

UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE DE LILLE 2

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année de soutenance : 2020

N°:

THESE POUR LE

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 27 Avril 2020

Par **Bernardin Kolin VELSON**

Né(e) le 19/02/1984 à Tuléar - MADAGASCAR

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LA DENTISTERIE

JURY

Président : Monsieur le Professeur Thomas COLARD

Assesseurs : Monsieur le Docteur Claude LEFEVRE

Monsieur le Docteur Jérôme VANDOMME

Monsieur Le Docteur Philippe ROCHER

Président de l'Université	:	Pr. J-C. CAMART
Directeur Général des Services de l'Université	:	P-M. ROBERT
Doyen	:	Dr. E. BOCQUET
Vice-Doyens	:	Dr. A. de BROUCKER
Responsable des Services	:	S. NEDELEC
Responsable de la Scolarité	:	M. DROPSIT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
E. DELCOURT-DEBRUYNE	Professeur Emérite Parodontologie
E. DEVEAUX	Dentisterie Restauratrice Endodontie Doyen de la Faculté
G. PENEL	Responsable du Département de Biologie Orale

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

K. AGOSSA	Parodontologie
T. BECAVIN	Dentisterie Restauratrice Endodontie
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
P. BOITELLE	Prothèses
F. BOSCHIN	Responsable du Département de Parodontologie
E. BOCQUET	Responsable du Département d' Orthopédie Dento-Faciale, Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire

C. CATTEAU	Responsable du Département de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
C. DELFOSSE	Responsable du Département d' Odontologie Pédiatrique
F. DESCAMP	Prothèses
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
P. HILDELBERT	Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Responsable du Département de Chirurgie Orale Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK	Biologie Orale
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
M. SAVIGNAT	Responsable du Département des Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Responsable du Département de Prothèses

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille 2 a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

Aux membres du jury,

Monsieur le Professeur Thomas COLARD
Professeur des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD
Section Réhabilitation Orale
Département Sciences Anatomiques

Docteur en Chirurgie Dentaire
Docteur au Museum National d'Histoire Naturelle en Anthropologie Biologique
Assesseur à la recherche

*Vous me faites l'honneur d'accepter la
présidence de ce jury de thèse, et je vous en
remercie.*

*Veillez trouver, dans cet ouvrage, l'expression
de ma reconnaissance et de mon profond
respect.*

Monsieur le Docteur Claude LEFEVRE

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale

Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Odontologie de l'Université de Lille 2

Responsable des Relations avec l'Ordre et avec les Partenaires Industriels.

Je suis très honoré que vous me fassiez l'honneur de participer à mon jury de thèse. Durant ces années d'études, j'ai eu la chance d'assister à vos enseignements d'une grande qualité qui m'ont permis d'évoluer dans la pratique de notre beau métier et pour cela je vous en suis reconnaissant. J'espère être digne de l'enseignement que vous m'avez prodigué à travers ce travail de thèse.

Veillez accepter l'expression de mes sentiments les meilleurs ainsi que de ma profonde considération.

Monsieur le Docteur Jérôme VANDOMME

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale

Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Biologie de l'Université de Lille 2

Master II Biologie Santé

Master I des Sciences Biologiques et Médicales

Responsable du Département de Prothèses

Vous me faites l'honneur d'accepter d'intégrer mon jury de thèse. Votre expérience et votre talent inspirent le respect. Je tiens à vous remercier pour l'enseignement que vous m'avez apporté tout au long de mon cursus universitaire et le plaisir que vous avez à transmettre vos connaissances. Merci pour votre pédagogie et votre poigne de fer. Voyez dans ce travail l'expression de ma reconnaissance et de mon admiration.

Monsieur le Docteur Philippe ROCHER

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale

Département Sciences Anatomiques

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Odontologie de l'Université de Lille 2

Maîtrise des Sciences Biologiques et Médicales

Diplôme d'Études Approfondies de Génie Biologique et Médical – option

Biomatériaux

Diplôme Universitaire de Génie Biologique et Médical

Certificat d'Études Supérieures de Biomatériaux

Je vous suis particulièrement reconnaissant pour la spontanéité et l'enthousiasme avec lesquels vous avez accepté de diriger ce travail mais aussi pour l'aide que vous m'avez apportée lors de son écriture. Soyez assuré de ma sincère gratitude pour la transmission de votre savoir, votre rigueur et votre passion tout au long de mon cursus universitaire.

A ma famille et mes amis pour leur soutien sans faille,

Table des abréviations

IA : Intelligence artificielle

CFAO : Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur

ML : Machine Learning

DL : Deep Learning

NBIC : Nanotechnologies, Biotechnologies, Informatique et Sciences Cognitives

OHM : Oral Hygiene Motivation

IC : Inlay-Core

Table des matières

1	Introduction	15
2	La Guerre des Intelligences	16
2.1	L'intelligence humaine	16
2.1.1	Définition	16
2.1.2	« Les » intelligences.....	16
2.1.3	Métamorphose de l'éducation	17
2.1.4	L'intelligence humaine versus l'intelligence artificielle	18
2.2	L'intelligence artificielle	18
2.2.1	Définition	18
2.2.2	Histoire de l'IA en 10 dates.....	19
2.2.3	Les NBIC (24–26).....	21
2.2.3.1	Définition	21
2.2.3.2	Evolution de l'IA via les NBIC	21
2.2.4	« Machine Learning » (4,5,14,15,27–29).....	22
2.2.4.1	Notions de statistiques	22
2.2.4.2	Quelques algorithmes d'apprentissage supervisé	24
2.2.4.3	Mener à bien un projet de Machine Learning	25
2.2.5	« Deep Learning » (4,5,14,15,27–30).....	26
2.2.5.1	Biologie du neurone.....	26
2.2.5.2	Description du neurone formel.....	27
2.2.5.3	Les réseaux de neurones simple couche et multicouches	29
3	L'IA et la dentisterie	30
3.1	Dans le domaine de la prévention	30
3.1.1	Genius X de Oral B ® (34,35)	30
3.1.1.1	Concept	30
3.1.1.2	Fonctionnement.....	30
3.1.1.3	Est-ce de l'IA ?(34,35).....	31
3.1.2	VisualDx® (36–41)	32
3.1.2.1	Concept	32
3.1.2.2	Fonctionnement.....	33
3.1.2.3	Est-ce que c'est de l'IA.....	38
3.2	Dans le domaine des soins.....	38
3.2.1	L'orthodontie (47)	38
3.2.1.1	Concept	38
3.2.1.2	Fonctionnement.....	39
3.2.1.3	Est-ce de l'IA ?	41
4	Le futur de la dentisterie assistée par IA	43
4.1	Assistant intelligent dentaire	43
4.1.1	Aide au diagnostic.....	43
4.1.1.1	Classification des kystes et tumeurs maxillo-faciales	43
4.1.1.2	Identification des lésions parodontales.....	43
4.1.1.3	Détecter les sinusites maxillaires.....	43
4.1.1.4	Détecter et établir un schéma dentaire.....	44
4.1.1.5	Détecter et établir la morphologie radiculaire	44
4.1.1.6	Et si.....	45
4.1.2	Et le secret médical ?	45
4.2	Avenir de la profession : Quels types de praticiens serons nous ?.....	46

4.2.1	Il y aura toujours des dinosaures	47
4.2.2	Une jeunesse polyvalente dans la profession	48
4.2.3	L'efficience de la profession, serons-nous des robots ?	50
4.2.3.1	Yomi® le robot qui sait poser des implants	50
4.2.3.2	RAC : Robots Antimicrobiens Catalytiques.....	50
5	Conclusion (32,91,96)	53
	Références bibliographiques	55
	Iconographie.....	63
	Annexes	64
	Annexe 1 : Computing Machinery and Intelligence	64
	Annexe 2 : Deep Blue	65
	Annexe 3 : Watson (92).....	66
	Annexe 4 : AlphaGo, joueur de Go (93,94)	67
	Annexe 5 : Composants d'un processeur (95)	68

1 Introduction

L'intelligence artificielle (IA) est une révolution pour de plus en plus de personnes, et reste encore un effet de mode pour certains, de moins en moins nombreux. Tous les secteurs se préparent à vivre les bouleversements qu'elle induit.

D'une part, la santé aimerait soulager des plaies structurelles : erreurs de diagnostiques, variabilité des situations, faillibilité des experts, difficulté à transmettre les informations de la recherche vers les praticiens rapidement et efficacement. D'autre part, l'IA qui excelle à digérer des monceaux de littérature, à dénicher des corrélations rares, à analyser des images et d'autres types de données toujours plus nombreuses que produit la médecine. Ce secteur, où les enjeux sont vitaux, ne souhaite pas forcément le médecin automatique, qui arrivera peut-être un jour, mais certainement le médecin « augmenté », mieux outillé pour guérir, prévenir, analyser, décider, et en même temps pourvu d'empathie et doué pour le contact humain. Cela afin d'améliorer les observations, les diagnostics, les choix thérapeutiques. (1,2)

Cette thèse s'efforce de faire le tour du sujet de l'IA en dentaire, voire des applications en médecine qui pourraient voir le jour dans notre domaine. Aujourd'hui où l'informatique a grandement fait évoluer et améliorer la vie du chirurgien-dentiste, par des logiciels de gestion du cabinet dentaire, des aides à la prescription, par la CFAO(3). Cette technologie évolue vite, et sa rapidité d'apprentissage est multipliée par 100 chaque année. A l'horizon 2030, même si ce n'est pas dans tous les domaines, l'intelligence humaine sera concurrencée par l'IA (4). Comment allons-nous nous adapter à cette nouvelle métamorphose de notre pratique ?

La première partie nous permettra de définir ce qu'est l'IA, en essayant d'être le plus objectif possible, sachant qu'il y a polémique. On survolera, sans rentrer dans les détails, les théories mathématiques, neurocognitives complexes ainsi que les langages de programmation informatique qui sont la base de cette technologie.

La deuxième partie détaillera quelques applications existantes dans le domaine de la dentisterie.

Et enfin la troisième partie sera réservée à l'avenir de la profession assistée par IA. Ce qu'elle nous apportera, et surtout comment elle modifiera notre exercice.

2 La Guerre des Intelligences

2.1 L'intelligence humaine

Il est important de définir ce qu'est l'intelligence avant de parler d'IA.

2.1.1 Définition

Le terme d'intelligence vient du latin « intelligentia » qui signifie la faculté de comprendre et de mettre en relation des éléments entre eux.

L'intelligence est cependant multiple, et tous les auteurs actuels s'accordent sur le fait qu'il n'y a pas une mais des intelligences, et que chacun d'entre nous peut présenter des forces et/ou des faiblesses dans les différentes formes d'intelligence.

2.1.2 « Les » intelligences

La théorie des intelligences multiples, proposée initialement par Howard Gardner en 1983 (professeur à Harvard et travaillant sur les enfants en échec scolaire), liste sept formes d'intelligence, auxquelles deux nouvelles se sont ajoutées pour arriver à la liste actuelle des neuf formes d'intelligence : (5,6)

- **L'intelligence logico-mathématique** : capacité à travailler à l'aide de chiffres, à analyser des situations, à mettre au point des raisonnements. Elle est mise en avant chez les scientifiques, en particulier en physique et mathématiques.
- **L'intelligence visuo-spatiale** : capacité à se représenter un objet ou un environnement en 3D, utilisée pour suivre une carte, se rappeler un chemin ou imaginer ce que donne une forme dans l'espace à partir de son plan. Elle est nécessaire par exemple aux artistes, aux architectes ou aux conducteurs de taxi.
- **L'intelligence verbo-linguistique** : capacité à comprendre et à énoncer des idées par le langage. Elle requiert une bonne connaissance et maîtrise du vocabulaire, ainsi que de la syntaxe et des figures de style. Elle aide les avocats, les politiciens ou les auteurs.
- **L'intelligence intrapersonnelle** : capacité à avoir une image fidèle de soi, ce qui signifie pouvoir déterminer son état émotionnel, ses envies, ses forces et ses faiblesses.
- **L'intelligence interpersonnelle** : capacité à comprendre les autres et à réagir de la façon adéquate. Elle est donc liée à la notion d'empathie, à la tolérance, à la sociabilité. Mais elle peut aussi permettre de manipuler et est ainsi très utilisée par les leaders de secte. Elle a aussi inspiré des techniques commerciales et de négociation.
- **L'intelligence corporelle/kinesthésique** : capacité à avoir une représentation mentale de son corps dans l'espace et à pouvoir mener un mouvement particulier. Très utilisée chez les athlètes, c'est elle qui permet d'avoir le bon geste au bon moment. Elle est utilisée dans les travaux manuels et de précision,

par exemple pour un chirurgien, mais permet aussi l'expression corporelle des émotions et est à ce titre nécessaire aux danseurs ou aux acteurs.

- **L'intelligence naturaliste** : capacité à trier, organiser et hiérarchiser les objets qui nous entourent. Elle permet ainsi de définir des espèces, des sous-espèces, ou de construire des classifications. Elle est par exemple très utilisée par les botanistes, les paléontologues ou les biologistes.
- **L'intelligence musicale** : capacité à reconnaître les mélodies, les notes et les harmonies, ou à les créer. Elle est ainsi nécessaire aux compositeurs et aux chanteurs et s'exprime chez tous les mélomanes.
- **L'intelligence existentielle ou spirituelle** : capacité à se poser des questions sur le sens de la vie, sur notre but. Elle se rapproche de notre notion de moralité. Elle n'est pas forcément liée à la notion de religion mais plus à notre positionnement par rapport au reste de l'univers.

2.1.3 Métamorphose de l'éducation

Le système scolaire met principalement en avant trois formes d'intelligences : logico-mathématique, visuo-spatiale et verbo-linguistique. (5–7)
Celles-ci sont aussi évaluées dans les tests de Quotient Intellectuel (QI). On voit bien que ces tests ne sont pas complets, et ne reflètent qu'une partie de l'Intelligence. D'autres formes sont étudiées dans les matières dites « annexes » : Sport, Musique, Technologie, Arts Plastiques... Et puis certaines ne sont pas du tout abordées : intra et interpersonnelle, existentielle.

D'où la nécessité d'une métamorphose de l'éducation. « Le miracle éducatif finlandais », classé en tête des systèmes éducatifs mondiaux depuis des années, a su lier développement créatif, développement de la cohésion sociale et de l'inclusivité, création d'une conscience commune d'appartenance à la collectivité, et développement des capacités des enseignants à être collectivement responsables du curriculum des élèves et des diagnostics d'évaluation plutôt que d'appliquer des tests standardisés. Presque la moitié des jeunes finlandais âgés de 16 ans lorsqu'ils quittent le système scolaire obligatoire, ont eu accès à des modules spécialisés, un soutien scolaire ou une aide personnalisée.

Pourtant, les professeurs passent moins de temps à enseigner, sont mieux rémunérés. Enseigner est un métier de prestige, et les élèves passent moins de temps à étudier, que ce soit en classe ou à la maison, que les autres pays ! (8)

Pour exceller demain, il faut exploiter toutes les formes d'intelligence, afin de corrélérer au mieux à toutes ces évolutions, à notre monde devenant plus complexe, intriqué dans les nouvelles technologies.

De ce fait, il faut accepter que l'intelligence ne soit pas facilement mesurable, ni facilement définissable, car elle couvre de trop nombreux domaines. La meilleure définition est donc aussi la plus large : l'intelligence est la capacité à s'adapter, apprendre, créer.

2.1.4 L'intelligence humaine versus l'intelligence artificielle

Il y a un conflit sur la définition de l'IA, et les répercussions économiques sont énormes. Certains la catégorisent en plusieurs sections : faible, forte. L'IA « faible », existante, est cantonnée à un domaine déterminé (logico-mathématique, verbo-linguistique...) et agit sous contrôle humain. L'IA « forte », potentielle, peut se développer par elle-même et échapper au contrôle humain.(7,9,10)

D'autres ne parlent pas d'IA mais d'Intelligence Augmentée.

Cependant, il est commun de dire que c'est bel et bien une forme d'intelligence mais aujourd'hui on ne peut pas dire que cette intelligence soit complète parce qu'inapte à la création. Pour qu'il y ait « intelligence », il faut que la machine puisse innover par elle-même. Elle pourrait inventer quelque chose qui n'aurait pas été programmé spécifiquement pour elle. Or c'est actuellement impossible et les chercheurs sont très loin de maîtriser ne serait-ce qu'une intelligence programmée, encore moins une intelligence innovante(11).

Même si la définition est encore floue, aujourd'hui nous dépendons de cette technologie, qui nous suit au quotidien, dans le creux de notre main, les smartphones. Assistants vocaux « intelligents », traitement du flot de données générées sur internet pour nous proposer ce qui pourrait nous plaire, liste de lecture musicale, vidéos « intuitives » ... Actuellement le seul moyen de rester maître de l'IA, est de l'utiliser.(5,12)

2.2 L'intelligence artificielle

2.2.1 Définition

« Ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine. »(13)

L'IA est une discipline de l'informatique qui consiste à imiter des formes d'intelligence dans les machines. Le logiciel ou le robot intègre alors des techniques qui se rapprochent de capacités cognitives de l'être humain : voir, entendre, s'exprimer, raisonner, etc. (14)

L'IA n'est autre qu'une série de formules mathématiques donnant naissance à des algorithmes. Elle se décline en deux parties, le Machine Learning (ML), donnant la faculté aux machines d'apprendre, et le Deep Learning (DL), ou l'apprentissage profond. Ce sont des algorithmes capables de s'améliorer de façon autonome via une modélisation d'un réseau de neurones inspirés du fonctionnement du cerveau humain, et reposant sur une grande quantité de données. (15)

En 1950, Alan Turing exprimait déjà les idées qui pourraient amener à concevoir une IA en 6 points clés (16):

1. L'IA requiert des Giga-octets de données
2. Seul un très long code pourrait parvenir à faire une IA
3. Les hommes ne peuvent pas écrire de très longs codes non compressibles
4. Toute méthode permettant d'écrire de très longs codes pertinents sera inégalable par l'homme

5. L'apprentissage machine ou ML est une telle méthode
6. Le ML est la clé de fabrication d'une IA

Il anticipait déjà que l'homme ne saurait créer une véritable IA. Et que seule la machine elle-même, pourrait évoluer par apprentissage, et devenir intelligente. Et c'est ce que nous retiendrons dans la suite des exemples. **Seront considérés dans cette thèse comme une IA, toutes applications, logiciels, robots, outils, machines, dotés d'une capacité d'apprentissage.**

2.2.2 Histoire de l'IA en 10 dates

1950 : Alan Turing, célèbre pour avoir décrypté le code Enigma des nazis, imagine la machine intelligente dans un manifeste (**Annexe 1**) (16)

1956 : Officialisation de l'IA comme véritable domaine scientifique lors d'une conférence au Etats-Unis qui s'est tenue au Dartmouth College. Par la suite, ce domaine atteindra de prestigieuses universités comme celles du MIT, Stanford, Edimbourg.

1957 : Le « Perceptron » : la première machine apprenante. Franck Rosenblatt, psychologue américain, travaillant sur l'IA, propose un modèle simple de neurone artificiel, encore appelé neurone « formel » : un neurone binaire qui émet un signal (on dit que la sortie vaut 1) ou non (la sortie vaut 0). Pour prendre cette « décision », il effectue la somme des données (0 ou 1) envoyées par les neurones auxquels il est connecté. Cette caricature du fonctionnement du cerveau humain présentait l'énorme avantage de permettre l'exécution d'opérations logiques à l'aide de « cellules » interconnectées. (**figure 1**) (17)

1968 : « 2001, l'Odyssée de l'espace » de Stanley Kubrick, fait découvrir au grand public l'intelligence artificielle, avec l'ordinateur HAL 9000. Apte à prendre de manière autonome des décisions et gérant tous les systèmes de navigation, de contrôle et de communication du vaisseau. C'est aussi dans ce film que l'on découvre ce que pourrait être la puissance d'une IA et ce qu'elle serait capable de nous faire en



prenant le contrôle, une peur insidieuse s'installe.

Figure 1 : Un exemple de réseaux de neurones « formels ». (18)

1973 : Le premier « hiver de l'IA ». L'IA subit critiques et revers budgétaires, car les chercheurs en IA n'ont pas une vision claire des difficultés, des problèmes auxquels ils sont confrontés. Leur immense optimisme a engendré une attente excessive et quand les résultats promis ne se matérialisent pas, les investissements consacrés à l'intelligence artificielle s'étiolent.(19)

1996-1997 : Kasparov, champion du monde d'échecs, et considéré comme l'un des meilleurs joueurs de l'histoire, se fait battre par « Deep Blue » (**Annexe 2**). En 1996 et 1997, Kasparov rencontre Deep Blue par deux fois. Lors du premier match, joué à Philadelphie, le Russe se fait peur en perdant la partie d'ouverture, puis redresse la barre en misant sur l'effet d'horizon : matérialistes, les logiciels de l'époque ont tendance à accepter les cadeaux qu'on leur fait, quitte à abîmer leur structure de pions, sans voir qu'à long terme la faiblesse ainsi créée dans leur position leur sera fatale. Au terme des six rencontres, Kasparov l'emporte par 4 points à 2. Le match de 1997, disputé à New York, se terminera sur le même score. Mais cette fois-ci en faveur de la version améliorée de Deep Blue. Le Russe a en effet décidé d'adopter un style anti-ordinateur afin de sortir Deep Blue de ses bases de données en jouant des coups non recensés par la théorie... et forcément douteux. Il s'est battu lui-même. La défaite du représentant de l'espèce humaine contre l'engin d'IBM fut avant tout psychologique.(20)

2011 : « Watson », un programme informatique d'IA, encore conçu par IBM. Son but est de répondre à des questions formulées en langage naturel (langage ordinaire, parlé par un humain). Il remporte le jeu télévisé « Jeopardy ! » face à 2 champions. (**Annexe 3**)

2016 : Google devient maître du Go avec « AlphaGo ». Il s'agit d'une étape symboliquement forte puisque le programme « joueur de go » est alors un défi complexe de l'intelligence artificielle (**Annexe 4**). En mars 2016, il bat Lee Sedol, un des meilleurs joueurs mondiaux. L'algorithme d'AlphaGo combine des techniques d'apprentissage automatique et de parcours de graphe, associées à de nombreux entraînements avec des humains, d'autres ordinateurs, et surtout lui-même, c'est une période charnière où le ML développe sa toute puissance. Cet algorithme sera encore amélioré dans les versions suivantes. AlphaGo Zero en octobre 2017 atteint un niveau supérieur en jouant uniquement contre lui-même. AlphaZero en décembre 2017 surpasse largement, toujours par auto-apprentissage, le niveau de tous les joueurs humains et logiciels, non seulement au go, mais aussi aux échecs.

2017 : « Alexa », naissance de la voix d'Amazon, après « Siri » d'Apple en 2007, « Google Now » de Google en 2012, et « Cortana » de Microsoft en 2014. C'est l'apparition et l'amélioration des assistants personnels « intelligents » à l'intérieur de nos maisons, à porter de main.

2019 : Le véhicule « autonome » ! Apte à rouler sans intervention d'un conducteur et équipé de capteurs numériques (caméras, radars, sonars, lidars...) dont les données sont traitées par des processeurs et des logiciels spécifiques employant des algorithmes d'IA pour décider de l'action à réaliser. Plusieurs tentatives isolées remontent aux années 70 !

Actuellement, de nombreuses questions techniques, juridiques, psychologiques, éthiques restent non résolues. Quelle responsabilité sera engagée en cas d'accident ? Les conséquences du piratage informatique d'un ou plusieurs véhicules ? La

possibilité pour un constructeur ou un gouvernement de surveiller/contrôler les déplacements des usagers (même si avec la géolocalisation des smartphones c'est déjà un peu le cas !). On parle pour le moment de véhicule « semi-autonome », disposant de différents systèmes d'aide à la conduite. Des accidents mortels entachent cette technologie ambitieuse. Alors que la majorité des accidents sur la route est liée à une erreur humaine, le véhicule autonome pourrait permettre de les réduire. Et aussi réduire les embouteillages, libérer la recherche de place de parkings, limiter les parkings en centre-ville... Selon l'INRIA, les voitures « autonomes » n'arriveront qu'en 2025 sur voie privée et en 2040 sur voies publiques. (21–23)

2.2.3 Les NBIC (24–26)

2.2.3.1 Définition

Les NBIC désignent un champs scientifique multidisciplinaire qui se situe au carrefour des Nanotechnologies (N), des Biotechnologies (B), de l'Informatiques (I) et des Sciences Cognitives (C).

La notion centrale est celle de « convergence ». Elle nécessite le bouleversement des frontières disciplinaires et le dépassement des postures des scientifiques. La convergence NBIC se fonde d'abord sur un projet d'unité matérielle, de machine à l'échelle nanométrique des objets de chacun des quatre domaines de traitement de l'information. Il s'agit de faire rencontrer le mouvement de la biologie, partant des êtres vivants, pour descendre vers le plus petit explicatif, celui de la cybernétique visant à mécaniser les comportements ou les substituer par des machines, celui de la cognitive pour agir sur la pensée, l'aider ou la remplacer par des mécanismes artificiels ou hybrides, tout ceci à partir des échelles infimes que maîtrisent les nanotechnologies. Cette révolution est aussi conceptuelle : ce n'est plus la science qui précède mais la technologie qui guide la science. Le but est l'efficacité concrète, et l'intégration est conçue à partir des plus bas niveaux pour remonter jusqu'aux objets ou aux éléments d'abord microscopiques, puis macroscopiques et même environnementaux.

2.2.3.2 Evolution de l'IA via les NBIC

Un processeur est la partie d'un ordinateur qui exécute les instructions et traite les données des programmes. Le concept de « réseaux de neurones » en IA découle de la biologie, et des sciences cognitives, et toute cette technologie est portée par des microprocesseurs de plus en plus petits, miniaturisés.

Pour prendre conscience de l'échelle actuelle de cette prouesse technologique, l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer, premier ordinateur) de 1946, occupait 167m² et pesait 30 tonnes, avec une puissance de calcul de 92600 opérations par seconde, tous les composants (**Annexe 5**) d'un processeur ne pouvaient tenir sur le même circuit intégré. Aujourd'hui la finesse de gravure est de l'ordre de 10 nanomètres, et tend à diminuer, grâce aux nanotechnologies.

Un processeur qui faisait la superficie d'une grande maison, aujourd'hui, est beaucoup plus puissant et ne tient que sur le bout de notre doigt (<1cm²).

L'IA s'inspire de notre Biologie, est écrite sous forme d'algorithmes Informatique,

s'appuyant sur les Sciences Cognitives (les réseaux de neurones par exemple), le tout est installé sur des microprocesseurs de plus en plus miniaturiser via la Nanotechnologie. Sans les NBIC, l'IA ne serait pas à son essor actuel.

2.2.4 « Machine Learning » (4,5,14,15,27–29)

Le ML, ou apprentissage automatique, ou apprentissage machine est une des parties de l'IA qui se fonde sur des approches statistiques pour donner aux machines la capacité d'apprendre à partir de données.

Il y a différent type d'apprentissage :

1. **Supervisé** : des données labellisées par l'humain seront exploitées par la machine pour apprendre. Ex : faire la différence entre un chien et un chat, chaque image utilisée par la machine sera étiquetée. Cette indication est la labellisation.
2. **Non Supervisé** : la machine va apprendre par elle-même. Elle sera capable de faire des regroupements, des classifications, cependant elle n'est pas capable de définir par elle-même les différents libellés, car elle n'a pas « conscience » des données dont elle fait l'apprentissage. Dans cette forme d'apprentissage, il n'y a pas de résultat attendu. On utilise cette forme d'apprentissage pour faire du **clustering** (aussi appelé segmentation), on a un ensemble de données, et on cherche à déterminer des classes de faits.
3. **Par renforcement** : apprentissage par l'expérience et récompense positive ou négative en fonction des décisions prises. C'est par exemple de cette façon que les animaux (et les humains) apprennent à marcher. On sait ce que l'on cherche à obtenir (la marche), mais pas comment l'obtenir (les muscles à utiliser, avec leur ordre). Le bébé essaie de marcher, et soit il tombera (il a faux), soit il arrivera à faire un pas (il a juste). Il finira par comprendre par renforcement positif ou négatif, ce qui lui permet de ne pas tomber, et deviendra meilleur, pour pouvoir arriver à courir ensuite. Cette forme est souvent utilisée en robotique, quand on cherche à obtenir des comportements complexes faisant intervenir des suites de décisions.

On ne développera que la partie où l'apprentissage est supervisé parce que c'est la plus courante.

Une multitude d'algorithmes existe pour prédire des valeurs (on parle de **régression**) ou tout autre chose (on parle de **classification**). Prédire le pourcentage de réussite d'un étudiant au CSCT (Certificat de Synthèse Clinique et Thérapeutique), est une régression, prédire qu'une rétrocavité représente une molaire maxillaire ou une molaire mandibulaire est une classification. On ne présentera que quelques algorithmes ici, pour bien comprendre la base statistique de l'apprentissage.

2.2.4.1 Notions de statistiques

Toute étude statistique se réalise sur une **population**, composée **d'individus**. Ces individus peuvent être des personnes ou des choses. Chaque individu dispose de caractères. En ML, les individus sont appelés des **observations** et les caractères des **features** (caractéristiques).

Il existe deux types de données :

1. **Quantitative** : nombres sur lesquels des opérations mathématiques sont applicables. Ces données peuvent être classées en deux groupes distincts :
 - a. **Continue** : variable ayant un nombre infini de valeurs entre deux valeurs. Ex : la taille d'une personne
 - b. **Discrète** : variable ayant un nombre fini de valeurs entre deux valeurs. Ex : nombre de dents d'un enfant

2. **Qualitative** : elle a pour but de décrire une qualité propre aux données, est-ce long ou large ? petit ou grand ? Ce n'est pas un nombre et est aussi classée en deux catégories :
 - a. **Catégorielle** : elle ne peut pas être ordonnée. Ex : homme ou femme
 - b. **Ordinale** : elle peut être ordonnée. Ex : petit, moyen, grand

Les mesures de tendance centrale servent à synthétiser la série statistique étudiée au moyen de valeurs caractéristiques :

1. **Valeurs minimale et maximale** : connaître ces valeurs d'un ensemble d'observations est intéressant pour établir son étendue.
2. **Moyenne arithmétique** : permet de connaître la valeur des éléments d'une série statistique si celle-ci était répartie équitablement.
3. **Médiane** : valeur qui partage la série d'observations en deux groupes de même effectif.
4. **Mode** : valeur la plus fréquemment présente dans la série.
 - a. Si une série a pour mode deux valeurs, elle est **bimodale**
 - b. Si une série a pour mode trois valeurs, elle est **trimodale**
 - c. Au-delà, la série est **multimodale**

La dispersion d'une série d'observations mesure la variabilité de celle-ci :

1. **L'étendue** : est la différence entre la valeur maximale et minimale d'une série :
 - a. Si l'étendue est petite, alors on peut affirmer qu'il y a peu d'écart entre les valeurs de la série. La série est dite **homogène**.
 - b. Si l'étendue est grande, forte, on ne peut pas affirmer qu'elle est **hétérogène**, car il peut y avoir des valeurs aberrantes, extrêmes, créant cette étendue, alors que les autres valeurs sont plutôt homogènes.
2. **L'écart-type** : permet de savoir si la série d'observations est dispersée ou non. Sa valeur est la racine carrée de la **variance**, nous ne détaillerons pas son calcul, mais elle mesure le degré de dispersion de la série. Plus la valeur de l'écart-type est petite, la majeure partie des valeurs de la série d'observations se retrouvent autour de la moyenne.

2.2.4.2 Quelques algorithmes d'apprentissage supervisé

L'objectif de ces algorithmes est de prédire des valeurs, des décisions, des catégories :

1. **La régression linéaire** (Linear Regression – LR) : Cet algorithme cherche à établir, sous forme d'une droite, une relation entre une variable expliquée et une variable explicative. Par exemple, prédire une note à un examen (variable expliquée) en fonction du nombre d'heures de révisions (variable explicative). En d'autres termes, les données d'une série d'observations sont représentées sous forme d'un nuage de points et l'on cherche à trouver une droite passant au plus près de ces points (**figure 2**)

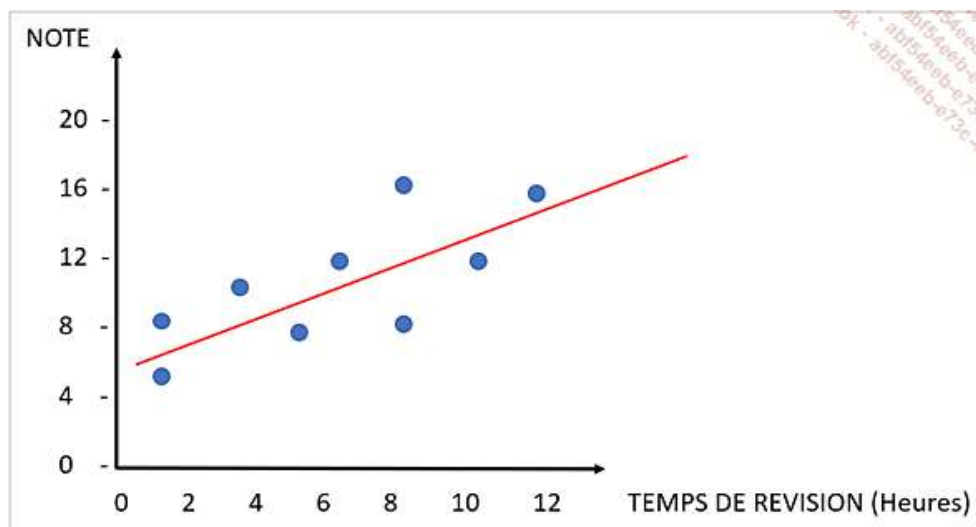


Figure 2 : Régression linéaire(15)

2. **La régression linéaire multiple** (Multiple Linear Regression – MLR) : ici on n'a pas qu'une seule variable explicative. On pourrait définir la note à l'examen par rapport au temps de révision, au nombre d'absences dans l'année, à la qualité de la prise de note...
3. **Arbre de décision** (Decision Tree – DT) : cet outil d'aide à la décision ou d'exploration de données permet de représenter un ensemble de choix sous la forme graphique d'un arbre. C'est une suite de tests réalisés dans le but de prédire un résultat, et on retrouve les décisions à chaque extrémité des branches de l'arbre. Ex : Déterminons de manière non exhaustive les possibilités de traitement lors de la présence d'une carie. (**figure 3**)
4. **Naive Bayes** : est un algorithme de classification basé sur des probabilités, en particulier sur le Théorème de Bayes fondé sur les probabilités conditionnelles. Le but est de déterminer la probabilité qu'un évènement se produise en fonction d'un évènement qui s'est déjà produit. Son utilisation est populaire dans les applications de ML, notamment dans les problématiques de classification de texte. Il se base sur le nombre d'occurrences d'un mot dans une phrase pour en déterminer sa catégorie,

chaque mot est alors pris de façon indépendante dans l'analyse. Cet algorithme est utilisé en reconnaissance de la parole, en traduction automatique.

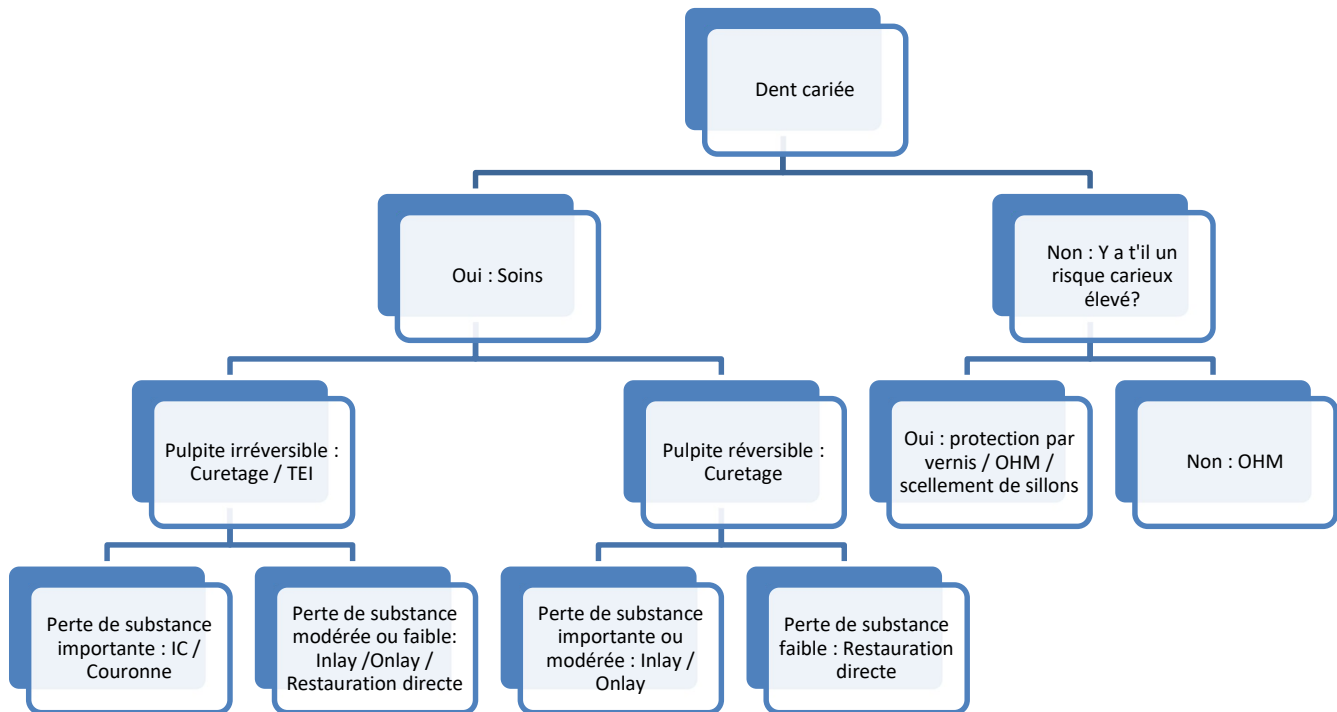


Figure 3 : Arbre de décisions simplifié sur les traitements possibles en présence d'une dent cariée ou non. (Source personnelle)

2.2.4.3 Mener à bien un projet de Machine Learning

Mener à bien un projet de ML consiste à réaliser six étapes consécutives :

1. Définition du problème à résoudre
2. Acquisition des données d'apprentissages et de tests
3. Préparer et nettoyer les données
4. Analyser, explorer les données
5. Choisir un modèle d'apprentissage
6. Visualiser les résultats, et ajuster ou modifier le modèle d'apprentissage

La phase de préparation des données est la plus importante dans un projet de ML, car en tant qu'humains, nous devons essayer de trouver les données les plus intéressantes qui nous permettront de répondre au problème donné.

Bien plus qu'une simple analyse des données, il faut déterminer comment il nous est possible de résoudre manuellement le problème, à partir des informations dont nous disposons, avant de le confier à la machine.

Ainsi, un même jeu de données peut être exploité différemment en fonction du problème donné.

L'apprentissage de la machine fait intervenir plusieurs paramètres, mais survolons la complexité en ne parlant ici que de « **overfitting** » (surapprentissage) et « **underfitting** » (sous-apprentissage). On s'est rendu compte de ces phénomènes en partitionnant 80% de données d'apprentissages et 20% de données de test d'un échantillon, avant la généralisation de l'algorithme. Le surapprentissage est un phénomène se traduisant par le fait que la solution est trop adaptée aux données d'apprentissage et ne se généralise pas à de nouvelles données qui lui sont inconnues. Ainsi, si pour un algorithme nous obtenons une précision de 99 % sur les données d'apprentissage et que nous obtenons une valeur de 20 % sur les données de tests, il y a fort à parier que nous sommes en présence d'un surapprentissage. C'est pourquoi il est conseillé de mesurer la précision à la fois sur les données d'apprentissage et sur des données de validation, avant de lancer la phase de test, ce qui nous donne sur un échantillon, 60% d'apprentissage, 20% de validation, et 20% de test, bien sûr, les phases sont choisies de manière aléatoire afin de limiter les biais.

Le phénomène de sous-apprentissage se produit lorsque l'algorithme n'arrive pas à trouver une corrélation entre les données d'apprentissage et n'arrive donc pas à réaliser de bonnes prédictions.

La notion d'**overfitting** est souvent rencontrée lors de l'utilisation des réseaux de neurones. En effet, lors de l'apprentissage nous allons chercher à minimiser les erreurs de prédictions en réalisant un certain nombre de boucles d'apprentissage (itérations) où, à chaque boucle, l'algorithme va apprendre de ses erreurs et se corriger. Plus nous réalisons d'itérations, plus l'algorithme apprend et moins il se trompe. Si trop d'itérations sont réalisées, l'algorithme aura une très bonne précision sur les données d'apprentissage, mais il se sera spécialisé sur celles-ci et aura une mauvaise précision sur les données de tests. La généralisation n'est donc plus possible.

Un résultat de l'overfitting serait par exemple d'apprendre qu'il y a peu de chance de gagner au loto et d'en conclure au test qu'il y a peu de gagnant au loto, alors qu'une validation de cet apprentissage permettrait d'ajouter la notion il y a un gagnant par jour ou presque sachant que je ne gagnerai peut-être jamais

2.2.5 « Deep Learning » (4,5,14,15,27–30)

Nous avons découvert les principes du ML à travers l'utilisation d'algorithmes issus des statistiques. Nous allons à présent voir comment une machine peut apprendre à partir d'algorithmes imaginés et conçus à partir des sciences cognitives à savoir les réseaux de neurones.

2.2.5.1 Biologie du neurone

Notre cerveau est composé de 86 à 100 milliards de neurones dont le rôle est

d'acheminer et de traiter des messages dans notre organisme. Certains neurones ont un rôle dédié aux perceptions des sensations et aux mouvements alors que d'autres sont responsables des fonctions automatiques de notre corps (digestion, respiration...).

Biologiquement, un neurone est une cellule composée :

- D'un corps cellulaire appelé également péricaryon
- D'un noyau
- De plusieurs ramifications appelées dendrites ayant pour fonction d'être les points d'entrée de l'information dans le neurone
- D'un chemin de sortie de l'information appelé axone, pouvant atteindre une longueur d'un mètre
- D'une gaine de myéline protégeant l'axone
- Des terminaisons axonales également appelées synapses connectées aux autres neurones

La communication entre neurones s'opère par l'échange de messages sous forme de variation de tension électrique. Un neurone peut recevoir plusieurs messages de la part d'autres neurones auxquels il est connecté. **(figure 4)**

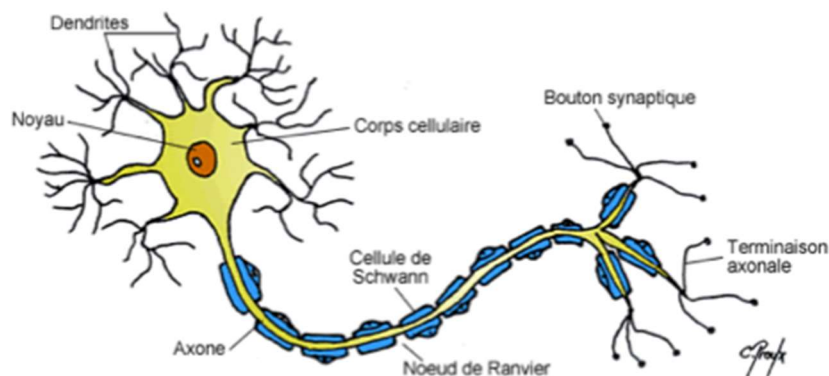


Figure 4 : Représentation d'un neurone (31)

Lorsqu'un neurone reçoit plusieurs messages, il effectue la somme des influx nerveux reçus puis, si cette somme dépasse un certain seuil, il s'active et transmet à son tour un message via son axone aux neurones connectés à celui-ci. Cette suite d'activation constitue notre mémoire. Car pour une action donnée, un ensemble de neurones s'active alors que d'autres restent inactifs, car un chemin s'est créé entre l'action et l'activation neuronale.

2.2.5.2 Description du neurone formel

C'est sur le principe de fonctionnement d'un neurone évoqué précédemment que le Perceptron a été conçu. Il s'agit en fait d'une transcription mathématique du fonctionnement d'un neurone **(tableau 1)**.

Le Perceptron va se caractériser par une couche de neurones en entrée et un neurone en sortie. Comme nous l'avons déjà évoqué auparavant, sous cette forme, le perceptron est également appelé neurone formel. **(figure 5)**

Tableau 1 : Comparatif entre un neurone biologique et artificiel

Neurone biologique	Neurone artificiel
Dendrites	Entrées (input)
Synapses	Poids
Axone	Sortie (output)
Activation	Fonction d'activation

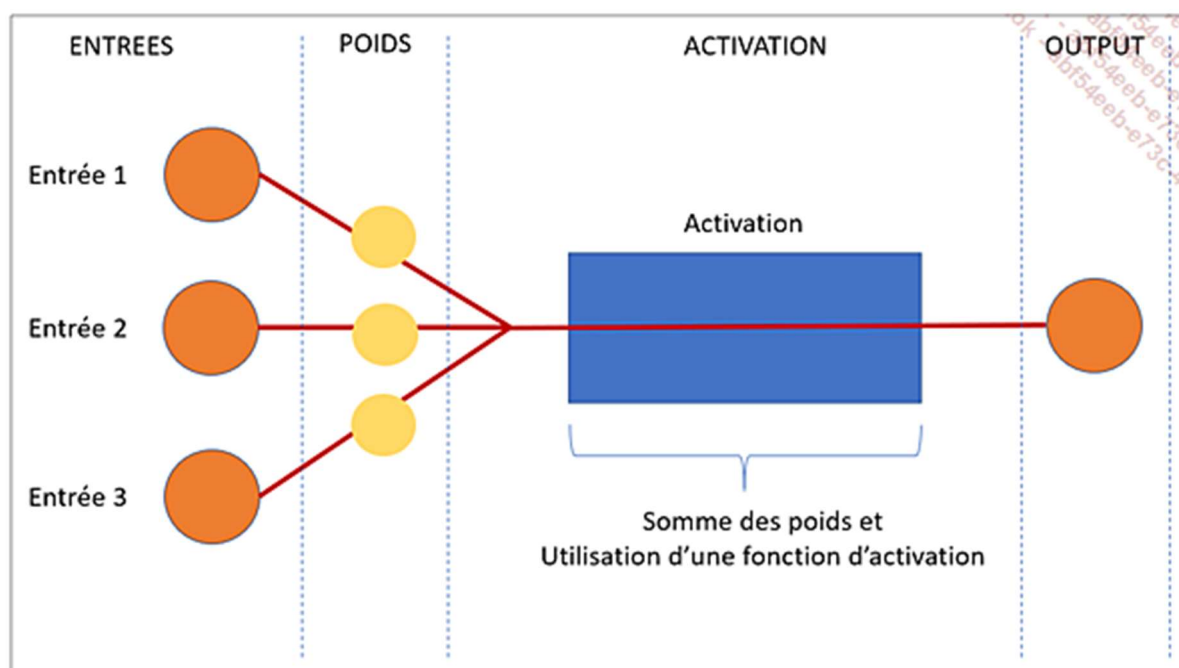


Figure 5 : Schématisation d'un neurone formel (15)

Pour un neurone formel, on parle aussi de :

- **Fonction d'activation** : binaire, sigmoïde...
- **Propagation** : après avoir effectué la somme pondérée des entrées, et utilisé une fonction d'activation pour obtenir une valeur de prédiction. On part des neurones d'entrées vers celle de sortie.
- **Rétropropagation** : On compare la valeur de prédiction du neurone formel avec celle attendue, c'est-à-dire, on calcule l'erreur de prédiction. Une fois l'erreur de prédiction obtenue on parcourt les neurones en sens inverse, de la sortie vers les entrées, en prenant compte de cette erreur et en ajustant les valeurs des différents poids.

2.2.5.3 Les réseaux de neurones simple couche et multicouches

Le Perceptron originel est un réseau de neurones formels, ou simple couche. Il n'est en mesure de classifier que des données « linéairement séparables ». On parle de données « linéairement séparables » lorsque l'on peut trouver une droite approximative passant au plus près de ces données, soit les classifier en deux groupes. Dans cette situation, en pratique il est bien rare que celles-ci le soient, un réseau de neurones simple couche est utilisé. Lorsque cela n'est pas possible, on parle de réseau de neurones multicouches. Ces réseaux multicouches permettent de résoudre des problématiques plus complexes comme reconnaître des lésions cutanées, prédire le positionnement d'une dent en fonction d'un traitement orthodontique spécifique...

Un exemple d'utilisation de réseaux de neurones multicouches et de leur puissance :

une revue systématique et une méta-analyse, sur la performance du DL face à celle de professionnels de santé pour la détermination de diagnostic à partir d'une image médicale a été faite en 2019 (32).

Une recherche sur Ovid-MEDLINE, Embase, Science Citation Index, et Conference Proceedings Citation Index a été faite pour des études publiées du 1er janvier 2012 au 6 juin 2019. Des études sur la performance diagnostique des modèles de DL et des professionnels de la santé basés sur l'imagerie médicale, pour toutes maladies, ont été incluses. 82 études ont été gardées. Cette étude a révélé que la performance diagnostique des modèles d'apprentissage en profondeur, ou DL, était équivalente à celle des professionnels de la santé !

Cependant, l'une des principales conclusions de l'examen est que peu d'études ont comparé la performance du DL et de professionnels de la santé utilisant le même échantillon. Cela dit, en 2019, le DL peut déjà concurrencer, dans le domaine de l'imagerie médicale, des années d'études et l'expérience d'un professionnel de santé. Cela présage des performances encore plus poussées d'ici quelques années.

3 L'IA et la dentisterie

3.1 Dans le domaine de la prévention

En 1770, William Addis a été emprisonné pour avoir déclenché une émeute en Angleterre. Il se rendait compte que la méthode de brossage des dents de son époque n'était pas très adaptée. Un chiffon et de la suie, du sel voire des coquilles broyées, la méthode pouvait être améliorée. En observant un détenu passer le balai, l'idée lui vient de conserver un petit os d'animal d'un repas, de faire des petits trous dedans, récupérer des poils de sanglier, les attachés en petites touffes, et les glisser dans les trous avant de les maintenir par un fil à l'os ! Après sa libération, il crée son entreprise de fabrication de brosses à dents. Aujourd'hui encore, sa société fabrique 70 millions de brosses à dents par an ! (33)

3.1.1 Genius X de Oral B ® (34,96)

Oral-B® est une marque de brosse à dents commercialisée par Gillette® de 1984 à 2005, puis fait partie de la société Procter&Gamble® depuis 2006. En 2019, elle présente la Genius X®, considéré comme la première brosse à dents intégrant de l'IA.

3.1.1.1 Concept

En partant du principe qu'environ 80% de leurs clients laissent des zones non brossées voire mal brossées. Travaillant avec des dentistes qui ont déterminé que ces mêmes zones présentent le plus de tartre. La société décide alors d'équiper la Genius X® de six capteurs placés dans des axes différents qui transmettent les données d'un accéléromètre et d'un gyroscope à une application. Effectivement, l'IA n'est pas dans la brosse à dents mais dans l'application associée. Les données sont fournies par la brosse et interprétées par l'application. Cela va permettre de tracker les mouvements de l'utilisateur, les différents axes utilisés de brossages, la force appliquée, la durée...

3.1.1.2 Fonctionnement

Lors de la phase d'apprentissage de l'algorithme d'IA, un millier de personnes utilisent la brosse à dents. Ils se sont rendu compte que les techniques étaient variées, la manière de tenir la brosse à dents avec ou sans changement de main pendant le brossage, les mouvements étaient très hétéroclites. De là, une phase de validation, puis une phase de test de l'application. Lors de la phase de validation et de test, les utilisateurs avaient au préalable un colorateur de plaque, ce qui permettrait d'évaluer la précision de prédiction de l'application, sur les zones oubliées. Pour obtenir la

précision actuelle, supérieure à 90%, il a fallu quelques années au groupe.

La brosse à dents récolte les données de vos mouvements, l'application détermine votre style de brossage et dresse votre portrait dentaire et vos statistiques au fil du temps (**figure 6**). Elle évalue :

- La position de la brosse à dents, pour déterminer (« prédire ») les zones oubliées. Elle vous donne ensuite un score du brossage
- La pression exercée pour vous éviter de traumatiser la gencive et les dents. En cas de forte pression, la rotation diminue, il y a présence d'un signal lumineux, et les zones en question passent au rouge sur l'application
- La durée de brossage, standardisée à 2 minutes, mais personnalisable

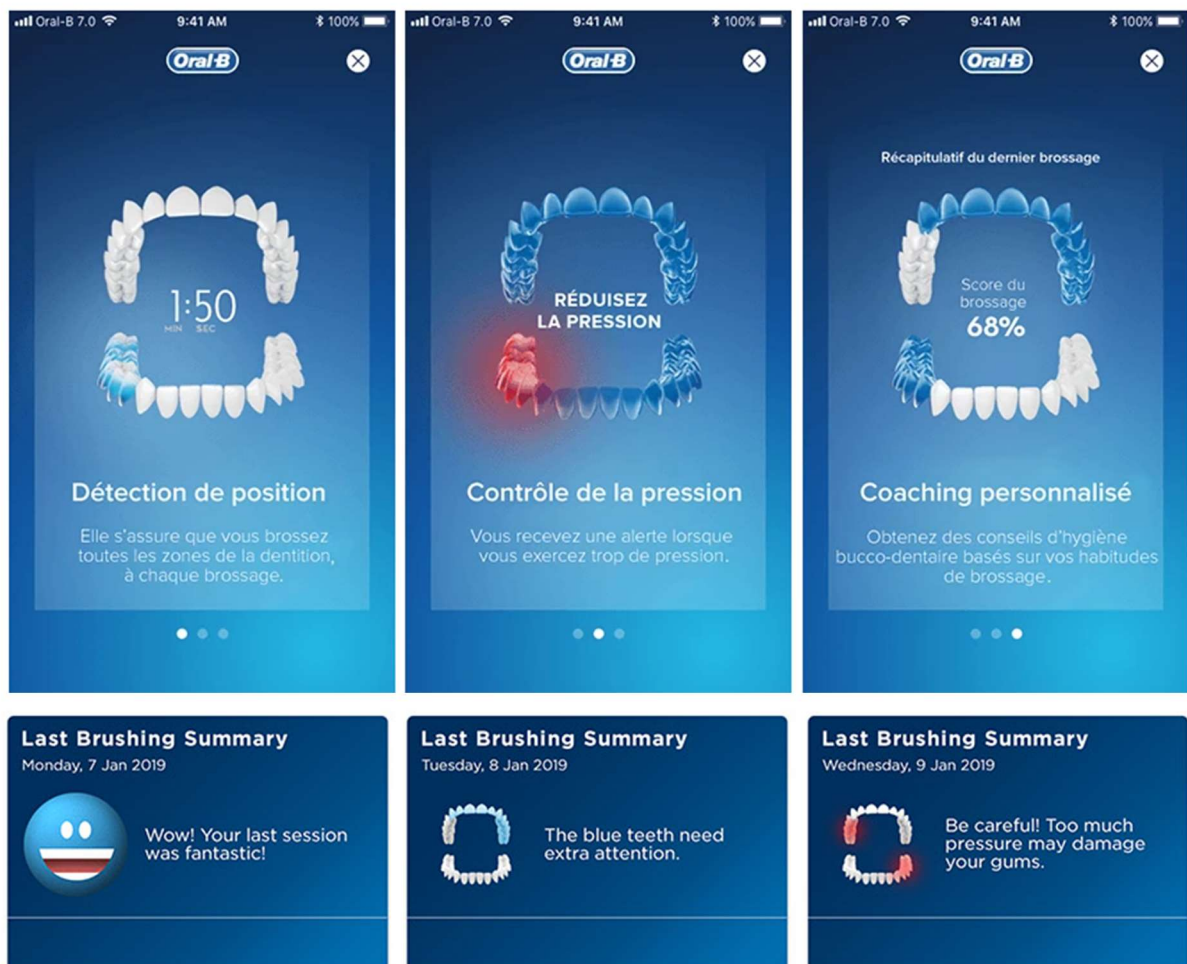


Figure 6 : Capture d'écran de l'application associée à la Genius X®, source Oral-B®

3.1.1.3 Est-ce de l'IA ?(34,96)

La technologie de détection de position de la Genius X fonctionne avec un capteur de mouvement qui se base sur 6 axes, placé à l'intérieur du corps de la brosse,

et un « réseau de neurones récurrents (RNN) » calcule la position de la brosse dans la cavité buccale de l'utilisateur.

Les multiples positions possibles de la brosse dans une cavité buccale ont été apprises au RNN dans les laboratoires Oral-B® à l'aide de technologies d'apprentissage automatique.

Le RNN a ensuite été implémenté dans l'application Oral-B® sur le téléphone mobile, qui reçoit les données du capteur de la brosse pendant le brossage et utilise le RNN pour calculer la position réelle.

Les RNN sont des réseaux capables de « penser » et « repenser » aux données qu'ils étudient. Ce qui est particulièrement utile pour analyser des données séquentielles, où le passé est utile pour comprendre le présent. Il se trouve dans l'application et reçoit les données de la brosse pour effectuer les calculs. Cependant, il n'évolue pas au fur et à mesure des utilisations.

Donc si l'on revient à notre définition de l'IA, toute application dotée d'apprentissage est une IA, celle du Genius X a appris toutes les positions possibles de la brosse à dents dans la cavité buccale. Il détecte si vous vous brossez les dents supérieures et inférieures ensemble (bouche fermée) ou séparément (bouche ouverte). Et l'algorithme n'évolue pas au cours de l'utilisation, parce qu'il n'a qu'une tâche à faire, reconnaître votre style de brossage, l'évaluer afin de l'améliorer.

3.1.2 VisualDx® (35–40)

VisualDx® est un système d'aide à la décision clinique diagnostique primé, conçu pour améliorer la précision du diagnostic, faciliter les décisions thérapeutiques et améliorer la sécurité des patients.

Les cliniciens peuvent rapidement établir un diagnostic différentiel personnalisé pour la médecine générale ou utiliser la puissante fonction de recherche pour accéder à des informations cliniques spécifiques au patient et à des images médicales.

3.1.2.1 Concept

Les retards et les erreurs de diagnostic peuvent être très dommageables au patient. En fait, les données de mortalité issues des autopsies ont montré que 35% à 40% des décès étaient dus à des diagnostics manqués.(41)

Des recherches ont confirmé que les erreurs cognitives des médecins étaient la cause principale de cette erreur.(42)

Bien que la plupart des cas médicaux soient finalement correctement diagnostiqués et traités, les erreurs entraînant des retards peuvent entraîner une mauvaise qualité des soins, des risques pour la sécurité des patients, une augmentation des coûts et, dans certains cas, des poursuites pour faute professionnelle.(43,44)

VisualDx® a été conçu dans ce but de limiter ces erreurs et ces retards, c'est un produit de diagnostic différentiel, basé sur des preuves, pour des maladies identifiables visuellement. Les diagnostics s'affichent sous la forme d'une collection d'images variant selon l'âge, le stade de la maladie et le type de peau. Des résumés cliniques et des documents à l'intention des patients accompagnent les diagnostics.

C'est un outil d'aide à la décision clinique qui utilise des images et des fonctions cliniques interrogeables pour aider les médecins à prendre une décision de diagnostic. Il contient une base de données de plus de 35 000 images de haute qualité couvrant une grande variété de conditions et d'éruptions cutanées médicamenteuses ou non.

3.1.2.2 Fonctionnement

VisualDx® est utilisable sous forme d'application web ou application mobile. La licence est payante pour pouvoir utiliser leur base de données. On a le choix d'entrer des symptômes, un médicament, un diagnostic ou choisir le générateur de diagnostic différentiel via un questionnaire sur le patient. (**figures 7, 8, 9, 10**)

En lançant l'application depuis son téléphone, on a le choix entre entrer un symptôme, un médicament ou un diagnostic, ou utiliser le générateur de diagnostics différentiels, ce qu'on a fait (**figure 7a**).

Ensuite, on doit déterminer les symptômes principaux pour lancer le programme de diagnostic différentiel (**figure 7b**, choix : douleur dentaire), l'âge et le sexe du patient (**figure 7c**, choix : femme de 50 à 59 ans). On peut aussi ajouter des détails sur :

1. L'apparence du patient (**figure 7d et 8a**, choix : patient paraît en bon état général)
2. Les signes bucco-dentaires (**figure 8b**, choix : hémorragie gingival et caries dentaires)
3. Les symptômes généraux (**figure 8c**, choix : adénopathie)
4. Les lésions buccales et situations (**figure 9a et 9b**, choix : néant)
5. La toxicomanie (**figure 8d**, choix : tabagisme)
6. Les résultats négatifs (**figure 8e**, choix : absence de signes cutanés, cardiovasculaires...)

Enfin, on obtient des premiers diagnostics différentiels selon leurs probabilités décroissantes, ici (**figure 8f**) :

1. Parodontite
2. Carie
3. Sinusite
4. Bruxisme
5. Algie vasculaire de la face

Ce qui est d'autant plus intéressant avec cette application, c'est qu'en fonction des circonstances de survenue du/des symptômes (urgences, suite d'infections) ou si l'on ne trouve pas le diagnostic de première intention, d'autres diagnostics différentiels sont proposés ! (**figure 10a, 10b, 10c**).

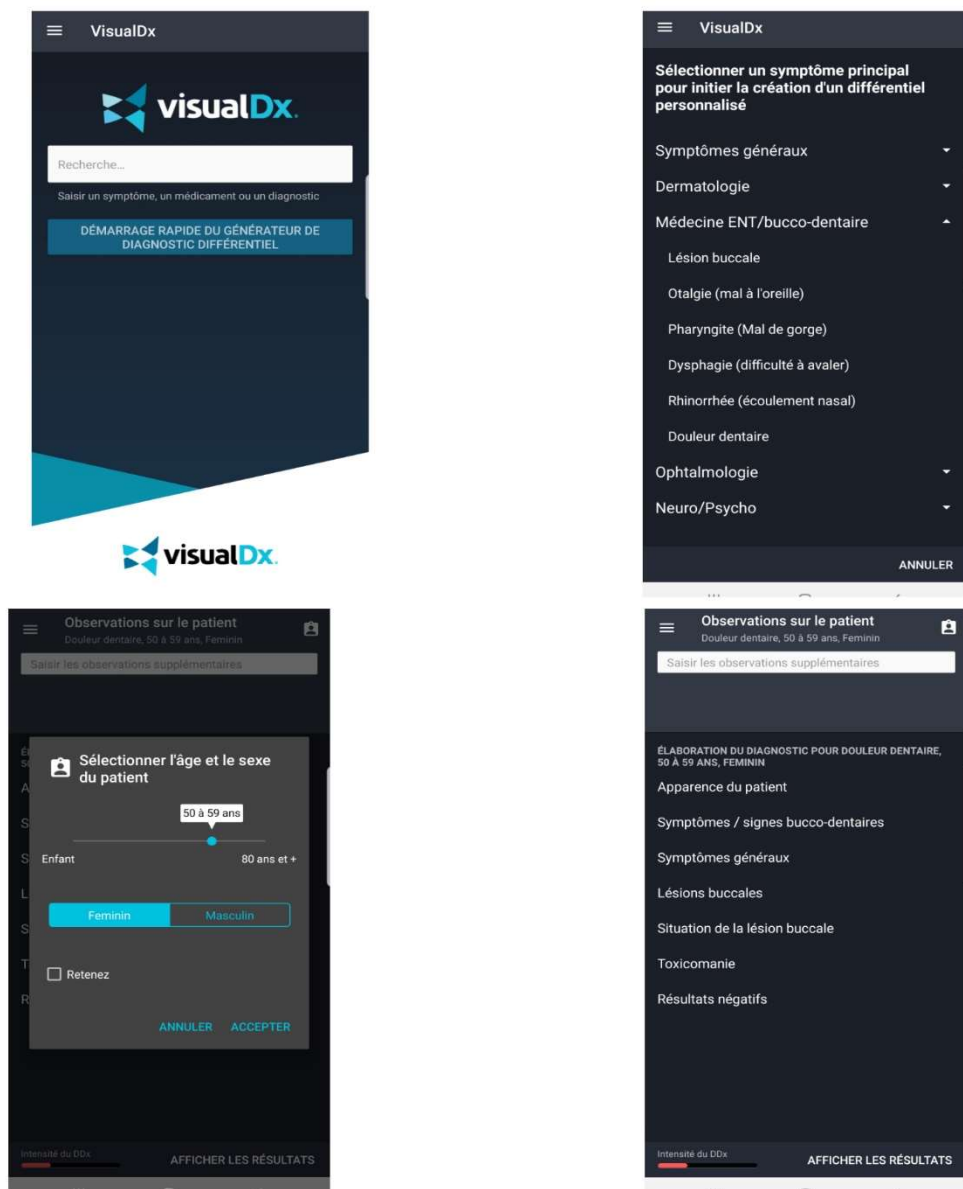


Figure 7 : a-b-c-d (de gauche à droite et de haut en bas) : Captures d'écrans de l'application VisualDx® sur Android®

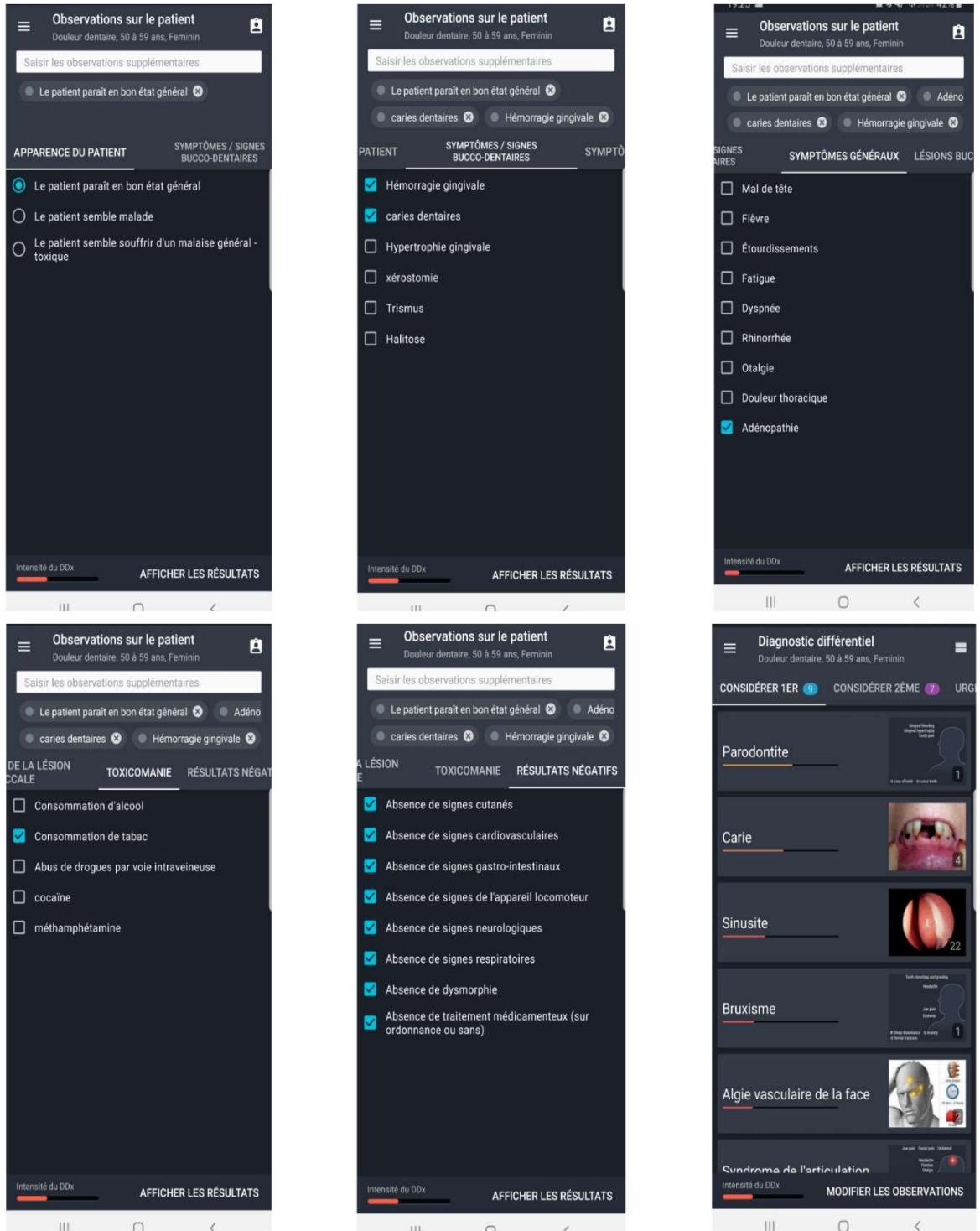


Figure 8 : a-b-c-d-e-f (de gauche à droite et de haut en bas) : Captures d'écrans de l'application VisualDx® sur Android®

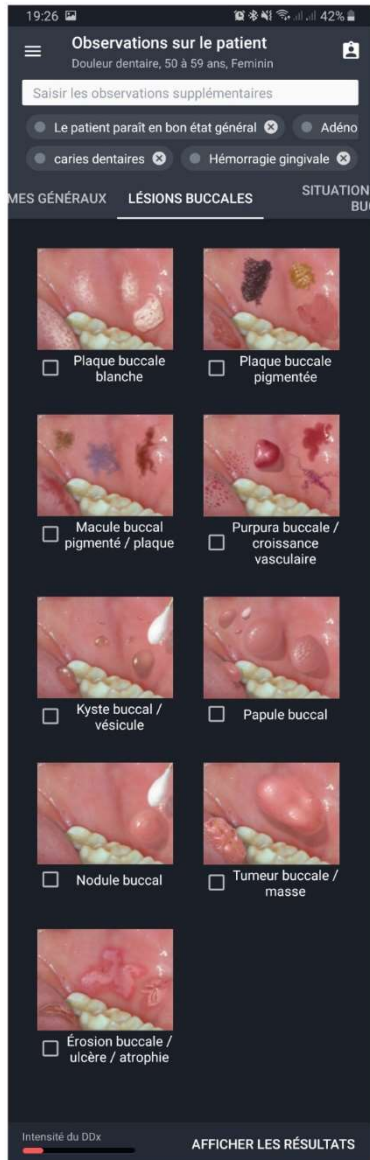


Figure 9 : a-b (de gauche à droite) : Captures d'écrans de l'application VisualDx® sur Android®

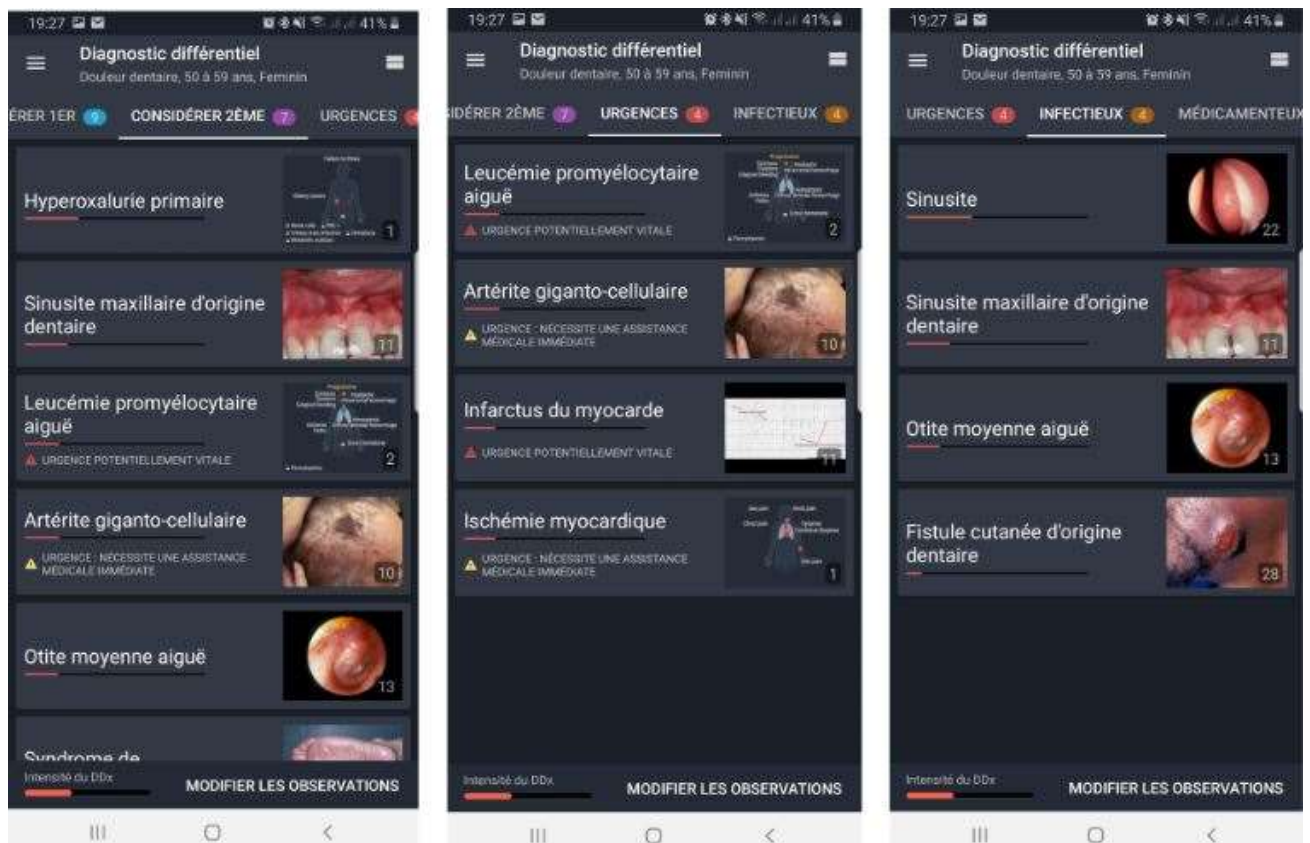


Figure 10 : a-b-c (de gauche à droite) : Captures d'écrans de l'application VisualDx® sur Android®

Pour ceux qui sont sur iOS® de Apple®, l'application utilise le nouveau moteur Core ML®, un framework d'Apple®, intégrant le Machine Learning et le Deep Learning pour associer de l'IA aux applications de manière simple. Cela débloque la fonctionnalité de prendre une photo d'une éruption ou d'une lésion cutanée, et en quelques millisecondes, elle est classée dans différents types de lésions possibles. Le clinicien visualise et confirme la classification adéquate, puis il entre des informations complémentaires sur le patient afin d'examiner immédiatement les possibilités de diagnostics et les options de traitements. Plus de 65% des problèmes de peau sont vus par des non-dermatologues et 15% de toutes les visites de soins primaires incluent des problèmes liés à la peau. Les étudiants en médecine qui deviennent par la suite urgentistes reçoivent en moyenne 21h de pratique en dermatologie. Ce qui rend difficile la précision du diagnostic de lésions cutanées ainsi que le traitement associé.(45)

Cette application permet d'aider les professionnels de santé à faire, dans l'urgence, des diagnostics et proposer des plans de traitements plus rapidement, plus précis. En plus des questions sur les antécédents médicaux des patients, elle récupère des informations mondiales en fonction de la localisation pour définir s'il y a présence d'épidémies locales/régionales. Utilisée dans 1 600 hôpitaux et cliniques à travers les États-Unis et par des dizaines de milliers de professionnels de la santé, elle s'appuie sur une grande bibliothèque d'images médicales organisée et dotée de métadonnées au monde. Est-il possible que ce soit une des solutions à la baisse continue des dermatologues, sachant que le vieillissement de la population va mettre à rude épreuve les médecins actuels ?

3.1.2.3 Est-ce que c'est de l'IA

VisualDx® utilise des réseaux de neurones entraînés pour identifier les lésions et les classer dans des catégories, puis par dichotomie obtenir un diagnostic plus pointu. C'est de l'IA. L'application a été entraînée, validée et testée, sa banque d'images ne cesse de croître, elle s'améliore et ses prédictions sont de plus en plus précises. Aujourd'hui, c'est un bon outil pédagogique comme un bon assistant pour améliorer la rapidité et la précision des diagnostics et des traitements.

3.2 Dans le domaine des soins

3.2.1 L'orthodontie (46)

Au cours des dernières décennies, nos habitudes ont été bouleversées par la naissance de l'orthodontie numérique et digitale (47). L'avènement de l'imagerie, des empreintes numériques, de l'impression tridimensionnelles, de l'IA à travers les algorithmes de proposition thérapeutique, comme le ClinCheck® de Align Technologie® dans les systèmes Invisalign® (gouttière transparente amovible en polymère thermoformable ou aligneur), permettant de faire des set-up virtuels, sans compter les procédés industriels de fabrication individualisée des appareils orthodontique, génèrent de profondes mutations.

Le mérite de la conception d'un appareillage orthodontiques sur mesure à l'aide de la technologie CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing ou Conception Assisté par Ordinateur/Fabrication Assisté par Ordinateur) revient à Craig Andreiko (48), qui développe en 1990 les premiers appareils.

3.2.1.1 Concept

Dès le début, la grande variabilité anatomique observable chez l'homme moderne était la difficulté principale à la création d'un logiciel qui généralise les thérapeutiques. Cette démarche thérapeutique s'inscrit dans une philosophie de médecine personnalisée, une médecine établie sur les caractérisations fines du patient, utilisant des moyens de modélisation individuels (49).

La modélisation du projet thérapeutique et de l'appareillage orthodontique est basée sur une IA qui détermine l'objectif du traitement et le chemin de déplacements dentaires pour y parvenir. (**figure 11**)

Un technicien traduit les informations paracliniques du patient en langage informatique, c'est-à-dire les modèles d'études avec segmentation des dents présentes sur arcade, et enregistre les instructions du praticien. Le set-up virtuel est ensuite validé par le praticien et l'appareil orthodontique est fabriqué par procédé industriel, puis livré par le praticien qui assure le suivi thérapeutique.

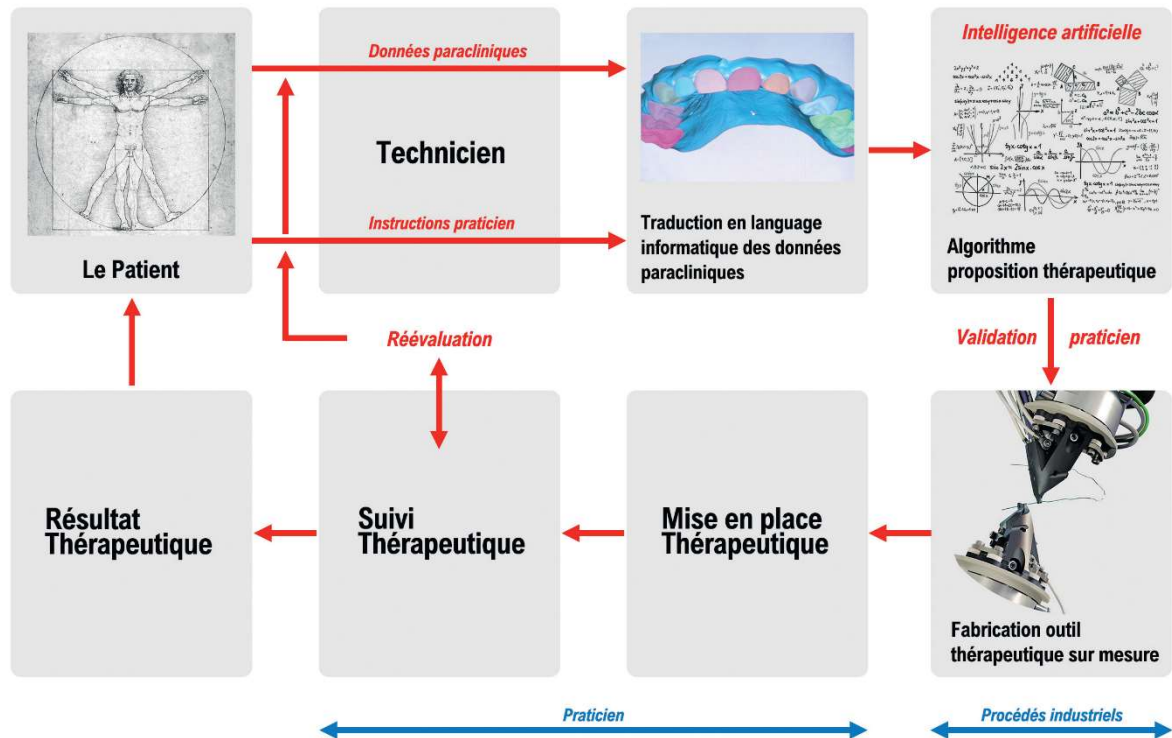


Figure 11 : Conception actuelle de l'outil thérapeutique orthodontique par procédé CAD/CAM (image du procédé industriels du robot de SureSmile® similaire au procédé d'Align Technology®)

3.2.1.2 Fonctionnement

Les empreintes sont le point de départ de notre thérapeutique, si elles ne sont pas précises, tout le pan de traitement peut être faussé. Par exemple, la société Align Technology® refuse toutes les empreintes qui présentent des défauts, à l'exception des petits détails qui peuvent être modifiés par traitement informatique (50). L'empreinte optique permet d'éviter la manipulation des matériaux d'empreintes, les éventuelles erreurs praticiens dépendants, et la contrainte pour le patient de les avoir en bouche.

Les photographies sont nécessaires en orthodontie, et leur qualité est tout aussi importante, d'où la nécessité des écarteurs et miroirs intrabuccaux. Il faudra envoyer les clichés (figure 12) :

- Du visage de profil (droit)
- Du visage de face
- Du visage de face avec sourire
- De la vue occlusale maxillaire
- De la vue occlusale mandibulaire
- De l'occlusion droite

- De l'occlusion gauche
- De l'occlusion de face

Les radiographies conseillées mais non obligatoires à communiquer sont :

- Un panoramique dentaire
- Une téléradiographie de profil
- Un bilan long cône ou status complet

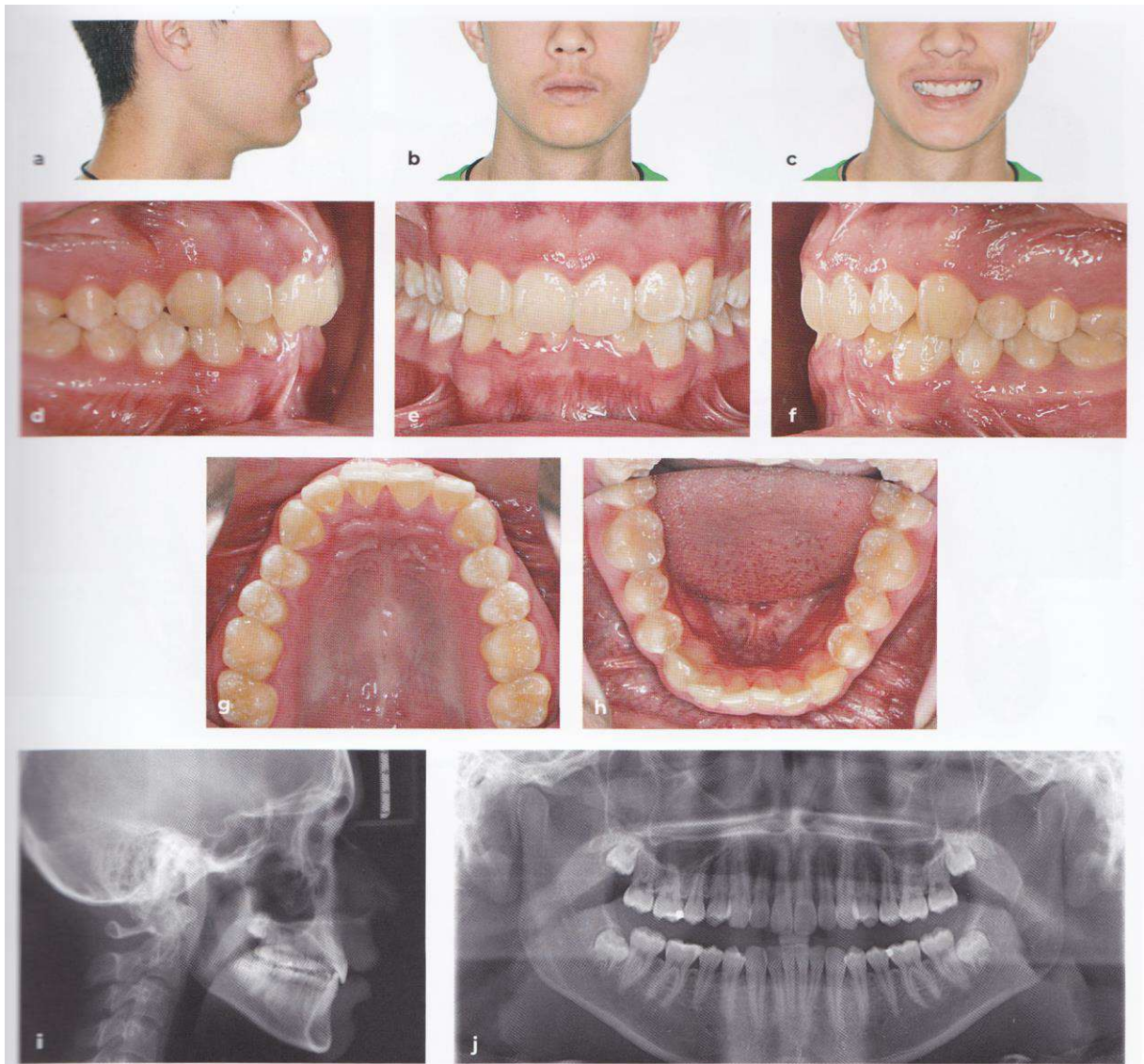


Figure 12 : Bilan photographique et radiographique complet (51)

Le ClinCheck® est une application logicielle propriétaire permettant de visualiser les étapes du traitement jusqu'au résultat final par une modélisation tridimensionnelle des mouvements dentaires, autrement dit un set-up animé informatisé préalable.

Sa finalité est de pouvoir prédire la solution thérapeutique la plus adaptée en obtenant une durée de traitement la plus réduite possible en fonction de la situation clinique à traiter.

À partir des empreintes classiques numérisées ou bien des empreintes optiques, Invisalign® crée le modèle virtuel final en fonction des indications du praticien.

Les unités dento-alvéolaires sont séparées individuellement et réintégrées au

modèle de travail.

Une reproduction virtuelle de l'axe, la position, les points de contact des dents, la situation de la gencive est réalisée.

C'est alors que le plan de traitement est appliqué et que les mouvements sont mis en séquence par le logiciel TREAT®.

Le praticien reçoit alors la simulation de traitement initial qu'il peut modifier à souhait jusqu'à satisfaction. Il peut ainsi visualiser chaque mouvement, chaque étape thérapeutique, ou le traitement dans sa globalité.

Il peut demander plusieurs plans de traitements et recevoir plusieurs ClinCheck® afin de les comparer et de choisir le plan de traitement le plus adapté (exemple : avec ou sans extractions) (50–53).

La version 4, appelée ClinCheck® Pro est une révolution dans le domaine des set-up informatiques car il permet maintenant à l'orthodontiste de déplacer chaque dent dans les 3 plans, de modifier les stripping (réductions interproximales), de placer des taquets...

Ce qui est réellement révolutionnaire et impressionnant lors de la première prise en main du ClinCheck® Pro c'est l'interaction immédiate de l'action sur une dent avec les autres dents. Lorsque l'on change un stripping, la position d'une dent ou la forme d'arcade, l'ensemble du set up se modifie immédiatement et un nouvel équilibre apparaît. Le praticien visualise les conséquences de ses choix immédiatement sans avoir à attendre une nouvelle proposition du laboratoire.

L'autre élément particulièrement intéressant c'est la limitation du mouvement (ou du stripping) que l'on peut ordonner à une dent et l'apparition de couleur indiquant la difficulté ou l'impossibilité de ce mouvement à se réaliser avec un aligneur (54).

3.2.1.3 Est-ce de l'IA ?

Le ClinCheck® est une application qui permet de compiler toutes les informations d'un patient, à partir de photos, radiographies, et empreintes dentaires, afin de prédire les mouvements possibles de chaque dent. Aujourd'hui, l'IA de Align Technology® annonce un apprentissage machine basé sur plus de 7 millions de patients.

Les techniques utilisées dans le Machine Learning permettent des reconstructions tridimensionnelles dont l'efficacité augmente rapidement. Ils permettent de superposer divers outils de diagnostic (CBCT (Cone Beam Computed Tomography ou Imagerie Volumétrique par Faisceau Conique), photographie numérique et scanners intra-oraux) (55).

Il existe différents logiciels qui intègrent des technologies d'intelligence artificielle pour automatiser les analyses céphalométriques (56) (**figure 13**). Cela libère des ressources cognitives pour le praticien et permet d'obtenir une perception tridimensionnelle exacte et objective des caractéristiques dento-faciales d'un patient donné. C'est un outil de diagnostic extrêmement puissant. Des études montrent qu'au moins 100 à 200 points craniométriques sont nécessaires à l'analyse biométrique d'une image 3D d'un CBCT (57). La force de l'IA réside dans sa capacité à analyser et à interpréter de manière succincte autant de paramètres à la fois (58). Aucune information d'Align Technology® nous renseigne sur les logiciels intégrés dans le ClinCheck® mais celui des analyses céphalométriques en fait probablement partie.

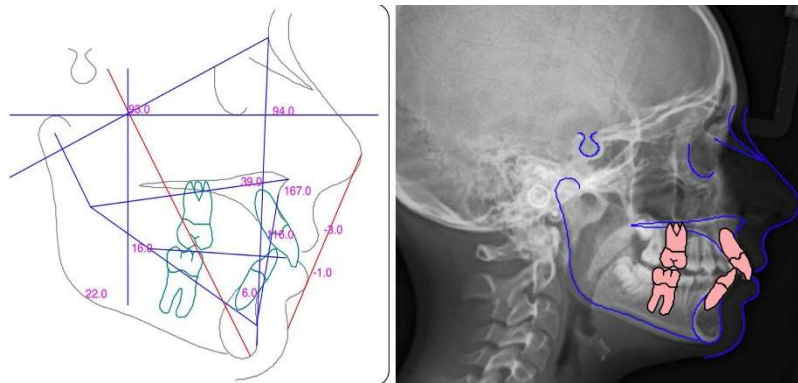


Figure 13 : CephX® utilisant l'apprentissage machine pour automatiser l'analyse céphalométrique (59)

Le ClinCheck® est une application brevetée, dont très peu d'informations sont disponibles, mais connaissant le résultat de sa fonction, on peut en déduire qu'elle soit composée de différentes IA dont les fonctions seraient :

- La reconnaissance des dents et leurs caractéristiques (formes, aspérités...)
- La reconnaissance des caractéristiques des arcades (formes, longueurs...)
- Le positionnement de la dent sur l'arcade (rotation, vestibulo-position...)
- L'évaluation des relations intermaxillaires (classe I, II, III...)
- L'évaluation des données céphalométriques (lorsqu'elles sont disponibles)
- La reconnaissance des limites de mouvements possibles par le polymère thermoformable

Les fonctionnalités biomécaniques du système Invisalign® appelées SmartForces®, sont représentées par des taquets optimisés, (mis en place sur mesure, en fonction de l'anatomie de la dent et de la quantité de mouvements qui sera nécessaire). Certaines fonctionnalités sont aussi représentées par des déformations intégrées au polymère thermoformable de traitement. Le matériau utilisé pour le traitement Invisalign® est le SmartTrack®. Il est breveté et exclusif à Invisalign®. Il est multicouche et cliniquement reconnu pour améliorer les mouvements dentaires. Le SmartTrack® est indispensable pour optimiser la prédictibilité des mouvements. De surcroît, il est plus confortable pour les patients (60).

Une étude interne réalisée par Align Technology® sur plus de 100 000 cas traités, valide l'amélioration de prédictibilité des mouvements dentaires, avec l'application des fonctionnalités SmartForces® et l'utilisation du matériau SmartTrack® (53).

Le ClinCheck® est bien une application dont la base de conception est une IA qui en regroupe d'autres. Sa fonction est de prédire des mouvements dentaires, évalués et suivis par un praticien, garanties à plus de 75% de prédictibilité par un matériau haute technologie (comparé aux matériaux prêts à l'emploi ou uni-couche, source Align Technology®), afin de produire à l'avance une série de gouttières personnalisées pour un traitement orthodontique donné.

4 Le futur de la dentisterie assistée par IA

4.1 Assistant intelligent dentaire

4.1.1 Aide au diagnostic

4.1.1.1 Classification des kystes et tumeurs maxillo-faciales

Cette classification peut s'avérer être un challenge pour l'omnipraticien. La détection des lésions, leur segmentation, l'extraction des caractéristiques de texture et enfin la classification correspondent aux quatre étapes principales à franchir. Un modèle basé sur l'asymétrie pour isoler automatiquement les kystes radiculaires, péri-coronaires, et les kératekystes sur des images de CBCT a été proposé (61). Actuellement la première phase doit toujours être effectuée manuellement. Et développer un modèle entièrement automatisé capable d'identifier les kystes et / ou les tumeurs demeure extrêmement compliqué.

Cependant ce travail est prometteur, et pourrait permettre, à l'omnipraticien, d'affiner son diagnostic, et de mieux traiter ou orienter son patient.

4.1.1.2 Identification des lésions parodontales

Quelques articles décrivent l'évaluation de la perte osseuse alvéolaire pour prédire si la conservation de la dent concernée est possible (62,63). Lee et al. (63) ont proposé un algorithme de Deep Learning pour déterminer ces pertes, avec des performances élevées dans les zones prémolo-molaires maxillaire. Cependant, ce modèle a été développé à partir d'images intra-orales idéales, c'est-à-dire en denture permanente mature, sans superposition des faces proximales, et en l'absence de restaurations. Ce qui n'est pas le cas le plus courant de la réalité.

Ces méthodes s'améliorent, et leur potentiel diagnostique ne sera que meilleur d'ici quelques années. Une fraction de seconde après la prise d'une rétro-alvéolaire suffira peut-être à déterminer si l'on adresse au parodontologue ou si l'on fait l'extraction. Bien sûr ces outils ne feront que nous donner plus d'arguments pour étayer nos diagnostics.

4.1.1.3 Détecter les sinusites maxillaires

Un système de détection des sinusites maxillaires sur des radiographies panoramiques, afin d'aider les praticiens non expérimentés (64). Le système permet au praticien non expérimenté d'avoir les mêmes résultats qu'un radiologue expérimenté en radiographie orale et maxillo-faciale. (**figure 14**)

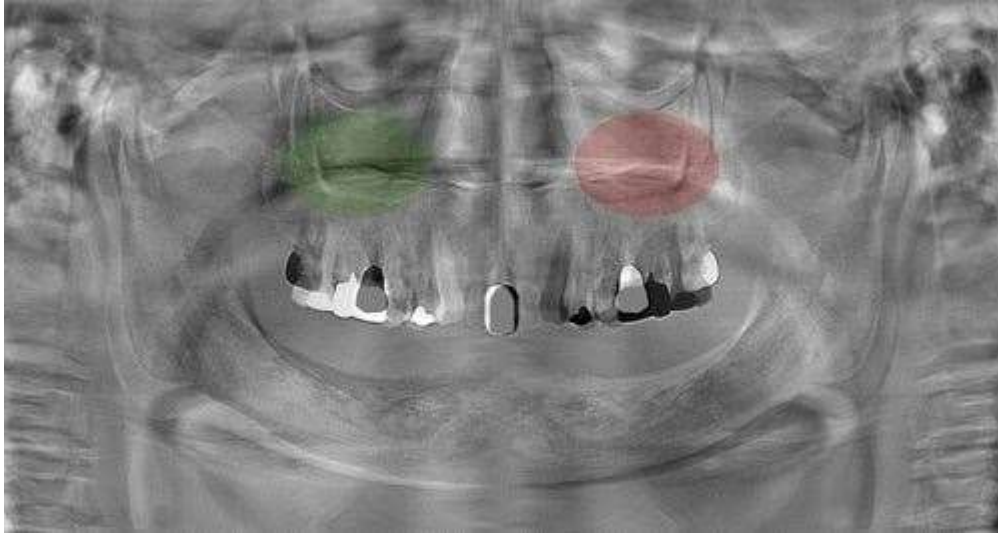


Figure 14 : Evaluation de la présence ou non d'une sinusite, en vert un sinus sain, en rouge une éventuelle sinusite. (64)

4.1.1.4 Détecter et établir un schéma dentaire

Un réseau de neurones capable de détecter et établir la numérotation dentaire sur des panoramiques dentaires (65).

La performance du réseaux de neurones est comparable à celle d'un professionnel expérimenté. Cette automatisation pourrait simplifier, et accélérer les bilans dentaires des nouveaux patients. Il faudrait pour cela, ajouter la détection, des couronnes, implants, inlay-core, restauration... Afin d'avoir un assistant vraiment compétent dans ce domaine.

Tout cela pourrait être fait automatiquement après chaque panoramique, et le schéma dentaire apparaîtrait sur notre ordinateur !

4.1.1.5 Détecter et établir la morphologie radiculaire

L'étude est faite sur les premières molaires mandibulaires, où l'on trouve occasionnellement un canal supplémentaire en distal (66).

Les images CBCT et les radiographies panoramiques de 760 premières molaires mandibulaires de 400 patients n'ayant pas subi de traitement canalaire ont été analysées. Les racines distales ont été examinées sur des images CBCT pour déterminer la présence d'une racine unique ou supplémentaire. Les zones d'image des racines ont été segmentées à partir de radiographies panoramiques et appliquées à un système de Deep Learning, et leur performance diagnostique dans la classification de la morphologie des racines a été examinée.

Des canaux supplémentaires ont été observés dans 21,4% des cas, et la précision du système a été de 86,9%, sur la présence ou non de canal ou canaux supplémentaires.

Cette étude étendue à toutes les particularités radiculaire, comme les MV2, les prémolaires à trois canaux... pourrait simplifier le diagnostic, chez l'omnipraticien, de

la complexité du traitement endodontique, et limiter les erreurs avant d'adresser à un spécialiste.

4.1.1.6 Et si...

Il y a beaucoup d'autres études sur l'IA dans le domaine de la dentisterie, mais maintenant si on imagine que toutes ces études soient compilées par une seule et même IA, qui serait capable en une fraction de seconde, après une radiographie panoramique ou un CBCT, de proposer un bilan complet. Le schéma dentaire complet, les traitements endodontiques nécessaires classés en fonction de leur complexité, la présence ou non de kystes et/ou tumeurs, la présence ou non de lésions parodontales... tout cela centralisé.

L'omnipraticien aurait des outils diagnostics aussi performants que des professionnels expérimentés, l'orientation et les traitements seraient plus précis, et les soins plus efficaces.

4.1.2 Et le secret médical ?

Lorsque l'on parle d'IA, on parle de données pour développer leur apprentissage. Légitiment les questions d'éthique qui s'y rattachent, en particulier l'utilisation et la circulation des données personnelles de santé qui doivent se faire de manière contrôlée dans un cadre réglementaire adéquat garantissant le respect du secret médical sans pour autant endiguer l'innovation.

L'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifique et Technologiques (OPECST) a adopté à l'unanimité le 14 mars 2017 un rapport intitulé « Pour une intelligence maîtrisée, utile et démystifiée » dont les points résumés sur l'éthique sont les suivants (67):

- Former à l'éthique de l'IA et de la robotique dans certains cursus spécialisés de l'enseignement supérieur
- Confier à un institut national de l'éthique de l'IA un rôle d'animation du débat politique sur les principes éthiques qui doivent encadrer ces technologies
- Former et sensibiliser le grand public aux conséquences pratiques de l'IA

Le rapport de la CNIL de Décembre 2017 donne quelques réponses supplémentaires (68):

- Le débat portant sur la nécessité ou non de « réguler les algorithmes » ignore le fait que ceux-ci sont encadrés par la loi depuis une quarantaine d'années (loi Informatique et Libertés de 1978)
- Trois principes de cette loi relayés dans le RGPD de mai 2018 :
 1. La loi encadre l'utilisation des données personnelles nécessaires au fonctionnement des algorithmes, au-delà même du traitement algorithmique à proprement parlé. Autrement dit, elle encadre les conditions de collectes et de conservation des données (principes de finalité, de proportionnalité, de sécurité, de limitation de la durée de conservation des données). Ainsi que l'exercice de leurs droits par les personnes (droit à l'information, droit d'opposition, droit d'accès, droit de rectification) afin de protéger leur vie privée et leurs libertés

2. La loi Informatique et Libertés interdit qu'une machine puisse prendre seule (sans intervention humaine) des décisions emportant des conséquences cruciales pour les personnes (décision judiciaire, décision d'octroi de crédit, par exemple) [Article 10 de la loi de 1978. Article 22 du RGPD]
 3. La loi prévoit le droit pour les personnes d'obtenir, auprès de celui qui est responsable, des informations sur la logique de fonctionnement des algorithmes. [Article 39 de la loi de 1978]
- D'autres dispositions légales plus anciennes encadrent l'utilisation des algorithmes. En santé, on pourrait envisager l'application du code de santé publique (qui réprime l'exercice illégal de la médecine par toute personne non titulaire d'un diplôme) à des dispositifs d'IA dans le domaine médical. On peut de ce fait imaginer l'interdiction de l'établissement d'un diagnostic par une IA seule.

La législation prévoit d'ores et déjà, que le diagnostic du médecin ne pourra faire l'objet d'une automatisation. Et que le praticien se tient responsable des données utilisées par l'IA et de maintenir sa confidentialité, sa sécurité, et le respect de l'éthique comme de la vie privée des patients.

Pour toutes les données utilisées par l'IA, il y a un accord préalable obligatoire par les concernés, et un droit de regard sur leurs utilisations.

Si pour le diagnostic nous en sommes là, alors quid d'un traitement fait par un robot autonome ? Nous sommes encore très loin de créer une intelligence forte, et encore plus loin de l'autoriser à faire des soins, des opérations, de manière autonome et dans ce cas comment allons-nous adapter notre pratique avec ces technologies ?

4.2 Avenir de la profession : Quels types de praticiens serons nous ?

Chaque année, l'Observatoire des Professions Libérales de Santé, CMV Médiforce réalisent un SCAN afin d'appréhender : l'évolution des mentalités et attentes des patients, l'émergence des nouvelles technologies et du numérique dans le champ de la santé, les évolutions réglementaires et crise économique. Cette 7ème édition de SCAN de 2018 a été réalisée en collaboration avec l'institut Vision & Talents, auprès de 483 Professionnels Libéraux de Santé, répartis en 8 professions : biologistes, chirurgiens-dentistes, infirmiers, kinésithérapeutes-ostéopathes, médecins généralistes, pharmaciens, radiologues et vétérinaires (69). Il en ressort que les chirurgiens-dentistes sont les moins favorables aux réformes en cours et à venir.

Avant de déprimer rappelons que :

- Les patients continueront à nous faire confiance. Les hommes auront toujours besoin de médecins, de dentistes pour les soigner, pour le moment et encore pour quelques années, en tout cas en France avec la législation en cours.
- La dentisterie « low-cost » permet de contenter une population croissante et de décomplexer ceux qui la prodiguent en donnant l'impression d'œuvrer pour le bien-être du plus grand nombre. Tout comme dans

l'alimentation, le logement, l'éducation, les vêtements, l'équipement... rien ni personne ne peut empêcher cette tendance car elle est le produit de l'effet de masse. La question à se poser est de savoir si « la dentisterie low-cost vaut moins que rien ? ». Tout en sachant que les services techniques et humains de grande qualité sont la meilleure garantie d'avenir pour n'importe quel professionnel, quelle que soit l'époque.

- Beaucoup de nos concitoyens réalisent et comprennent que la santé a un coût, que prendre soin de son corps n'est pas facile et demande des efforts.

4.2.1 Il y aura toujours des dinosaures

L'adaptation se définit, de manière générale, comme l'ajustement fonctionnel de l'être vivant au milieu, et en particulier, l'appropriation de l'organe à sa fonction, permettant à l'organisme de durer et de se reproduire.

La capacité d'adaptation est donc une condition essentielle de la vie mais c'est également une condition essentielle de l'exercice de la médecine en général et bucco-dentaire en particulier.

On observe depuis quelques années comme dans les autres professions médicales, un accroissement de normes qui imposent aux chirurgiens-dentistes à côté de leurs pratiques de soins, des normes en matière de fabrication des prothèses dentaires, alliages ou produits de soins dentaires conformes aux normes européennes, des normes de médecines bucco-dentaires et d'implants, des normes de gestion des déchets, des normes de tarification toujours plus étendues. Cette normalisation touche également l'organisation et la gestion des ressources des cabinets dentaires afin de garantir la sécurité des soins, de bonnes conditions d'hygiène et la protection du personnel.

Ce mouvement de normalisation qui touche toutes les entreprises privées ou publiques, grandes ou petites trouve son explication notamment par une théorie appelée la Tétranormalisation qui prend son point d'appui en 2005 sur la base de nombreux travaux (70–73). Ces travaux expliquent que les entreprises et les organisations sont soumises à quatre grands corps de normes :

1. Les normes comptables et financières
2. Les normes sociales et RH
3. Les normes qualité, sécurité et environnement
4. Les normes commerciales et techniques.

Selon ces travaux, l'intégration de normes multiples, souvent contradictoires mais inévitables car imposées par la législation et/ou les marchés provoque des dysfonctionnements importants entraînant des coûts cachés très élevés. Au-delà de ces contraintes normatives, les cabinets d'odontologie sont confrontés quotidiennement de plus en plus à des problématiques managériales et de GRH (Gestion de Ressources Humaines) comme un turn-over du personnel élevé, la démotivation du personnel, des situations de sureffectif ou sous-effectif, le burn-out du praticien, le surbooking des agendas, les retards dans les rendez-vous, les annulations, le sentiment de routine, des conflits relationnels et internes latents ou déclarés entre praticiens/associés, praticiens/assistantes ou assistantes entre elles, des divergences politiques entre associés, des départs à la retraite, des reprises de

cabinet et des regroupements d'associés...(74)

L'ordre des chirurgiens-dentistes recensait 42 006 praticiens en exercice en octobre 2019. La majorité d'entre eux le font en libéral et seulement 13,5 % en tant que salariés. Le salariat est d'ailleurs en timide mais constante progression et s'explique en partie par l'aspiration des professionnels à la stabilité et la sécurité. Si pendant longtemps les praticiens ont exercé à titre individuel, le nombre de sociétés ne cesse de croître, afin de permettre une mutualisation des moyens voire des revenus et d'optimiser la fiscalité. Cependant, l'exercice à titre individuel est toujours présent !

La classification commune des actes médicaux (CCAM) exerce un effet structurant sur la réalisation de l'activité, à la fois dans le choix des soins à réaliser, mais aussi par l'organisation de ces soins entre les différents membres des cabinets, les actes nécessitant des compétences techniques souvent longues à acquérir et des installations techniques coûteuses (laboratoire, bloc opératoire, matériel, impression 3D...). Le regroupement de professionnels au sein de sociétés permet ainsi de mutualiser des moyens et une structure mais aussi d'offrir un éventail de compétences réparties entre les praticiens (74,75).

Il y aura toujours des dinosaures, la DCASPL (Direction du Commerce, de l'Artisanat, des Services et Professions Libérales) a recensé le nombre total de cabinets dentaires, avec ou sans salariés en 2010 (76):

- 36 100 entreprises au total et 41 500 dentistes en France
- 23 460 entreprises dentaires avec au moins 1 salarié, soit 65%
- 12 640 entreprises sans salarié, soit 35%, plus du tiers

En 2015 (76) :

- 38 010 entreprises au total et 42 600 dentistes en France
- 23 186 entreprises dentaires avec au moins 1 salarié, soit 61%
- 14 824 entreprises sans salarié, soit 39%

Il existe encore énormément de praticiens en exercice individuel et de 2010 à 2015 leur nombre n'a fait qu'augmenter ! Ce type d'exercice fait ressortir quelques lacunes managériales, d'organisation, un manque de matériel, un manque de préparation des rendez-vous, présence de matériel défaillant, des procédures d'achat imprécises, un manque de polyvalence et de formation, des interruptions fréquentes dans le travail, un manque d'harmonisation dans les procédures de rangement...(71). En effet, cette situation est peu propice à l'innovation, à l'amélioration et l'évolution de son exercice, mais aujourd'hui il est impossible de savoir si ces praticiens seuls n'investissent pas dans les nouvelles technologies, même si la gestion est d'autant plus compliquée et le côté financier une problématique.

4.2.2 Une jeunesse polyvalente dans la profession

Le numérique a atteint très vite notre domaine, et la pédagogie en faculté a suivi. Même si elle admet encore quelques lacunes, du fait du manque de financement et donc de matériels, les étudiants sont avides de nouvelles technologies et ont grandi

avec, donc sont plus facilement ouverts à la nouveauté. Elle n'est plus crainte, au contraire elle est vite apprivoisée. Les réseaux sociaux sont aussi un lieu de découverte des nouveaux matériaux, matériels. Les entreprises n'hésitent plus à partager le potentiel de leur machine.

Une enquête transversale Suisse, où certains praticiens français exercent, de 2019, sur l'utilisation des technologies numériques dans la pratique dentaire ressort les résultats suivants (77):

- La plupart des dentistes, 97%, avaient un ordinateur dans leur vie privée (smartphone, ordinateur portable ou ordinateur de bureau) et 74% l'utilisaient aussi à des fins professionnelles.
- Il est apparu que **plus le dentiste était jeune, plus le degré de numérisation personnelle était élevé.**
- 43% des dentistes avaient accès à des dossiers dentaires depuis leur domicile, afin d'effectuer pour la plupart des tâches administratives et seulement une minorité, 3%, planifiaient des procédures dentaires.
- Les dentistes avec un degré de numérisation personnel élevé étaient plus susceptibles de travailler dans les cabinets dentaires avec un plus grand nombre de salles de traitement.
- Sur la moitié des cabinets dentaires, 52%, cinq ordinateurs de bureau ou plus étaient installés, 32% des cabinets dentaires disposaient d'un ordinateur mobile.
- 69% des cabinets dentaires avaient une page d'accueil et 10% utilisaient également des canaux de médias sociaux.
- Pour l'administration des données des patients, un logiciel a été utilisé dans 95% des cas des cabinets dentaires.
- Une stratégie numérique était maintenue dans 73% des cas des cabinets dentaires et 53% d'entre eux rappellent leurs patients à l'aide de SMS automatisés.
- Les antécédents médicaux étaient gérés numériquement dans 53% des cas des cabinets dentaires et dans 38% des cas, les résultats étaient enregistrés numériquement.
- Les technologies numériques les plus couramment utilisées sont en imagerie dentaire (photos / rayons X).
- Les scanners intra-oraux étaient disponibles dans 23% des cabinets dentaires.
- Le niveau de numérisation le plus élevé au sein des cabinets dentaires a été observé chez les orthodontistes, 57%, alors que chez l'omnipraticien ce taux était de 29%.
- Il a été constaté que **plus le dentiste était jeune, plus le cabinet dentaire était jeune, plus la zone de recrutement des patients était grande, plus le nombre de salles de traitement était élevé, plus le degré de numérisation dans les cabinets dentaires était élevé.**
- Dans 23% des cabinets dentaires, un système CAD/CAM était disponible.

Cette jeunesse dans la profession ne peut apporter qu'innovation et créativité, mêlée aux nouvelles technologies parce qu'aujourd'hui, apprendre n'est plus réservé au temps passé dans la classe ou sur les bancs de l'université. L'éducation formelle n'est finalement qu'un petit pan de ce que nous apprenons tout au long de l'existence,

de manière informelle.

À l'ère numérique, les écrans offrent un accès illimité à toutes les questions que chacun se pose. Qui n'a pas assisté à un dîner où les convives sollicitent Google® sur leur smartphone pour répondre à une question ou vérifier une information ? Qui n'a pas visité Wikipédia pour s'informer sur un point d'histoire, d'actualité ou de culture générale ? Qui n'a jamais sollicité Youtube® pour découvrir une nouvelle recette de cuisine, apprendre comment faire pousser des tomates bio sur sa terrasse ou visualiser des préparations pour facettes ?

Nous sommes entrés dans des sociétés de l' « apprenance », les connaissances et les compétences sont devenues « un élément vital du développement personnel », et principales sources de création (78,79).

4.2.3 L'efficacité de la profession, serons-nous des robots ?

4.2.3.1 Yomi® le robot qui sait poser des implants

On a tous été surpris et incrédules sur cette vidéo sortie fin 2017, où un robot chinois, Yomi®, pose deux implants sur une patiente. Plusieurs articles parlent de non intervention humaine (80–82), effectivement lors de la pose les praticiens et assistantes présentes n'intervenaient pas, mais il fallait tout de même changer les forêts et c'était la seule tâche de l'humain.

Yomi® fonctionne grâce à une IA, qui est capable de s'adapter à la bouche de chaque patient. Il peut se déplacer dans la position correcte pour effectuer l'opération et déterminer les mouvements, l'angle et la profondeur nécessaires pour s'adapter à la cavité buccale du patient. De plus il sait s'adapter aux mouvements du patient, qui est anesthésié de manière locale.

Le robot a été conçu dans le but de pallier à la pénurie d'implantologues expérimentés et des besoins en Chine (selon une étude épidémiologique 400 millions de patients attendraient la pose d'un implant), et des erreurs fréquentes (84–87).

En mars 2017, la Food and Drug Administration des États-Unis (FDA) a approuvé l'utilisation de ce système de robot appelé Yomi®, et conçu pour aider les chirurgiens à poser des implants.

4.2.3.2 RAC : Robots Antimicrobiens Catalytiques

Une équipe de chercheurs de l'université de Pennsylvanie vient ainsi de mettre au point des microrobots chargés de nettoyer les dents avec une redoutable efficacité. À l'origine, leur invention visait plutôt les tubes et espaces confinés comme les canalisations, les sondes ou les cathéters médicaux. Des endroits où les biofilms bactériens sont particulièrement résistants aux traitements antimicrobiens car ils collent au support, provoquant infections et dégradation des surfaces.

Hyun Koo, chercheur au département de médecine dentaire avait précédemment expérimenté plusieurs solutions contre ces biofilms, dont une solution à base de nanoparticules d'oxyde de fer. Ces dernières catalysent la réaction avec le peroxyde

d'hydrogène pour libérer des radicaux libres qui décomposent la matrice d'exopolysaccharides du biofilm (88). Il s'est un jour aperçu que ses collègues de l'école d'ingénierie et de sciences appliquées utilisaient ces mêmes nanoparticules de fer pour élaborer des microrobots que l'on peut diriger par champ magnétique.

Les deux équipes ont alors décidé de rapprocher leurs savoir-faire pour mettre au point des microrobots à double fonction, catalytique et magnétique, capables de cibler précisément les biofilms. Deux types de ces robots antimicrobiens catalytiques (RAC) ont été développés. Le premier consiste à suspendre des particules d'oxyde de fer dans une solution, celle-ci pouvant alors être dirigée par des aimants pour éliminer le biofilm à la manière d'un chasse-neige. « Ces RAC biohybrides peuvent ainsi être balayés sur des larges bandes ou sur une trajectoire bien définie pour une élimination localisée à l'échelle microscopique », assure Hyun Koo. Le second type de robot implique l'incorporation des nanoparticules dans un gel polymère, moulé en 3D dans une forme personnalisée à l'endroit que l'on souhaite traiter (**figure 15**). « Les RAC en forme d'ailettes conviennent par exemple aux courbes des tubes cylindriques, tandis que ceux en hélice peuvent percer un biofilm qui obstrue un canal », illustre le chercheur (88,89).

L'équipe a testé les RAC sur des tubes et plaques en verre avant de les appliquer sur les dents. Ils se sont avérés particulièrement efficaces pour éliminer les biofilms bactériens, non seulement à la surface de la dent mais aussi à des endroits habituellement inaccessibles aux outils du dentiste, comme les canaux radiculaires situés à la racine de la gencive où s'accumulent les bactéries. « Les traitements existants sont inefficaces parce qu'ils sont incapables de dégrader simultanément la matrice protectrice du biofilm, de tuer les bactéries incrustées et d'éliminer les résidus. Nos robots peuvent faire les trois à la fois, ne laissant absolument aucune trace du biofilm. »

Débarrasser les dents des restes de la dégradation diminue ainsi le risque que la plaque ne se redépose dessus. Les chercheurs espèrent déboucher rapidement sur une application clinique.

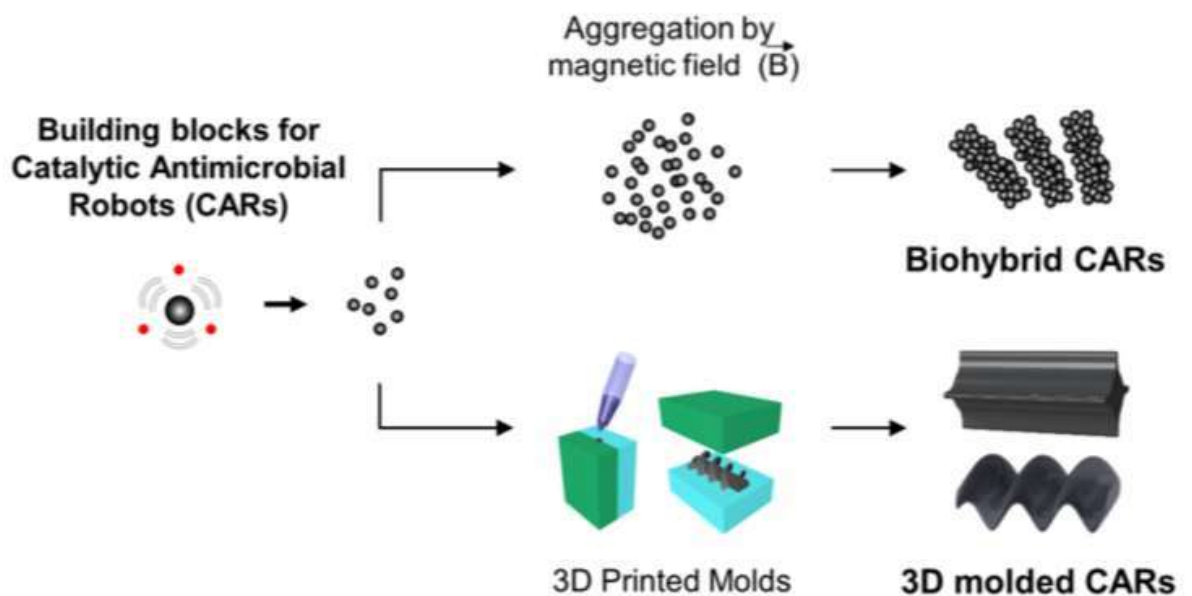


Figure 15 : deux types de microrobots, un à base de nanoparticules de fer dans une solution, l'autre à partir de nanoparticules moulées en 3D dans un gel polymère(89)

Des solutions thérapeutiques où le dentiste passe au second plan, c'est-à-dire, assistant du robot intelligent travailleur existe déjà, ailleurs qu'en France. Parce qu'il n'y est pas autorisé et que cela peut être considéré comme un exercice illégal de la médecine et que les mentalités ne sont pas encore prêtes à se faire soigner par des machines.

Entre un praticien et un patient, il y a avant tout la confiance. Et celle-ci ne sera pas facile à contourner ou à acquérir par les robots, même si leurs performances deviennent de plus en plus exceptionnelles. Ensuite, l'empathie, les robots ne sont pas encore assez « intelligents » pour comprendre et apprendre l'empathie. La place du dentiste ne sera pas facilement détrônée par les machines, par contre leur utilisation se fera croissante et améliorera certainement notre pratique.

5 Conclusion (32,90,91)

On manque encore d'études de qualité suffisante pour dire si l'intelligence artificielle est plus efficace qu'un médecin expérimenté pour établir un diagnostic médical.

On peut probablement dire d'après le maigre corpus disponible de travaux comparant l'IA aux médecins, que l'IA ne fait pas moins bien que les humains. Mais comparer les deux est hasardeux, les médecins travaillent avec des données médicales qui sont "brouillonnes, difficiles à cerner et imparfaites", et en contactent avec les patients, et tout leur panel de sentiments, peur, colère, incompréhension, joie, déception... Une qualité dans le domaine médical est l'empathie qu'aujourd'hui aucune machine, encore, ne sait comprendre.

Le terme d'IA est un enjeu à la fois commercial et scientifique. Effectivement, l'engouement dans ce domaine est tel qu'un nouveau produit doté d'IA sort régulièrement ! Et cette course commerciale est bénéfique pour la science, car les investissements dans la recherche sont colossaux.

L'IA s'améliorera, et certains professionnels de santé utilisent déjà cette technologie au quotidien, ils ne peuvent pas en dépendre mais l'outil est efficace et devient parfois nécessaire dans certains domaines comme les analyses radiographiques. Cependant, aujourd'hui on parle du « gouffre de l'IA » (« The AI Chasm »), tous les hôpitaux n'en sont pas équipés et pourtant on parle beaucoup de prouesse ou de réussite technologique ! Pourquoi ?

1. Des problèmes d'ordre technique : il manque encore des données diversifiées et de qualités pour entraîner et valider les algorithmes en milieu de soins réels. Mais il y a aussi des problèmes de compatibilité entre les systèmes d'IA et les systèmes d'informations des organisations de santé, ce qui tend à limiter l'implantation de cette technologie.
2. Des problèmes de nature individuelle : certains cliniciens ne perçoivent pas les bénéfices de l'IA, souvent du fait d'un manque de compréhension et/ou de formation. Pour les patients, ils ont peur que ces algorithmes ne comprennent pas leurs ressentis.
3. Des problèmes liés aux législations : Les réglementations encadrant l'IA ne répondent pas encore aux manques de transparence, aux risques de biais...

Plusieurs pays travaillent sur ces problématiques pour accélérer l'implantation de la technologie en garantissant la protection des droits des citoyens. Et tentent de se doter d'une stratégie d'IA cohérente (quels problèmes ces systèmes vont résoudre ?), d'intégrer l'ensemble des parties prenantes (praticiens, patients, gestionnaires...), et développer des mécanismes d'audit algorithmique (la transparence des données et des techniques utilisées pour entraîner les algorithmes).

Dans le domaine de la dentisterie, nous sommes encore au début de l'exploitation de cette technologie.

Notre métier est manuel, nécessite un travail de précision, et surtout la confiance

de nos patients. On travaille particulièrement dans une zone intime, et nous ne serons certainement jamais totalement remplacés par des machines pour ces différentes raisons.

L'IA nous ouvre des possibilités techniques, simplifie nos diagnostics, améliore nos prises en charge, nous permet d'être plus efficaces, mais ne remplacera pas le praticien, pas encore.

Références bibliographiques

1. Villani C. Donner un sens à l'intelligence artificielle pour une stratégie nationale et européenne [Internet]. 2018. Disponible sur: https://www.aiforhumanity.fr/pdfs/9782111457089_Rapport_Villani_accessible.pdf
2. Nordlinger B, Villani C. Santé et intelligence artificielle - broché - Bernard Nordlinger, Cédric Villani - Achat Livre ou ebook | fnac. C.N.R.S Eds; 2018. 250 p.
3. Bertaud V, Chaumeil B, Ehrmann E, Fages M, Valcarcel J. L'informatisation du cabinet dentaire. In: Venot A, Burgun A, Quantin C, éditeurs. Informatique médicale, e-Santé: Fondements et applications [Internet]. Paris: Springer Paris; 2013 [cité 22 mai 2019]. p. 377-413. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-2-8178-0338-8_15
4. Rodriguez J-M. Intelligence Artificielle et Cognitive business [Internet]. ENI. ENI; 2018 [cité 21 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.editions-eni.fr/livre/intelligence-artificielle-et-cognitive-business-9782409013423>
5. Mathivet V. L'Intelligence Artificielle pour les développeurs - Concepts et implémentations en Java (2e édition) [Internet]. ENI. 2019 [cité 22 mai 2019]. 500 p. Disponible sur: <https://www.editions-eni.fr/livre/l-intelligence-artificielle-pour-les-developpeurs-concepts-et-implémentations-en-java-2e-edition-9782409017094>
6. Gardner HE. Multiple Intelligences: The Theory In Practice. New York, NY: Basic Books; 1993. 320 p.
7. Alexandre L. La guerre des intelligences. Paris: J. -C. Lattès; 2018. 339 p.
8. Sahlberg P, Ravitch D, Hargreaves A, Robinson K. Finnish Lessons 2.0: What Can the World Learn from Educational Change in Finland? 2nd Revised edition. New York: Teachers' College Press; 2014. 264 p.
9. Israel M. Intelligence Artificielle avec AWS. ENI; 2019. 424 p.
10. Gilbert C. Conception d'interfaces pour mobiles - Graphisme et développement des applications natives, web et hybrides [Internet]. ENI; 2017. 248 p. Disponible sur: <https://www.editions-eni.fr/livre/conception-d-interfaces-pour-mobiles-graphisme-et-developpement-des-applications-natives-web-et-hybrides-9782409006241>
11. Julia L. L'intelligence artificielle n'existe pas [Internet]. First; 2019 [cité 16 sept 2019]. 200 p. Disponible sur: <https://livre.fnac.com/a12970716/Luc-Julia-L-intelligence-artificielle-n-existe-pas#omnsearchpos=1>
12. Lee K-F. AI Superpowers: China, Silicon Valley, and the New World Order. Boston: Houghton Mifflin Harcourt; 2018. 272 p.
13. Larousse É. Encyclopédie Larousse en ligne - intelligence artificielle [Internet]. [cité 16 sept 2019]. Disponible sur: http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/intelligence_artificielle/187257
14. Bouvard C. Botkit - Développez vos bots avec JavaScript et Node.js [Internet]. ENI.

- 2018 [cité 22 mai 2019]. 495 p. Disponible sur: <https://www.editions-eni.fr/livre/botkit-developpez-vos-bots-avec-javascript-et-node-js-9782409016646>
15. VANNIEUWENHUYZE A. Intelligence artificielle vulgarisée - Le Machine Learning et le Deep Learning par la pratique [Internet]. ENI; 2019 [cité 17 sept 2019]. 434 p. Disponible sur: <https://www.editions-eni.fr/livre/intelligence-artificielle-vulgarisee-le-machine-learning-et-le-deep-learning-par-la-pratique-9782409020735>
 16. Turing AM. COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. *Mind*. 1 oct 1950;LIX(236):433-60.
 17. Rosenblatt F. The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in The Brain. *Psychol Rev*. 1958;65–386.
 18. Henno J. 1957 : le Perceptron, première machine apprenante. *Les Echos* [Internet]. 9 janv 2018 [cité 16 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.lesechos.fr/idees-debats/dossiers/intelligence-artificielle-IA-Gafa-AlphaGo-Watson/1957-le-perceptron-premiere-machine-apprenante-130009>
 19. Crevier D. AI: the tumultous history of the search for artificial intelligence. New York: Basic Books; 1993.
 20. Barthélémy P. L'espèce humaine, échec et mat. *Le Monde.fr* [Internet]. 11 sept 2014 [cité 17 sept 2019]; Disponible sur: https://www.lemonde.fr/jeux-d-esprit/article/2014/09/11/l-espece-humaine-echec-et-mat_4486139_1616889.html
 21. Favre B. La voiture autonome n'arrivera pas avant 2040. *La Tribune* [Internet]. [cité 17 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/automobile/bernard-favre-la-voiture-autonome-n-arrivera-pas-avant-2040-789934.html>
 22. Feitz A. Les constructeurs mal engagés dans la bataille du véhicule autonome. *Les Echos* [Internet]. 13 mai 2018 [cité 17 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.lesechos.fr/2018/05/les-constructeurs-mal-engages-dans-la-bataille-du-vehicule-autonome-990290>
 23. Gauthier E. Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la commande d'un véhicule autonome. 25 janv 1999 [cité 17 sept 2019]; Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00004833>
 24. Roco MC, Bainbridge WS. Overview Converging Technologies for Improving Human Performance. In: Roco MC, Bainbridge WS, éditeurs. *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2003 [cité 17 sept 2019]. p. 1-27. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-94-017-0359-8_1
 25. Claverie B. De la cybernétique aux NBIC : l'information et les machines vers le dépassement humain. *Hermes Rev*. 24 avr 2014;n° 68(1):95-101.
 26. Curbatov O, Louyot-Gallicher M. Convergence NBICS (nano-bio-info-cognitive) and Knowledge Marketing: experimental fields of application. The biomedical case. In: *International Marketing Trends Conference* [Internet]. VENISE, Italy: ESCP Europe -

Université Ca Foscari; 2016 [cité 17 sept 2019]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01364860>

27. Kermorvant C. Machine Learning : présentation des concepts. ENI; 2017.
28. Khichane M. Data Science avec Microsoft Azure - Maîtrisez le Machine Learning sur Cortana Intelligence Suite [Internet]. ENI. 2018 [cité 22 mai 2019]. 346 p. Disponible sur: <https://www.editions-eni.fr/livre/data-science-avec-microsoft-azure-maitrisez-le-machine-learning-sur-cortana-intelligence-suite-9782409012785>
29. Laude E, Laude H. Data Scientist et langage R - Guide d'autoformation à l'exploitation intelligente des Big Data (2e édition) [Internet]. ENI. 2018 [cité 22 mai 2019]. 811 p. Disponible sur: <https://www.editions-eni.fr/livre/data-scientist-et-langage-r-guide-d-autoformation-a-l-exploitation-intelligente-des-big-data-2e-edition-9782409013973>
30. Mitchell TM. Machine Learning. 1 edition. New York: McGraw-Hill Education; 1997. 432 p.
31. Sciences Cognitives. Les neurones pour apprendre | sciences cognitives [Internet]. [cité 17 sept 2019]. Disponible sur: <https://sciences-cognitives.fr/les-neurones-pour-apprendre/>
32. Liu X, Faes L, Kale AU, Wagner SK, Fu DJ, Bruynseels A, et al. A comparison of deep learning performance against health-care professionals in detecting diseases from medical imaging: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Digit Health*. 1 oct 2019;1(6):e271-97.
33. Pennsylvania DA. Invention of Toothbrush. [cité 29 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.padental.org/Online/Public/Children/Invention%20of%20Toothbrush.aspx>
34. Oral-B. Broses à dents électriques Genius X [Internet]. [cité 29 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.oralb.fr/fr-fr/produits-dentaires/genius-x>
35. VisualDx. How VisualDx Works [Internet]. [cité 7 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.visualdx.com/how-it-works#see-the-differential>
36. Kucko C, Montinarello K. VisualDx - A Transformational Artificial Intelligence App for iPhone to Help Improve Diagnosis of Diseases [Internet]. [cité 7 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.visualdx.com/in-the-news/visualdx-a-transformational-artificial-intelligence-app-for-iphone-to-help-improve-diagnosis-of-diseases>
37. Tleyjeh IM, Nada H, Baddour LM. VisualDx: Decision-Support Software for the Diagnosis and Management of Dermatologic Disorders. *Clin Infect Dis*. 1 nov 2006;43(9):1177-84.
38. Torres-Urquidy MH, Collins BM. VisualDx Clinical Decision Support Software. *J Dent Educ*. 1 août 2006;70(8):892-4.
39. Vardell E, Bou-Crick C. VisualDx: A Visual Diagnostic Decision Support Tool. *Med Ref Serv Q*. 1 oct 2012;31(4):414-24.
40. Walton DJ. Database Review: VisualDx. *J Electron Resour Med Libr*. 3 avr 2015;12(2):97-104.

41. Leape LL. Error in medicine. *JAMA*. 21 déc 1994;272(23):1851-7.
42. Graber ML, Franklin N, Gordon R. Diagnostic error in internal medicine. *Arch Intern Med*. 11 juill 2005;165(13):1493-9.
43. Graber M. Diagnostic errors in medicine: a case of neglect. *Jt Comm J Qual Patient Saf*. févr 2005;31(2):106-13.
44. Berner ES, Miller RA, Graber ML. Missed and delayed diagnoses in the ambulatory setting. *Ann Intern Med*. 20 mars 2007;146(6):470; author reply 470-471.
45. Lowell BA, Froelich CW, Federman DG, Kirsner RS. Dermatology in primary care: Prevalence and patient disposition. *J Am Acad Dermatol*. août 2001;45(2):250-5.
46. Makaremi M. Apport des sciences cognitives à l'optimisation de l'interface entre le praticien et les nouvelles technologies en orthodontie. *Rev Orthopédie Dento-Faciale*. 1 juin 2016;50(3):335-43.
47. Vassura G, Vassura M, Bazzacchi A, Gracco A. Le vecteur de force se déplace du bras à l'esprit : l'emploi de la technologie informatique 3D dans la gestion du traitement orthodontique. www-em-premium-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/article/247777/resultatrecherche/1 [Internet]. 30 mars 2010 [cité 27 oct 2019]; Disponible sur: <https://www-em-premium-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/article/247777/resultatrecherche/1>
48. Andreiko C. Craig Andreiko, DDS, MS, on the Elan and Orthos systems. Interview by Dr. Larry W. White. *J Clin Orthod JCO*. août 1994;28(8):459-68.
49. Mathieu T, Bermont L, Boyer J-C, Versuyft C, Evrard A, Cuvelier I, et al. Champs lexicaux de la médecine prédictive et personnalisée. *Ann Biol Clin (Paris)*. 1 nov 2012;70(6):651-8.
50. Bouchez R. Les traitements orthodontiques invisalign. Paris: Quintessence international; 2009. 142 p.
51. Tai S, Dib M. Orthodontie invisible : Guide clinique des traitements par aligneurs. Quintessence International; 2018. 298 p.
52. Blais C. Comparaison entre la simulation d'alignement du ClinCheck® et les modèles numériques finaux des patients traités par la technique Invisalign® avec ou sans l'appareil AcceleDent®. 8 nov 2016 [cité 22 mai 2019]; Disponible sur: <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/16433>
53. Chazalon J-F. Invisalign®, 15 ans après, est-il devenu une véritable alternative au traitement multi-attaches ? *Rev Orthopédie Dento-Faciale*. 1 juin 2016;50(3):275-301.
54. Mariani P. Guideline numérique : le ClinCheck® Pro Invisalign [Internet]. *L'Information Dentaire*. 2015 [cité 27 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.information-dentaire.fr/formations/guideline-numerique-le-clincheck-pro-invisalign/>
55. Cevidanes LHS, Styner MA, Proffit WR. Image analysis and superimposition of 3-dimensional cone-beam computed tomography models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1 mai 2006;129(5):611-8.

56. Nishimoto S, Sotsuka Y, Kawai K, Ishise H, Kakibuchi M. Personal Computer-Based Cephalometric Landmark Detection With Deep Learning, Using Cephalograms on the Internet. *J Craniofac Surg.* févr 2019;30(1):91.
57. Zamora N, Llamas JM, Cibrián R, Gandia JL, Paredes V. A study on the reproducibility of cephalometric landmarks when undertaking a three-dimensional (3D) cephalometric analysis. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* juill 2012;17(4):e678-88.
58. Faure J, Arlette O, Treil J, Chen S, Wong V, Inglese J-M. 3D cephalometry and artificial intelligence. *J Dentofac Anom Orthod.* 1 janv 2016;19:409.
59. Bouletreau P, Makaremi M, Ibrahim B, Louvrier A, Sigaux N. Artificial Intelligence: Applications in orthognathic surgery. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.* 1 sept 2019;120(4):347-54.
60. Sabouni W, Eichelberger A, Koubi G, Azria A, Rachlin G. Avantages et limites de l'orthodontie par aligneurs – Présentation d'un système [Internet]. *L'Information Dentaire.* [cité 27 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.information-dentaire.fr/formations/avantages-et-limites-de-l-orthodontie-par-aligneurs-presentations-d-un-systeme/>
61. Abdolali F, Zoroofi RA, Otake Y, Sato Y. Automated classification of maxillofacial cysts in cone beam CT images using contourlet transformation and Spherical Harmonics. *Comput Methods Programs Biomed.* 1 févr 2017;139:197-207.
62. Lin PL, Huang PY, Huang PW. Automatic methods for alveolar bone loss degree measurement in periodontitis periapical radiographs. *Comput Methods Programs Biomed.* 1 sept 2017;148:1-11.
63. Lee J-H, Kim D, Jeong S-N, Choi S-H. Diagnosis and prediction of periodontally compromised teeth using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *J Periodontal Implant Sci.* avr 2018;48(2):114-23.
64. Ohashi Y, Arijji Y, Katsumata A, Fujita H, Nakayama M, Fukuda M, et al. Utilization of computer-aided detection system in diagnosing unilateral maxillary sinusitis on panoramic radiographs. *Dentomaxillofacial Radiol.* 3 févr 2016;45(3):20150419.
65. Tuzoff DV, Tuzova LN, Bornstein MM, Krasnov AS, Kharchenko MA, Nikolenko SI, et al. Tooth detection and numbering in panoramic radiographs using convolutional neural networks. *Dentomaxillofacial Radiol.* 5 mars 2019;48(4):20180051.
66. Hiraiwa T, Arijji Y, Fukuda M, Kise Y, Nakata K, Katsumata A, et al. A deep-learning artificial intelligence system for assessment of root morphology of the mandibular first molar on panoramic radiography. *Dentomaxillofacial Radiol.* 9 nov 2018;48(3):20180218.
67. De Ganay C, Gillot D. Pour une intelligence artificielle maîtrisée, utile et démystifiée - Rapport [Internet]. [cité 22 oct 2019]. Disponible sur: http://www.senat.fr/basile/visio.do?id=r8101907_2&idtable=r8102247_18|r8101907_2|r8105653_13|r8105879|r8104388_4|r8106971|r8106947_10|r8104627|r8106369_2|r8106585_18&_c=intelligence+artificielle&rch=rs&de=20161022&au=20191022&dp=3+ans&radio=dp&aff=ens&tri=p&off=0&afd=ppr&afd=ppl&afd=pjl&afd=cvn&isFirst=true#

68. CNIL. Comment permettre à l'Homme de garder la main ? Rapport sur les enjeux éthiques des algorithmes et de l'intelligence artificielle | CNIL [Internet]. [cité 22 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/fr/comment-permettre-lhomme-de-garder-la-main-rapport-sur-les-enjeux-ethiques-des-algorithmes-et-de>
69. CMV M. Bilan de la 7e édition 2018 de l'Observatoire CMV Médiforce des professions libérales de santé (Communiqué) – Toute La Veille des acteurs de la Santé. 2018 [cité 28 oct 2019]; Disponible sur: <https://toute-la.veille-acteurs-sante.fr/98638/7e-edition-2018-de-lobservatoire-cmv-mediforce-des-professions-liberales-de-sante-communique/>
70. Savall H, Zardet V. Tétranormalisation. Défis et dynamiques - Henri Savall, Véronique Zardet [Internet]. 2005 [cité 7 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.decite.fr/livres/tetranormalisation-9782717850581.html>
71. Bessire D, Cappelletti L, Pigé B. Normes : Origines et Conséquences des Crises [Internet]. 2010 [cité 7 févr 2020]. 271 p. Disponible sur: <https://www.furet.com/livres/normes-origines-et-consequences-des-crisis-dominique-bessire-9782717859393.html>
72. Cappelletti L. Le choc de simplification n'aura pas lieu. Le Monde.fr [Internet]. 15 nov 2013 [cité 7 févr 2020]; Disponible sur: https://www.lemonde.fr/economie/article/2013/11/15/le-choc-de-simplification-n-aura-pas-lieu_3514385_3234.html
73. Cappelletti L, Pigé B, Zardet V. Dynamique normative : Arbitrer et négocier la place de la norme dans l'organisation [Internet]. EMS Editions; 2015 [cité 7 févr 2020]. Disponible sur: https://ionis.scholarvox.com/catalog/book/docid/88829841?_locale=fr
74. Noguera F, Tronc B. Les nouveaux défis des cabinets d'odontologie : vers une normalisation du management et de la GRH. Manag Avenir. 19 sept 2019;N° 110(4):171-94.
75. Boris T, Delattre M. Renouveau du Leadership et direction partagée : le cas d'une SCP de dentistes [Internet]. HAL; 2016 oct [cité 28 oct 2019]. (Post-Print). Report No.: hal-01386825. Disponible sur: <https://ideas.repec.org/p/hal/journal/hal-01386825.html>
76. OMPL. Baromètre Entreprise : Cabinet dentaire et Economie [Internet]. 2015 [cité 28 oct 2019]. Disponible sur: https://www.ompl.fr/publications.html?start=0&filter_type=1&filter_sector=3&filter_branch=10&filter_region=0&search=#
77. Mühlemann S, Sandrini G, Ioannidis A, Jung RE, Hämmerle CHF. The use of digital technologies in dental practices in Switzerland: a cross-sectional survey. Swiss Dent J. 9 sept 2019;129(9):700-7.
78. Frétygné C. P. Carré – L'apprenance : vers un nouveau rapport au savoir. Rev Fr Pédagogie. 2005;153(1):151-2.
79. Fournier M. Éduquer et Former [Internet]. 2016 [cité 29 oct 2019]. Disponible sur: <http://www.cairn.info/eduquer-et-former--9782361063580.htm>
80. Gibert A. Les robots-dentistes vont-ils bientôt remplacer les praticiens dans les cabinets ? [Internet]. Dental.org. 2019 [cité 29 oct 2019]. Disponible sur:

<https://www.dentaly.org/robots-dentistes/>

81. Yan A. Robot dentist is first to fit implants without a human touch [Internet]. South China Morning Post. 2017 [cité 29 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.scmp.com/news/china/article/2112197/chinese-robot-dentist-first-fit-implants-patients-mouth-without-any-human>
82. Haidar Z. Autonomous Robotics: A fresh Era of Implant Dentistry... is a reality! J Oral Res. 9 juill 2019;6(9):230-1.
84. Srivastava R, Jyoti B, Kushwaha S. EBSCOhost | 138063732 | Computer Aided Navigation for Predictable Dental Implantology : A Review. [Internet]. [cité 29 oct 2019]. Disponible sur: <https://web.a.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=09759840&AN=138063732&h=Fj6KFjslJZya77%2bdsZxg71LmaDVhBwEP3kB%2f7iqezeg9MTCj%2bEJpprAHupzIKGerH3Slxd185DC1%2f8bO7ogCcQ%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNotAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d09759840%26AN%3d138063732>
85. Vasudevan A. They did surgery on a grape! BDJ Stud. avr 2019;26(2):9-9.
86. Rekow ED. Digital dentistry: The new state of the art — Is it disruptive or destructive? Dent Mater [Internet]. 14 sept 2019 [cité 29 oct 2019]; Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564119308061>
87. Li J, Shen Z, Xu WYT, Lam WYH, Hsung RTC, Pow EHN, et al. A Compact Dental Robotic System Using Soft Bracing Technique. IEEE Robot Autom Lett. avr 2019;4(2):1271-8.
88. Koo H. Nanoparticle robots sweep away biofilms [Internet]. National Institutes of Health (NIH). 2019 [cité 29 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.nih.gov/news-events/nih-research-matters/nanoparticle-robots-sweep-away-biofilms>
89. Hwang G, Paula AJ, Hunter EE, Liu Y, Babeer A, Karabucak B, et al. Catalytic antimicrobial robots for biofilm eradication. Sci Robot. 24 avr 2019;4(29):eaaw2388.
90. Obsession. Intelligence artificielle et diagnostic médical: efficacité encore incertaine, selon une étude [Internet]. O. 2019 [cité 7 févr 2020]. Disponible sur: <https://o.nouvelobs.com/high-tech/20190925.AFP5315/intelligence-artificielle-et-diagnostic-medical-efficacite-encore-incertaine-selon-une-etude.html>
91. Panch T, Mattie H, Celi LA. The “inconvenient truth” about AI in healthcare. Npj Digit Med. 16 août 2019;2(1):1-3.
92. Niedercorn F. 2011 Avec Watson, IBM remporte « Jeopardy ! » [Internet]. Les Echos. 2017 [cité 17 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.lesechos.fr/2017/08/2011-avec-watson-ibm-remporte-jeopardy-1116704>
93. Granter SR, Beck AH, Papke DJ. AlphaGo, Deep Learning, and the Future of the Human Microscopist. Arch Pathol Lab Med. 27 avr 2017;141(5):619-21.
94. Fu MC. AlphaGo and Monte Carlo Tree Search: The Simulation Optimization

Perspective. In: Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference [Internet]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press; 2016 [cité 17 sept 2019]. p. 659–670. (WSC '16). Disponible sur: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3042094.3042188>

95. Informatique. cours informatique: Composition d'un processeur [Internet]. cours informatique. 2008 [cité 20 sept 2019]. Disponible sur: <http://infomaroon.blogspot.com/2008/04/composition-dun-processeur.html>
96. Michael Artsis interviewing Mandl C. from ORAL-B Genius X Electric Smart Toothbrush at CES 2019 [Internet]. [cité 16 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=5Yj1CiQcvPQ>

Iconographie

Figure 1 : Un exemple de réseaux de neurones « formels »

Figure 2 : Régression linéaire

Figure 3 : Arbre de décisions simplifié sur les traitements possibles en présence d'une dent cariée ou non

Figure 4 : Représentation d'un neurone

Figure 5 : Schématisation d'un neurone formel

Figure 6 : Captures d'écrans de l'application associée à la Genius X® d'Oral B®

Figure 7, 8, 9, 10 : Captures d'écrans de l'application VisualDx® sur Android®

Figure 11 : Conception actuelle de l'outil thérapeutique orthodontique par procédé CAD/CAM

Figure 12 : Bilan photographique et radiographique complet

Figure 13 : CephX® utilisant l'apprentissage machine pour automatiser l'analyse céphalométrique

Figure 14 : Evaluation de la présence ou non d'une sinusite, en vert un sinus sain, en rouge une éventuelle sinusite

Figure 15 : Deux types de microrobots, un à base de nanoparticules de fer dans une solution, l'autre à partir de nanoparticules moulées en 3D dans un gel polymère

Annexes

Annexe 1 : Computing Machinery and Intelligence

VOL. LIX. No. 236.]

[October, 1950

MIND

A QUARTERLY REVIEW

OF

PSYCHOLOGY AND PHILOSOPHY

I.—COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE

BY A. M. TURING

1. *The Imitation Game.*

I PROPOSE to consider the question, 'Can machines think?' This should begin with definitions of the meaning of the terms 'machine' and 'think'. The definitions might be framed so as to reflect so far as possible the normal use of the words, but this attitude is dangerous. If the meaning of the words 'machine' and 'think' are to be found by examining how they are commonly used it is difficult to escape the conclusion that the meaning and the answer to the question, 'Can machines think?' is to be sought in a statistical survey such as a Gallup poll. But this is absurd. Instead of attempting such a definition I shall replace the question by another, which is closely related to it and is expressed in relatively unambiguous words.

The new form of the problem can be described in terms of a game which we call the 'imitation game'. It is played with three people, a man (A), a woman (B), and an interrogator (C) who may be of either sex. The interrogator stays in a room apart from the other two. The object of the game for the interrogator is to determine which of the other two is the man and which is the woman. He knows them by labels X and Y, and at the end of the game he says either 'X is A and Y is B' or 'X is B and Y is A'. The interrogator is allowed to put questions to A and B thus:

C: Will X please tell me the length of his or her hair?

Now suppose X is actually A, then A must answer. It is A's

28

433

Première page du manifeste de Turing sur l'IA en 1950

Annexe 2 : Deep Blue

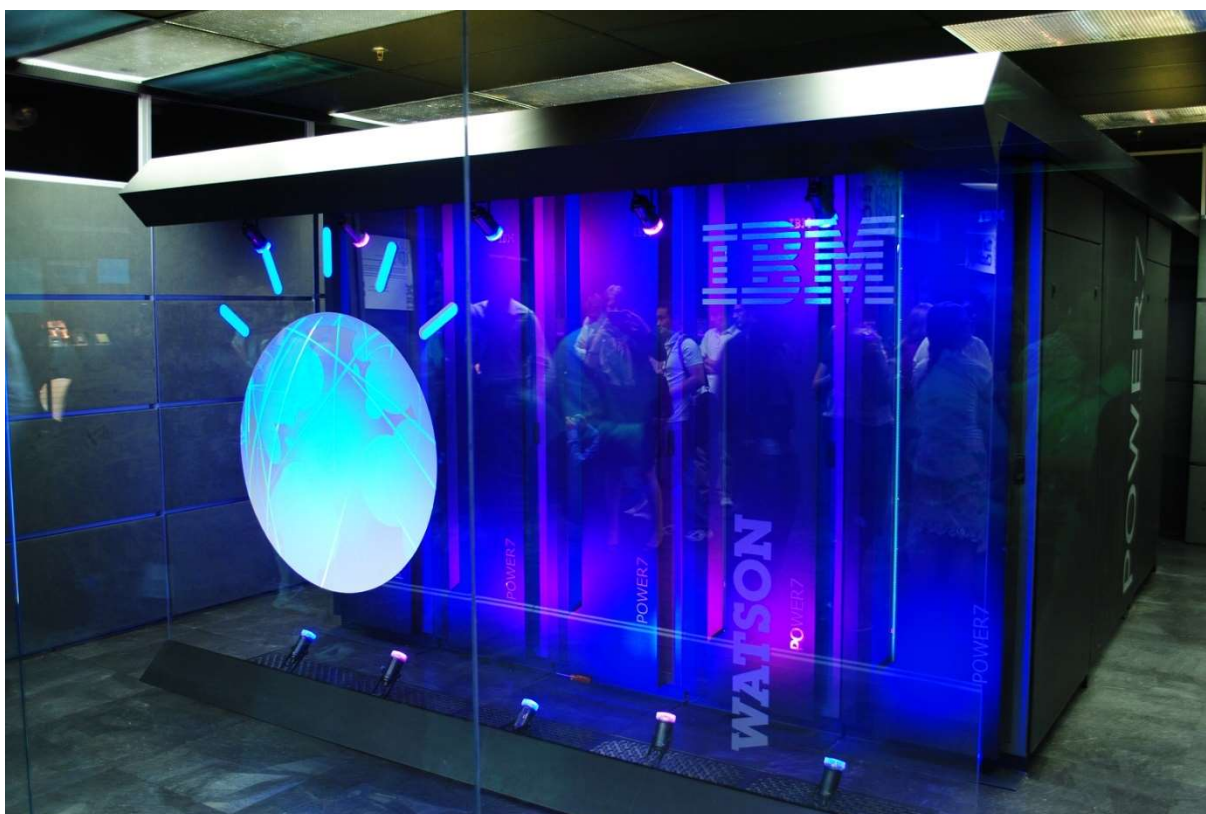
Deep Blue est un superordinateur spécialisé dans le jeu d'échecs par adjonction de circuits spécifiques, développé par IBM au début des années 1990. Doté de 256 processeurs sur lesquels s'exécutent les différentes tâches propres à tout logiciel d'échecs : recension des coups légaux, consultation des bases de données, évaluation de la position obtenue, élagage de l'arbre des variantes pour ne pas s'attarder sur des coups faibles ni recalculer des solutions déjà vues auparavant... Comme tout programme, Deep Blue ne joue pas, il compte et choisit le coup auquel il a attribué la meilleure note. Ce n'est pas un champion d'échecs mais un tâcheron du calcul. En trois minutes, il examine entre 50 et 100 milliards de positions différentes. Néanmoins, les possibilités aux échecs étant exponentielles, même en optimisant ses évaluations, il ne voit en moyenne que sept coups à l'avance. Perdant un match en 1996 (2-4) contre le champion du monde d'échecs de l'époque Garry Kasparov, Deep Blue (surnommé alors *Deeper Blue*) bat le champion du monde (4-2) lors du match revanche en 1997, mais hors des conditions exigées lors des championnats du monde.



Un ordinateur IBM similaire à Deep Blue lors de son match en 1997 exposé au Musée de l'Histoire de l'ordinateur de Mountain View en Californie [Wikipédia]

Annexe 3 : Watson (92)

Watson est un programme informatique d'intelligence artificielle conçu par IBM dans le but de répondre à des questions formulées en langage naturel. Il s'intègre dans un programme de développement plus vaste, le *DeepQA research project*. Le nom « Watson » fait référence à Thomas J. Watson, dirigeant d'IBM de 1914 à 1956, avant même que cette société ne s'appelle ainsi. Le programme a notamment acquis une notoriété mondiale en devenant en 2011 champion du jeu télévisé américain *Jeopardy !* À partir de réponses communément appelées des indices, trois candidats doivent trouver la question correspondante. Chaque bonne réponse (c'est-à-dire chaque bonne question) rapporte une somme, chaque erreur la fait perdre. Ils peuvent choisir entre six catégories et cinq valeurs d'indices par catégorie. Les deux premières rondes font s'affronter les trois candidats selon leur rapidité à buzzer pour répondre. Lors de la troisième et dernière ronde, ils répondent par écrit pour trouver une question, et parient secrètement une somme sur leurs réponses avant la présentation de la réponse. Le gagnant est celui qui a gagné le plus d'argent pendant l'émission, lui donnant le droit de revenir pour la suivante.



Watson en 2011, dans les locaux d'IBM [Wikipédia]

Annexe 4 : AlphaGo, joueur de Go (93,94)

Comme pour tous les jeux, il faut jouer un coup qui améliore sa situation et détériore celle de son adversaire. Pour estimer une situation aux échecs, une bonne estimation est de compter le nombre de pièces sur l'échiquier, en les pondérant (1 point par pion, 5 par tour...), et en ajustant la valeur trouvée par les libertés, les protections des pièces...

Cela passe par le calcul d'une fonction d'évaluation, associant les scores de chacun des adversaires à chaque nœud.

C'est difficilement réalisable au go. Un jeu de plateau originaire de Chine. Il oppose deux adversaires qui placent à tour de rôle des pierres, respectivement noires et blanches, sur les intersections d'un tablier quadrillé appelé *goban*. Le but est de contrôler le plan de jeu en y construisant des « territoires ». Les pierres encerclées deviennent des « prisonniers », le gagnant étant le joueur ayant totalisé le plus de territoires et de prisonniers. : on ne dispose pas de fonction d'évaluation (estimation des valeurs antagonistes d'une position) ne nécessitant pas, entre autres, des capacités « humaines » de « reconnaissance de formes », l'« expérience de parties » déjà jouées et une très grande « profondeur de calcul ».

La technique d'exploration des différentes possibilités (pour chaque coup, déterminer la meilleure réponse possible, puis la meilleure réponse à celle-ci, et ainsi de suite...), plus techniquement la méthode dite minimax, échoue au go à cause de l'énorme quantité de coups plausibles, de la durée des parties et de la complexité croissante (Aux échecs, la complexité est, elle, décroissante par diminution du nombre de pièces restantes). L'algorithme minimax (aussi appelé algorithme MinMax) est un algorithme qui s'applique à la théorie des jeux pour les jeux à deux joueurs à somme nulle (et à information complète) consistant à minimiser la perte maximum dans le pire des cas.

Le nombre de positions légales est estimé à 10^{170} , sur un goban 19×19, contre environ 10^{40} aux échecs, sur un échiquier 8×8, tandis que l'arbre du jeu couvre plus de 10^{360} parties plausibles (contre environ 10^{120} aux échecs).



Un Goban, plateau de jeu de go

Annexe 5 : Composants d'un processeur (95)

Les parties essentielles d'un processeur sont :

- **L'Unité Arithmétique et Logique** (UAL, en anglais *Arithmetic and Logical Unit - ALU*), qui prend en charge les calculs arithmétiques élémentaires et les tests ;
- **L'unité de contrôle** ;
- **Les registres**, qui sont des mémoires de petite taille (quelques octets), suffisamment rapides pour que l'UAL puisse manipuler leur contenu à chaque cycle de l'horloge. Un certain nombre de registres sont communs à la plupart des processeurs :
 - **Compteur de programme** : ce registre contient l'adresse mémoire de l'instruction en cours d'exécution ;
 - **Accumulateur** : ce registre est utilisé pour stocker les données en cours de traitement par l'UAL ;
 - **Registre d'adresses** : il contient toujours l'adresse de la prochaine information à lire par l'UAL, soit la suite de l'instruction en cours, soit la prochaine instruction ;
 - **Registre d'instructions** : il contient l'instruction en cours de traitement ;
 - **Registre d'état** : il sert à stocker le contexte du processeur, ce qui veut dire que les différents bits de ce registre sont des drapeaux (*flags*) servant à stocker des informations concernant le résultat de la dernière instruction exécutée ;
 - **Pointeurs de pile** : ce type de registre, dont le nombre varie en fonction du type de processeur, contient l'adresse du sommet de la pile (ou des piles) ;
 - **Registres généraux** : ces registres sont disponibles pour les calculs ;
 - **Le séquenceur**, qui permet de synchroniser les différents éléments du processeur. En particulier, il initialise les registres lors du démarrage de la machine et il gère les interruptions ;
 - **L'horloge** qui synchronise toutes les actions de l'unité centrale. Elle est présente dans les processeurs synchrones, et absente des processeurs asynchrones et des processeurs autosynchrones ;
 - **L'unité d'entrée-sortie**, qui prend en charge la communication avec la mémoire de l'ordinateur ou la transmission des ordres destinés à piloter ses processeurs spécialisés, permettant au processeur d'accéder aux périphériques de l'ordinateur.

Thèse d'exercice : Chir. Dent. : Lille 2 : Année [2020] – N°:

L'Intelligence Artificielle et la dentisterie / **VELSON Bernardin Kolin.**- p. (68) : ill. (15) ; réf. (96).

Domaines : Informatique ; Technologie ; Santé ; Odontologie

Mots clés Rameau: Santé publique bucco-dentaire ; Bouche – soins et hygiène ; Intelligence Artificielle ; Invisalign ;

Mots clés FMeSH: Dent ; Santé buccodentaire ; Intelligence Artificielle ;

Résumé de la thèse :

L'intelligence artificielle est dans nos vies, avec nos téléphones portables, contenant des assistants personnels intelligents tels que : Siri®, Cortana®, Google Now®, où il nous suffit de leurs parler pour obtenir des réponses plus précises à chaque utilisation. Mais elle élargit aussi son champ d'utilisation dans des secteurs professionnels comme la santé, la recherche, l'écologie... avec des logiciels d'aide au diagnostic, de compilation d'articles scientifiques, tout cela pour nous simplifier la vie et augmenter notre productivité. Nous leur fournissons des informations à traiter ou qu'elle récupère dans des bases de données : photos, textes, audios... et le programme informatique intelligent « apprend » et s'améliore avec ou sans intervention humaine, tout cela dans des délais très courts.

Il apprend vite et sa rapidité d'apprentissage est multipliée par 100 chaque année, à l'horizon 2030, même si ce n'est pas dans tous les domaines, l'intelligence humaine sera concurrencée par l'intelligence artificielle.

Et aujourd'hui où l'informatique a grandement fait évoluer et améliorer la vie du chirurgien-dentiste, par des logiciels de gestion du cabinet dentaire, des aides à la prescription, par la CFAO, que nous apportera de plus l'intelligence artificielle ? Comment allons-nous nous adapter à cette nouvelle métamorphose de notre pratique ?

Mais que signifie l'intelligence artificielle ? Comment se matérialise-t-elle ? Qu'est-ce que le «Machine Learning» ou le «Deep Learning» ? Peut-on réellement parler d'«intelligence» en comparaison à celle humaine? Comment cette technologie est employée en dentisterie, en santé ?

Cette thèse répondra à ces questions, en survolant les théories mathématiques, neurocognitives complexes, ainsi que les langages de programmation informatique qui sont la base de cette technologie.

JURY :

Président : **Monsieur le Professeur Thomas COLARD**

Assesseurs : **Monsieur le Docteur Claude LEFEVRE**

Monsieur le Docteur Jérôme VANDOMME

Monsieur le Docteur Philippe ROCHER