure 5). Au terme d'un match en 5 manches, Lee Sedol s'incline sur un score de 4-1 en faveur du logiciel. Il y a donc un réel progrès et de grandes avancées permises par le Deep Learning qui à ce stade a déjà fait ses preuves.



Figure 5 : match entre Lee Sedol et AlphaGo (2016) (9)

2) L'intelligence artificielle actuellement

2.1) Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ?

Si l'on doit introduire l'IA (Intelligence Artificielle) qui est un domaine très vaste, la première chose à faire est d'en donner une définition. Selon la CNIL, (Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés), (10) l'intelligence artificielle est « un procédé logique et automatisé reposant généralement sur un algorithme et en mesure de réaliser des tâches bien définies ». Cette définition peut être complétée par celle du Parlement Européen qui dit que « constitue une intelligence artificielle tout outil utilisé par une machine afin de reproduire des comportements liés aux humains, tels que le raisonnement, la planification et la créativité » (11). Cette définition sera certainement élargie en raison des progrès récents de l'IA.

Ainsi, tout système mettant en œuvre des mécanismes qui tend à reproduire les capacités humaines peut être qualifié d'intelligence artificielle. Cette intelligence artificielle se divise en différentes catégories selon la tâche qui lui est attribuée et son degré de performance.

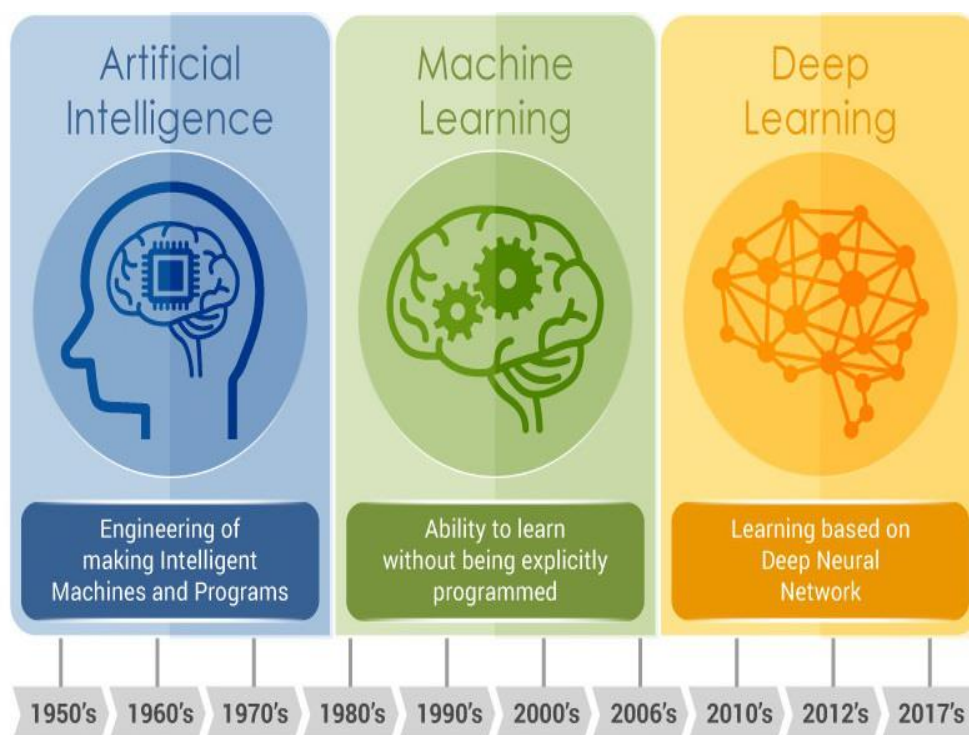


Figure 6 : évolution de l'intelligence artificielle (12)

Pour commencer, on peut parler d'IA basique ou symbolique, il s'agit d'une IA qui va essentiellement exécuter les ordres qu'on lui donne. Avec les progrès de l'IA on parle aujourd'hui de Machine Learning et de Deep Learning (Figure 6).

Le Machine Learning (13) peut se définir comme un sous domaine de l'IA (Figure 7) où un algorithme apprend à réaliser des tâches sur la base d'une phase d'apprentissage avec des données d'entrée connues et des données de sortie attendues. Puis l'algorithme sera déployé dans le secteur que l'on souhaite une fois opérationnel. Un des exemples de machine learning est celui de « cluster ». Il consiste en une discrimination des données afin de créer des groupes homogènes. Le programme est entraîné sur la base de certains critères de sélection et fera la répartition en fonction de ceux-ci. Ce type de programme n'apprend pas par lui-même. Si l'on soumet des données pour lesquelles il n'y a pas eu d'entraînement, il n'effectuera pas la tâche correctement. Il faudra donc de nouveau faire passer l'algorithme par une phase d'entraînement pour traiter ces données. Parmi les deux types de données à disposition (structurées et non structurées), on utilisera plus souvent des données organisées sous un format prédéfini. Ces données sont issues de sources différentes, mais organisées de manière claire, généralement sous forme de tableau (exemple : âge, poids, IMC...). L'apprentissage à partir de ces données permet, à terme, de créer des modèles prédictifs en fonction de ce que l'on cherche à obtenir (14). L'algorithme apprend sur la base de données qu'on lui donne et continuer d'apprendre en fonction de ce que l'on souhaite intégrer. Si on reprend le « cluster » cité précédemment, il y a de nombreux exemples de ses applications que l'on peut citer mais la plus évidente est la reconnaissance d'image (15). On peut, par exemple, créer un algorithme capable de distinguer des images d'hommes et de femmes après y avoir été entraîné grâce à une banque d'images.

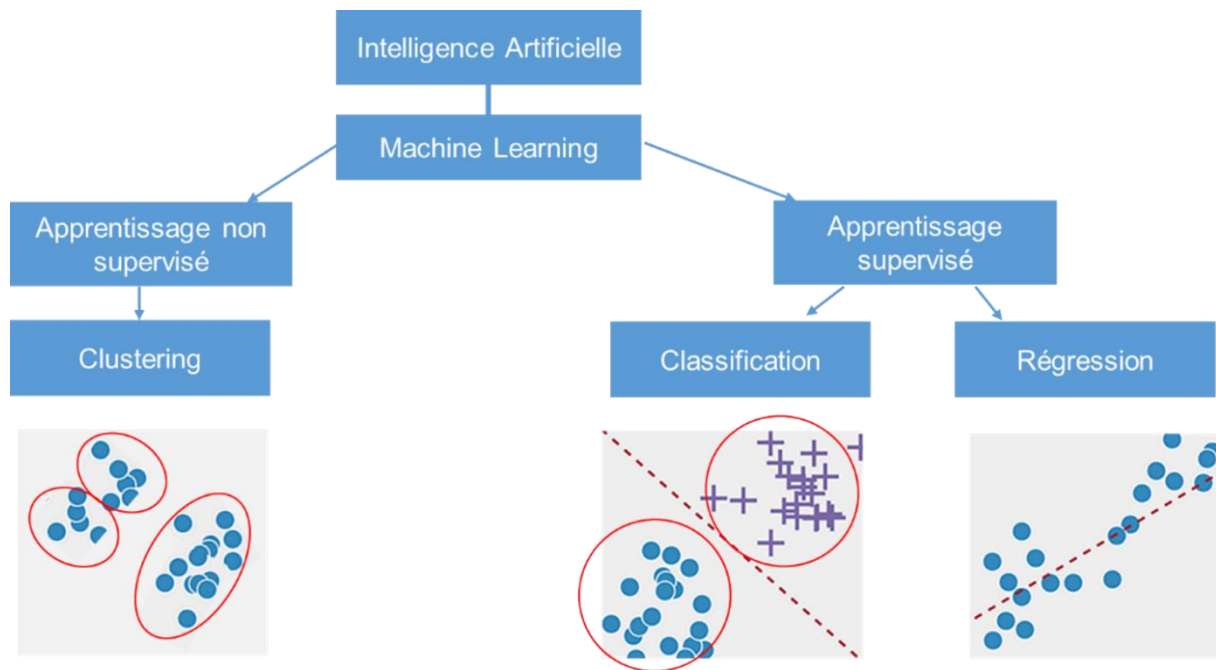


Figure 7 : fonctionnement du Machine Learning (16)

Le Deep Learning (17), quant à lui, est fondé sur un modèle reproduisant artificiellement l'organisation des neurones humains (Figure 8) lui procurant des capacités d'apprentissage décuplées. Ce sont des algorithmes extrêmement puissants qui nécessitent de grandes quantités de données, bien supérieures à celles du Machine Learning lors de la phase d'entraînement. Un réseau de neurones artificiels est conçu, afin de pouvoir prendre des décisions à la manière du cerveau humain. On peut le concevoir comme une forme évoluée de Machine Learning (18) (Figure 9). Pour en donner une représentation plus visuelle, on peut le voir comme un mille feuilles, où chaque couche est un algorithme et l'organisation de ces algorithmes aboutit au réseau neuronal. A la différence du Machine Learning, le Deep Learning intègre un grand nombre de paramètres avec cotation (système de notation à points). Dans l'éventualité où l'algorithme se tromperait, il intégrerait alors l'erreur et s'en servirait pour modifier les paramètres afin d'arriver au bon résultat. Un tel système va pouvoir se nourrir de données différentes de celles utilisées pour le machine learning. Dans ce cas, il est tout à fait possible d'utiliser des données non structurées. Ces dernières n'ont par principe aucune définition ; elles peuvent provenir de n'importe quelle source et être de toute taille ou format (exemple : vidéos,

photos, fichiers audios, texte, graphique...) (14). Par conséquent, il faut de plus grandes capacités d'analyse, permettant ainsi d'obtenir en échange des outils prédictifs plus performants.

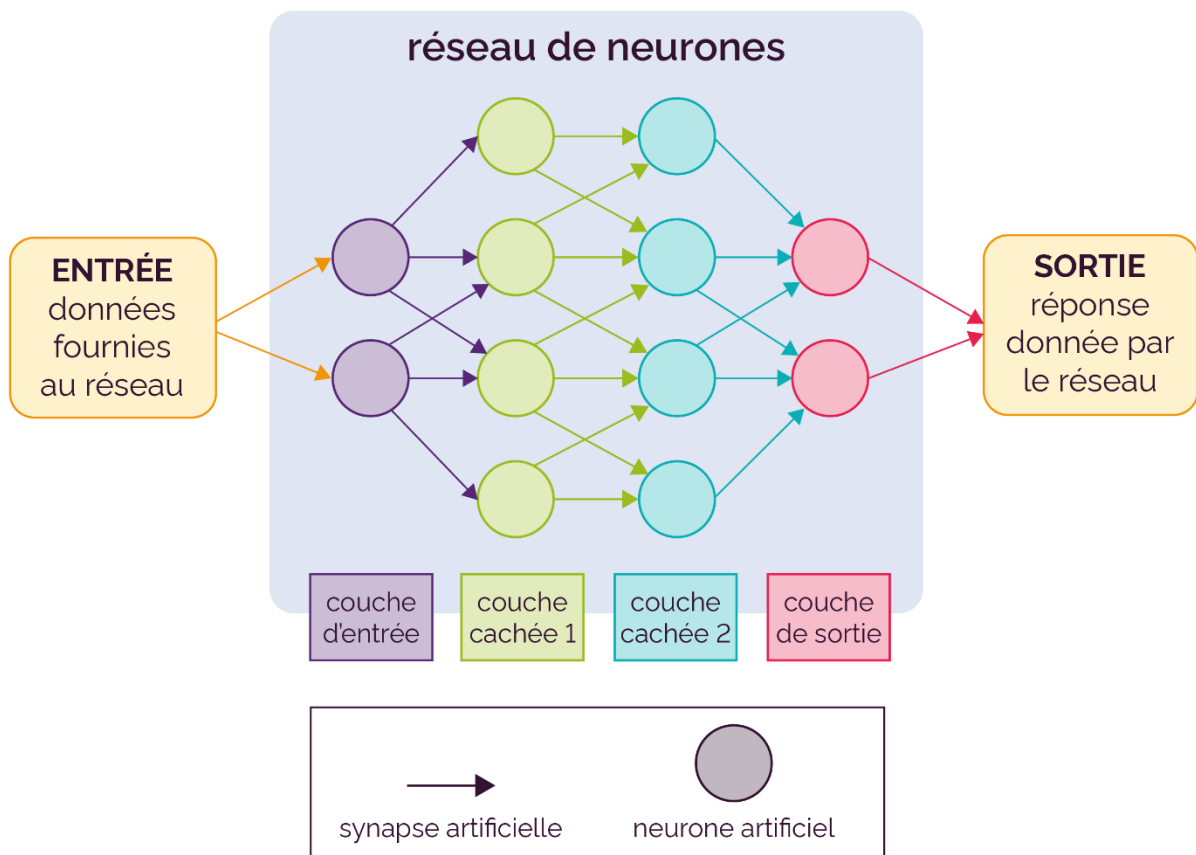


Figure 8 : fonctionnement du Deep Learning (19)

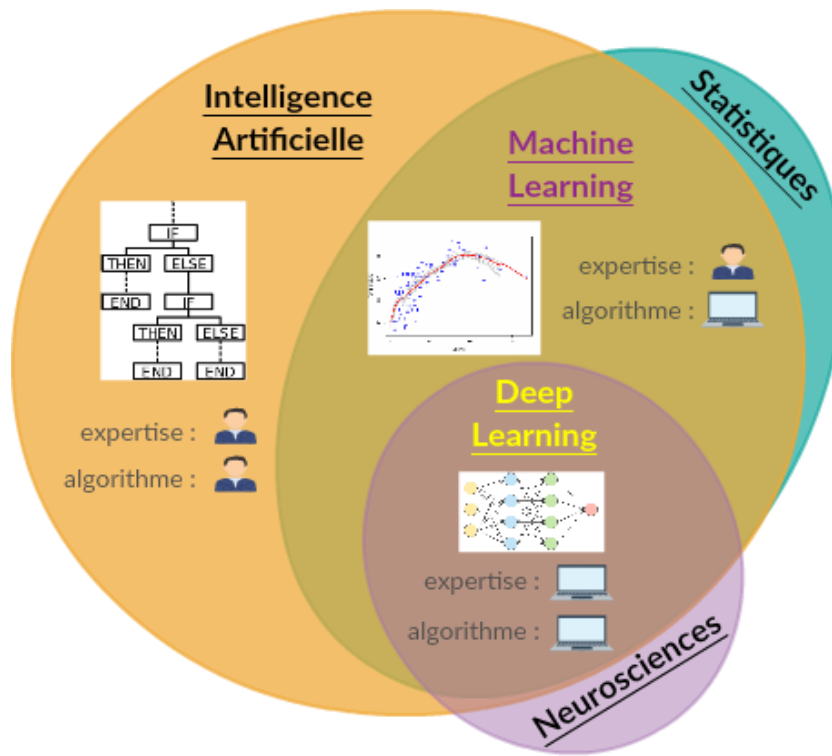


Figure 9 : schéma intelligence artificielle (12)

Le Deep Learning et les algorithmes qui le composent sont à l'origine des percées les plus impressionnantes de ces dernières années dans le domaine de l'IA.

Bien que l'on parle de plus en plus d'intelligence artificielle ces derniers temps, il est important de préciser que l'IA n'est pas une création récente et qu'on la retrouve même dans notre vie quotidienne (20). On peut citer quelques exemple d'utilisations de l'IA au quotidien (Figure 10) :

- Les achats en ligne et la publicité : lorsque l'on fait des recherches sur des sites en ligne, il n'est pas rare de se voir proposer ensuite des publicités très ciblées, sur les réseaux sociaux par exemple. Des systèmes d'IA ont analysé le comportement de l'utilisateur en ligne afin de faire les recommandations les plus pertinentes.
- La traduction automatique : lorsque l'on utilise des outils afin de traduire une langue, qu'elle soit écrite ou parlée, c'est en général une IA qui fournit la traduction, tout en essayant de l'améliorer sans cesse.

- Maisons connectées : certaines grandes entreprises ont créé des assistants virtuels qui permettent d'avoir accès à un certain nombre de configurations au sein d'une maison, ou encore de la contrôler à distance.
- La cybersécurité : l'utilisation de plus en plus grand public de l'IA génère de grandes failles de sécurité, comme la création d'images photoréalistes, ou encore la création d'enregistrements audios avec des voix trafiquées. D'un autre côté, l'IA peut être utilisée pour prévenir ces dérives ; on l'utilise également pour détecter et combattre d'éventuelles cyberattaques ou d'autres menaces.

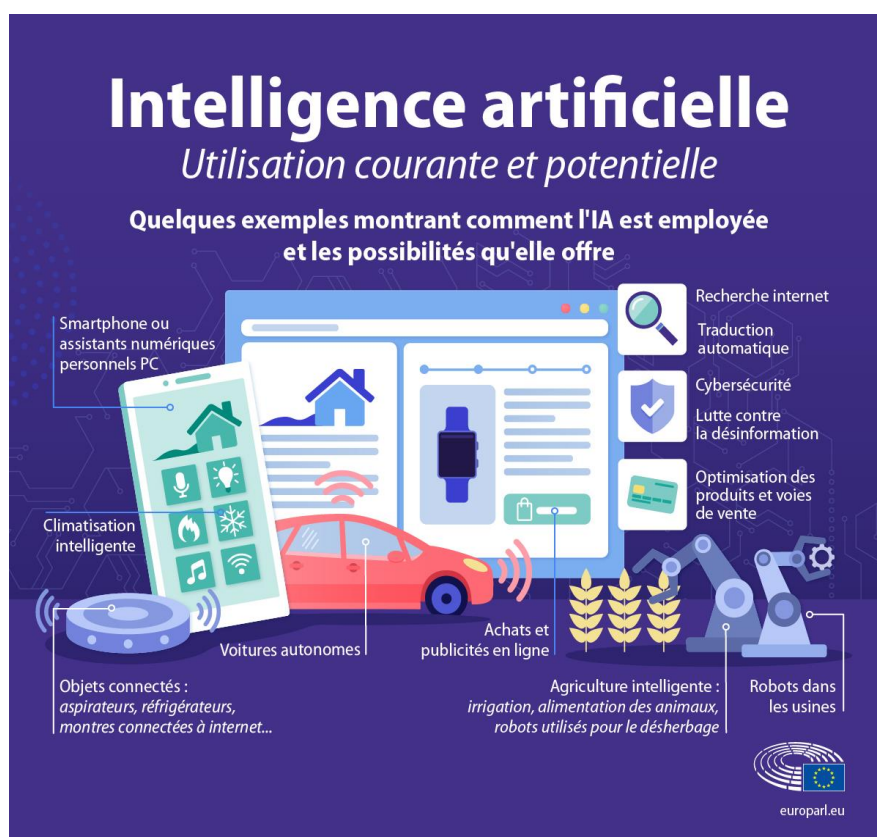


Figure 10 : exemples d'utilisation de l'intelligence artificielle dans la vie quotidienne (21)

2.2) L'IA de nos jours

Le Deep Learning connaît un véritable essor avec des programmes de plus en plus performants. On peut citer le programme de reconnaissance faciale de Facebook, Deepface. Aujourd'hui, il égale presque les performances humaines (22). L'intelligence artificielle occupe une place de plus en plus importante dans nos vies, parfois même sans que l'on ne s'en doute. On retrouve aujourd'hui de l'IA dans les voitures autonomes, les suggestions de nos moteurs de recherche voire même dans la traduction de conversations en simultané comme vu précédemment.

Plus récemment, l'intelligence artificielle s'est retrouvée au cœur de l'actualité et est devenue un véritable sujet de société avec son évolution accrue. En 2022, un logiciel fait sensation, « ChatGPT », conçu par l'entreprise OpenAI. Il est à l'origine d'une révolution dans le monde numérique et sur Internet par sa capacité à répondre à des questions complexes comme à dialoguer. Son utilisation massive pour tous types d'usage en a fait un véritable phénomène. C'est toujours le cas, notamment avec ses nombreuses versions améliorées. Suivant l'arrivée de ChatGPT, d'autres logiciels ont été dévoilés, en particulier dans les domaines tels que la vidéo (technologie deepfake), du graphisme et du dessin (DALL-E) ainsi que la musique (possibilité de recréer la voix d'un artiste via un logiciel d'intelligence artificielle).

En mars 2023, une tribune signée par plus de 1000 experts, dont Elon Musk (fondateur de Tesla et SpaceX), appelle à une pause dans la course au développement de l'intelligence artificielle, évoquant des « risques majeurs pour l'humanité ».

2.3) Utilisation actuelle de l'intelligence artificielle en santé

2.3.1) Détection précoce des maladies

L'intelligence artificielle croît dans le domaine de la santé. L'ère du Deep Learning dans laquelle nous évoluons amène toutes sortes d'applications au service des patients comme des professionnels de santé. On peut tout d'abord citer l'exploitation de l'intelligence artificielle dans la détection précoce des maladies (23).

Si on s'intéresse à la cardiologie, il existe aujourd'hui des appareils connectés qui sont capables de monitorer le rythme cardiaque et l'ECG (Electrocardiogramme) d'un patient. En ce sens, il sera possible de diagnostiquer plus tôt certaines affections cardiaques encore silencieuses. C'est d'ailleurs tout le principe d'un projet européen nommé MAESTRIA (24). Ce projet, initié en 2021 et coordonné par la Sorbonne, a pour sujet la FA (Fibrillation Auriculaire) et l'AVC (Accident Vasculaire Cérébral), deux enjeux majeurs en termes de santé publique au sein de l'UE (Union Européenne). MAESTRIA s'articule autour d'un consortium de cliniciens, de scientifiques et d'industriels pharmaceutiques à la pointe de la recherche et des soins médicaux sur les sujets précédemment cités. L'objectif, pour permettre au plus tôt la détection de ces pathologies, est donc de créer et de fournir des outils numériques multiparamétriques, fondés sur une nouvelle génération de biomarqueurs. Ils intégreront des mégadonnées issues de l'imagerie de pointe, d'électrocardiographie et des technologies omiques traitées par l'IA.

Dans un autre domaine, l'oncologie et plus précisément dans le cancer du sein, des projets importants sont apparus. Récemment, un groupe d'imagerie médicale de Dijon (25) s'est vu doté d'un logiciel d'IA (ProFound AI développé par la société iCAD), pour fournir un diagnostic complémentaire dans le dépistage du cancer du sein. Il est fondé sur le principe du Deep learning évoqué précédemment. Il s'appuie sur des millions de clichés documentés de mammographies lui permettant une analyse de précision des images qu'on lui présente. Il parvient à identifier des lésions peu visibles, ce qui permet d'attirer

l'attention du radiologue sur la zone concernée (Figure 11). Le groupe d'imagerie médicale évoque aussi son utilisation dans les radiographies de fractures et la détection de nodules pulmonaires au scanner.

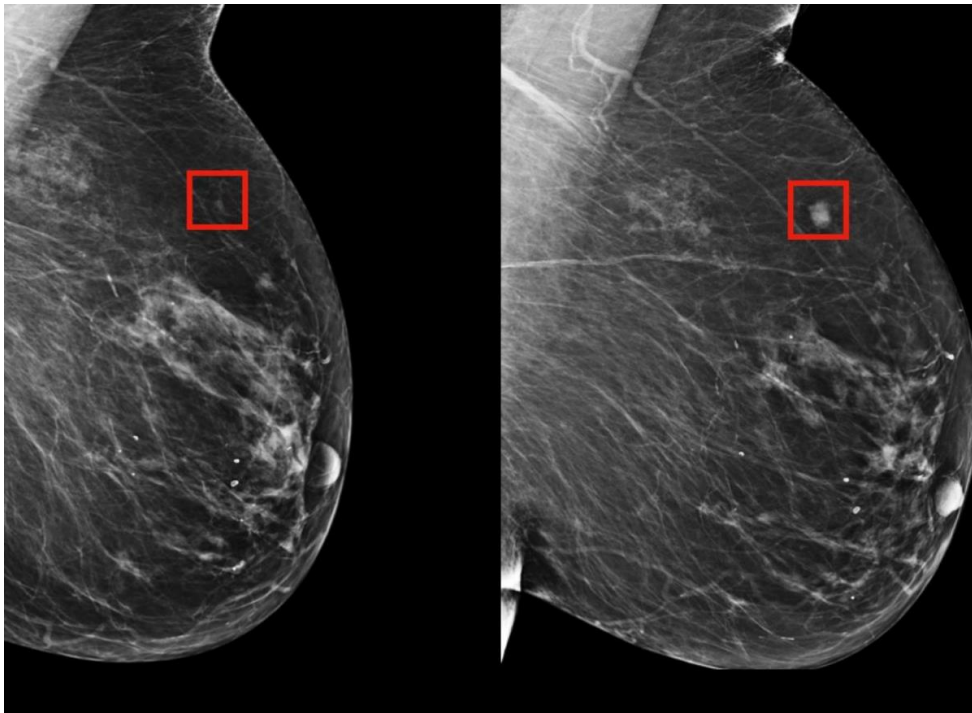


Figure 11 : algorithme élaboré par le MIT capable d'identifier une femme à haut risque de cancer du sein (à gauche) quatre ans avant l'apparition de lésions (à droite) (26)

2.3.2) Aide au diagnostic

En dermatologie, l'intelligence artificielle est employée pour l'aide au diagnostic via des images analysées par la technologie Deep Learning (27). Dans ce cas de figure, c'est devenu possible grâce à la compilation d'images au sein de bases de données internationales et publiques. C'est une première application en dermatologie, afin de poser un diagnostic sûr, mais elle reste limitée à certains types de lésions. Cet outil est pour l'instant utilisé à titre expérimental et il est important de rappeler qu'il n'a pas pour but de remplacer l'avis médical mais de fournir une aide au diagnostic.

En 2022, l'Institut Curie et l'entreprise Ibex Medical Analytics ont conduit une étude sur un outil à base d'IA dans pour le diagnostic sur des biopsies

mammaires (28). Elle s'est révélée concluante et les résultats ont été publiés dans un article dans la revue NPJ Breast Cancer (29). L'article mentionne que sur l'ensemble des biopsies analysées, l'outil d'IA a réussi à identifier des cancers que les médecins n'avaient pas vus. C'est donc une preuve de son efficacité et de son utilité en clinique dans l'aide au diagnostic (30).

2.3.3) Utilisation dans la chirurgie

Aujourd'hui, le recours à l'utilisation de l'intelligence artificielle au sein des blocs opératoires, pour certaines opérations chirurgicales, connaît des avancées. La recherche sur ce sujet progresse à grands pas avec déjà plusieurs centaines d'articles publiés chaque année sur le sujet et dans tous les domaines chirurgicaux. L'intelligence artificielle est un outil pouvant aider à mener à bien une procédure chirurgicale, on l'envisage d'abord comme un outil capable de digérer et traiter la grande quantité de data générée lors de chaque opération et qui aujourd'hui n'est pas ou peu utilisée (31). L'intelligence artificielle peut avoir des applications à toutes les étapes de la chirurgie. Elle peut en effet servir à compiler un grand nombre d'informations telles que des articles scientifiques et les dernières recommandations, afin que l'opération se déroule sous les meilleurs standards possibles. Durant l'opération, son utilisation repose essentiellement sur le traitement de données en temps réel, par exemple sur des constantes vitales ou encore des retours sur les gestes opératoires effectués en temps réel, afin d'optimiser le déroulement de l'acte chirurgical. Après l'opération, on peut continuer de surveiller les patients durant la période post-opératoire et également l'utiliser dans le contrôle qualité (Figure 12). L'intelligence artificielle peut aussi avoir une utilité dans la formation des chirurgiens par le biais notamment des programmes de formation en réalité virtuelle associés une intelligence artificielle intégrée.

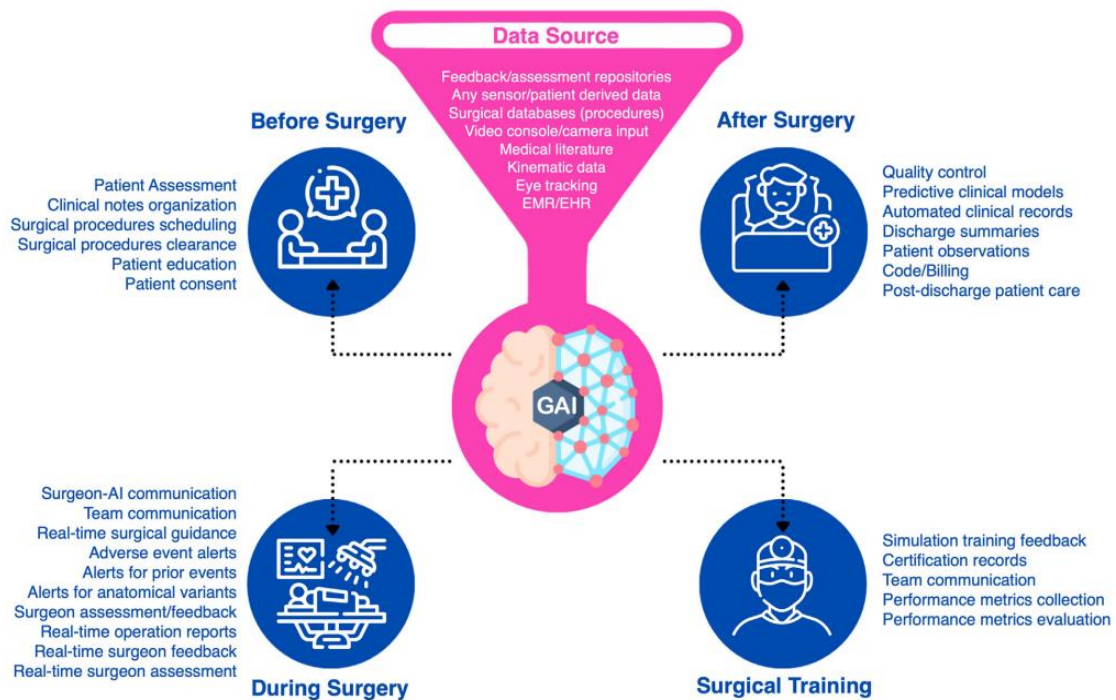


Figure 12 : Application de l'intelligence artificielle en chirurgie (32)

2.3.4) Utilisation hospitalière

L'IA a déjà franchi les portes de certains services de pharmacie hospitalière. C'est le cas de la plateforme PharmIA qui est, une aide à l'analyse des prescriptions médicales destinées aux soignants (33). Elle contribue à renforcer la sécurité du patient, que ce soit lors de l'étape d'analyse de l'ordonnance ou lors de la délivrance de médicaments, par le pharmacien en lui apportant une aide précieuse sur ces aspects du métier.

En 2011, l'IGAS (Inspection Générale des Affaires Sociales) a émis un rapport relevant les chiffres suivants (34) :

- 1 EIG (Effet Indésirable Grave) sur 2 est évitable ;
- 38000 à 72000 EIG évitables imputables aux médicaments surviennent lors d'une hospitalisation ;
- 10000 à 30000 sont attribués à une erreur médicamenteuse chaque année en France.

Ces chiffres ne concernent que le monde hospitalier et montrent déjà l'intérêt d'une telle plateforme. Ces innovations sont d'autant plus nécessaires compte tenu du fait de l'augmentation toujours plus importante du nombre des ordonnances, en raison du vieillissement de la population. PharmaIA a reçu son marquage CE en 2021 et est depuis utilisée au CH (Centre Hospitalier) de Valenciennes.

Toutefois, ces logiciels ne sont que la partie visible du potentiel de l'intelligence artificielle. L'enjeu dans les années à venir, est d'équiper les professionnels de santé avec des outils permettant d'optimiser leurs pratiques quotidiennes. L'intelligence artificielle a les capacités de traiter (analyser, compiler, trier...) toutes les données disponibles, ce qui représenterait un gain de temps considérable pour replacer l'homme sur des tâches à forte valeurs ajoutée.

III) L'industrie pharmaceutique 4.0 et l'intelligence artificielle

1) L'évolution de l'industrie pharmaceutique : du 1.0 à nos jours

Aujourd'hui, nous sommes à l'aube d'une quatrième révolution industrielle que l'on appelle "Industrie 4.0". Elle est le fruit de 200 ans de progrès scientifiques et technologiques (35). Afin de mieux percevoir l'émergence de cette nouvelle ère et la place de l'IA dans l'industrie 4.0, il est pertinent de retracer l'histoire de ces révolutions.

1.1) L'industrie 1.0

La première révolution industrielle prend place entre la fin du XVIIIème siècle et le début du XIXème siècle. A cette époque, on constate une recrudescence de la découverte de principes actifs issus de plantes tels que l'opium (ex : codéine) découvert en 1832 par le chimiste français Pierre Jean Robiquet. La principale problématique se trouve dans l'extraction de ces principes actifs qui ne peut être conduite au sein des pharmacies d'officine car elle nécessite des équipements spécifiques dédiés à la chimie. Le modèle alors établi est bouleversé et c'est l'une des nombreuses causes de l'émergence de l'industrie pharmaceutique. En conséquence, deux ans après la découverte de l'opium, on assiste à la création de la toute première fabrique d'extraits de plantes médicinales que l'on peut considérer comme le tout premier modèle de l'industrie pharmaceutique (36).

Cependant, il est admis par bon nombre d'historiens que l'arrivée de l'industrie pharmaceutique s'est faite lors de la création de la Pharmacie Centrale de France en 1852 par le pharmacien François Dorvault (Figure 13). Il s'agit d'une coopérative regroupant tous les pharmaciens de France (37). La société avait pour but de se substituer aux pharmaciens d'officine, notamment dans la fabrication de médicaments et les achats de droguerie (38).

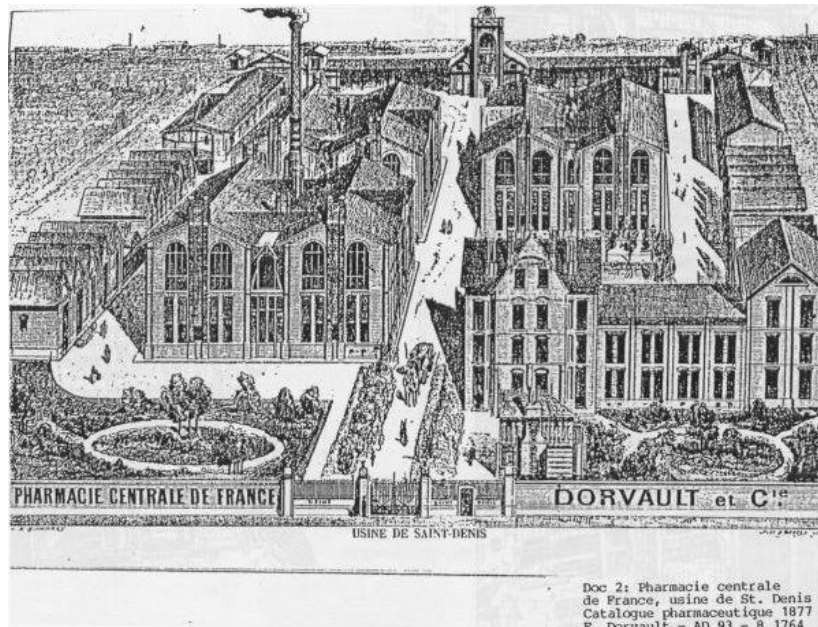


Figure 13 : lithographie de la Pharmacie Centrale de France vers 1877 (39)

1.2) L'industrie 2.0

La fin du XIX^{ème} siècle est marquée par la deuxième révolution, industrielle notamment avec l'apparition de l'électricité et le développement de domaines tels que l'automobile et l'aviation. Au début du XX^{ème} siècle, la France est l'un des principaux pays exportateurs de produits pharmaceutiques (37). En effet, avec l'apparition des premières usines pharmaceutiques au cours de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, on recense 473 établissements employant 13 000 personnes en 1900. Ces chiffres démontrent l'importance de l'industrie pharmaceutique à cette époque (40).

En 1914 la première guerre mondiale éclate, l'industrie pharmaceutique française se heurte à la non-disponibilité de produits de première nécessité médicale. La France dépend beaucoup de l'Allemagne pour certains produits comme l'aspirine, et ce malgré l'export de nombreuses spécialités. Il apparaît donc que l'industrie pharmaceutique française doit innover et changer son modèle économique afin de redevenir compétitive (41).

Entre les années 1920 et 1950, l'industrie pharmaceutique continue de se développer en Europe. La fabrication de médicaments va se baser de plus en plus sur des travaux scientifiques (de chimistes et de médecins) et de nouvelles

méthodes de production à grande échelle via l'apparition des chaînes d'assemblage ainsi que des processus d'automatisation.

De nos jours, une grande partie de l'industrie pharmaceutique fonctionne encore selon ce modèle (42).

1.3) L'industrie 3.0

Au début des années 1970, on parle d'industrie 3.0, notamment avec la mise en place de nouvelles technologies : l'informatique en réseau, la communication sans fil et l'internet. Ces avancées permettent d'atteindre un niveau plus élevé d'automatisation des processus de fabrication. On voit apparaître des équipements dotés d'une interface connectée. Ils mènent à la mise en œuvre des stratégies de contrôle des processus de fabrication dont l'objectif est d'améliorer la qualité des produits. En lien avec ces progrès, deux concepts se dégagent, à savoir : le PAT (Process Analytical Technology -Figure 14) et le QbD (Quality by Design – Figure 14). Le PAT, créé par la FDA (Food and Drug Administration) en 2004, est décrit comme “une dynamique visant à comprendre comment les différentes variables d'un procédé de fabrication affectent la qualité finale de la production” (43). Il intègre un concept plus ancien, le QbD définit dans l'ICH (International Council for Harmonisation) Q8 comme : “ une approche systématique du développement qui commence par des objectifs prédéfinis et met l'accent sur la compréhension et le contrôle des produits et des processus, basée sur une science solide et une gestion des risques liés à la qualité.” (44). De cette approche se définissent les CQAs du produit (Attributs Critiques de la Qualité) et les CPPs de fabrication (Paramètres Critiques des Procédés).

Pour mieux différencier ces différentes époques, on peut admettre que la marque d'entrée dans l'industrie 3.0 est la numérisation du processus de fabrication.

L'enjeu est d'améliorer la qualité finale des produits par un contrôle et un pilotage en temps réel des paramètres de la chaîne de production, tout en anticipant les risques sur la qualité des produits et des procédés de fabrication dès la phase de développement. En somme, ces approches transforment le

modèle antérieur de production des médicaments avec un gain en temps et en efficacité supposés.

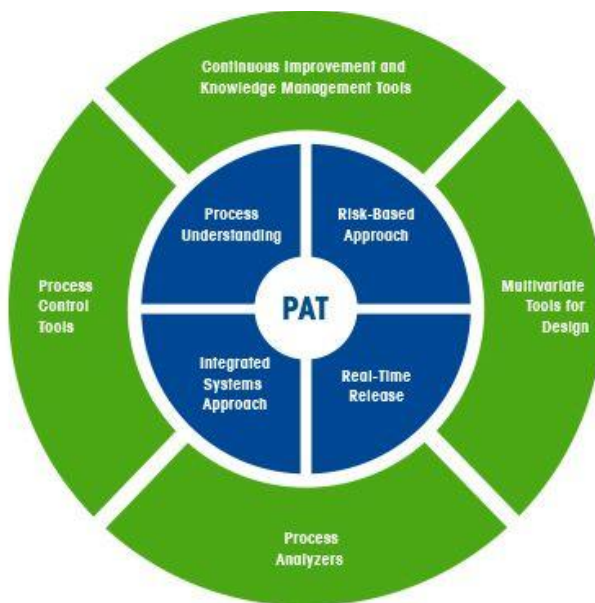


Figure 14 : concept de PAT et de QbB (45)

L'industrie 3.0 est marquée par la génération massive de données de production à collecter, analyser et qu'il est important de sécuriser.

Cependant, malgré l'apport significatif sur la qualité des produits, on constate des pénuries liées à des rappels de lots de médicaments non conformes en 2019 par la FDA (46). Le PAT et le QbD doivent donc être poussés encore plus loin par des avancées technologiques supplémentaires.

Par ailleurs, durant cette période on commence à voir apparaître un nouveau modèle : la fabrication en continue. Il s'agit "d'une méthode spécifique de fabrication de produits pharmaceutiques ou d'autres produits avec une alimentation et un retrait continu de matières" (47). Il en résulte un changement majeur dans la libération des produits : on passe d'une libération de lots à une libération continue en temps réel en fin de production des produits pharmaceutiques. On parle de RTRT qui signifie "Real-Time Release Testing", test de libération en temps réel. L'étape de libération des produits repose ainsi sur les données collectées via internet au cours de processus de fabrication (42).

Bien que largement utilisée aujourd'hui dans diverses industries, cette méthode n'a pas encore été démocratisée dans le secteur pharmaceutique, encore en pleine transition.

1.4) L'industrie 4.0

L'industrie 4.0 apparaît pour la première fois à la fin de l'année 2012 en Allemagne et a été théorisée par l'Association des constructeurs allemands de machines et d'équipements de production. Elle repose sur trois piliers : l'automatisation, IoT et l'IA (48). L'IoT signifie "Internet of Things", l'Internet des objets, et désigne un réseau d'objets interconnectés via Internet. Ces objets intègrent des capteurs, des logiciels et d'autres technologies permettant de collecter et d'échanger des données entre eux et avec d'autres systèmes et appareils (49). Les équipements de fabrication connectés sont contrôlés par un système de supervision et d'acquisition des données appelé SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition - Figure 15). Une entreprise utilise un système SCADA (Figure 16) généralement pour contrôler des équipements sur un site. Il sert également à collecter et enregistrer des données concernant les opérations de production (50).

Le MES (Manufacturing Execution System – Figure 15) est un système informatique qui suit, contrôle, surveille et documente le processus de fabrication de la matière première au produit fini au travers des données recueillies par le SCADA (51).

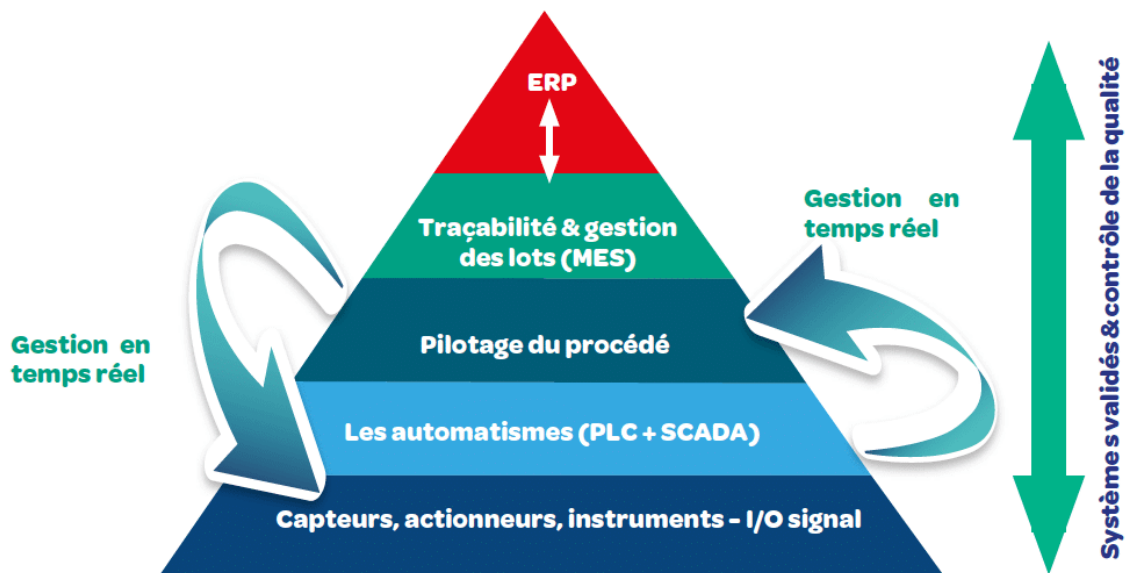


Figure 15 : Concept de MES et de SCADA (52)



Figure 16 : Photo d'un SCADA (53)

L'IoT succède à l'émergence d'internet à la fin des années 80, ce terme a été utilisé pour la première fois en 1999 par un ingénieur britannique, Kevin Ashton. Il en donne la première définition et le décrit comme un système où les objets physiques sont connectés à internet. A l'origine, les dispositifs IoT permettaient la surveillance à distance de la performance des équipements et processus industriels et la détection d'éventuelles pannes (54).

Dans les années 2000, l'IoT s'est répandu dans de nombreux secteurs incluant la santé et la fabrication, avec l'arrivée de la connexion sans fil tels que le Wi-Fi et Bluetooth.

Plus récemment, cette technologie a pris un nouveau tournant avec l'intégration de l'IA rendue possible grâce à l'augmentation des capacités de stockage et de la puissance de calcul des serveurs. En effet, les appareils connectés fournissent une quantité massive de données générées en temps réel qui peuvent être analysées par l'IA afin d'optimiser la prise de décision et d'améliorer l'efficacité de la fabrication (Figure 17). Sur cette figure on peut voir un ensemble de sources de données collectées et intégrées en temps réel dans un « network » avant leur traitement.

Les dispositifs IoT sont désormais de plus en plus conçus pour fonctionner avec l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique (55).

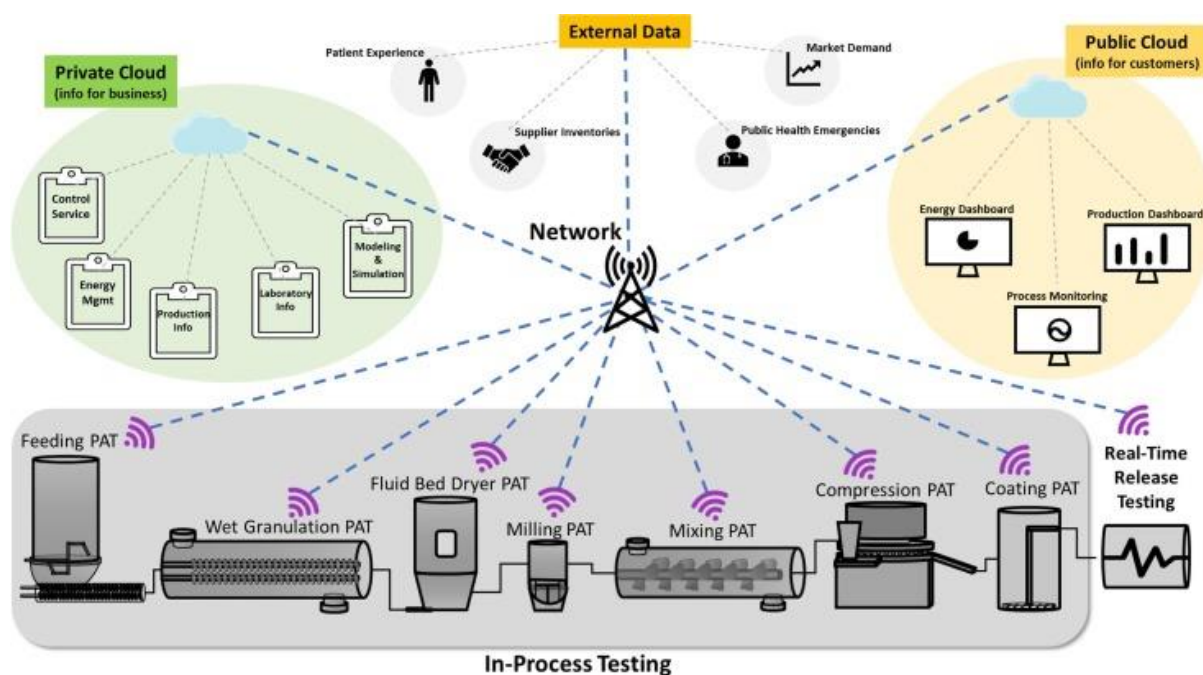


Figure 17 : la chaîne de valeur pharmaceutique contrôlée, hyper-connectée, numérisée (56)

2) Concepts de l'IA dans l'industrie 4.0

2.1) La donnée au cœur de l'IA

Dans un contexte de révolution numérique où les données sont de plus en plus nombreuses et deviennent un enjeu majeur, l'IoT couplé à l'IA offre de nouvelles opportunités à l'industrie pharmaceutique.

On parle ici de « Big Data » autrement appelé les “3 v”, il s'agit d'un ensemble de données de sources variées, arrivant dans des volumes importants et à une vitesse élevée (temps réel) (57). Le mécanisme d'intégration de ces données repose sur l'ETL (Extraction, Transformation and Load – Figure 18) défini comme : “un processus automatisé qui prend les données brutes, extrait l'information nécessaire à l'analyse, la transforme en un format qui peut répondre aux besoins opérationnels et la charge dans un “Data Warehouse” ou base de données qui sont stockées sur le cloud » (58).

Les jeux de Big Data récoltés en temps réel par des capteurs intégrés aux équipements de production sont croisés et analysés par des algorithmes de machine learning complexes et prédictifs. Il est ainsi possible de créer des modèles prédictifs de certains événements liés au processus de fabrication de produits de santé avec plus de précision. Pour créer une IA performante, il faut fournir une quantité importante de données de qualité afin qu'elle démarre son processus d'entraînement.

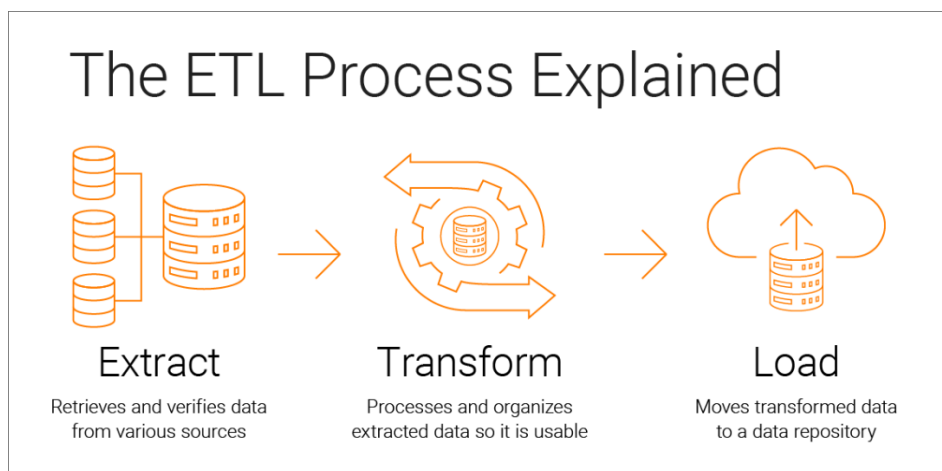


Figure 18 : Principe de l'ETL (59)

Il existe deux types d'analyse de données :

“-L'analyse descriptive : analyser des données et décrire ce qu'elles racontent à un instant T

-L'analyse prédictive : prédire un potentiel résultat à partir des données que l'on a extraites d'activités passées ou actuelles” (60).

L'IA accélère le processus d'analyse descriptive en traitant un volume important de données (Figure 19) en un temps réduit. Mais l'apport le plus significatif de l'IA réside dans sa capacité prédictive.

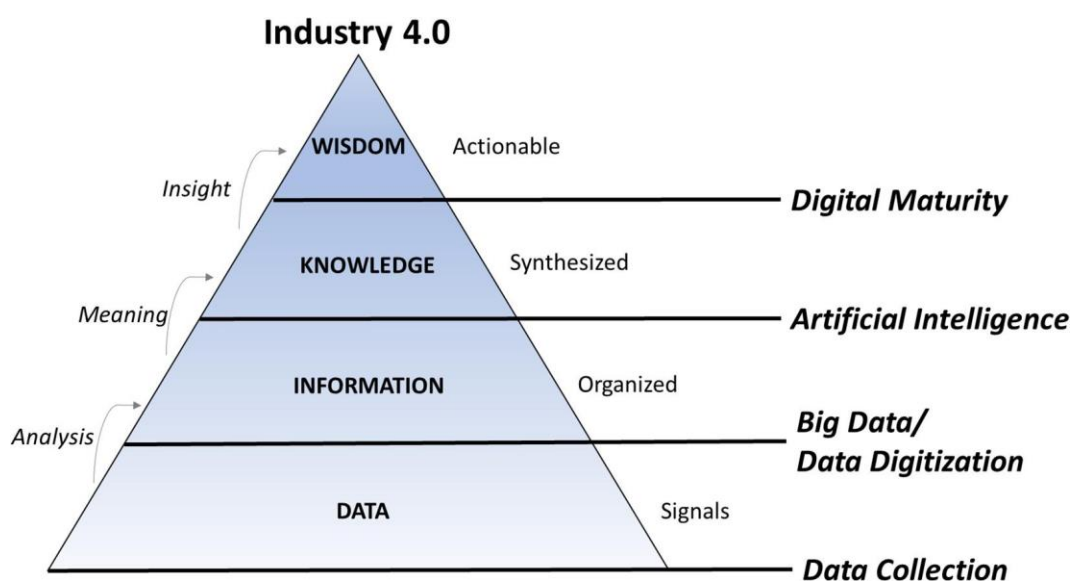


Figure 19 : les étapes de la transformation des données vers l'industrie 4.0

(56)

Dans le domaine pharmaceutique où les exigences réglementaires sont strictes, il est primordial d'assurer l'intégrité des données (avoir des données non altérées ou détruites) selon le principe ALCOE+. Le principe ALCOE + repose sur neuf principes : les données doivent être Attribuables, Lisibles, Contemporaines, Originales, Fiables, Complètes, Cohérentes, Durables, Disponibles (61). Enfin, pour prouver la conformité des produits finis, tous les paramètres et événements du processus de fabrication doivent être documentés et enregistrés.

En comparaison aux données manuscrites, la collecte automatique de données en temps réel permet de renforcer la qualité, la fiabilité et la traçabilité des données en écartant le biais humain. L'évaluation de la qualité des produits

fabriqués repose sur la qualité de l'ensemble des données les caractérisant. En outre, cela conditionne la décision de libération des produits pharmaceutiques. L'IA présente de multiples applications et avantages dans ce secteur.

2.2) Perspectives de l'intelligence artificielle en industrie pharmaceutique

Le potentiel de l'intelligence artificielle dans l'industrie pharmaceutique est considérable comme l'étaye de nombreux articles scientifiques. A l'heure actuelle et sur la base des données communiquées par les Industries pharmaceutiques, son utilisation dans le cadre de la production reste faible comparé au domaine de la recherche.

Cependant, il est déjà possible d'entrevoir comment elle révolutionnerait le fonctionnement d'un site de fabrication

2.2.1) Le lean management et la supply chain

Le lean management est une méthode de gestion de la production qui trouve ses origines dans les usines de Toyota au Japon. Le terme "lean" signifie "maigre" ou encore "allégé", c'est là tout le principe. On cherche à maximiser la performance (que ce soit en termes de qualité, d'efficacité ou encore de réduction des coûts) tout en réduisant les temps sans valeur ajoutée ou gaspillages (Figure 20) appelés "muda" en japonais (62).

Lean Six Sigma: 8 Wastes



Figure 20 : les 8 “muda” du lean management (63)

Le lean management repose sur le principe de l'amélioration continue, et pour cela plusieurs outils peuvent être utilisés. On peut citer la roue de Deming (Figure 21) qui est une représentation schématique du système PDCA (Plan-Do-Check-Act) où l'on agit en continu sur une situation (64).

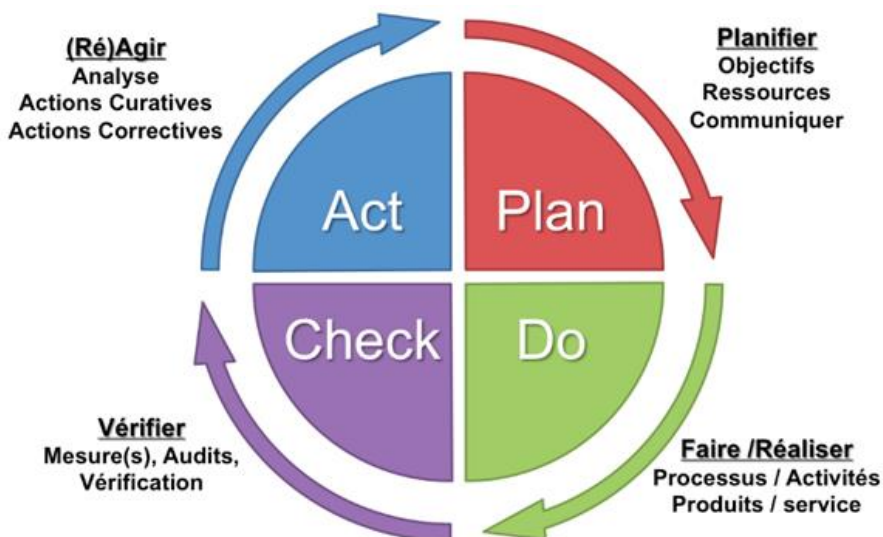


Figure 21 : La roue de Deming (65)

Un autre méthode favorisant l'amélioration continue est la méthode 5S (Figure 22). Elle se compose de cinq principes :

- Seiri (Sélectionner et supprimer)
- Seiton (Situer)
- Seiso (Faire scintiller)
- Seiketsu (Standardiser)
- Shitsuke (Suivre)

Le but est d'optimiser l'environnement de travail et à terme d'éviter les gaspillages liés à une perte de temps (66).



Figure 22 : La méthode 5S (67)

Le lean management est un concept dynamique et agile, cependant, il pourrait l'être encore plus grâce à l'IA. En effet, l'analyse d'un nombre important de données par l'IA mène à des prises de décisions plus rapides et éclairées et à une amélioration de la performance industrielle à tous les niveaux dont la réduction des gaspillages dans la supply chain (68).

La supply chain correspond aux différentes étapes liées à la chaîne d'approvisionnement, de l'achat des matières premières à la livraison d'un produit ou service au client (69). L'IA optimiserait la gestion des stocks avec un suivi en temps réel des flux et de la demande.

Son intérêt est double. Elle permettrait la diminution des stocks excédentaires mais également la prévention des ruptures d'approvisionnement des

pharmacies d'officine. Pour l'exemple on peut citer le centre logistique d'Evreux de l'entreprise Schneider Electric. Ce site dispose d'un outil d'intelligence artificielle interne qui permet une gestion optimisée des stocks et la garantie des délais de livraison (70).

Par définition, les ruptures d'approvisionnement consistent en « une rupture dans la chaîne d'approvisionnement ou de distribution des médicaments, rendant momentanément impossible leur délivrance aux patients. C'est lorsqu'une pharmacie d'officine est dans l'incapacité de dispenser un médicament à un patient dans un délai de 72 heures, après avoir effectué une demande d'approvisionnement auprès de deux entreprises exerçant une activité de distribution de médicaments. » (71).

L'atout de l'IA serait sa capacité de prédiction de la demande en médicaments en fonction des données.

Les données analysées permettraient de déterminer sa performance de prédiction. Il peut s'agir d'informations sur la consommation, la veille sanitaire (épidémies saisonnières), sociodémographiques, de transports ou encore des données météorologiques...

2.2.2) La maintenance prédictive

Elle correspond à un concept qui “vise à éviter les pannes et les temps d'arrêt des équipements en connectant les actifs de l'entreprise intégrant la technologie IoT, en appliquant l'analytique avancée aux données en temps réel fournies par ces appareils, et en utilisant les insights qui en découlent pour obtenir des protocoles de maintenance documentés, rentables et efficaces” (72).

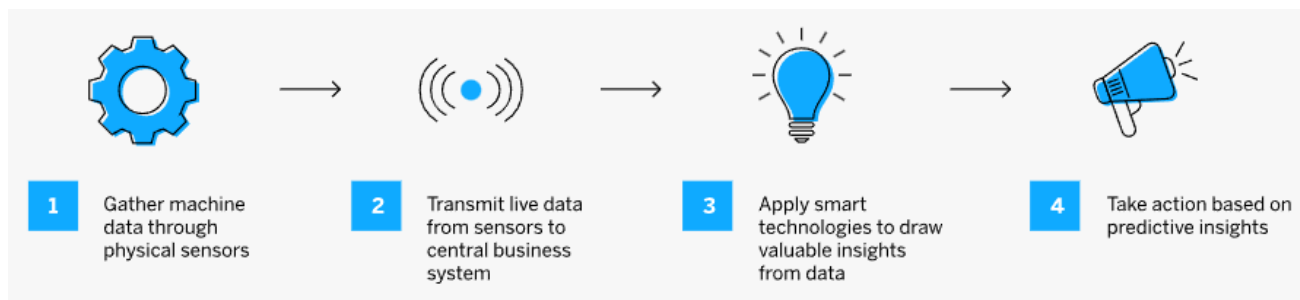


Figure 23 : processus de maintenance prédictive (73)

La maintenance prédictive (Figure 23) permettrait d'anticiper d'éventuels problèmes survenant au cours du processus de production. Ainsi, les équipes de maintenance interviendraient au moment le plus opportun soit : ni trop tôt, ni trop tard. Elle se différencie de la maintenance préventive, qui repose sur l'expérience des équipes de maintenance, sur des recommandations fournisseurs ainsi que sur les performances antérieures.

La maintenance préventive suit un calendrier d'interventions planifiées à des intervalles réguliers.

Cependant, sa précision est relative et engendre donc des dépenses onéreuses au travers d'interventions réalisées soit trop tôt sur une pièce encore fonctionnelle, soit trop tard dans la cadre d'une panne.

L'intégration du machine learning dans le processus de maintenance donne naissance à la maintenance prédictive. Les données relatives au fonctionnement des machines et des pièces qui les composent sont récoltées en temps réel puis analysées pour créer des procédures d'intervention optimisées.

En effet, à la moindre défaillance, un signal d'alerte automatiquement généré est transmis aux équipes de maintenance qui devront confirmer ou infirmer la nécessité d'intervenir.

A titre d'exemple, l'éditeur IoT Cartesiam et le fournisseur de service Eolane créent en 2018 « Bob assistant ». Il s'agit d'un boîtier connecté dédié à la maintenance prédictive. Les algorithmes interprètent et contextualisent des données en complète autonomie (74).

La finalité est un gain de productivité et de qualité.

2.2.3) Les jumeaux numériques

Si l'on prend l'exemple d'une entreprise pharmaceutique, le principe consisterait à installer une série de capteurs sur l'ensemble d'une ligne de production. Des données seraient récoltées pour différents paramètres que l'on souhaite étudier tels que la cadence des équipements, le fonctionnement des systèmes de production ou encore la performance (Figure 24).

Bien que l'idée d'utiliser une copie numérique d'un objet remonte à plusieurs décennies, le concept de jumeau numérique n'a été théorisé pour la première fois qu'en 1991 par David Garlenter (professeur d'informatique à l'université de Yale) dans sa publication "Mirror Worlds". (75)

Les données seraient ensuite regroupées pour constituer le jumeau numérique de la ligne. Il serait ainsi possible de simuler le comportement et la performance de la copie numérique de la ligne par une modification virtuelle des différents paramètres. Des feedbacks alimenteraient la ligne de production réelle pour optimiser le processus (76).

Le jumeau numérique serait continuellement actualisé à partir des données récupérées en temps réel par les capteurs.

Cette nouvelle technologie intégrerait entre autres une IA capable de traiter les vastes quantités de données ainsi générées.

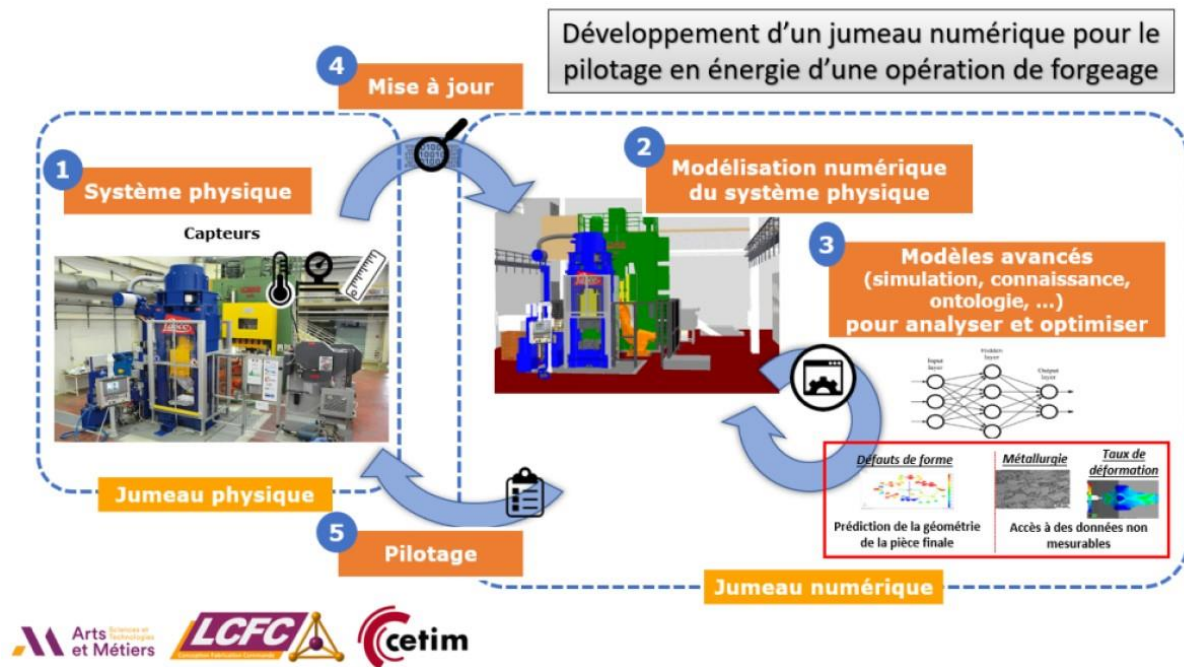


Figure 24 : Schéma fonctionnement d'un jumeau numérique (77)

Trois principaux axes ressortent de l'association du jumeau numérique avec la puissance de l'IA :

- **« Analyses prédictives »** : l'IA peut effectuer des analyses prédictives sur la base de données historiques, permettant ainsi de prédire les performances et les problèmes futurs. L'intérêt est la prise de mesures proactives pour éviter les interruptions et améliorer l'efficacité.
- **Simulations et analyses de scénarii** : un jumeau numérique utilise l'IA pour simuler et analyser différents scénarii. Il y a une utilité à tester de nouvelles configurations, afin de prédire les performances dans des conditions variées, ou étudier les effets de modifications apportées au système.
- **Systèmes d'auto-apprentissage** : l'IA peut apprendre à partir de données historiques et de retours d'information, et s'améliorer avec le temps. Le jumeau numérique pourra de fait devenir de plus en plus intelligent et prendre de meilleures décisions à mesure de l'intégration de nouvelles données. » (78)

L'anticipation représente un atout non négligeable pour la production pharmaceutique.

Ce concept amène donc la production pharmaceutique vers une production en continue de type PAT. Les différents modèles générés via le jumeau numérique apportent une compréhension accrue ainsi qu'une vision globale des processus en cours.

En termes d'utilisation concrète, on peut parler de la coopération entre deux entreprises françaises, Atos et Siemens. Atos est une entreprise spécialisée dans la transformation digitale. Quant à Siemens, son expertise englobe les domaines de l'industrie, des infrastructures, du transport et de la santé. Les deux entreprises ont développé un jumeau numérique afin d'optimiser leurs opérations et pouvoir simuler les différentes modifications de processus. Ce développement vient d'un besoin de plus en plus pressant de réduire les délais de fabrication et de commercialisation des produits pharmaceutiques tout en ayant des produits plus fiables et qualitatifs (79).

2.2.4) Les robots collaboratifs

Le robot collaboratif ou "cobot" est un "robot énergisé, autonome et intégré dans une cellule robotique pour travailler à proximité des opérateurs ou en relation directe avec eux" selon l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité). Il s'agit d'une interaction robot-humain sans barrière autrement appelée « coactivité » (Figure 25).



Figure 25 : programmation d'un cobot (80)

D'après l'INRS, on peut distinguer trois types d'interactions entre l'humain et le robot :

- La collaboration peut se faire dans un même environnement avec des tâches distinctes pour les deux partis.
- La collaboration s'effectue sur la même tâche en simultané
- La collaboration s'effectue sur la même tâche mais à tour de rôle

La collaboration peut donc respectivement être un partage d'espace de travail, direct ou indirect (81).

Dans le cadre d'une industrie 4.0, les robots collaboratifs pourraient se voir dotés de logiciels d'IA afin d'en améliorer leurs performances. Ils seraient alors plus autonomes et plus efficaces car il n'y aurait plus d'étapes de programmation du robot. Le principe serait de rendre les robots collaboratifs en capacité de s'adapter aux aléas de la production avec une réactivité accrue. En effet, grâce à la puissance de l'IA en termes de traitement des données, les cobots pourraient recevoir les informations dont ils ont besoin, et ce en temps réel, permettant un temps d'adaptation relativement court.

L'enjeu serait un gain de sécurité de l'espace de travail et une production plus efficiente (82).

Actuellement en France, dans l'industrie pharmaceutique, les cobots sont utilisés pour des tâches fastidieuses, répétitives ou demandant un effort physique important (Figure 26). Une entreprise pharmaceutique a par ailleurs communiqué sur le sujet. Il s'agit de Sanofi qui possède désormais 7 cobots dans l'une de ses usines. Ces derniers ont la charge de la palettisation soulageant ainsi les opérateurs du déplacement de plusieurs centaines de kilos de produits par jour (83).

Cette innovation devrait cependant, s'accompagner de normes et de protocoles de sécurité pour limiter d'éventuels risques (ex : accident lors d'un travail de proximité) liés au travail collaboratif entre humain et robot (82).

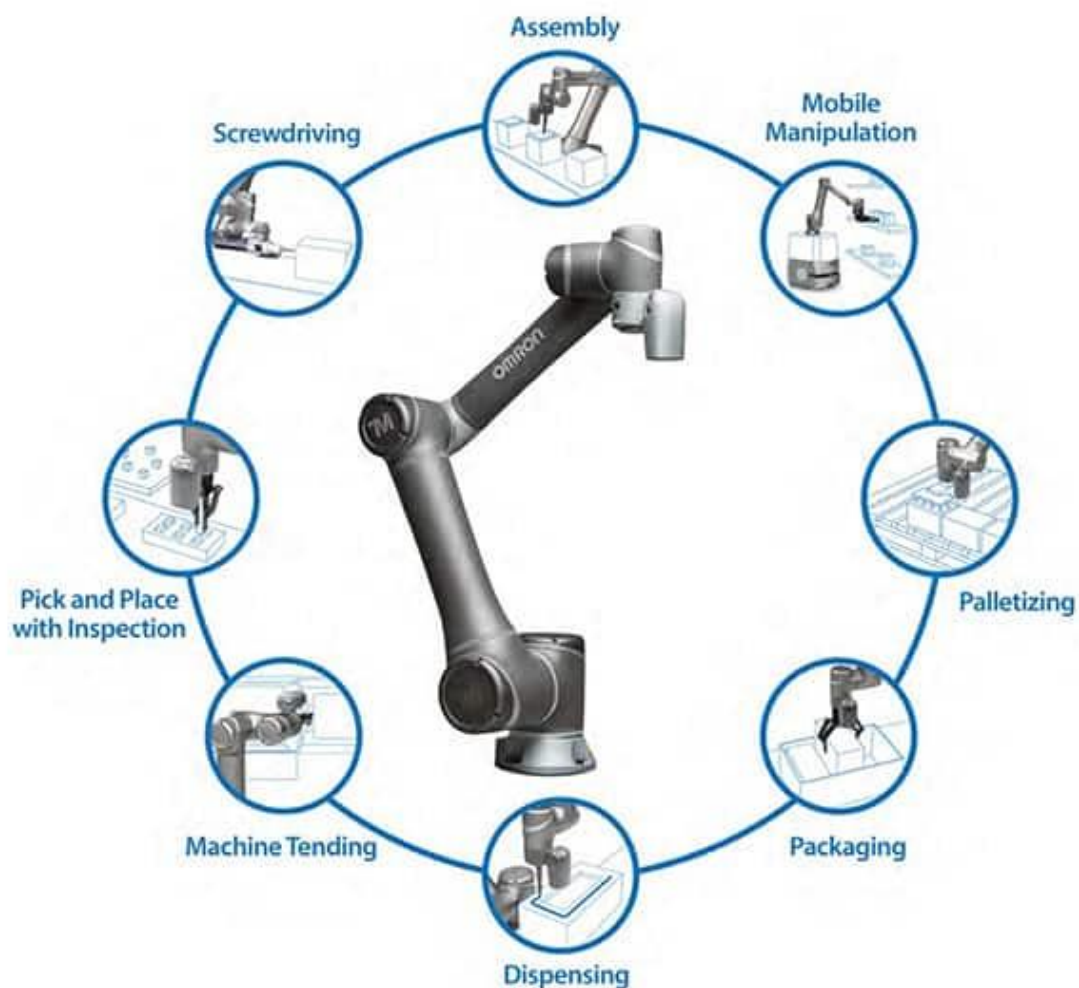


Figure 26 : Applications cobot (84)

2.2.5) La réalité virtuelle

La réalité virtuelle tout comme la réalité augmentée sont deux concepts tout d'abord issus du monde du divertissement :

- La réalité virtuelle « consiste à créer un environnement artificiel en 3D entièrement immersif pour l'utilisateur. Les casques de réalité virtuelle contiennent des capteurs qui suivent les mouvements de la tête de l'utilisateur. Ils ajustent la vue en temps réel, offrant ainsi à l'utilisateur une expérience totalement immersive dans le monde virtuel. » (85)
- La réalité augmentée quant à elle « utilise la caméra d'un appareil mobile ou d'un casque pour intégrer des éléments virtuels dans le monde réel, tels que des images, vidéos, sons, ou informations contextuelles. » (85)

Aujourd'hui, ils sont de plus en plus utilisés en industrie. Plusieurs entreprises pharmaceutiques l'utilisent d'ores et déjà notamment à des fins de formations avec répliques numériques de leurs lignes de fabrication. Le but est de rendre plus performant le personnel de production en particulier sur des manipulations complexes et/ou critiques.

L'entreprise « UniVR » a conçu et fourni de tels outils à des entreprises pharmaceutiques. Elle précise que son intérêt porte principalement sur des manipulations complexes à exécuter au sein d'environnements particuliers comme les zones blanches (ex : laboratoire P4 Jean Mérieux à Lyon) ou zone à atmosphère contrôlée. La qualité des logiciels de VR développés repose sur la fidélité de la reproduction afin de garantir une formation optimale.

Des scénarios peuvent être conceptualisés par une intelligence artificielle entraînée. D'ailleurs, elle est de plus en plus associée à la VR dans un objectif de formation. Elle rend la formation plus complète en intégrant un nombre plus important de simulation d'aléas de production (86). L'apprentissage se fait en relevant toutes les erreurs commises au cours de la fabrication, en l'occurrence celle de vaccins pour ce logiciel d'UniVR (87).

Un autre avantage de la réalité virtuelle est la possibilité de mettre en place dans la simulation des situations impossibles à reproduire lors d'une formation sur une ligne de production physique.

3) Etude de cas : l'intelligence artificielle au sein de compagnies pharmaceutiques

3.1) Contexte

L'IA est devenue un outil qui repousse le champ des possibilités et tend à se démocratiser depuis quelques années. De nombreux partenariats ont été signés entre quelques-unes des plus importantes compagnies pharmaceutiques au monde et des start-ups spécialisées dans la biotechnologie. Ces start-ups mettent en service des solutions à base d'IA dans le cadre la recherche et le développement de nouvelles molécules thérapeutiques. Dans le monde pharmaceutique, la R&D est le domaine où l'IA s'est le plus intégrée.

Afin de pouvoir documenter son utilisation, il a fallu effectuer des recherches approfondies sur un panel d'entreprises. Les recherches ont été menées jusqu'en début septembre 2024 et ont mis en évidence l'existence du « Pharma AI Readiness Index » décrit dans un article (Figure 27).

Il s'agit d'un classement créé par la société CB Insights et datant d'août 2023. Celle-ci dispose d'une base de données permettant l'accès à un ensemble d'informations concernant les compagnies pharmaceutiques. Le classement présenté en figure ci-dessous s'effectue grâce à des critères comme « les demandes de brevet, les accords de partenariat et de licence, les activités de négociation, les acquisitions, ou encore les lancements de produits et de projets d'IA » (88).



Pharma AI Readiness Index

Ranking is based on a scoring model using CB Insights datasets.

Rank	Bank	Score ▼	Talent	Execution	Innovation
1	Roche	77.48	★★★★★	★★★★★	★★★★★
2	NOVARTIS	70.16	★★★★★	★★★★★	★★★★★
3	Johnson & Johnson	67.43	★★★★★	★★★★★	★★★★★
4	NOVARTIS	61.37	★★★★★	★★★★★	★★★★★
5	sanofi	59.14	★★★★★	★★★★★	★★★★★
6	AstraZeneca	58.12	★★★★★	★★★★★	★★★★★
7	AMGEN	57.66	★★★★★	★★★★★	★★★★★
8	Pfizer	52.10	★★★★★	★★★★★	★★★★★
9	GSK	51.79	★★★★★	★★★★★	★★★★★
10	Bristol Myers Squibb	49.74	★★★★★	★★★★★	★★★★★

Figure 27 : top 10 du Pharma AI Readiness Index (08/2023) (89)

Par la suite, des recherches complémentaires pour le top 10 des entreprises indiquées dans ce tableau ont été réalisées et deux entreprises en sont ressorties, Sanofi et GSK. Ces entreprises ont été sélectionnées sur la base des articles, conférences de presses et dossiers disponibles. Au moment de la recherche soit au début du mois de septembre 2024, il s'agissait en effet, des entreprises pour lesquelles on recensait un grand nombre d'articles détaillant leur utilisation de l'IA ainsi que les partenariats et les sommes engagées.

3.2) Cas d'utilisations

3.2.1) SANOFI

3.2.1.1) Présentation

Sanofi est une entreprise pharmaceutique française créée en 1973 dont le portefeuille de produits s'étend actuellement sur 6 aires thérapeutiques, à savoir :

- L'immuno-inflammation
- Les vaccins

- Les maladies rares
- Les maladies rares du sang
- La neurologie
- L'oncologie

Pour donner quelques chiffres, à l'heure actuelle elle possède 78 projets en phase clinique dont 33 sont en phase 3 (afin d'obtenir la mise sur le marché) (90).

3.2.1.2) « Plai »

Ces dernières années, l'entreprise communique énormément sur son ambition et ses avancés en termes d'intelligence artificielle. Dans plusieurs communiqués de presse, elle établit clairement l'enjeu que représente l'IA pour son développement futur, à savoir « Nous sommes résolus à faire de l'intelligence artificielle un atout majeur. Nous voulons devenir la première entreprise biopharmaceutique utilisant l'IA à grande échelle » (91).

On peut notamment citer le communiqué du 13 juin 2023, où Sanofi y évoque un nouvel outil mis en service : l'application « plai ». Cette application fournit une vue d'ensemble de l'intégralité des activités au sein de l'entreprise et ce en temps réel. « plai » exploite les données internes disponibles et la puissance de l'intelligence artificielle pour prédire des scénarii dans divers domaines (production, recherche...) avec précision. L'objectif est d'optimiser la prise de décision et la productivité tout au long de la chaîne de vie du cycle du médicament (de la recherche jusqu'à l'analyse commerciale en passant par la fabrication).

Dans le cadre de la recherche, différents outils d'IA permettent d'automatiser les activités et de réduire la phase de recherche de quelques semaines à quelques heures (Figure 28). Il s'agit de modèles numériques prédisant l'efficacité potentielle de molécules thérapeutiques sur une cible donnée et inversement. Selon Sanofi, l'IA a amélioré de 20 à 30% l'identification de cibles potentielles dans plusieurs aires thérapeutiques (92).

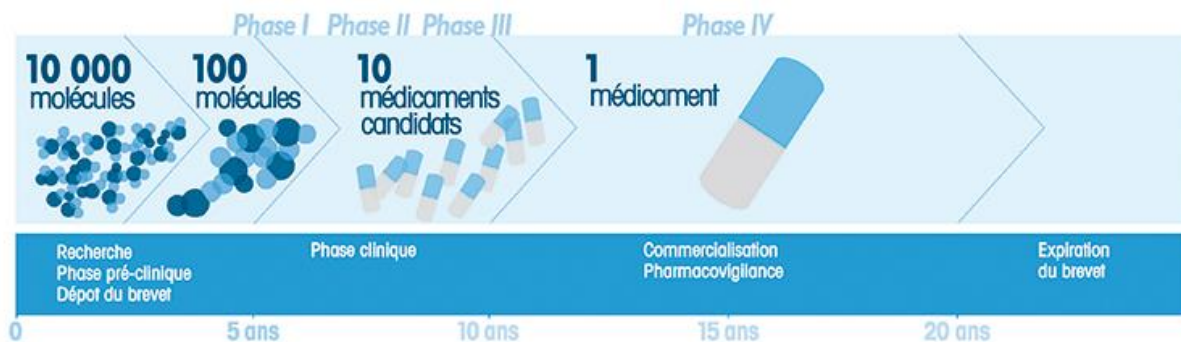


Figure 28 : Phases de développement d'un médicament (93)

Avec la transition numérique les dossiers de lots papier passent au format électronique et deviennent des EBR (Electronic Batch Record). Le dossier de lot peut se définir comme « un ensemble de documents dans lesquels sont inscrits les informations relatives à la fabrication, conditionnement et contrôle du médicament » (94). Les performances sur les dossiers de lots sont évaluées au travers de KPI (Key Indicator Performance) définis par l'entreprise. L'IA consisterait ici en un analyseur de KPI élaborant des propositions d'optimisation de parties du processus de fabrication. (95).

Dans le contexte de la production et de la qualité, « plai » a pour objectif d'optimiser continuellement les rendements de Sanofi en s'appuyant sur les performances des dossiers de lots. D'autre part, cette IA améliore la gestion des stocks de matières premières avec une précision de 80% sur la détection des niveaux de stocks bas, d'après l'entreprise. Ainsi, il est possible d'anticiper la phase de réapprovisionnement.

3.2.1.3) Partenariats

La création de partenariats clés constitue un enjeu majeur. L'ensemble des partenaires sont des entreprises spécialisées dans le développement d'outils intégrant de l'IA permettant de fournir de nouveaux médicaments. En effet, en 2022, Sanofi a signé un accord de licence et de collaboration de recherche avec Exscientia à hauteur de 100 millions de dollars. Il s'agit de la société de technologie pharmaceutique ayant mis au point la première

plateforme d'oncologie de précision fonctionnelle (96). Ce partenariat stratégique a permis d'effectuer des tests sur certains médicaments candidats à partir d'échantillons biologiques humains et ce plusieurs années avant le lancement des essais cliniques. Pour contextualiser des résultats, le développement d'un médicament nécessite en moyenne 15 ans d'après un article mis à jour en 2022 sur le site du Ministère de la Santé et de l'Accès aux Soins (97). La possibilité de réaliser des tests (exemple : criblage) en amont via des échantillons permet d'obtenir un premier aperçu de l'efficacité potentielle de certains candidats médicaments. Il y a donc une réduction des coûts associés à l'arrêt en phase de développement de médicaments se révélant être non prometteurs avant le début des essais cliniques. Le temps et l'argent ainsi économisés sont réinvestis dans d'autres médicaments à plus forte valeur ajoutée.

Par la suite, toujours en 2022, Sanofi a également misé sur l'acquisition d'une entreprise, Amunix Pharmaceuticals qui utilise de l'IA dans le cadre de médicaments ciblés. Cette dernière possède une expertise en immuno-oncologie et s'emploie à concevoir et à développer des cytokines thérapeutiques ainsi que des thérapies engageant les lymphocytes T « masquées ». Elle possède deux plateformes qui lui sont propres et leur exploitation lui permet de développer des médicaments innovants, notamment en dans le domaine de l'oncologie.

En 2021, Sanofi s'est engagé avec l'entreprise Owkin pour une somme de 180 millions de dollars.

Owkin est définie comme « une entreprise spécialisée dans l'intelligence artificielle (IA) et la médecine de précision qui élabore des modèles d'intelligence artificielle prédictifs appliqués à la biomédecine parmi les meilleurs de leur catégorie, ainsi que de solides ensembles de données » (98). Cette collaboration a pour but d'optimiser et d'accroître le développement du portefeuille de Sanofi en oncologie avec des recherches portant sur quatre types de cancers différents.

Les différents investissements que Sanofi a effectué dans le développement de médicaments s'appuyant sur la technologie de l'IA montrent le potentiel de cette dernière.

3.2.2) GSK

3.2.2.1) Présentation

GlaxoSmithKline (GSK) est un laboratoire pharmaceutique d'origine anglaise né en 2000 à la suite de la fusion de Glaxo Wellcome et SmithKline Beecham. Les produits de l'entreprise couvrent 4 domaines ou aires thérapeutiques :

- Les maladies infectieuses,
- Le VIH,
- L'oncologie,
- L'immunologie.

3.2.2.2) Concepts de l'IA

GSK a développé un pôle à part entière dédié à l'IA décrit par Kim Branson lors d'une émission appartenant au TWIML AI Podcast (This Week in Machine Learning and Artificial Intelligence) datant du 15 novembre 2021. Ce dernier est actuellement au poste de « Senior Vice President and global Head of artificial intelligence and machine learning » à GSK.

Dans cette émission, il lui est demandé d'expliquer comment est intégré le machine learning, l'IA au sien de GSK ainsi que les futures perspectives.

Kim Branson indique que l'entreprise possède des banques de données génétiques humaines constituant la toute première étape dans la recherche de potentielles cibles d'intérêt thérapeutique. En effet, on y trouve des variants génomiques, le génome de chaque individu étant unique et différent d'un individu à un autre. D'après lui on ne saurait utiliser que 15 à 20% de ces variants. En effet, une faible partie seulement se situant au niveau de ce que l'on appelle « l'open reading frame » ou cadre de lecture ouvert (ADN codant), permettent de connaître l'effet d'éventuelles mutations.

Quant à la majorité des autres variants, ils se retrouvent dans des séquences régulatrices de l'ADN (ADN non codant) pour lesquels on ne peut donc pas déterminer les effets.

Le principe repose sur la construction de modèles solides de machine learning déterminant les gènes affectés par des mutations, pour ainsi avoir de nouvelles

cibles potentielles sur lesquelles travailler afin de créer un médicament adapté (99).

Le 5 juin 2024, un article a été publié sur le site de GSK et permet d'entrevoir l'usage faite de l'IA ainsi que les résultats déjà obtenus. Dans cet article, Patrick Schwab (Director of Machine Learning and Artificial Intelligence at GSK) affirme que le machine learning a permis à GSK de prédire la réponse future de certains patients à un traitement en cours de développement. De plus, ce système permettrait de prédire les personnes à risque de développer une pathologie donnée (100). L'enjeu est le diagnostic d'un grand nombre de patients afin de prévenir la survenue de potentielles conséquences sévères de la maladie.

Deux exemples avancés et mis en pratique illustrent ce concept. Le premier concerne les personnes souffrant de lupus (maladie chronique auto-immune touchant plusieurs organes) pour lesquelles une IA serait à même de définir celles qui répondant ou non aux traitements usuels de la pathologie via l'analyse de datas génétiques et génomiques. Ainsi, les non-répondants ne s'exposent pas à de potentiels effets secondaires liés au médicament pouvant être lourds et bénéficient plus rapidement d'un traitement adapté.

Le second exemple, s'appuie sur le nombre de patients atteints d'une hépatite B à travers le monde qui est estimé à 254 millions en 2022 selon l'OMS.

Sur l'ensemble de ces patients, 13% se savent porteurs de la pathologie et seulement 3% sont traités (101). Selon GSK, l'avancée de l'intelligence artificielle permettrait de prédire avec plus de précision les patients à risque de développer une hépatite B et également de déterminer la réponse à un potentiel traitement. L'objectif est de diagnostiquer plus précocement la maladie et de limiter les complications liées associées (102).

L'article évoque également une méthode conjuguant l'IA et de l'apprentissage automatique. Des ingénieurs, généticiens et biologistes sont réunis pour développer des pipelines (ensemble des médicaments en développement ou en cours de recherche et développement) à l'aide d'une méthode d'apprentissage actif. Il s'agit d'un « processus de traduction inverse qui crée une boucle de rétroaction, également connue sous le nom de *laboratoire dans la boucle* ».

Ce processus soutient les scientifiques dans la sélection des expériences à prioriser parmi un ensemble d'hypothèses sur la base de cibles identifiées par les algorithmes. Sur la base des résultats obtenus, il est possible de savoir s'il est nécessaire d'effectuer des recherches complémentaires comme la susceptibilité de certains patients à répondre ou non à un traitement expérimental lors de la phase clinique.

Dans ce même article, la notion de big data est également abordée. En effet, dans les entreprises pharmaceutiques, des données massives sont générées et doivent être conservées pendant une durée déterminée. Il s'agit d'un point crucial pour alimenter une IA.

GSK possède ainsi des archives constituées au fil des années pour les données cliniques.

3.2.2.3) Partenariats

De plus, les partenariats réalisés permettent d'accéder à de grandes bases de données comme ceux initiés avec des banques de données génétiques, génomiques et de santé. Ces données récoltées serviront à la conduite des recherches à venir.

En termes de banques biomédicales, on peut citer la UK Biobank. Elle se définit comme « la base de données de recherche en santé la plus importante ».

Cette plateforme permet d'exploiter les données de santé anonymisées de 500 000 personnes ayant volontairement participé à l'élaboration de la plateforme (103). Elle a par ailleurs annoncé en novembre 2023 la publication de l'ensemble des séquences génomiques de ces 500 000 personnes. Cela représente le plus grand ensemble de données de séquençage du génome au monde (104)

La UK Biobank a publié en janvier 2023, un article mettant en lumière l'alliance prometteuse de l'IA avec l'une de leurs banques de données.

La puissance de traitement de données par l'IA ouvre de nouvelles perspectives concernant un ensemble de paramètres de santé tels que « la prédisposition génétique, l'expression génétique, les caractéristiques cliniques et biochimiques, le mode de vie et les facteurs comportementaux ».

Il s'agirait donc, d'une part, d'une approche personnalisée du risque de développement de maladies incluant des stratégies de prévention individuelle, d'autre part, de déterminer les meilleures options de traitement pour un patient spécifique dans l'optique d'un effet thérapeutique maximal.

La UK Biobank espère ainsi développer des scores de risques intégrés et basés sur l'IA. Ces nouveaux outils seront testés dans le cadre d'essais cliniques et sur un ensemble de pathologies comme le diabète de type 2 ou encore les maladies thyroïdiennes (105).

3.2.2.4) Mise en application

L'intelligence artificielle est déjà utilisée en routine chez GSK, notamment sur un de leurs sites appelé « Upper Merion », où un investissement à hauteur de 120 millions de dollars a été fait en 2019 dans un ensemble de domaines tels que la technologie, l'innovation et l'automatisation. Sur ce site, l'intelligence artificielle se retrouve dans des modèles mathématiques numériques dont l'objectif est de prédire les performances des vaccins et d'aider à l'amélioration de la performance pendant la fabrication, notamment grâce à l'apprentissage automatique. Ces modèles servent également dans le cadre de la maintenance au sein du site, notamment en anticipant le remplacement des équipements et en informant les équipes pour une gestion de stock optimisée (106).

3.2.3) Exscientia

Exscientia est une entreprise de biotechnologie spécialisée dans l'utilisation de programmes d'intelligence artificielle appliqués au domaine de la recherche pharmaceutique. Cette entreprise, fondée en 2012, est aujourd'hui considérée comme une pionnière dans ce domaine. Elle a rapidement pu s'imposer comme l'un des principaux leaders dans le développement de nouvelles molécules en particulier grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle (107). Cette approche a permis d'accélérer et surtout d'optimiser la découverte de nouvelles molécules à visée thérapeutique (108). L'une des principales caractéristiques d'Exscientia est l'utilisation d'ontologies. Une ontologie est une

modélisation d'un ensemble de données selon des concepts ou des relations connues dans un domaine spécifique (par exemple, géographie, médecine, agriculture, etc.). Ce concept permet de modéliser au mieux les relations complexes retrouvées entre des composés chimiques et des cibles biologiques. Il est donc plus facile de créer de nouveaux traitements et de les rendre plus efficaces et précis. En somme, l'avantage est un gain de temps considérable, une réduction des coûts liés à la recherche et au développement avec une augmentation des chances de succès de nouvelles molécules.

3.2.4) Insilico Medecine

Tout comme Exscientia, Insilico Medicine est une entreprise de biotechnologie créée en 2014 et spécialisée dans l'utilisation de l'intelligence artificielle. Elle se donne pour principal objectif d'accélérer la découverte et le développement de nouveaux médicaments en exploitant sa propre plateforme appelée Pharma.AI (109). Cette plateforme permet le développement de nouvelles molécules thérapeutiques selon 3 axes majeurs d'après l'entreprise :

- La Découvrir/Prioriser des hypothèses : des applications (telle que « PandaOmics ») analysent plusieurs millions de données omiques pour fournir des hypothèses viables sur de potentielles nouvelles cibles médicamenteuses (110).
- Développer de nouveaux médicaments : la plateforme « Chemistry42 » permet de découvrir de nouveaux traitements grâce à une IA générative (ex : conception de novo) et à la précision des méthodes basées sur la physique (ex : alchimie) afin d'obtenir le résultat le plus optimal possible (111).
- Concevoir/Prédire les résultats d'un essai clinique : avec sa plateforme de prévision multimodale « inClinico », elle utilise de grandes quantités de données sur un ensemble de sujets (cibles thérapeutiques, pathologies, essais cliniques...). Cette plateforme conçoit et prédit les résultats d'un essai clinique augmentant ainsi significativement les chances d'aboutissement en identifiant par exemple les points critiques (112).

IV) Enjeux de l'intelligence artificielle (partie commune)

1) Enjeux de sécurité et économiques

L'intelligence artificielle est aujourd'hui en train de prendre une place de plus en plus importante au sein de notre société. Bien que son essor apporte beaucoup de perspectives intéressantes pour le futur dans un grand nombre de domaines, ce même essor suscite aussi des inquiétudes. Depuis son émergence dans notre vie quotidienne, l'intelligence artificielle est sujette à des dérives. Il est important de préciser que l'intelligence artificielle est un terme extrêmement vaste. Il couvre un large panel de technologies allant d'un algorithme de programmation ou de recherche jusqu'aux SALA (Systèmes d'Armes Létales Autonomes) (113). Il apparaît donc nécessaire d'avoir une réglementation qui permette d'encadrer au mieux ces concepts, afin d'en avoir l'utilisation la plus vertueuse et la plus sécurisée possible.

1.1) Enjeux de sécurité : le deepfake

Concernant les dérives pouvant survenir aujourd'hui, on peut parler des deepfakes qui ont plusieurs fois été mentionnés ces derniers mois. Le mot deepfake peut être traduit en français par le mot « hyper-trucage » et consiste à créer des vidéos, des photos, voire des fichiers audio, grâce à de l'intelligence artificielle. Si à l'origine son recours s'effectuait à des fins humoristiques, les usages abusifs ont conduit à des dérives regrettables

En mars 2022, une vidéo du président ukrainien Volodymyr Zelensky demandant à son peuple de déposer les armes et arrêter les combats a été diffusée sur une chaîne d'informations qui avait été piratée ainsi que sur la quasi-totalité des réseaux sociaux avant que l'information ne soit démentie (114). Ci-dessous un comparatif montre la différence entre l'image générée artificiellement et la réalité (Figure 29). Bien qu'il apparaisse facile d'identifier la fausse image, ce procédé reste extrêmement dangereux compte tenu des progrès fulgurants de l'intelligence artificielle sur des périodes assez courtes.

Un autre fait divers lié à l'utilisation de deepfake survenu en 2019 et concernant Nancy Pelosi (présidente de la chambre des représentants des Etats-Unis) a eu un fort retentissement. La vidéo trafiquée avait pour but de la faire passer pour ivre lors d'un discours (115). Cette vidéo a été partagée massivement sur les réseaux sociaux, lui permettant de cumuler plus de vingt millions de vues contre moins d'un million pour l'originale. L'information a bien évidemment été rapidement démentie, mais il n'en reste pas moins inquiétant de voir les effets que peuvent avoir une vidéo trafiquée, couplé à un partage massif sur les réseaux sociaux.



Figure 29 : Comparatif des images du président Volodymyr Zelensky (à droite : l'image truquée, à gauche : l'image réelle) (116)

Pour aller un peu plus loin sur le sujet des deepfakes, on remarque que leur utilisation ne cesse d'augmenter. On peut le constater en regardant le rapport sur les tentatives de fraude de l'entreprise SUMSUB (entreprise spécialisée dans la vérification d'identité et la détection de fraudes (117)) qui dévoile qu'entre 2022 et 2023, il a été observé, dans certains pays, une augmentation de plus de 4000% de cas de fraudes (Figure 30) par l'utilisation de la technologie deepfake (118). Si, ici, on ne parle que des tentatives de fraudes, on sait que le deepfake peut être utilisé dans un bon nombre d'autres domaines. Il peut donc y avoir des problèmes de sécurité, particulièrement pour les industries qui sont souvent sujettes à des tentatives de fraude, alors que le phénomène ne fait que s'amplifier. Les secteurs les plus touchés sont les

médias en lignes, services professionnels, les systèmes de santé, le transport et l'industrie du jeu vidéo (118). Il s'agit donc d'un premier exemple de dérives de l'utilisation de l'intelligence artificielle qui, en moins d'une dizaine d'années, est devenu une menace à différentes échelles, de la nuisance à un particulier (discours de Nancy Pelosi) à de l'ingérence au plus haut niveau d'état souverain (fausse vidéo du président Zelensky).

Dans le secteur de la santé, pour le moment aucun cas mentionnant l'utilisation de deepfake n'a été pour l'instant déclaré cependant il est assez facile d'entrevoir ce que pourrait donner l'utilisation des deepfakes. Les conséquences d'une utilisation malveillante pourraient être graves avec par exemple la rédaction d'un faux rapport médical, basé sur des données falsifiées, qui pourrait être créé pour tromper des autorités de santé ou des professionnels de soins. Des questions éthiques et morales se posent sur la sécurité des données de santé des patients. Dans un cas extrême, un deepfake d'un médecin pourrait être utilisé pour prescrire des médicaments ou recommander des interventions médicales non nécessaires.

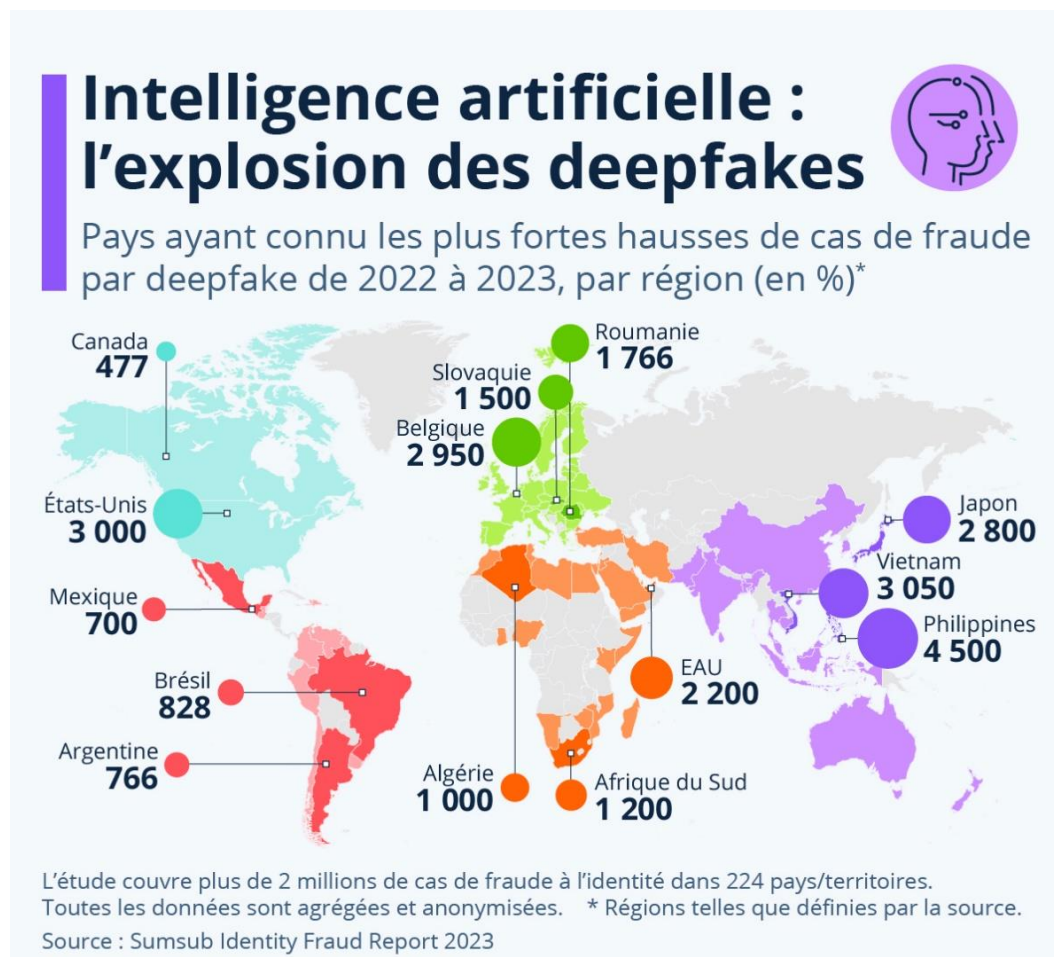


Figure 30 : résultats du rapport « Sumsb Research : Global Deepfake Incidents Surge Tenfold from 2022 to 2023 » (Statistica) (119)

1.2) Enjeux économiques : la transformation des emplois

Il s'agit sûrement de la dérive liée à l'intelligence artificielle qui inquiète le plus. Si l'intelligence artificielle était surexploitée à un point où elle pourrait supplanter l'humain, qu'advviendrait-il de bon nombre d'emplois ? En effet, même si l'on peut supposer qu'une telle utilisation de l'intelligence artificielle pourrait nécessiter de créer de nouveaux emplois, il y en aurait un certain nombre d'autres qui serait à même d'opérer une transformation radicale. Une étude relayée par le Parlement Européen affirme que 14% des emplois au sein de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economique) pourraient être automatisés et que 32% supplémentaires verraient des changements drastiques dans leurs pratiques (120). Toutefois, ces chiffres sont à relativiser car l'automatisation complète d'un emploi en particulier est une

tâche bien spécifique et longue à mettre en place. Il est aussi admis qu'il serait bien plus facile d'automatiser des emplois requérant peu de qualifications. A titre d'exemple, on peut citer le service postal canadien qui envisageait de remplacer la livraison de courrier classique par une livraison faites par des drones. Ce projet n'a au final jamais aboutit.(121).

A priori on se dirigerait plus vers un paradigme de la transformation profonde des emplois notamment via une automatisation totale ou partielle, que vers une destruction pure et simple d'un grand nombre d'emplois. Selon un rapport de l'ILO (International Labor Organization), il s'agit d'un changement auquel il faudra s'adapter au plus vite, afin de ne pas le subir (Figure 31). Il est également important de préciser que l'arrivée de l'intelligence artificielle dans le monde du travail aura des impacts plus ou moins importants en fonction des professions touchées. Toujours selon le rapport de l'ILO, les professions les plus susceptibles de se voir exposées à l'IA générative sont les emplois administratifs puis les professions intermédiaires, suivies des professions intellectuelles et scientifiques(122).

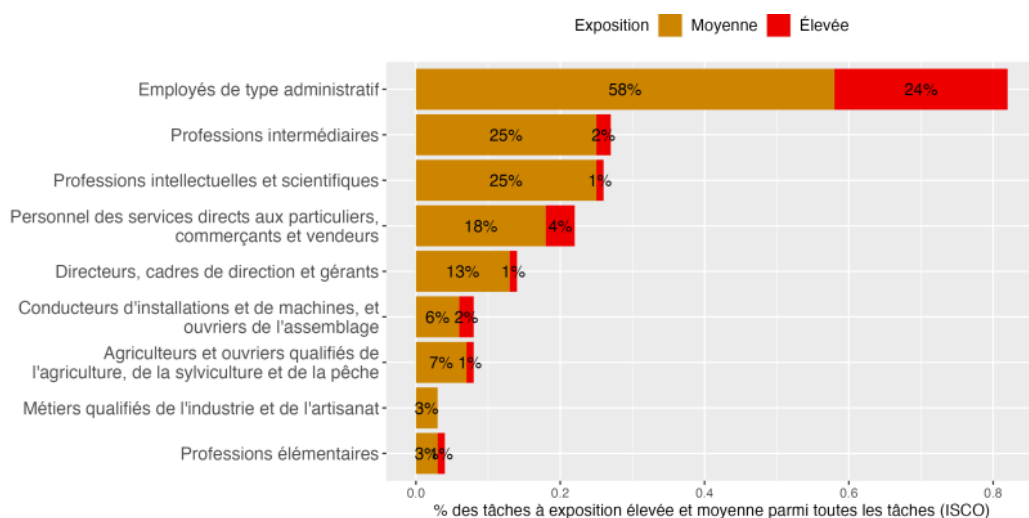


Figure 31 : Tâches moyennement et fortement exposées à l'IA générative, par groupe professionnel (123)

Les pharmaciens se situent dans la catégorie professionnelle « professions intellectuelles et scientifiques » selon l'INSEE (Institut National des Statistiques

et des Etudes Economiques). Cette catégorie regroupe un grand nombre de professions, dont celles ayant trait à la santé, comprenant donc les pharmaciens à la section 311F (124). Il est intéressant de noter que dans cette catégorie, on estime une exposition moyenne à hauteur de 25% pour les professions qui la composent. Ce seul chiffre est abstrait car on ne peut faire la part des professions plus ou moins impactées par l'IA générative. Dans le monde pharmaceutique, le secteur de l'industrie a déjà signé des contrats avec des entreprises spécialisées dans le développement des programmes à base d'intelligence artificielle. A l'heure actuelle, faute de retour d'expérience consolidé, il semble prématuré de tirer des conclusions mais la problématique est désormais soulevée, afin que la transition vers un nouveau modèle d'emploi s'effectue le mieux possible.

2) Enjeux juridiques

2.1) Première réglementation sur l'IA

L'intelligence artificielle apporte son lot de changements depuis quelques années et comme bon nombre de nouveaux outils technologiques, il est essentiel que son usage soit encadré et réglementé afin que son utilisation soit la plus saine possible. Jusqu'à peu il n'y avait pas de loi en rapport avec l'intelligence artificielle. C'est donc en 2024 que la toute première réglementation des usages de l'intelligence artificielle a été publiée. Le Parlement européen a adopté la loi en mars 2024 et le 21 mai 2024, ce qu'on appelle l'« IAAct » a été adopté à son tour par le Conseil de l'Union Européenne (125). La loi s'applique progressivement sur une période de 3 ans, à partir de juin 2024. Cette nouvelle loi se veut autant opposable que les RGPD avec l'élaboration d'un régime de sanction financière en fonction des cas d'infractions.

2.2) Contours de l'utilisation de l'IA

Afin d'encadrer au mieux l'utilisation de l'intelligence artificielle, l'IA Act décrit un certain nombre de sanctions liées à des usages détournés et/ou mal intentionnés de l'IA. Les sanctions sont mentionnées dans l'article 99 dont l'entrée en vigueur est prévue pour le 2 août 2025. Il est mentionné à l'alinéa 4 que « Le non-respect de l'interdiction des pratiques d'IA visées à l'article 5 est passible d'amendes administratives pouvant aller jusqu'à 35 000 000 EUR ou, si le contrevenant est une entreprise, jusqu'à 7 % du chiffre d'affaires annuel mondial total réalisé au cours de l'exercice précédent, le montant le plus élevé étant retenu » (126). L'article 5 mentionné évoque l'ensemble des pratiques interdites en matière d'intelligence artificielle et figurant dans le registre « risque inacceptable ». Cet article est prévu pour rentrer en vigueur en février 2025. Pour comprendre ce qui est autorisé ou non en matière d'intelligence artificielle au sein de l'Union Européenne, l'IA Act possède un classement en 4 paliers de risques associés à l'utilisation de l'intelligence artificielle (89) :

- Palier 1 : Risque minimal
- Palier 2 : Risque spécifique en matière de transparence
- Palier 3 : Haut risque
- Palier 4 : Risque inacceptable

Règlement IA - Approche par les risques

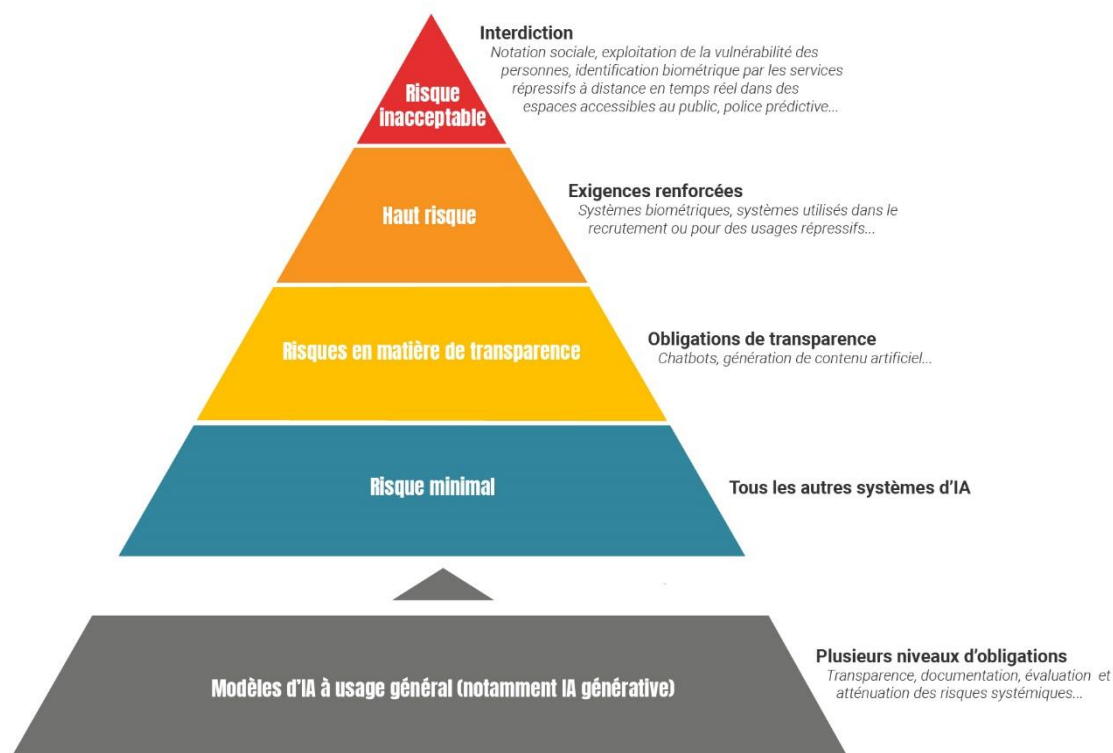


Figure 32 : Classement des risques liés à l'utilisation de l'intelligence artificielle (127)

Le graphique présenté ci-dessus (Figure 32) inclut donc un certain nombre de mentions dans les utilisations interdites. Il est cependant important de préciser que ces interdictions pourront être levées dans de très rares cas le nécessitant (ex : recherches de personnes disparues ou préventions du risque d'attentat). Actuellement, si un nouveau système d'intelligence artificielle est créé et placé en palier 2 ou 3, alors le concepteur aura un certain nombre d'obligations à respecter, s'il souhaite que son nouveau système puisse être autorisé sur le territoire européen. A l'article 16 de la réglementation on retrouve les « obligations des fournisseurs de systèmes d'IA à haut risque ». Le système d'IA doit donc répondre à un ensemble de normes spécifiques, comme le fait de disposer d'un marquage CE. Le marquage CE s'obtient en s'assurant de la conformité à la réglementation du dispositif.

Cette nouvelle législation va donc permettre de donner un cadre à l'utilisation de l'intelligence artificielle, ce qui permettra à terme de disposer d'outils avec lesquels il sera possible de travailler en toute sécurité. C'est d'autant plus important pour le secteur de la santé. En effet, la plupart des données traitées dans ce secteur sont des données dites sensibles. C'est le cas des données de santé des patients, que ce soit dans le cadre de la pratique officinale ou dans l'exploitation de celles-ci dans des banques de données utilisées par l'industrie pharmaceutique. Il y a donc une nécessité d'obtenir des garanties quant à l'exploitation des données de santé par des programmes d'intelligence artificielle mettant en avant leur transparence sur ce sujet

3) Enjeux environnementaux

3.1) Stockage et matériel

Une des principales préoccupations dans notre société actuelle est l'environnement et l'impact que l'être humain peut avoir dessus. Bien évidemment, l'arrivée de l'intelligence artificielle et son utilisation de plus en plus démocratisée pose la question de son impact sur l'environnement. Pour qu'un système d'intelligence artificielle fonctionne, il faut des serveurs informatiques capables de stocker de grandes quantités de données en réseaux. Un serveur informatique est une sorte d'ordinateur qui peut fournir un ensemble de services allant de l'hébergement de site web au stockage de données. Un serveur va posséder de grandes capacités de stockage, idéales pour la gestion de base de données dont on peut avoir besoin pour alimenter les systèmes d'intelligence artificielle (128). Les serveurs pourront être retrouvés dans ce qu'on appelle des « data center » (Figure 33), qui sont des infrastructures où l'on retrouve un réseau d'ordinateurs et d'espaces de stockage permettant d'abriter un grand nombre de données (129). On peut donc y retrouver un grand nombre de serveurs.

Pour avoir un ordre d'idée, on peut citer le plus grand data center de France, le « Paris Digital Park ». Il s'agit d'un bâtiment avec une surface de 40 000 m² , soit 7 terrains de football, où l'on retrouve essentiellement des serveurs. Ce site a été mis à contribution lors des Jeux Olympiques de Paris 2024, notamment pour la diffusion des épreuves à l'international (130). Si le data center que l'on vient d'évoquer paraît déjà immense, certains ont une surface dépassant les 500 000 m² , comme le « China Telecom Inner Mongolia Information Park », situé en Mongolie et qui contient plus d'1,2 millions de serveurs (131).

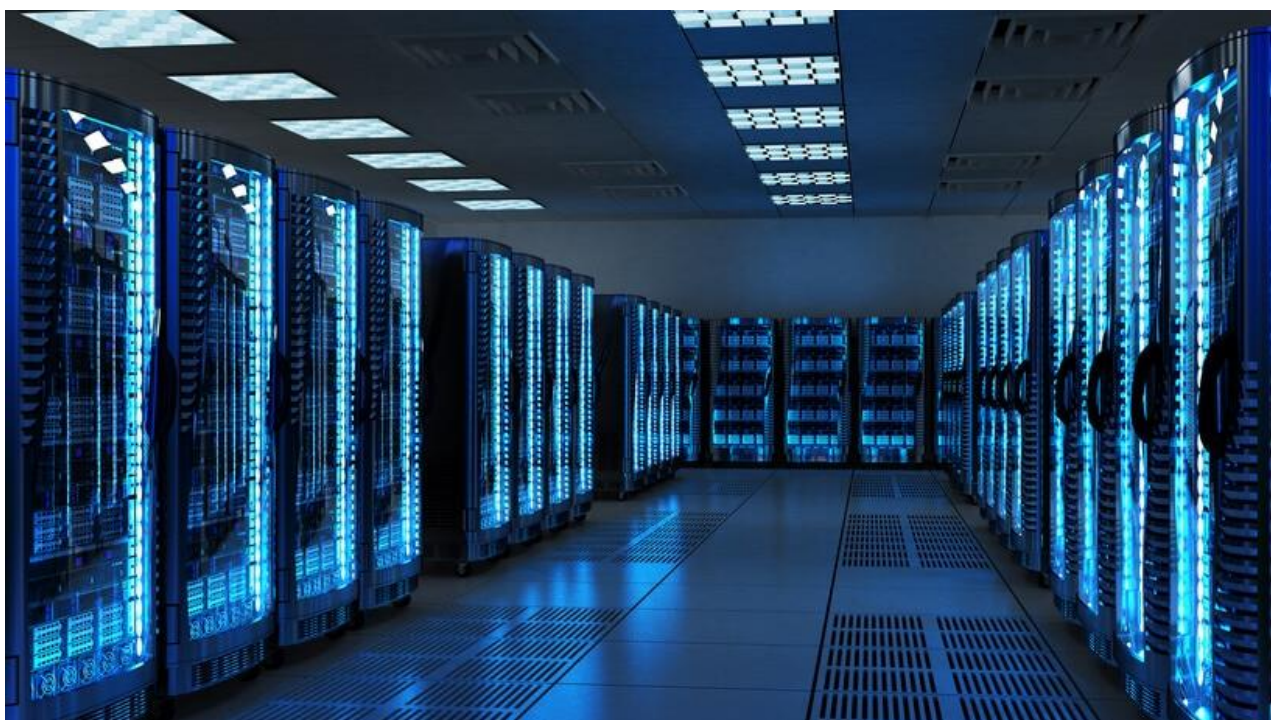


Figure 33 : photo d'un data center (132)

Aujourd'hui, de plus en plus de systèmes d'intelligence artificielle arrivent sur le marché et certains sont même devenus très connus, comme ChatGPT, développé par la société OpenAI. Encore plus récemment Google a sorti sa nouvelle IA appelée Gemini. Le lancement et le maintien en service de tels outils nécessitent l'ouverture exponentielle de data centers, très énergivores et donc à forte empreinte carbone. L'impact sur l'environnement a fait l'objet d'une étude conduite par l'université du Massachussets en 2019 (Figure 34). L'empreinte

carbone est mesurée selon le système métrique anglais, en pounds de CO₂. A titre de comparaison, l'empreinte carbone d'un être humain sur une année entière représente environ 11 000 pounds de CO₂ (soit 5 tonnes de CO₂), alors que l'entraînement d'un système d'intelligence artificielle peut avoir une empreinte d'environ 626 000 pounds de CO₂ (soit 280 tonnes de CO₂). En somme, l'entraînement d'un système d'IA représente l'empreinte carbone moyenne d'environ 56 humains (133). Pour précision, ici ne sont prises en compte que les émissions de CO₂ pour l'entraînement d'un modèle d'intelligence artificielle. Il faut aussi prendre en compte que l'utilisation de ce modèle, une fois l'entraînement achevé, entraînera des émissions supplémentaires.

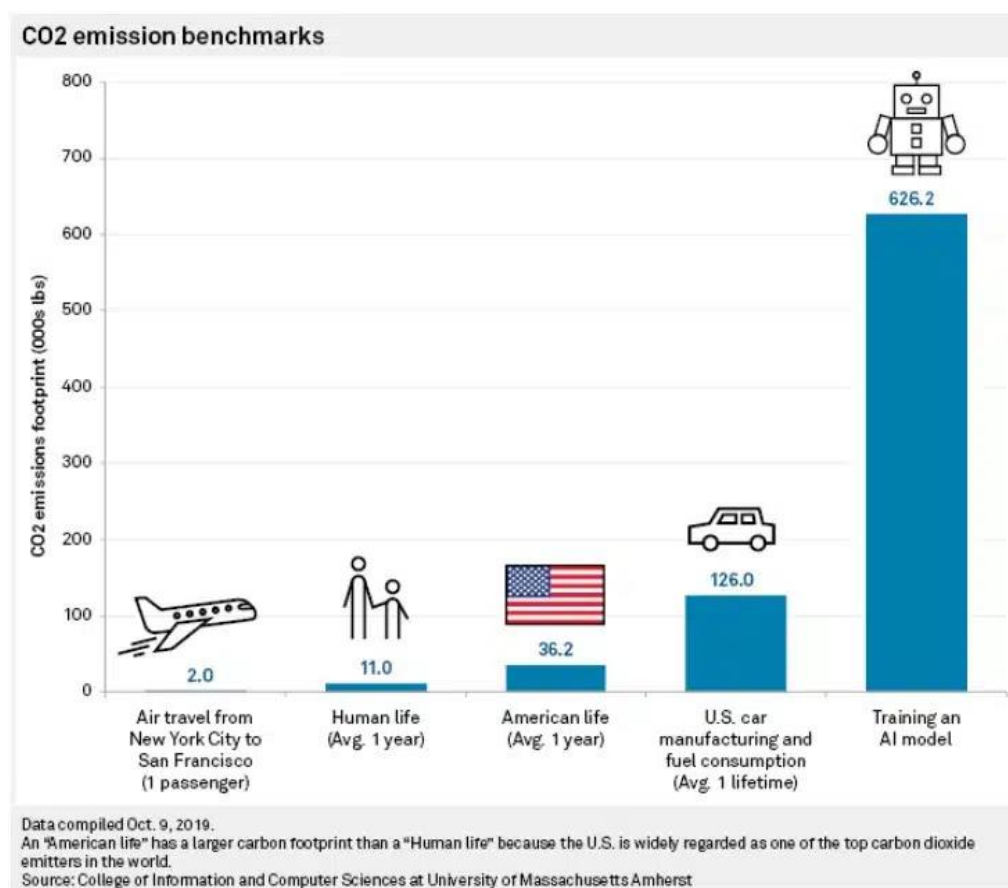


Figure 34 : graphique de l'empreinte carbone (134)

Même si aucune estimation n'a été faite à l'heure actuelle concernant le coût environnemental de l'intelligence artificielle utilisée dans le secteur pharmaceutique, il est toutefois possible de se faire une idée de l'impact

potentiel que cette technologie pourrait représenter. Tout d'abord les industries pharmaceutiques, au vu du grand nombre de données qu'elles génèrent et exploitent, auraient besoin d'une grande quantité de serveurs avec la puissance de calcul associée. Et si l'on regarde du côté officinal, en supposant qu'une grande partie des officines adoptent de tels outils afin d'optimiser leur pratique quotidienne, il faudrait composer avec une quantité de données non négligeable et également un grand besoin de serveurs pour les exploiter. Ce ne sont que des suppositions mais il est évident que l'utilisation de l'intelligence artificielle ne peut se faire sans envisager l'impact environnemental qu'elle peut avoir.

3.2) Puissance de calcul

Un autre aspect de l'IA, sur lequel des chercheurs d'OpenAI se sont intéressé concerne la puissance de calcul nécessaire pour la recherche sur des modèles d'intelligence artificielle. Selon ces chercheurs depuis 2012, il est nécessaire de doubler la puissance de calcul tous les 3,4 mois (135). Pour l'exemple, si on se base sur l'étude de janvier 2012 à janvier 2024, on constate alors une augmentation d'environ $2,2^{12}$ fois la puissance de calcul, ce qui est un chiffre complètement hors de proportions. Ce calcul permet également de mettre en lumière le coût environnemental que peut avoir l'intelligence artificielle aujourd'hui. Sur le long terme, le constat pourrait être davantage alarmant. Dans un contexte de changement climatique s'accroissant chaque année, le développement à grande vitesse de l'intelligence artificielle ainsi que l'ouverture exponentielle de data centers posent également un problème éthique. Une étude conduite en 2018 avance que d'ici 2040, les ICTs (Information and Communication Technology) pourraient représenter jusqu'à 14% des émissions globales, avec une part majeure attribuée aux infrastructures comme les data centers. L'intelligence artificielle pourrait avoir une part non négligeable dans ces émissions (136).

3.3) Déchets électroniques

Les déchets rejetés par la technologie d'intelligence artificielle sont regroupés dans un ensemble appelé « E-Waste » pour déchets électroniques. Il s'agit donc de produits électroniques non fonctionnels ou arrivés en fin de vie. Au début ce sont des EEE (Equipements Electriques et Electroniques). Ces EEE sont définis comme suit par la directive européenne 2012/19/UE, il s'agit « d'équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques et les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu. Parmi les produits concernés figurent par exemple les congélateurs, les téléviseurs, les téléphones, les panneaux photovoltaïques, les distributeurs de billets de banques, les ampoules, les sèche-cheveux, les vélos électriques, les jouets électriques, etc.» (137).

Afin d'avoir un ordre d'idée de ce que représentent les déchets électroniques, il est possible de consulter le « Global E-Waste Monitor ». Il s'agit d'un rapport rédigé chaque année par l'UNITAR (United Nation Institute for Training and Research). Dans le rapport de l'année 2024, il est évoqué qu'en 2022, 62 millions de tonnes de déchets électroniques ont été générés (Figure 35). Ce chiffre a presque doublé depuis 2010, et les projections indiquent que l'on pourrait dépasser les 80 millions de tonnes de déchets d'ici à 2030. Sur l'ensemble de ces déchets électroniques, le rapport estime à 22,3% la part de déchets collectés et recyclés correctement, ce qui laisse entrevoir un impact environnemental à grande échelle (138). Bien évidemment, l'intelligence artificielle à elle seule ne génère pas une telle quantité de déchets. Cependant, elle fait partie de ce problème plus global et son rythme de développement ainsi que les matériaux et outils nécessaires à son fonctionnement contribuent à ce problème.

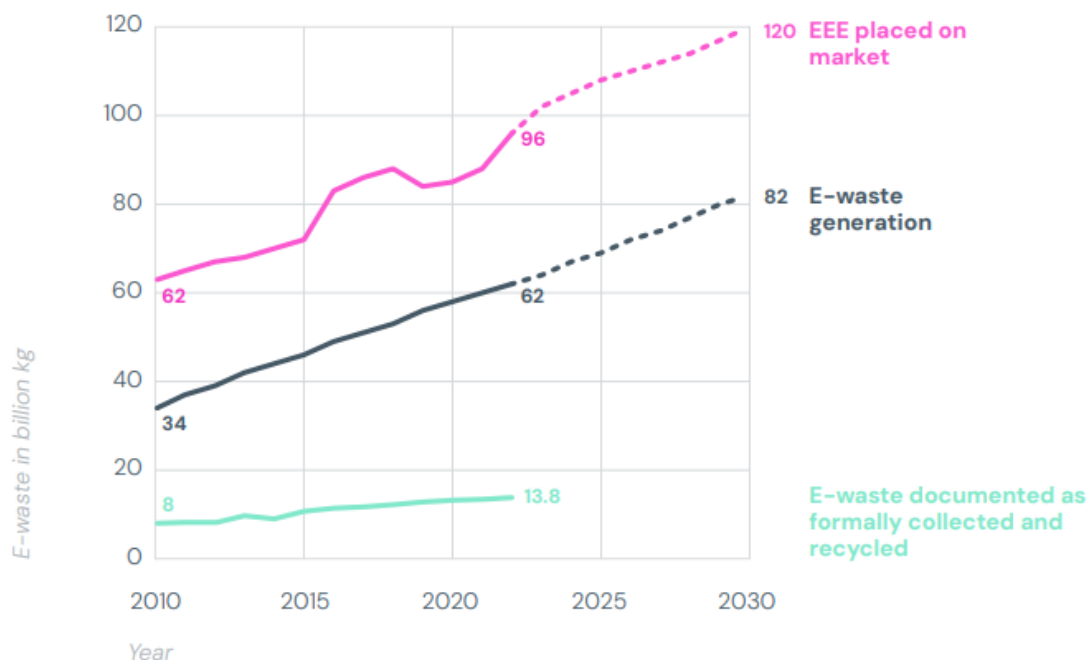


Figure 35 : nombre de millions de tonnes de déchets électroniques générés par année (139)

3.4) Une intelligence artificielle durable ?

Malgré les inquiétudes environnementales qu'elle suscite, il existe une marge de progression pour faire de l'intelligence artificielle un outil s'inscrivant dans le développement durable et même au service de celui-ci. En 2023 l'ESSCA (Ecole Supérieure des Sciences Commerciales d'Angers), une grande école de commerce, a fondé l'« AI for Sustainability Institute » composé de chercheurs travaillant sur le potentiel de l'intelligence artificielle dans la décarbonation et la préservation de l'environnement. Son directeur Dejan GLAVAS reconnaît le grand impact environnemental de l'intelligence artificielle mais nuance le propos en évoquant une utilisation plus raisonnée de l'intelligence artificielle (140). L'idée ici serait de passer « d'une IA de précision à une IA de l'efficacité », c'est-à-dire ne pas chercher le modèle le plus performant mais celui qui répond le mieux au besoin en réduisant les quantités de calculs, en privilégiant les modèles simples (en opposition aux réseaux de neurones). L'effet final recherché consiste à diminuer le plus possible la consommation énergétique liée à l'utilisation de l'intelligence artificielle, tout en

réduisant les déchets électroniques produits, grâce à une consommation raisonnée des matériaux et des composants. Il y a d'ailleurs déjà des exemples d'intelligence artificielle empruntant ce chemin. La société française « Another Brain » a choisi l'approche d'une nouvelle génération d'intelligence artificielle en créant un modèle d'IA « bio-inspiré » appelée « OrganicAI ». L'entreprise évoque son modèle comme « capable d'apprendre sans supervision, d'expliquer ses décisions, de fonctionner sans Big Data, sans cloud et en temps réel ; elle est également frugale en énergie » (141). Il s'agit donc là d'un nouveau format d'intelligence artificielle s'inscrivant dans une dynamique de développement durable et d'économie d'énergie.

V) Conclusion

En conclusion, l'utilisation de l'intelligence artificielle au sein de l'industrie pharmaceutique a déjà débuté et son potentiel est déjà visible sur certains sites de production. L'intelligence artificielle pourrait être appliquée à une grande partie des domaines de l'industrie pharmaceutique permettant ainsi l'émergence d'un nouveau modèle de production ou encore de recherche. L'intelligence artificielle serait donc à même d'optimiser de nombreux aspects de ce secteur.

Néanmoins, il apparaît nécessaire de contrôler les applications et l'intégration progressive de ces technologies au sein des entreprises pharmaceutiques avec des contrôles rigoureux afin d'en assurer une utilisation vertueuse et au service de l'amélioration de l'ensemble des processus internes aux entreprises. Les perspectives d'applications de l'IA dans le secteur pharmaceutique sont à l'heure actuelle déjà nombreuses et prometteuses. Cependant, les questions d'éthique et de législation doivent être prises en compte afin d'en assurer une utilisation vertueuse.

Pour conclure, l'intelligence artificielle est un domaine en perpétuelle évolution qui influencera les pratiques pharmaceutiques dans les années à venir. Il faudra être également vigilant quant au cadre juridique avec l'émergence de nouvelles législations pour encadrer cet outil et préserver les données sensibles. Enfin il faudra également prendre en compte la dimension et l'impact environnemental de l'intelligence artificielle dans le cadre d'une utilisation à grande échelle. Les acteurs du secteur seront à terme, confrontés au choix d'intégrer et de travailler ou non avec l'intelligence artificielle.

Bibliographie

1. In his Novel « Erewhon » Samuel Butler Describes Artificial Consciousness : History of Information [Internet]. [cité 16 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=3850>
2. [Histoire des sciences] L'histoire de l'intelligence artificielle (IA) [Internet]. 2018 [cité 16 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=qmwJx-r5vmw>
3. L'histoire de l'intelligence artificielle en 7 dates clefs [Internet]. 2023 [cité 16 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=dgJdPERKbqU>
4. L B. INTELLIGENCE-ARTIFICIELLE.COM. 2022 [cité 16 avr 2024]. Test de Turing - Un test pour mesurer l'intelligence artificielle. Disponible sur: <https://intelligence-artificielle.com/test-de-turing/>
5. Guerres mondiales - Alan Turing(23 juin 1912 - 7 juin 1954) - Herodote.net [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.herodote.net/Bio/Turing-biographie-VHVyaW5n.php>
6. The Meeting of the Minds That Launched AI - IEEE Spectrum [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://spectrum.ieee.org/dartmouth-ai-workshop>
7. clubic.com [Internet]. 2018 [cité 4 nov 2024]. HAL 9000 bientôt sur votre mur ? Disponible sur: <https://www.clubic.com/mag/actualite-846058-hal-9000-mur.html>
8. 25 Years Ago Today: How Deep Blue vs. Kasparov Changed AI Forever | AI Business [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://aibusiness.com/ml/25-years-ago-today-how-deep-blue-vs-kasparov-changed-ai-forever#close-modal>
9. Guinnebault C. Bridge the Gap with Cécile Guinnebault. 2021 [cité 4 nov 2024]. Intelligence artificielle v/s intelligence humaine : 5 leçons d'AlphaGo. Disponible sur: <https://bridge-the-gap-coaching.com/la-boite-a-outil-du-coach-systemique/strategie-jeu-de-go/alphago-intelligence-artificielle/>
10. Intelligence artificielle, de quoi parle-t-on ? [Internet]. [cité 29 mars 2024]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/fr/intelligence-artificielle/intelligence-artificielle-de-quoi-parle-t-on>
11. enseignementsup-recherche.gouv.fr [Internet]. [cité 15 oct 2024]. Intelligence artificielle (IA) : de quoi parle-t-on ? Disponible sur: <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/intelligence-artificielle-de-quoi-parle-t-91190>

12. Amah. Intelligence Artificielle, Machine Learning et Deep Learning : Quels liens et quelles différences ? [Internet]. Geek Mais Pas Que. 2019 [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.geekmaispasque.com/2019/10/intelligence-artificielle-machine-learning-deep-learning-liens-differences/>
13. Apprentissage automatique [Internet]. [cité 16 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/fr/definition/apprentissage-automatique>
14. Différences entre les types de données structurées et non structurées [Internet]. [cité 9 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.oracle.com/fr/big-data/structured-vs-unstructured-data/>
15. Kassel R. Machine Learning & Clustering : Focus sur l'algorithme CAH [Internet]. Formation Data Science | DataScientest.com. 2020 [cité 25 oct 2024]. Disponible sur: <https://datascientest.com/machine-learning-clustering-focus-sur-algorithme-cah>
16. Turhan R. IA & Marketing : la promesse de la data intelligence ! (Part 2) [Internet]. Fanvoice. 2018 [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.fanvoice.com/ia-marketing-la-promesse-de-la-data-intelligence-part-2/>
17. Apprentissage profond (deep learning) [Internet]. [cité 16 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/fr/definition/apprentissage-profond-deep-learning>
18. Que sont les réseaux neuronaux ? | IBM [Internet]. 2024 [cité 9 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/neural-networks>
19. myMaxicours [Internet]. [cité 4 nov 2024]. L'intelligence artificielle. Disponible sur: <https://www.maxicours.com/se/cours/l-intelligence-artificielle/>
20. Thèmes | Parlement européen [Internet]. 2020 [cité 16 avr 2024]. Intelligence artificielle : définition et utilisation. Disponible sur: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20200827STO85804/intelligence-artificielle-definition-et-utilisation>
21. 20200827STO85804_fr.pdf [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2020/9/story/20200827STO85804/20200827STO85804_fr.pdf
22. Zaffagni M. Futura. [cité 6 nov 2024]. Facebook : une reconnaissance faciale presque humaine avec DeepFace. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/internet-facebook-reconnaissance-faciale-presque-humaine-deepface-52925/>
23. Guide de l'intelligence artificielle dans le domaine de la santé [Internet]. Calmedica. 2021 [cité 16 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.calmedica.com/lintelligence-artificielle-dans-le-domaine-de-la->

24. CORDIS | European Commission [Internet]. [cité 16 avr 2024]. Machine Learning Artificial Intelligence Early Detection Stroke Atrial Fibrillation | MAESTRIA Project | Fact Sheet | H2020. Disponible sur: <https://cordis.europa.eu/project/id/965286/fr>
25. France 3 Bourgogne-Franche-Comté [Internet]. 2024 [cité 16 avr 2024]. C'est une première en Côte-d'Or : l'intelligence artificielle « pour détecter les cancers plus rapidement ». Disponible sur: <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bourgogne-franche-comte/cote-d-or/dijon/c-est-une-premiere-en-cote-d-or-l-intelligence-artificielle-pour-detecter-les-cancers-plus-rapidement-2927031.html>
26. Jalinière H. Sciences et Avenir. 2019 [cité 4 nov 2024]. Dépistage : l'IA du MIT qui prédit l'apparition du cancer du sein. Disponible sur: https://www.sciencesetavenir.fr/sante/cancer/une-intelligence-artificielle-pour-predire-le-cancer-du-sein_134056
27. Monnier J, L'Orphelin JM, Bataille M. Intelligence artificielle en dermatologie : implications pratiques. Ann Dermatol Vénéréologie - FMC [Internet]. 30 mars 2024 [cité 16 avr 2024]; Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667062324000680>
28. Diagnostic du cancer du sein : l'intelligence artificielle d'Ibex bientôt réalité clinique à l'Institut Curie | Institut Curie [Internet]. [cité 16 avr 2024]. Disponible sur: <https://curie.fr/actualite/publication/diagnostic-du-cancer-du-sein-lintelligence-artificielle-dibex-bientot-realite>
29. Sandbank J, Bataillon G, Nudelman A, Krasnitsky I, Mikulinsky R, Bien L, et al. Validation and real-world clinical application of an artificial intelligence algorithm for breast cancer detection in biopsies. Npj Breast Cancer. 6 déc 2022;8(1):1-11.
30. Sandbank J, Bataillon G, Nudelman A, Krasnitsky I, Mikulinsky R, Bien L, et al. Validation and real-world clinical application of an artificial intelligence algorithm for breast cancer detection in biopsies. Npj Breast Cancer. 6 déc 2022;8(1):1-11.
31. Rodler S, Ganjavi C, De Backer P, Magoulisanitis V, Ramacciotti LS, De Castro Abreu AL, et al. Generative artificial intelligence in surgery. Surgery [Internet]. 6 avr 2024 [cité 30 avr 2024]; Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039606024001193>
32. Rodler S, Ganjavi C, De Backer P, Magoulisanitis V, Ramacciotti LS, De Castro Abreu AL, et al. Generative artificial intelligence in surgery. Surgery. 1 juin 2024;175(6):1496-502.
33. PharmaCos-Média [Internet]. [cité 2 mai 2024]. Comment PharmaIA a intégré l'intelligence artificielle pour répondre aux défis du pharmacien hospitalier. Disponible sur: <https://www.pharmacos->

media.fr/dossier/comment-pharmia-a-integre-lintelligence-artificielle-pour-repondre-aux-defis-du-pharmacien-hospitalier-53009.html

34. RM2011-103P.pdf [Internet]. [cité 22 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.igas.gouv.fr/IMG/pdf/RM2011-103P.pdf>
35. La révolution industrielle [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.economie.gouv.fr/facileco/revolution-industrielle>
36. Warolin C. Pierre-Jean Robiquet (Rennes, 14 janvier 1780-Paris, 29 avril 1840). 1999 [cité 4 oct 2024]; Disponible sur: https://www.persee.fr/doc/pharm_0035-2349_1999_num_87_321_4935#pharm_0035-2349_1999_num_87_321_T1_0102_0000
37. Sueur PN. LA PHARMACIE CENTRALE DE FRANCE : UNE COOPERATIVE AU SERVICE D'UN.
38. Sueur N. La Pharmacie centrale de France en images (1852-1903) ou l'émergence de l'industrie pharmaceutique. 2013 [cité 4 oct 2024]; Disponible sur: https://www.persee.fr/doc/pharm_0035-2349_2013_num_100_378_22636
39. Seine-Saint-Denis D de la. Atlas de l'architecture et du patrimoine. 2007 [cité 4 nov 2024]. Saint-Denis ; Pharmacie centrale de France - l'usine vers 1877. Disponible sur: https://patrimoine.seinesaintdenis.fr/IMG/images/saint-denis/sites/066inv010/13271_pleinecran.jpg
40. Chauveau S. Les origines de l'industrialisation de la pharmacie avant la Première Guerre mondiale. 1995 [cité 4 oct 2024]; Disponible sur: https://www.persee.fr/doc/hes_0752-5702_1995_num_14_4_1794
41. Chauveau S. Entreprises et marchés du médicament en Europe occidentale des années 1880 à la fin des années 1960. 1998 [cité 4 oct 2024]; Disponible sur: https://www.persee.fr/doc/hes_0752-5702_1998_num_17_1_1974#hes_0752-5702_1998_num_17_1_T1_0051_0000
42. Arden NS, Fisher AC, Tyner K, Yu LX, Lee SL, Kopcha M. Industry 4.0 for pharmaceutical manufacturing: Preparing for the smart factories of the future. Int J Pharm. 1 juin 2021;602:120554.
43. Pourchayre J. Le PAT (process analytical technology) et ses perspectives d'application en compression à l'échelle industrielle. 14 oct 2016;65.
44. Abraham J. International Conference On Harmonisation Of Technical Requirements For Registration Of Pharmaceuticals For Human Use. In: Tietje C, Brouder A, éditeurs. Handbook of Transnational Economic Governance Regimes [Internet]. Brill | Nijhoff; 2010 [cité 4 oct 2024]. p. 1041-53. Disponible sur:

https://brill.com/view/book/edcoll/9789004181564/Bej.9789004163300.i-1081_085.xml

45. reserved MTII all rights. Qualité par la conception [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur:
https://www.mt.com/ca/fr/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_PAT/quality-by-design.html
46. Gaugh D. Global Pharmaceutical Manufacturing: Association for Accessible Medicines Perspective. J Manag Care Spec Pharm. mai 2020;26(5):594-6.
47. Delavoye M. La fabrication en continu au sein de l'industrie pharmaceutique : exemple du procédé de cristallisation en continu. 23 mars 2022;107.
48. Blanchet M. Industrie 4.0 Nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique. Outre-Terre. 19 juill 2016;46(1):62-85.
49. Accélérez vos opérations grâce à l'IoT [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.oracle.com/fr/internet-of-things/>
50. Qu'est-ce qu'un SCADA? Supervisory Control and Data Acquisition | COPA-DATA [Internet]. [cité 2 nov 2024]. Disponible sur:
<https://www.copadata.com/fr/produits/zenon-software-platform/qu-est-ce-qu-un-scada-supervisory-control-and-data-acquisition/>
51. SAP [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Qu'est-ce qu'un Manufacturing Execution System (MES) ? | SAP Insights. Disponible sur:
<https://www.sap.com/france/products/scm/execution-mes/what-is-mes.html>
52. A3P - Industrie Pharmaceutique & Biotechnologie [Internet]. 2016 [cité 4 nov 2024]. Du Capteur au Serveur pour valider, produire, piloter, libérer... Les enjeux de l'évolution de l'automatisation du procédé à son pilotage par ses données. Disponible sur: <https://www.a3p.org/du-capteur-au-serveur-pour-valider-produire-piloter-liberer-les-enjeux-de-levolution-de-lautomatisation-du-procede-a-son-pilotage-par-ses-donnees-la-vague-50/>
53. Qu'est-ce qu'un SCADA? Supervisory Control and Data Acquisition | COPA-DATA [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur:
<https://www.copadata.com/fr/produits/zenon-software-platform/qu-est-ce-qu-un-scada-supervisory-control-and-data-acquisition/>
54. Marketing S. Synox. 2023 [cité 4 oct 2024]. Mieux comprendre l'internet des objets (IoT). Disponible sur: <https://www.synox.io/actualites-sectorielle/internet-des-objets-iot-qu-est-ce-que-cest/>
55. admin7676. La folle évolution des objets connectés [Internet]. Electronie. 2023 [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://electronie.fr/la-folle-evolution-des-objets-connectes>
56. Arden NS, Fisher AC, Tyner K, Yu LX, Lee SL, Kopcha M. Industry 4.0 for pharmaceutical manufacturing: Preparing for the smart factories of the

future. Int J Pharm. 1 juin 2021;602:120554.

57. Qu'est-ce que le Big Data ? [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.oracle.com/fr/big-data/what-is-big-data/>
58. Oracle France [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Qu'est-ce que le processus ETL. Disponible sur: <https://www.oracle.com/fr/database/processus-etl-definition.html>
59. La Importancia del ETL en Business Intelligence (BI) [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://es.linkedin.com/pulse/la-importancia-del-etl-en-business-intelligence-bi-natalia-perosio>
60. Ousseny A. EDHEC Online. 2023 [cité 4 oct 2024]. Le rôle de l'IA et du machine learning dans l'analyse de données. Disponible sur: <https://online.edhec.edu/fr/blog/le-role-de-lia-et-du-machine-learning/>
61. Principes ALCOA+ pour l'intégrité des données dans les sciences de la vie [Internet]. Eurotherm Limited. [cité 2 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.eurotherm.com/fr/life-sciences-cpg/data-integrity-life-sciences/alcoa/>
62. Manutan [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Définition, outils et avantages du Lean Management. Disponible sur: <https://www.manutan.com/blog/fr/lexique/le-lean-management-definition-et-outils>
63. ResearchGate [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Fig 9: -8 Types of Waste (MUDA). Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/8-Types-of-Waste-MUDA_fig4_369298411
64. Roue de Deming (PDCA) : Définition et étapes [Internet]. 2023 [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://blog-gestion-de-projet.com/suivons-la-roue-de-deming-ou-cycle-de-shewart-deming/>
65. C-QSE. Cycle PDCA / La roue de Deming [Internet]. Certification QSE. 2016 [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.certification-qse.com/cycle-pdca-roue-de-deming/>
66. La méthode 5S : définition, avantages et exemples [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://blog-gestion-de-projet.com/methode-des-cinq-s/>
67. Le 5S : comment bien implanter et pérenniser le Lean Manufacturing ? [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://blog.proactioninternational.com/fr/lean-management-implantation-5s>
68. Cochard F. IA et Lean Management, un duo gagnant ? IA et Lean Management [Internet]. ISLEAN. 2024 [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://islean-consulting.fr/fr/excellence-operationnelle/intelligence-artificielle-et-lean-management-un-duo-gagnant/>
69. Qu'est-ce que la supply chain ? | ICD [Internet]. [cité 4 oct 2024].

Disponible sur: <https://www.icd-ecoles.com/definition-de-la-supply-chain>

70. Les Echos [Internet]. 2024 [cité 7 nov 2024]. Comment l'IA et le machine learning vont réinventer la supply chain. Disponible sur: <https://www.lesechos.fr/thema/articles/ia-et-machine-learning-ils-vont-reinventer-la-supply-chain-2083546>
71. Ruptures de médicaments : le remède de la Big data et de l'IA [Internet]. TechToMed. 2020 [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://techtomed.com/ruptures-de-medicaments-comment-la-big-data-et-lintelligence-artificielle-peuvent-aider-a-y-remedier/>
72. SAP [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Qu'est-ce que la maintenance prédictive ? Présentation complète. Disponible sur: <https://www.sap.com/france/products/scm/apm/what-is-predictive-maintenance.html>
73. SAP [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Qu'est-ce que la maintenance prédictive ? Présentation complète. Disponible sur: <https://www.sap.com/france/products/scm/apm/what-is-predictive-maintenance.html>
74. Marketing S. Synox. 2023 [cité 4 oct 2024]. La place de l'IoT dans l'industrie économique. Disponible sur: <https://www.synox.io/actualites-sectorielle/limpact-de-liot-dans-lindustrie-vers-un-modele-economique-oriente-service/>
75. Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ? | IBM [Internet]. 2023 [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/what-is-a-digital-twin>
76. www.cognizant.com [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Quels sont les avantages des jumeaux numériques dans l'industrie pharmaceutique ? Disponible sur: <https://www.cognizant.com/fr/fr/insights/blog/articles/how-digital-twin-technology-can-benefit-life-sciences-manufacturing1>
77. Développement d'un jumeau numérique en forge [Internet]. MetalBlog. 2023 [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://metalblog.ctif.com/2023/04/10/developpement-dun-jumeau-numerique-en-forge/>
78. Jumeau numérique : le rôle de l'Intelligence Artificielle (IA) - Sogelink [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.sogelink.com/innovation/jumeau-numerique-le-role-de-lintelligence-artificielle-ia/>
79. Atos [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Industrie Pharmaceutique Intelligente. Disponible sur: <https://atos.net/fr/solutions/smart-pharma>
80. Les apports de la cobotique pour le secteur pharmacie et produits médicaux [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.universal-robots.com/fr/blog/apports-cobotique-secteur->

pharmacie/

81. Robots collaboratifs. De quoi parle-t-on ? - Risques - INRS [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/robots-collaboratifs/de-quoi-parle-t-on.html>
82. Quelle est la place de l'intelligence artificielle dans la robotique ? [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://revtechsys.com/blogue/intelligence-artificielle-dans-la-robotique>
83. Les apports de la cobotique pour le secteur pharmacie et produits médicaux [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.universal-robots.com/fr/blog/apports-cobotique-secteur-pharmacie/>
84. DigiKey [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Évolution des robots en cobots dans l'Industrie 4.0. Disponible sur: <https://www.digikey.fr/fr/articles/robots-evolve-to-cobots-in-industry-4-0>
85. Mlynarek W (Klotz). Dassault Systèmes blog. 2024 [cité 6 nov 2024]. Comprendre les différences entre réalité augmentée, réalité virtuelle et réalité mixte. Disponible sur: <https://blog.3ds.com/fr/brands/delmia/comprendre-les-differences-entre-realite-augmentee-realite-virtuelle-et-realite-mixte/>
86. R S. REALITE-VIRTUELLE.COM. 2022 [cité 4 oct 2024]. Comment l'IA peut-elle améliorer la VR ? Disponible sur: <https://www.realite-virtuelle.com/ia-vr-intelligence-artificielle/>
87. Sanofi Pasteur – Développement en réalité virtuelle - UniVR Studio [Internet]. 2018 [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://univrstudio.com/project/simulation-vr-sanofi-pasteur/>
88. Intelligence artificielle: Roche, Bayer et J&J sur le podium du Pharma AI Readiness Index - TICpharma [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.ticpharma.com/story?ID=2367>
89. Intelligence artificielle: Roche, Bayer et J&J sur le podium du Pharma AI Readiness Index - TICpharma [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.ticpharma.com/story?ID=2367>
90. Notre portefeuille [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.sanofi.com/fr/notre-science/notre-portefeuille>
91. L'intelligence artificielle au sein de Sanofi [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.sanofi.com/fr/notre-science/digital/l-intelligence-artificielle-au-sein-de-sanofi>
92. 2023-06-13-12-00-00-2687072-fr.pdf [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.sanofi.com/assets/dotcom/pressreleases/2023/2023-06-13-12-00-00-2687072-fr.pdf>
93. Technoflex [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Médicament injectable : le parcours

d'un combattant. Disponible sur:

<https://www.technoflex.net/actualites/flexmag/flexmag-n06/medicament-injectable-le-parcours-dun-combattant/>

94. Rémi Haegel - Mise en place d'un système informatisé en production pharmaceutique : application avec le dossier de lot électronique - UPthÃses - Les thÃses en ligne de l'UniversitÃ de Poitiers [Internet]. [cité 18 oct 2024]. Disponible sur: <http://petille.univ-poitiers.fr/notice/view/59166>
95. APSALYS [Internet]. 2024 [cité 18 oct 2024]. 7 outils d'IA qui pourraient révolutionner la fabrication des produits de santé. Disponible sur: <https://apsalys.com/blog-et-actualites/2024/07/09/7-outils-d-ia-qui-pourraient-revolutionner-la-fabrication-des-produits-de-sante.html>
96. 2022-01-07-06-00-00-2362917-fr.pdf [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.sanofi.com/assets/dotcom/pressreleases/2022/2022-01-07-06-00-00-2362917-fr.pdf>
97. soins M de la santé et de l'accès aux, soins M de la santé et de l'accès aux. Ministère de la santé et de l'accès aux soins. [cité 4 oct 2024]. Le développement du médicament. Disponible sur: <https://sante.gouv.fr/soins-et-maladies/medicaments/le-circuit-du-medicament/article/le-developpement-du-medicament>
98. 2021-11-18-06-30-00-2336966-fr.pdf [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.sanofi.com/assets/dotcom/pressreleases/2021/2021-11-18-06-30-00-2336966-fr.pdf>
99. Machine Learning at GSK with Kim Branson - #536 [Internet]. 2021 [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=v6WOeOHVer0>
100. 'We've seen an explosion in computing power': Using AI, machine learning and data to unlock the mysteries of disease | GSK [Internet]. [cité 6 nov 2024]. Disponible sur: <http://www.gsk.com/en-gb/behind-the-science-magazine/ai-ml-data-computing-power/>
101. H  patite B [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/hepatitis-b>
102. 'We've seen an explosion in computing power': Using AI, machine learning and data to unlock the mysteries of disease | GSK [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <http://www.gsk.com/en-gb/behind-the-science-magazine/ai-ml-data-computing-power/>
103. UK Biobank - UK Biobank [Internet]. 2024 [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.ukbiobank.ac.uk>
104. newsletter23_web.pdf [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: https://www.ukbiobank.ac.uk/media/20nihhvn/newsletter23_web.pdf

105. Approved Research [Internet]. [cité 6 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.ukbiobank.ac.uk/enable-your-research/approved-research/ai-based-integrative-risk-scores-for-predictive-medicine-and-precision-therapy-in-complex-and-rare-diseases>
106. Robots, IA et apprentissage automatique : comment la fabrication intelligente permet de faire parvenir plus rapidement les médicaments et les vaccins des usines aux patients | GSK [Internet]. [cité 18 oct 2024]. Disponible sur: <http://www.gsk.com/en-gb/behind-the-science-magazine/smart-manufacturing-factories-uppermerion-medicines/>
107. Exscientia. Exscientia - Our Mission [Internet]. Exscientia. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.exscientia.com/our-mission/>
108. Exscientia. Exscientia Pipeline [Internet]. Exscientia. [cité 6 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.exscientia.com/pipeline/>
109. About Insilico [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: https://insilico.com/about_fr
110. PandaOmics | Insilico Medicine [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: https://insilico.com/pandaomics_fr
111. Chemistry42 | Insilico Medicine [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: https://insilico.com/chemistry42_fr
112. inClinico [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://pharma.ai/inclinico>
113. IRIS_ProgIndusDef_SALA_avril-2024.pdf [Internet]. [cité 26 juill 2024]. Disponible sur: https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2024/04/IRIS_ProgIndusDef_SALA_avril-2024.pdf
114. BFMTV [Internet]. [cité 26 juill 2024]. Piratée, une chaîne d'information ukrainienne diffuse un « deepfake » de Volodymyr Zelensky. Disponible sur: https://www.bfmtv.com/tech/piratee-une-chaine-d-information-ukrainienne-diffuse-un-deepfake-de-volodymyr-zelensky_AN-202203170296.html
115. Le Figaro [Internet]. 2019 [cité 26 juill 2024]. «Deepfake»: une vidéo trafiquée de Nancy Pelosi relayée par des proches de Trump. Disponible sur: <https://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/deepfake-une-video-trafiquée-de-nancy-pelosi-relayee-par-des-proches-de-trump-20190524>
116. Q&A: With Zelenskyy Surrender Hoax, the Feared Future of Deepfakes Is Here | UVA Today [Internet]. 2022 [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://news.virginia.edu/content/qa-zelenskyy-surrender-hoax-feared-future-deepfakes-here>
117. Sumsub [Internet]. [cité 7 nov 2024]. Leading Identity Verification Service - 2024 G2's Top Pick. Disponible sur: <https://sumsub.com/>

118. Sumsb [Internet]. [cité 26 juill 2024]. Sumsb Research: Global Deepfake Incidents Surge Tenfold from 2022 to 2023. Disponible sur: <https://sumsub.com/newsroom/sumsub-research-global-deepfake-incidents-surge-tenfold-from-2022-to-2023/>
119. Sumsb [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Sumsb Research: Global Deepfake Incidents Surge Tenfold from 2022 to 2023. Disponible sur: <https://sumsub.com/newsroom/sumsub-research-global-deepfake-incidents-surge-tenfold-from-2022-to-2023/>
120. Thèmes | Parlement européen [Internet]. 2020 [cité 26 juill 2024]. Intelligence artificielle : opportunités et risques. Disponible sur: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20200918STO87404/intelligence-artificielle-opportunités-et-risques>
121. Bettache M, Foisy L. Intelligence artificielle et transformation des emplois. *Quest Manag.* 2019;25(3):61-7.
122. Intelligence artificielle générative et emploi : comment assurer la transition | International Labour Organization [Internet]. 2023 [cité 29 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.ilo.org/fr/publications/intelligence-artificielle-generative-et-emploi-comment-assurer-la>
123. Intelligence artificielle générative et emploi : comment assurer la transition | International Labour Organization [Internet]. 2023 [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.ilo.org/fr/publications/intelligence-artificielle-generative-et-emploi-comment-assurer-la>
124. pcs2003-311f-Pharmaciens libéraux | Insee [Internet]. [cité 29 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/pcs2003/professionRegroupee/311f>
125. Thèmes | Parlement européen [Internet]. 2023 [cité 1 oct 2024]. Loi sur l'IA de l'UE : première réglementation de l'intelligence artificielle. Disponible sur: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20230601STO93804/loi-sur-l-ia-de-l-ue-premiere-reglementation-de-l-intelligence-artificielle>
126. Article 99 : Sanctions | Loi de l'UE sur l'intelligence artificielle [Internet]. [cité 1 oct 2024]. Disponible sur: <https://artificialintelligenceact.eu/fr/article/99/>
127. Entrée en vigueur du règlement européen sur l'IA : les premières questions-réponses de la CNIL [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/fr/entree-en-vigueur-du-reglement-europeen-sur-lia-les-premieres-questions-reponses-de-la-cnil>
128. Serveur informatique : Qu'est-ce qu'un serveur informatique ? | Lenovo France [Internet]. [cité 1 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.lenovo.com/fr/fr/glossary/what-is-a-computer-server/>

129. Qu'est-ce qu'un centre de données ? | IBM [Internet]. 2022 [cité 21 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/data-centers>
130. Makowski G. Seine-Saint-Denis - L'actualité du département. 2024 [cité 21 oct 2024]. Le plus grand data center de France. Disponible sur: <https://seinesaintdenis.fr/actualite/emploi-entrepreneuriat/Le-plus-grand-data-center-de-France/>
131. Les enjeux majeurs des Datas Centers - PHOSPHORIS [Internet]. [cité 22 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.phosphoris.fr/fr/project/les-enjeux-majeurs-des-datas-centers/>
132. Déménager un data center : 7 étapes à retenir - Groupe i2T [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://i-2t.com/demenager-un-data-center/>
133. MIT Technology Review [Internet]. [cité 1 oct 2024]. Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes. Disponible sur: <https://www.technologyreview.com/2019/06/06/239031/training-a-single-ai-model-can-emit-as-much-carbon-as-five-cars-in-their-lifetimes/>
134. Environmental Sustainability And AI [Internet]. [cité 4 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.forbes.com/sites/glenngow/2020/08/21/environmental-sustainability-and-ai/>
135. The true cost of AI innovation | Scientific Computing World [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.scientific-computing.com/analysis-opinion/true-cost-ai-innovation>
136. Nordgren A. Artificial intelligence and climate change: ethical issues. J Inf Commun Ethics Soc. 1 janv 2023;21(1):1-15.
137. Équipements électriques et électroniques (EEE) [Internet]. [cité 7 nov 2024]. Disponible sur: <https://filieres-rep.ademe.fr/filieres-REP/filiere-EEE>
138. Baldé CP, Kuehr R, Yamamoto T, McDonald R, D'Angelo E, Althaf S, et al. THE GLOBAL E WASTE MONITOR 2024. 2024;
139. Baldé CP, Kuehr R, Yamamoto T, McDonald R, D'Angelo E, Althaf S, et al. THE GLOBAL E WASTE MONITOR 2024. 2024;
140. Digitale U. Alléger l'empreinte carbone de l'intelligence artificielle : rêve ou réalité ? 19 juill 2024 [cité 4 oct 2024]; Disponible sur: <https://www.usine-digitale.fr/editorial/alleger-l-empreinte-carbone-de-l-intelligence-artificielle-reve-ou-realite.N2216397>
141. Une autre vision de l'intelligence artificielle | AnotherBrain [Internet]. [cité 4 oct 2024]. Disponible sur: <https://anotherbrain.ai/fr>

Université de Lille
UFR3S-Pharmacie
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE
Année Universitaire 2024/2025

Nom : DUCHEMIN
Prénom : Anaëlle

Titre de la thèse : Utilisation de l'intelligence artificielle dans le monde pharmaceutique : l'intelligence artificielle dans l'industrie pharmaceutique

Mots-clés : Intelligence artificielle, industrie 4.0, production, recherche, développement, données

Résumé :

Les récentes évolutions de l'intelligence artificielle et le changement qu'elle pourrait apporter au sein de la société amènent à s'interroger sur son exploitation dans différents secteurs. Bien que l'industrie pharmaceutique ait déjà commencée à l'utiliser, l'enjeu de cette thèse est de présenter un ensemble de perspectives, permettant d'entrevoir tous les bénéfices que l'IA serait à même d'amener sur l'ensemble de l'industrie pharmaceutique. Mais aussi d'entrevoir les limites juridiques comme environnementales associées à ce nouvel outil.

Membres du jury :

Président : Bertrand DECAUDIN, PU-PH, Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière

Assesseur(s) : Claire PINÇON, MCU, Biomathématiques

Membre(s) extérieur(s) :

- Léa CAGNIEUX, Spécialiste Senior Performance Qualité Lyo à GSK Saint Amand-les-Eaux
- Christophe KARAS, Pharmacien titulaire d'officine, Pharmacie des Terrils à Liévin