



HAL
open science

L'intelligence artificielle en chirurgie dentaire : état des connaissances en 2022

Mélissa Samer

► **To cite this version:**

Mélissa Samer. L'intelligence artificielle en chirurgie dentaire : état des connaissances en 2022. Sciences du Vivant [q-bio]. 2023. hal-04517087

HAL Id: hal-04517087

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-04517087v1>

Submitted on 22 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

ACADÉMIE DE NANCY-METZ
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
FACULTÉ D'ODONTOLOGIE DE LORRAINE

Année 2023

N° 12988 C

THÈSE
Pour le
DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE
Par

Melissa Samer
Née le 09/08/1994 à Tizi Ouzou Algérie

L'intelligence artificielle en chirurgie dentaire : État des
connaissances en 2022.

Présentée et soutenue publiquement le

27 juin à 11H

Composition du jury :

Président :

Pr Jean Marc Martrette

Membres :

Dr Claire EGLOFF-JURAS

Dr Pascale CORNE

Dr Caroline DENIZART

GERBER

Directeur de thèse :

Dr Claire EGLOFF-JURAS

**Présidente : Docteur Hélène BOULANGER
YASUKAWA**

Doyen : Docteur Kazutoyo

Vice-Doyens : Dr Charlène KICHENBRAND – Dr Rémy BALTHAZARD – Dr Marin VINCENT

Membres Honoraires : Dr L. BABEL – Pr. S. DURIVAUX – Pr A. FONTAINE – Pr G. JACQUART – Pr D. ROZENCWEIG - Pr ARTIS

Doyens Honoraires : Pr J. VADOT, Pr J.P. LOUIS

Département odontologie pédiatrique Sous-section 56-01	Mme	JAGER Stéphanie	Maître de conférences *
	M.	PREVOST Jacques	Maître de conférences
	Mme	HERNANDEZ Magali	Maître de conférences *
	M.	HAINOT Raphaël	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme	HILT Léa	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme	HOMBOURGER Morgane	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M.	MASSON Maximilien	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M.	WATRIN Ferdinand	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
Département orthopédie dento-faciale Sous-section 56-01	M.	VANDE VANNET Bart	Professeur des universités *
	Mme	DAMERDJI-BENHABIB Zaheira	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux ass. *
	M.	FAWAZ Paul	Chef de clinique des universités associé *
Département prévention, épidémiologie, économie de la santé, odontologie légale Sous-section 56-02	Mme	CLÉMENT Céline	Maître de conférences *
	M.	BAUDET Alexandre	Maître de conférences *
	Mme	CAIONE Mariette	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M.	VEYNACHTER Thomas	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
Département parodontologie Sous-section 57-01	Mme	BISSON Catherine	Professeur des universités *
	M.	JOSEPH David	Maître de conférences *
	Mme	BERBE Ludivine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
	Mme	VITALI Marine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Département chirurgie orale Sous-section 57-01	M.	BRAVETTI Pierre	Maître de conférences *
	Mme	GUILLET-THIBAUT Julie	Maître de conférences
	Mme	KICHENBRAND Charlène	Maître de conférences *
	Mme	PHULPIN Bérengère	Maître de conférences *
	M.	CLERC Sébastien	Praticien hospitalier universitaire *
	Mme	BECKER Alice	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme	PEREIRA Laure	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Département biologie orale Sous-section 57-01	Mme	EGLOFF-JURAS Claire	Maître de conférences *
	M.	MARTRETTE Jean-Marc	Professeur des universités *
	M.	YASUKAWA Kazutoyo	Maître de conférences *
Département dentisterie restauratrice, endodontie Sous- section 58-01	M.	MORTIER Eric	Professeur des universités *
	M.	ENGELS-DEUTSCH Marc	Professeur des universités *
	M.	AMORY Christophe	Maître de conférences
	M.	BALTHAZARD Rémy	Maître de conférences *
	M.	VINCENT Marin	Maître de conférences*
	M.	GIESS Renaud	Maître de conférences associé*
	M.	DAL MAGRO Claire	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme	DAVRIL Jeanne	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*

Département prothèses Sous- section 58-01	M.	LESIEUR François	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M.	<u>DE MARCH Pascal</u>	Maître de conférences
	Mme	CORNE Pascale	Maître de conférences *
	M.	SCHOVER Jacques	Maître de conférences
	Mme	VAILLANT Anne-Sophie	Maître de conférences *
	M.	HIRTZ Pierre	Enseignant universitaire
	Mme	GERBER Caroline	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
	M.	JONVEAUX Maxime	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme	MOUGEL Armande	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M.	PERRIN Tom	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M.	SYDA Paul-Marie	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme	WILK Sabine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Département fonction- dysfonction,imagerie, biomatériaux Sous-section 58-01	Mme	<u>STRAZIELLE Catherine</u>	Professeur des universités *
	Mme	MOBY (STUTZMANN) Vanessa	Maître de conférences *
	M.	SALOMON Jean-Pierre	Maître de conférences
	M.	RITTIE François	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux

Souligné : **responsable de département**

* temps plein

**Mis à jour le
17 février 20**

*Par délibération en date du 11 décembre 1972,
la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que
les opinions émises dans les dissertations
qui lui seront présentées
doivent être considérées comme propres à
leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner
aucune approbation ni improbation.*

REMERCIEMENTS

A notre président

Monsieur le Professeur Jean Marc MARTRETTE

Docteur en chirurgie dentaire

Docteur en sciences pharmacologiques

Spécialiste qualifié en médecine bucco-dentaire Habilité à diriger des recherches

Professeur des universités

Praticien hospitalier

Ancien doyen de la faculté d'odontologie de Lorraine

Officier des palmes académiques

Nous vous sommes très reconnaissantes
d'avoir accepté de présider notre
thèse.

Veillez trouver dans ce travail,
l'expression de notre reconnaissance
et de notre profond respect.

A nôtre directrice de thèse

Madame le Docteur Claire EGLOFF-JURAS,

**Docteur en chirurgie dentaire
Spécialiste qualifiée en médecine bucco-
dentaire
Ancienne interne en médecine bucco-
dentaire
Maitre de conférences
Praticien hospitalier
Responsable du département de biologie orale**

Nous souhaitons exprimer notre
profonde gratitude à l'égard de notre
directrice de thèse pour son encadrement,
son expertise et son soutien tout au long
de ce travail. Vos conseils éclairés, vos
critiques constructives et votre
engagement ont été d'une grande aide
pour moi et ont contribué à la réussite de
ce projet. Nous tenons à vous remercier
sincèrement pour votre précieux
accompagnement.

Nous vous sommes également
reconnaissante pour les enseignements en
prothèse que vous nous avez transmis,
lesquels nous guideront durant toutes nos
années d'exercice. Veuillez trouver ci-joint
le témoignage de notre grande sympathie
et de notre réelle reconnaissance.

A notre juge

Madame le Docteur Pascale CORNE

**Docteur en Chirurgie Dentaire
Docteur de l'Université de Lorraine
Spécialité Sciences des Matériaux
Lauréate de l'Académie Nationale de Chirurgie Dentaire
Maitre de conférences – Praticien Hospitalier**

Nous sommes honorés que vous ayez
accepté de faire partie de notre jury.

Veillez trouver dans ce travail,
l'expression de notre reconnaissance
et de notre profond respect.

A notre juge,

Madame le Docteur Caroline DENIZART GERBER

**Docteur en Chirurgie Dentaire
Assistante hospitalo-universitaire
Sous-section : Prothèses**

Nous vous remercions d'avoir accepté
d'intégrer notre jury.

Nous vous remercions pour vos précieux
enseignements en prothèse ainsi que
pour votre extrême gentillesse.

Que ce travail témoigne de notre réelle
considération.

A ma maman, Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ma mère, tu as été une source constante d'inspiration, de soutien et d'amour tout au long de ma vie et de cette aventure de thèse. Ta patience, ta bienveillance et tes encouragements ont été inestimables pour moi. Je suis extrêmement chanceuse d'avoir une mère aussi dévouée et attentionnée. Tu as toujours été présente pour moi, me prodiguant des conseils précieux et m'encourageant à poursuivre mes rêves. Je ne pourrais jamais assez te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi, mais je tiens à t'exprimer ma reconnaissance éternelle pour ton amour infini, ta patience inépuisable et ton dévouement sans faille.

A mon père, je souhaite te remercier pour ton soutien et tes encouragements à aller loin dans mes études et ce depuis le primaire.

A mon frère, je souhaite également remercier chaleureusement mon frère, qui a été un soutien inconditionnel tout au long de mon parcours universitaire. Je suis profondément reconnaissant pour tout ce que tu as fait pour moi. Merci, Amar, pour ton amour fraternel et ta présence réconfortante qui ont été un soutien constant tout au long de ma vie.

A ma sœur, Je tiens à remercier ma sœur Sabrina pour son soutien constant tout au long de mon parcours universitaire. Sa présence bienveillante et ses encouragements ont été une source de motivation pour moi. Je te suis profondément reconnaissante pour son aide précieuse et son soutien infaillible.

A Ayé, ma mamie, ma deuxième maman, je t'aime.

A Amel, ma partner in crime, merci pour tous tes encouragements qui m'ont été très utiles. Je suis profondément reconnaissante d'avoir une amie aussi incroyable que toi à mes côtés.

A Jef, vois en ces quelques mots toute mon amitié et ma reconnaissance. Tes bons petits plats m'ont été d'un grand réconfort.

A ma famille, Je tiens à remercier ma famille pour leur soutien et leur encouragement constants tout au long de mes études. Leur amour, leur présence bienveillante et leur soutien sans faille ont été une source d'inspiration et de motivation pour moi.

A mes amis, Je tiens à remercier mes amis pour leur soutien et leur amitié durant ces années d'études. Votre présence, vos encouragements et vos échanges ont été d'une grande importance pour moi.

Table des matières

Remerciements	4
Liste des abréviations	12
Listes des figures	13
Listes des tableaux	14
Introduction	15
1. Historique et définitions	16
1.1. Historique	16
1.2. Définitions	19
2. L'intelligence artificielle en odontologie	24
2.1. Les différentes indications de l'intelligence artificielle en médecine bucco-dentaire	24
2.1.1. La radiologie.....	24
2.1.2. L'orthodontie.....	33
2.1.3. L'odontologie conservatrice.....	40
2.1.4. La parodontologie.....	44
2.1.5. L'endodontie.....	47
2.1.6. La prothèse.....	49
2.1.7. La chirurgie Orale.....	56
2.1. Les enjeux de l'intelligence artificielle en médecine bucco-dentaire	
2.1.5. La relation patient-praticien	61
2.1.6. L'éthique et la sécurisation des données	64
3. Panorama des applications de l'IA du secteur dentaire sur le marché international	
3.1. Pearlii	66
3.2. VideHealth	67
3.3. Denti.AI	67
3.4. DentalMonitoring	68
3.5. TeleDentists	68
3.6. Toothscan	69
3.7. Beam Dental	70

3.8.	Smart Mouth Guard	70
3.9.	IoT Diet Wearable	71
3.10.	Le Smart Dental Implant	71
3.11.	Neocis	72
3.12.	Diagnocat	73
3.13.	Spotimplant.com	73
3.14.	TOOTY VR	74

4. L'intelligence artificielle en évolution dans les cabinets dentaires en France75

4.1.	La situation actuelle	75
4.2.	L'avenir	76

Conclusion

Liste des abréviations

CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

CBCT: Cone Beam Computed Tomography.

CNN : Convolutional neuronal networks.

FAO : fabrication assistée par ordinateur.

IA : intelligence artificielle.

IdO : internet des objets.

IOS : iPhone Operating System.

LPRPDE : Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques.

OCT : Tomographie à Cohérence Optique.

OECD : Organisation de coopération et de développement économiques.

OMS : Organisation mondiale de la Santé.

RGPD : Règlement général sur la protection des données.

SAOS : syndrome d'apnées obstructives du sommeil.

VR : réalité virtuelle.

3D : les trois dimensions de l'espace.

Liste des figures

Figure 1 : : Chronologie de l'évolution de l'IA (des années 50 à 2000)	17
Figure 2 : Les composantes de l'IA	21
Figure 3 : Exemple de l'analyse des structures dentaires et du marquage des caries.....	26
Figure 4 : Accueil du site de second opinion.....	27
Figure 5 : Analyse automatisée des voies respiratoires sur coupe de CBCT avec le logiciel Orca-DentalAI,.....	28
Figure 6: set-up automatisé (CS Model+, Carestream Dental™)	34
Figure 7 : Analyse céphalométrique automatisée en norma lateralis (Carestream Dental™)	34
Figure 8 : Segmentation automatique des arcades dentaires et mesures automatiques (CS Model+, Carestream Dental™)	35
Figure 9 : Logiciel de mesure CS Model (Carestream Dental™).....	36
Figure 10: Fusion automatique Cone Beam et acquisition optique intra orale (inclusion dentaire multiples Carestream Dental™).....	37
Figure 11 : Segmentation et analyse automatique des voies aériennes (Carestream Dental™).....	37
Figure 12 : Fusion automatique Cone Beam et acquisition optique extra-orale (Carestream Dental™).....	38
Figure 13 : Conception d'onlay avec le logiciel Cerec de Dentsply Sirona....	41
Figure 14 : Interface du logiciel Romexis Smile	42
Figure 15 : VITA Easyshade V.....	51
Figure 16 : La camera optique trios 5 Wireless.....	52
Figure 17 : Modélisation du châssis avec le logiciel Partial Dental Wings Photo.....	53
Figure 18 : Personnalisation du montage et réglage de la prothèse avec le logiciel LUCY.....	54
Figure 19 : Planification implantaire avec le logiciel implant studio de 3 Shape.....	56
Figure 20 : Forage implantaire guidé par les informations figurant sur l'écran avec le système xguide (50).....	57
Figure 21 : Utilisation de la réalité augmentée lors d'une chirurgie	58
Figure 22: Réalisation de l'ostéotomie de Le Fort 1 sous guidage VOSTAR.....	58
Figure 23 : L'application PearlII.....	65
Figure 24 : Le logiciel denti.AI.	66
Figure 25 : La scan box de dentalmonitoring.....	67
Figure 26: L'application tooth scan.....	68
Figure 27: Le kit beam dental	69
Figure 28 : Le capteur IoT Diet Wearable	70
Figure 29 : smart dental implant.....	71
Figure 30 : Le robot Yomi.....	72
Figure 31 : Implant tsv reconnu par le logiciel spotimplant.....	73
Figure 32 : casque de réalité virtuelle Tooty VR.....	74
Figure 33 : Le robot patient de la faculté dentaire de Strasbourg	76
Figure 34 : le robot dentiste posant deux implants	77
Figure 35 : Le robot neosis	78

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en radiologie.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en orthodontie.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en odontologie conservatrice.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en parodontologie.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en endodontie.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en prothèse dentaire.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en chirurgie orale.

Introduction

Les pathologies bucco-dentaires figurent parmi les affections les plus répandues de l'humanité, et les coûts directs de leur gestion ainsi que les coûts indirects associés ont été quantifiés à plus de 500 milliards de dollars américains en 2015 (Righolt et al. 2018) (48). Compte tenu de la dynamique démographique et épidémiologique, ce fardeau des maladies bucco-dentaires devrait s'accroître, alors que la main-d'œuvre pour fournir des soins bucco-dentaires est limitée, ce qui, en combinaison, met à rude épreuve des systèmes de santé déjà fort mal au point et met en péril le caractère abordable et l'accessibilité des soins bucco-dentaires (Organisation mondiale de la santé 2020). (44)

Les technologies numériques, telles que l'intelligence artificielle (IA), sont fréquemment envisagées pour rendre les processus plus efficaces ou augmenter la qualité des décisions. En particulier dans le domaine des soins bucco-dentaires, l'IA est très prometteuse en raison de son potentiel d'efficacité, de sécurité et d'efficience accrus, qui permettent de fournir de meilleurs soins à un plus grand nombre de personnes (Schwendicke et Krois 2021). (51)

Cette technologie simplifie l'analyse de données de plus en plus complexes, du fait notamment de l'utilisation des scanners optiques intra-oraux, des scanners faciaux ou de la radiographie 3D.

Qu'il s'agisse d'imagerie, de diagnostic ou de thérapie, il ne reste aucun domaine d'activité en dehors de l'intelligence artificielle. (19)

1. Historique et définitions

1.1. Historique

Le développement exponentiel de la science et de la technologie a introduit différentes applications qui sont utilisées quotidiennement, comme Siri et Alexa. Ces applications se trouvent au sommet de l'intelligence artificielle (IA) et de ses composants. Le terme IA est principalement associé à la robotique. Il décrit la façon dont la technologie est utilisée pour développer un logiciel ou une machine qui peut facilement imiter l'intelligence humaine et effectuer des activités spécifiques. (1)

L'intelligence artificielle (IA) est officiellement née lors d'une conférence à Dartmouth (États-Unis) en 1956 même si les recherches sur cette technologie ont commencé dès l'après-guerre. Cette conférence est historique de par le fait qu'elle a réuni presque toutes les figures emblématiques de l'IA en un seul endroit. En particulier, le mathématicien John McCarthy, le théoricien de l'organisation Herbert Simon, le mathématicien Allen Newell, Claude Shannon, le père de la théorie de l'information, Marvin Minsky, mathématiciens. Ces pionniers rêvaient de construire des machines capables d'égaliser (ou de surpasser) l'intelligence humaine, basées sur des moyens informatiques émergents. C'était un projet d'une ambition folle puisqu'à cette époque tout restait à faire. Or, malgré les immenses difficultés qui se trouvaient devant eux, ces chercheurs (et beaucoup d'autres) vont rapidement concrétiser leurs idées au travers de résultats qui feront date dans l'histoire de l'informatique.

En 1955, Newell et Simon ont conçu un programme (le "théoricien logique") pour prouver automatiquement 38 des 52 théorèmes de l'article "Principia Mathematica" d'Alfred North Whitehead et Bertrand Russell (1913). C'est un résultat important (et très impressionnant) à l'heure actuelle, car c'est la première fois qu'une machine est capable de raisonner, et le programme est considéré à juste titre comme la toute première intelligence artificielle. Quelques années plus tard, Newell et Simon ont généralisé cette approche et ont conçu un GPS (un "résolveur de problèmes généraux") qui pourrait résoudre tout type de problème s'il pouvait être formellement spécifié sur une machine. Parallèlement, d'autres chercheurs développent d'autres

domaines tels que la traduction automatique, la robotique, la théorie des jeux et la vision.

Les recherches sur l'IA ont été extrêmement prolifiques et ont engendré un nombre considérable de résultats. Mais bien qu'ils aient fait des progrès impressionnants, les chercheurs reconnaissent qu'ils sont loin d'avoir résolu les problèmes généraux liés à l'intelligence et qu'ils ont peut-être été un peu trop optimistes. ("Dans trois à huit ans nous aurons une machine avec l'intelligence générale d'un être humain ordinaire", Marvin Minsky, 1970 ").

Nous appelons ce revers le premier hiver de l'IA. Cependant, grâce à l'émergence des systèmes experts et à la résolution du problème d'apprentissage dans les perceptrons multicouches, l'IA a connu un renouveau jusqu'à la fin des années 1990. Cependant, ce nouvel essor a été de courte durée, car l'IA a connu à nouveau un ralentissement en raison des mêmes problèmes.

Ce qui est certain, cependant, c'est que l'intelligence artificielle suscite un regain d'intérêt depuis le début des années 2000, grâce à ses succès qui ont secoué à la fois l'industrie et le quotidien des citoyens et de ce fait, elle attire des milliards d'euros de financement pour la recherche et son implémentation ubiquitaire. Il n'y a presque aucune industrie ou secteur qui reste imperméable à cette transformation.

La médecine n'est clairement pas en reste, avec un intérêt pour l'IA pour l'aide au diagnostic dans les spécialités médicales, l'imagerie, la chirurgie, et pour améliorer les soins médicaux et chirurgicaux. (40)

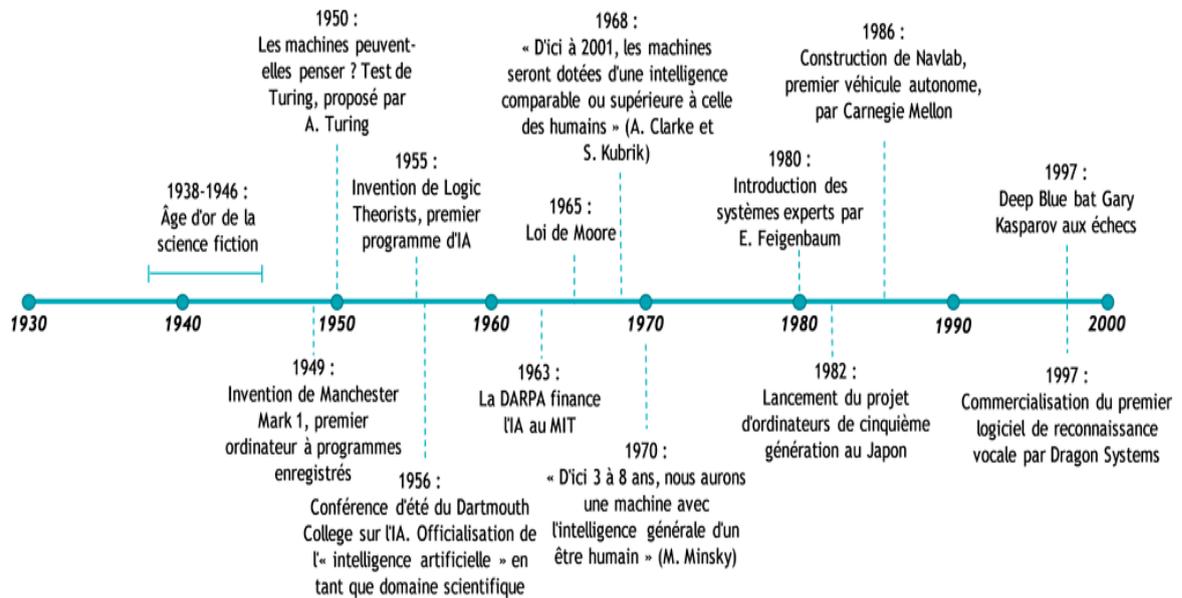


Figure 1 : Chronologie de l'évolution de l'IA (des années 50 à 2000)
 D'après Anyoha (28 août 2017[4]), « The history of artificial intelligence »
<http://sitn.hms.harvard.edu/flash/2017/history-artificial-intelligence/>.

1.2. Définitions

L'IA est un domaine complexe qui peut être difficile à définir, car il existe de nombreuses approches et définitions différentes, en voici quelques-unes :

Selon les co-fondateurs d'Allisone : « Très simplement, un modèle d'intelligence artificielle (IA) est un outil ou un algorithme, qui grâce à un certain ensemble de donnée fourni en amont, peut, face à une nouvelle donnée, arriver à une décision sans la nécessité d'une intervention humaine dans le processus de prise de décision. » (18)

« Pour entrer dans plus de détails, l'intelligence artificielle est une constellation de technologie différentes, qui fonctionnent de concert pour permettre aux machines de percevoir, de comprendre, d'agir et d'apprendre à des niveaux d'intelligence comparables à ceux des humains. Cela explique sans doute pourquoi il y'a autant de définitions de l'IA car elle ne se limite pas à une seule technologie. » (18)

Selon le dictionnaire Le robert, l'intelligence artificielle (IA) se définit comme l'« Ensemble des théories et des techniques développant des programmes informatiques complexes capables de simuler certains traits de l'intelligence humaine (raisonnement, apprentissage...) ».

Selon le groupe d'experts sur l'AI de l'OECD, « un système d'intelligence artificielle (ou système d'IA) est un système automatisé qui, pour un ensemble donné d'objectifs définis par l'homme, est en mesure d'établir des prévisions, de formuler des recommandations, ou de prendre des décisions influant sur des environnements réels ou virtuels. Pour ce faire, il se fonde sur des entrées machines et/ou humaines afin de percevoir les environnements réels et/ou virtuels ; transcrire ces perceptions en modèles (par des moyens automatisés, en s'appuyant par exemple sur l'apprentissage automatique ou manuel) ; et utiliser des inductions de modèles pour formuler des possibilités de résultats (informations ou actions à entreprendre). Les systèmes d'IA sont conçus pour fonctionner à des niveaux d'autonomie divers. » (43)

L'IA désigne les machines capables d'imiter les connaissances et les comportements humains. Cette capacité d'intelligence peut être mise en œuvre par des séquences d'algorithmes. Avec l'amélioration du matériel informatique, il est possible pour l'IA de traiter de grands ensembles de données, de révéler par le calcul le comportement humain et de permettre l'interaction avec les gens. Cette technologie améliore qualitativement la vie des gens et influence continuellement le monde. (20)

Elle peut être divisée en deux tendances :

L'intelligence artificielle "faible" qui correspond au développement de systèmes de plus en plus autonomes pour réduire le coût de contrôle des machines industrielles dans les usines de fabrication. Des algorithmes en constante évolution, construits par des ingénieurs à partir d'un problème pragmatique, seront capables de résoudre des problèmes de plus en plus importants : programmes de réaction qui simulent une réponse "intelligente" mais réaliste, connue de tous. Les partisans de l'IA "faible" l'appellent "régénération de l'intelligence" ou "réponse automatique".(27)

Une intelligence artificielle « forte » qui peut non seulement reproduire le comportement des mammifères et des Homo sapiens, mais aussi avoir une véritable "conscience de soi" possible avec les ordinateurs manipulant des symboles (techniques connexionnistes de type réseaux de neurones. (27)

L'apprentissage automatique ou *machine learning* en anglais est l'un des domaines de l'IA que les chercheurs et les praticiens ont largement appliqué, en l'utilisant pour l'analyse des données. L'apprentissage automatique a été mentionné pour la première fois en 1959 par Arthur Samuel, qui l'a défini comme un processus permettant aux ordinateurs d'apprendre sans être explicitement programmés. Aujourd'hui, l'apprentissage automatique permet à un ordinateur de classer ou de prédire un résultat à partir d'une vaste base de données. (20)

Elle s'appuie sur des algorithmes qui utilisent des données structurées (classées ou étiquetées par des observateurs) pour régler le système lui-même en fonction des commentaires des personnes signalant des erreurs. L'apprentissage automatique

s'améliore à mesure que de nouvelles données s'accumulent, mais il n'examine que les données organisées, il n'analyse donc que comme programmé.

Par exemple, Alexa (Amazon) a été lancé en tant qu'assistant virtuel, avec la capacité de reconnaître et de comprendre des voix et des accents différents. Avec la possibilité d'ajouter des "compétences", il a commencé à aider les gens à accomplir leurs tâches quotidiennes. (20)

Le *deep learning* ou l'apprentissage en profondeur est une forme spécifique et plus avancée d'apprentissage automatique car il utilise des données non structurées. Contrairement à l'apprentissage automatique, qui utilise des algorithmes "a priori", dans l'apprentissage en profondeur, ce sont les données qui pilotent la fonctionnalité des algorithmes.

C'est un système d'apprentissage autonome qui ajuste constamment son modèle mathématique en fonction des données analysées et des erreurs observées.

Inspiré du cerveau humain, le *deep learning* repose sur des réseaux de neurones constitués de plusieurs couches. Chaque couche du réseau interprète et module les informations de la couche précédente et les transmet à la couche suivante.

Les réseaux de neurones profonds sont des systèmes adaptatifs (capable d'apprendre). Librement inspiré du fonctionnement des neurones biologiques, sa conception repose sur des méthodes statistiques et des opérations mathématiques simples, chaque « neurone » étant modélisé à l'aide de quelques opérateurs de base.

Les réseaux de neurones profonds ont de nombreuses utilisations. Non seulement ils sont derrière des jeux de stratégie, mais ils sont derrière des systèmes de conduite autonome comme Google Waymo, Tesla et Uber. Ils sont utilisés aussi dans le traitement du langage, cependant, l'un des principaux domaines d'application des réseaux de neurones profonds est le traitement d'images médicales. On s'inspire souvent du cortex visuel pour le traitement d'images via des réseaux de neurones convolutifs ou réseaux de neurones à convolution (CNN en anglais ou ConvNet pour les réseaux de neurones convolutifs).

L'apprentissage en profondeur fonctionne pour toutes sortes d'images médicales, 2D et 3D. Il est utilisé dans l'imagerie par rayons X 2D telle que les panoramiques dentaires, les volumes CBCT (tels que la segmentation du canal mandibulaire),

l'imagerie par ultrasons, les volumes d'imagerie par résonance magnétique, la tomographie par cohérence optique (OCT) et la microscopie optique et électronique. En particulier, le *deep learning* permet la création d'outils de diagnostic. Des résultats remarquables ont été obtenus dans la détection du mélanome, le diagnostic ophtalmique de la dégénérescence maculaire avec l'imagerie OCT et le diagnostic du COVID-19 avec l'imagerie tomographique du poumon.

L'apprentissage en profondeur peut également être utilisé pour le filtrage d'images, comme la réduction des artefacts métalliques dans les images CBCT, la réduction des artefacts de mouvement dans les images IRM et la réduction du bruit entre les modalités. (20)

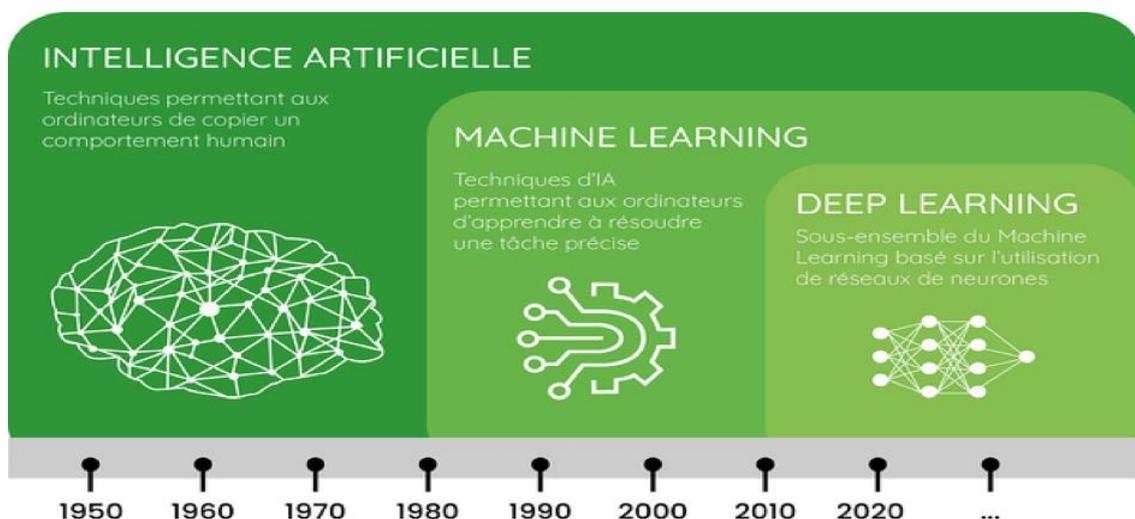


Figure 2 : Les composantes de l'IA

D'après : Aurelien YOL (18 janvier 2021), « La différence entre IA, Deep Learning, Machine Learning en agriculture »
<https://www.dilepix.com/blog/difference-intelligence-artificielle-deep-learning-agriculture>

Quand a l'intelligence humaine, elle est définie dans le dictionnaire le ROBERT comme la faculté de connaître, de comprendre ; qualité de l'esprit qui comprend et s'adapte facilement. L'ensemble des fonctions mentales ayant pour objet la connaissance rationnelle (opposé à sensation et à intuition).

L'intelligence humaine peut être définie comme la capacité de comprendre, apprendre, raisonner et s'adapter à son environnement. Cela inclut la capacité de résoudre des problèmes, de prendre des décisions judicieuses, de comprendre les concepts abstraits et de s'adapter aux nouvelles situations. La mesure de l'intelligence humaine est souvent évaluée à travers des tests standardisés, bien que la notion d'intelligence soit complexe et controversée, et que différentes formes d'intelligence peuvent être valorisées dans différentes cultures et contextes. (54)

2. L'intelligence artificielle en odontologie

2.1. Les différentes indications de l'intelligence artificielle en médecine bucco-dentaire

L'IA a été utilisée principalement en dentisterie pour rendre le processus de diagnostic plus précis et plus efficace, ce qui est de la plus haute importance pour obtenir les meilleurs résultats aux traitements fournis ainsi que des soins de qualité supérieure aux patients.

Les chirurgiens-dentistes doivent utiliser toutes leurs connaissances acquises pour établir un diagnostic et décider de la meilleure option de traitement. Ils doivent également prédire le pronostic, ce qui nécessite des compétences précises en matière de prise de décision clinique. Cependant, dans certains cas, les praticiens ne disposent pas de suffisamment de connaissances pour prendre la bonne décision clinique en un temps limité. Les applications d'IA peuvent leur servir de guide afin qu'ils puissent prendre de meilleures décisions et être plus performants. (28)

D'après Shortliffe, Chae *et al*, Schleyer *et al*, les chirurgiens-dentistes sont devenus dépendants des applications informatiques pour obtenir des informations permettant de prendre des décisions cliniques. (52) (8) (49)

2.1.1. La radiologie (20)

L'imagerie médicale a été considérée comme la porte d'entrée de l'IA vers la médecine car les images peuvent être traduites en langage informatique très facilement.

En odontologie, la recherche se concentre sur cinq applications principales basées sur l'imagerie radiologique : la détection des caries, la détection des fractures dentaires, la détection des lésions kystiques, l'analyse de la structure parodontale et l'optimisation de la qualité d'image.

Lors de la planification d'un plan de traitement dentaire pour chaque patient, il est nécessaire de saisir des informations intrabuccales et ce quel que soit le traitement à proposer. En pratique clinique, cette procédure est effectuée par un dentiste et prend souvent du temps. Le résultat de cette procédure dépend également des connaissances et de l'expérience de ce dernier. Un système automatique serait intéressant pour analyser la situation intraoral en peu de temps et par conséquent faire gagner du temps au praticien.

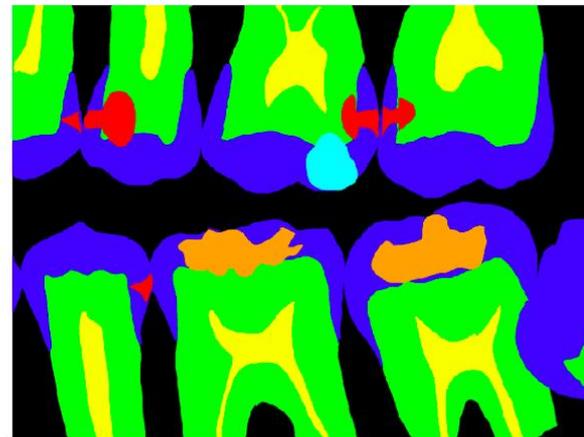
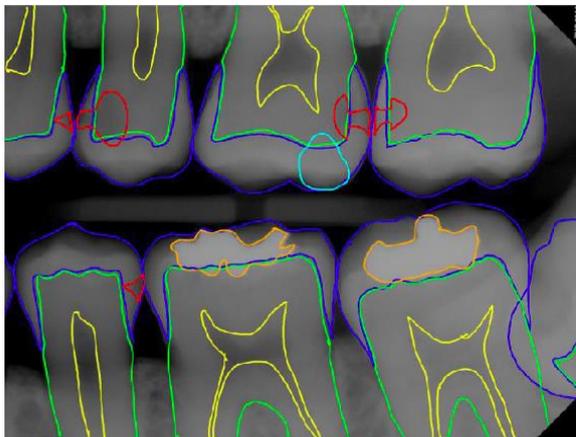
L'intelligence artificielle a été utilisée pour améliorer l'interprétation des images en radiologie dentaire. Dans les radiographies bidimensionnelles (2D), une radiographie numérique se compose de milliers de pixels. Chaque unité de pixel représente un niveau de luminosité différent sur la grille d'image numérique et peut être identifié comme une structure métallique ou minérale et ce selon son ton de rayonnement. Grâce à ces fonctionnalités, les programmes d'intelligence artificielle apprennent à analyser une image numérique. Par exemple, les images radiographiques peuvent être calculées à l'aide d'algorithmes utilisés pour la détection des caries via des couches d'entrée, des couches cachées et des couches de sortie. Cet apprentissage de l'IA repose sur la coordination d'un ingénieur logiciel et d'un expert clinique.

L'expert clinique analyse un grand nombre de radiographies dentaires comme une série d'études avec plusieurs radiographies et marque manuellement des repères

anatomiques, l'ingénieur logiciel en se basant sur les données du clinicien, utilise un ensemble d'entraînement et conçoit un modèle d'apprentissage (Figure 3) pour entraîner l'IA à prédire le reste des données sous la forme d'un "ensemble adaptatif". Les dentistes et les ingénieurs assurent la précision de l'installation ou du logiciel.

Marquage du dentiste

Modèle d'apprentissage en profondeur



Carie (rouge), émail(bleu), dentine(vert), pulpe(jaune), restauration métallique (orange), restauration (bleu ciel), gutta percha (marron), arrière fond (noir).

Figure 3 : Exemple de l'analyse des structures dentaires et du marquage des caries. Des lignes ont été tracées pour la segmentation des structures dentaires (émail, dentine, pulpe, restauration métallique, restaurations de la couleur de la dent, gutta percha) et des caries dentaires sur les radiographies bitewing.(31)

D'après Lee S, Oh S, Jo J, Kang S, Shin Y, Park J.(2021). Deep learning for early dental caries detection in bitewing radiographs.

L'analyse des radiographies assistée par l'IA présente un grand potentiel pour aider les cliniciens à établir un diagnostic. Sur le plan commercial, de jeunes entreprises ont annoncé leurs produits avec des fonctions prometteuses, telles que la détection des caries, l'amélioration de l'image et la suggestion de plans de traitement. Les radiographies dentaires peuvent être interprétées par des logiciels (Second Opinion, Pearl ; Denti.AI ; VideaDetect, VideaHealth, Allisone) avec des algorithmes d'apprentissage automatiques. Ces logiciels utilisent la vision par ordinateur pour aider les cliniciens en générant automatiquement des propositions de traitement basées sur des algorithmes d'apprentissage profond. Ces plans de traitement peuvent potentiellement être adaptés aux philosophies de traitement des cliniciens et aux résultats qui permettent finalement au clinicien de prendre la décision finale de traitement.

Cependant ces logiciels sont limités à la détection des caries et de leur proximité avec le nerf dentaire, à la détection des lésions kystiques, à la détection des dents présentant une obturation endodontique ainsi que le type de restauration effectué sur les dents (couronne ou restauration au composite). Par ailleurs, les plans de traitement proposés se limitent encore à des procédures simples telles que les obturations coronaires, l'endodontie et les restaurations par inlay / onlay.

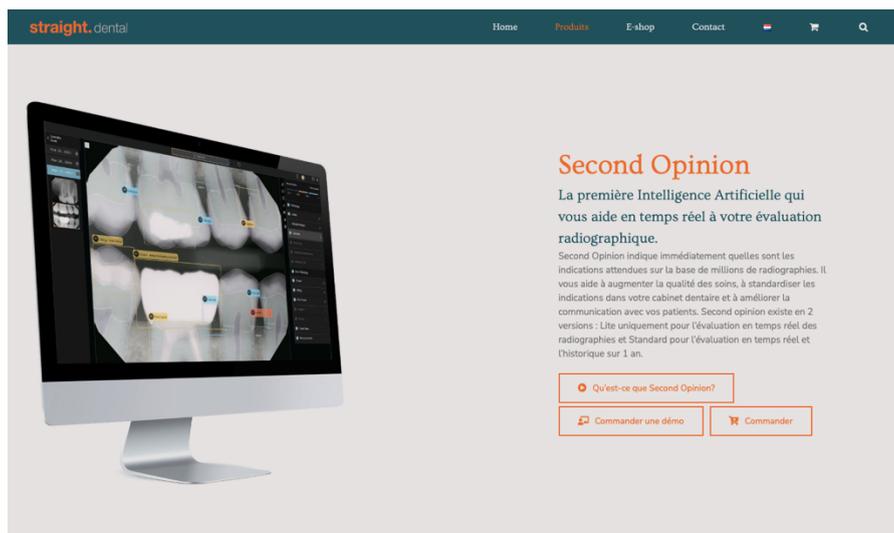


Figure 4 : accueil du site de second opinion
Source : <https://straightdental.com/fr/second-opinion-3/>

L'IA a été intégrée des applications bidimensionnelles aux applications tridimensionnelles (3D). Dans les radiographies 3D, telles que les scanners tomographiques, l'annotation des repères anatomiques et la segmentation des structures osseuses et dentaires sont réalisées par l'IA. Une société (Orca-Dental AI) a présenté son logiciel avec des capacités d'annotation, segmentant automatiquement des structures anatomiques telles que le maxillaire, la mandibule et les dents. La reconnaissance des nerfs et l'identification des pathologies sont également possibles avec ces algorithmes. Ce logiciel a un énorme potentiel d'auto-amélioration et de livraison d'informations plus précises aux cliniciens. (20)

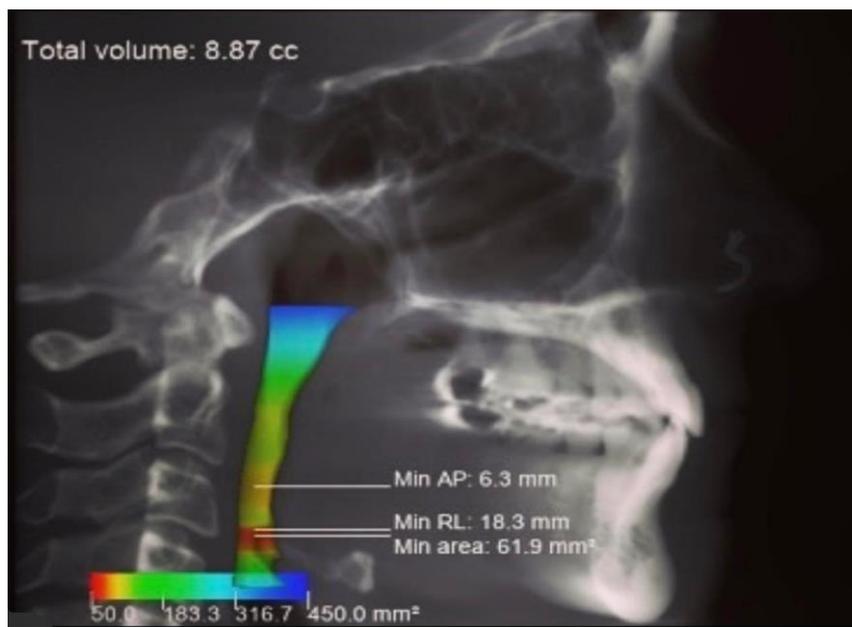


Figure 5: Analyse automatisée des voies respiratoires sur coupe de CBCT avec le logiciel Orca-Dental AI,
Source : photo instagram du compte orca_dental
<https://www.instagram.com/p/CJZWq4rhSO-/?igshid=YTE5MTA4ODQ=>

L'application Allisone (18)

L'application d'intelligence artificielle Allisone a été développée en 2021 par le Dr Lionel Elbaz. Créé par des dentistes, cet outil permet d'obtenir, en un instant, une seconde opinion sur une radiographie panoramique. L'intelligence artificielle d'Allisone détecte les lésions (cariées et périapicales) et met en évidence les particularités dentaires de chaque patient grâce à un code-couleur.

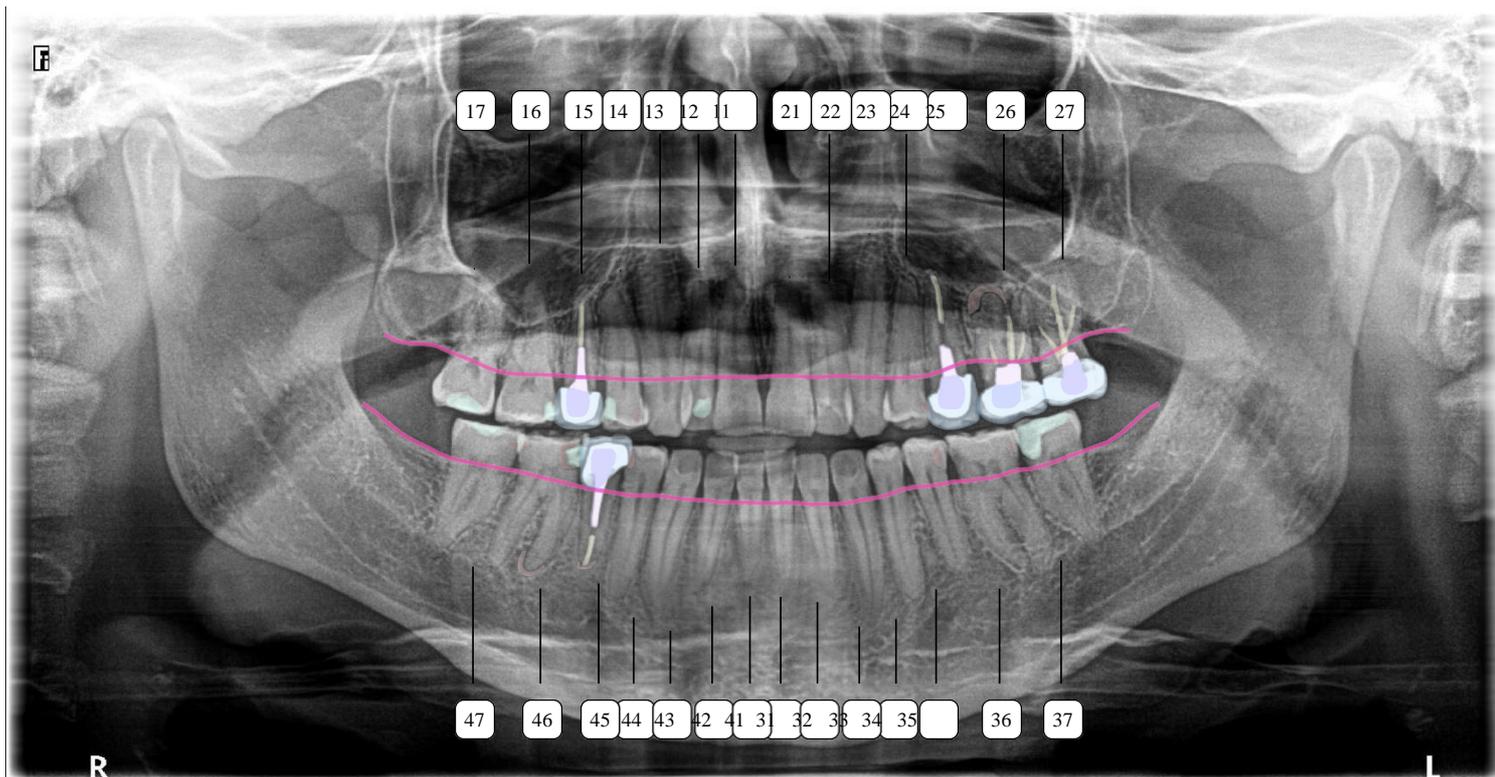
Ce logiciel SaaS, accessible depuis n'importe quel appareil connecté à Internet, fonctionne sur le principe du *deep learning* : il apprend en continu grâce aux éléments ajoutés par ses utilisateurs.

Allisone facilite le travail de diagnostic et de construction du plan de traitement. En automatisant la transcription des compte-rendu et la préparation de mails récapitulatifs aux patients, l'application facilite le travail de pédagogie auprès des patients.

Comment ça fonctionne ?

Une fois la radiographie panoramique du patient importé dans le logiciel, ce dernier rend visible tous les éléments de la radiographie et les retranscrit à l'écran : chaque élément visible est mis en évidence et se voit appliquer un code-couleur. Par exemple les restaurations dentaires en vert, les réactions périapicales en rouge, les lésions carieuses en rouge foncé. A la clé pour le dentiste : une lecture facilitée des radiographies, une détection plus aisée des lésions (cariées et périapicales), même les plus petites. Le logiciel propose aussi un plan de traitement qui sera validé ou non par le praticien.

Pour les patients : le logiciel permet une compréhension instantanée de leurs problématiques dentaires et une aide visuelle pour constater l'évolution de leur santé bucco-dentaire au fil des séances.



Légende des éléments

- █ Carie
 - █ Couronne
 - █ Endodontie
 - █ Inlay core
 - █ Lésion péri apicale
- █ Restauration

Votre plan de traitement

Voici le plan de traitement proposé par votre praticien.

- 01 : Détartrage
- 02 : Détartrage
- 14 : Inlay
- 24 : Inlay
- 26 : Retraitement canalaire + Inlay core + Couronne
- 35 : Inlay + BioDentine



-  : Inlay
-  : Retraitement canalaire + Inlay core + Couronne
-  : Dévitalisation + Inlay core + Couronne
-  : Inlay

Compte rendu de l'analyse de la radio

Élément(s) détecté(s)

-  : Restauration
-  : Carie ne touche pas le nerf + Restauration
-  : Couronne + Inlay core + Endodontie
-  : Restauration
-  : Restauration
-  : Carie ne touche pas le nerf
-  : Couronne + Inlay core + Endodontie
-  : Couronne + Inlay core + 3 Endodontie + Lésion péri apicale
-  : Couronne + Inlay core + Endodontie
-  : Carie proche du nerf
-  : Carie ne touche pas le nerf
-  : Restauration
-  : Carie ne touche pas le nerf

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en radiologie

Applications de l'IA en radiologie dentaire	Description
Détection des caries	L'IA peut être utilisée pour détecter les caries à un stade précoce, avant qu'elles ne deviennent visibles à l'œil nu. Elle peut également aider à différencier les caries des autres anomalies dentaires.
Détection des fractures dentaires	L'IA peut aider à identifier les fractures dentaires qui peuvent être difficiles à détecter avec l'imagerie conventionnelle. Elle peut également aider à déterminer la gravité et la profondeur de la fracture.
Détection des lésions kystiques	L'IA peut être utilisée pour détecter les lésions kystiques, qui peuvent être difficiles à détecter avec l'imagerie conventionnelle. Elle peut également aider à déterminer la taille et la nature de la lésion.
Analyse de la structure parodontale	L'IA peut aider à identifier les anomalies de la structure parodontale, y compris la perte osseuse et le déchaussement dentaire. Elle peut également aider à déterminer la progression de la maladie parodontale.
Optimisation de la qualité d'image	L'IA peut être utilisée pour améliorer la qualité d'image en éliminant les artefacts et en optimisant les paramètres d'imagerie pour un diagnostic précis.

2.2.2. L'orthodontie

L'Intelligence Artificielle (IA) ouvre de nouvelles perspectives en orthodontie, certains auteurs évoquent même, à moyen terme, la fin de l'orthodontie classique. (Rev Orthop Dento Faciale 2019). (7)

L'IA utilisée en orthodontie est l'IA faible. Elle s'appuie principalement sur l'analyse des modèles numériques des arcades dentaires, l'analyse céphalométrique automatisée, analyse automatisée des voies aériennes... (6)

Une étude publiée dans le journal of Orthodontic Science en 2019 ("*Artificial intelligence in orthodontics : à review of current applications and future prospects*" par Sun et al.) (55) a examiné les différentes façons dont l'IA peut être utilisée en orthodontie, y compris pour la planification des traitements, la conception des appareils orthodontiques, la prédiction des résultats, la détection des anomalies et la surveillance des progrès. Les auteurs ont conclu que l'IA peut offrir de nombreux avantages pour les patients et les orthodontistes, mais qu'il est important de continuer à surveiller et à évaluer les développements futurs dans ce domaine en évolution rapide.

Depuis quelques années, un logiciel (CS model+, Carestream Dental™) propose une analyse entièrement automatisée des modèles numériques acquis à l'aide d'une caméra optique ou d'une numérisation CBCT des empreintes.

En effet ce logiciel propose en fonction des critères thérapeutiques retenus par l'orthodontiste un *set-up* entièrement automatisé ; permettant ainsi une visualisation aisée des objectifs de traitement et aidant ainsi à planifier les différentes étapes orthodontiques. En temps réel, automatiquement ou en fonction des prescriptions de l'orthodontiste (forme d'arcade, contraction/expansion, extraction, réduction amélaire proximale ou adjonction, angulations incisives, nivellement de la courbe de Spee, conservation des diastèmes, coordination des arcades), il calcule les corrections et simule la situation orthodontique finale.

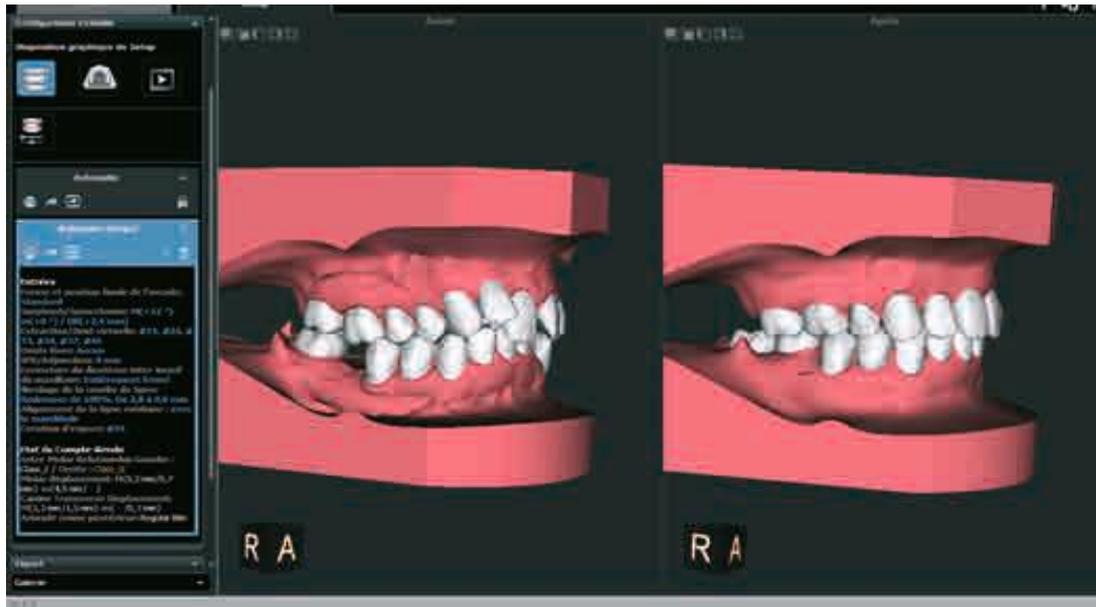


Figure 6 :set-up automatisé (CS Model+, Carestream Dental™).
 D'après, Sun Y, Tang X, Zhao Y, Zhang Z. (2019).Artificial intelligence in orthodontics: A review of current applications and future prospects.

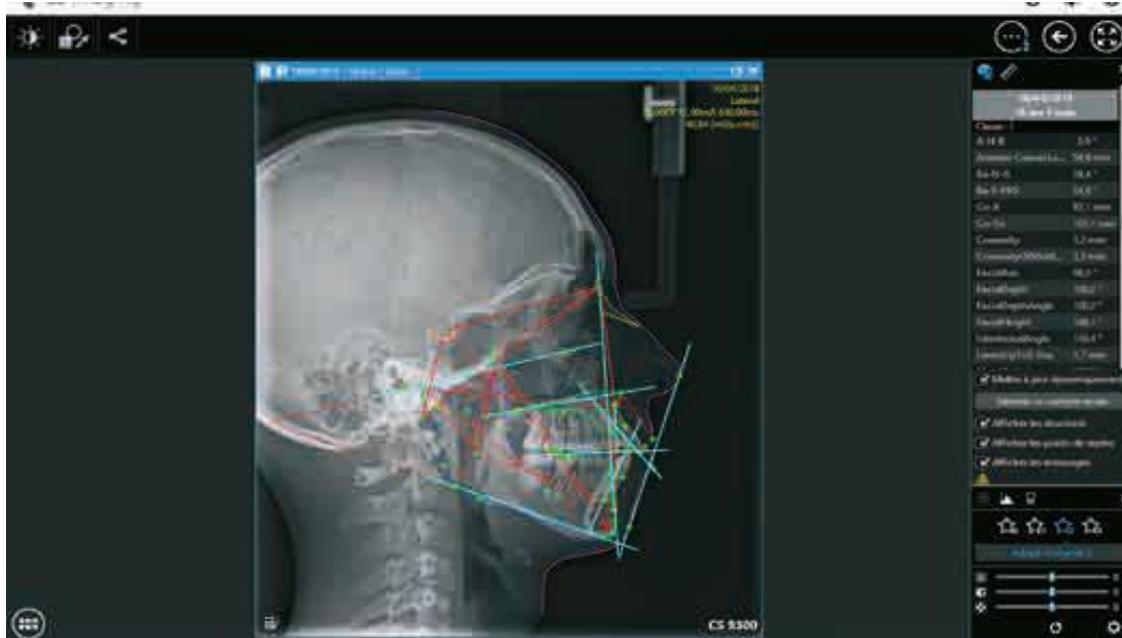


Figure 7 :Analyse céphalométrique automatisée en norma lateralis (Carestream Dental™).
 D'après, Sun Y, Tang X, Zhao Y, Zhang Z. (2019). Artificial intelligence in orthodontics: A review of current applications and future prospects.

Une autre étude publiée dans la revue d'Orthopédie Dento Faciale en 2019 (Intelligence artificielle : le futur de l'Orthodontie ?) (32) dont l'objectif est d'évaluer la fiabilité de ce logiciel dans l'analyse automatisée des modèles tant au niveau de leur numérisation que de leur segmentation.

L'étude a conclu que les technologies numériques et les nouvelles solutions d'intelligence artificielle modifient déjà fondamentalement l'orthodontie et que la fiabilité des premières solutions intégrées n'est plus à prouver et permettent de réaliser :

- Des analyses céphalométriques entièrement automatisées
- La détection, la segmentation, l'identification automatique des structures dentaires à partir d'une acquisition numérique optique ou par CBCT.
- La fusion des données diagnostic en un rapport diagnostic automatique pouvant proposer une évaluation de la difficulté du cas via les index habituellement utilisés (Analyse de discordance de Bolton, Peer Assessment Rating index, Indice de divergence de l'American Board of Orthodontics...).



Figure 8 :Segmentation automatique des arcades dentaires et mesures automatiques (CS Model+, Carestream Dental™).

D'après, Sun Y, Tang X, Zhao Y, Zhang Z. (2019).Artificial intelligence in orthodontics: A review of current applications and future prospects.

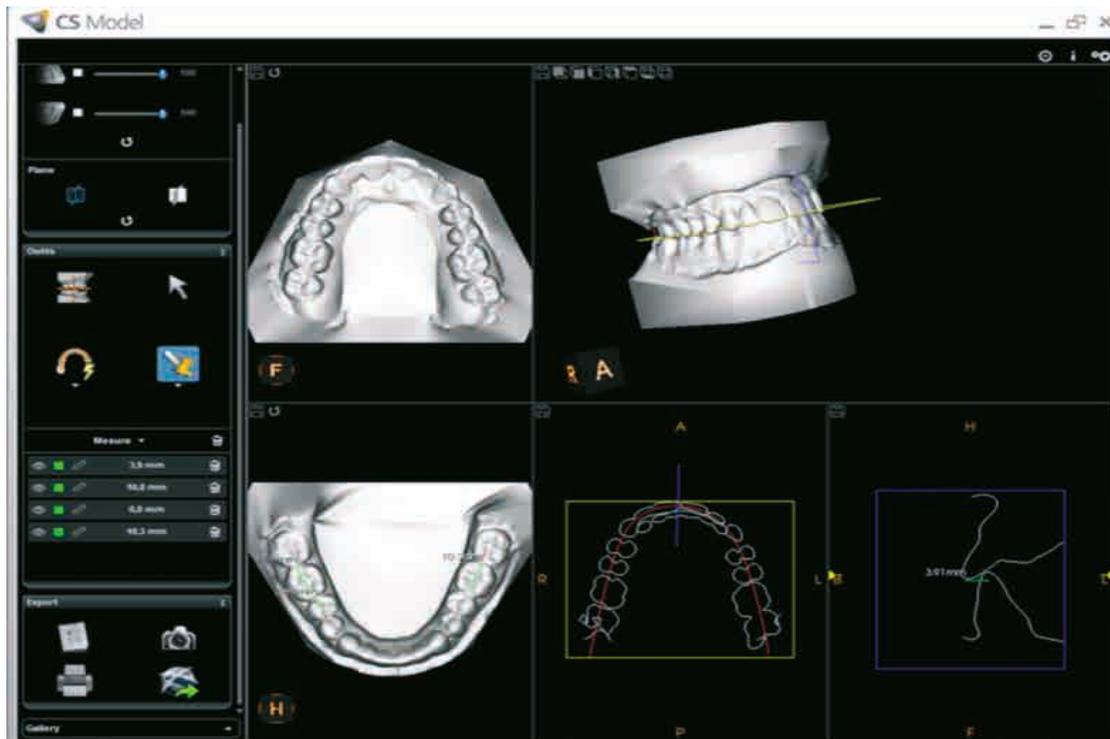


Figure 9 : Logiciel de mesure CS Model (Carestream Dental™).
 D'après, Sun Y, Tang X, Zhao Y, Zhang Z. (2019). Artificial intelligence in orthodontics: A review of current applications and future prospects.

Parallèlement sur le marché, de nouvelles séquences CBCT dites « faible dose » apparaissent, séquences qui autorisent l'acquisition d'un massif facial pour une irradiation comparable à celle d'un panoramique dentaire.

Dans les prochaines années, ces acquisitions devraient remplacer les classiques acquisitions panoramiques 2D. Selon les systèmes, il est déjà possible de fusionner ces images 3D avec les acquisitions extra et intra-orales optiques mais aussi de réaliser une segmentation automatique des voies aériennes afin d'évaluer les risques de SAOS (Syndrome d'Apnée Obstructive du sommeil). A très court terme, il est donc possible d'envisager un système de diagnostic 3D entièrement intégré prenant en compte les arcades dentaires, mais aussi de manière plus globale la dysmorphose des patients. L'orthodontiste interviendra alors pour établir le choix thérapeutique, la proposition thérapeutique finale étant visualisable instantanément, et la mettre en œuvre. (32)



Figure 10 :Fusion automatique Cone Beam et acquisition optique intra-orale (inclusions dentaires multiples) (Carestream Dental™).
 D'après, Sun Y, Tang X, Zhao Y, Zhang Z. (2019).Artificial intelligence in orthodontics: A review of current applications and future prospects.

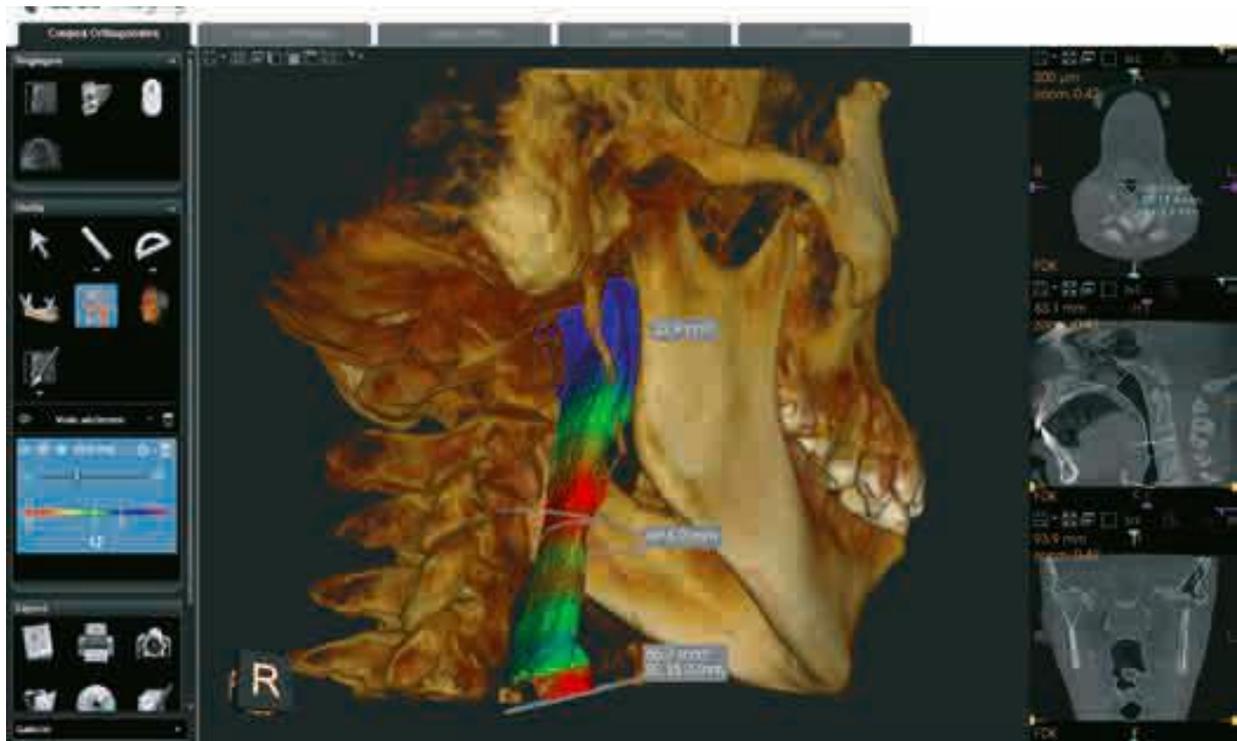


Figure 11 : segmentation et analyse automatique des voies aériennes (Carestream Dental™).
 D'après, Sun Y, Tang X, Zhao Y, Zhang Z. (2019).Artificial intelligence in orthodontics: A review of current applications and future prospects.

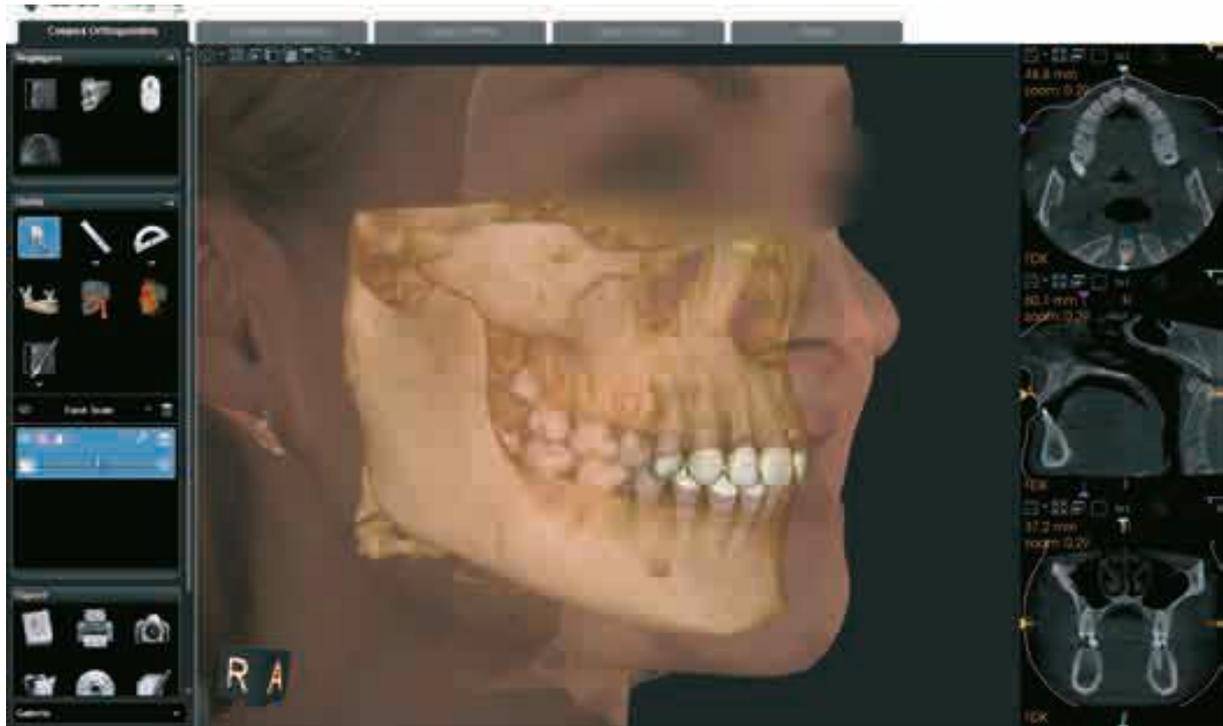


Figure 12 : fusion automatique Cone Beam et acquisition optique extra-orale (Carestream Dental™). D'après, Sun Y, Tang X, Zhao Y, Zhang Z. (2019). Artificial intelligence in orthodontics: A review of current applications and future prospects.

En plus des logiciels d'analyse et de planifications automatisées, le traitement orthodontique personnalisé piloté par l'IA a révolutionné la prise en charge orthodontique. En effet un algorithme de données a été créé pour décider intelligemment comment les dents des patients doivent être déplacées, quelle pression doit être appliquée et même reconnaître les points de pression pour cette ou ces dents spécifiques. Les aligneurs conjugués à l'IA fournissent non seulement un traitement précis, mais réduisent également les risques d'erreur et le temps de traitement. (46)

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en orthodontie.

Applications de l'IA en orthodontie	Description
Planification des traitements	L'IA peut être utilisée pour optimiser la planification des traitements orthodontiques en prédisant les résultats du traitement et en aidant à concevoir des plans de traitement personnalisés pour chaque patient.
Conception des appareils orthodontiques	L'IA peut aider à concevoir des dispositifs orthodontiques personnalisés pour chaque patient, en fonction de ses caractéristiques anatomiques uniques.
Prédiction des résultats	Les algorithmes d'IA peuvent prédire la position future des dents et des os de la mâchoire en utilisant des données radiographiques et des images 3D des dents et des gencives. Cette technique permet de mieux comprendre les mécanismes de la croissance dentaire et de prédire les résultats du traitement.
Détection des anomalies	L'IA peut aider à détecter les anomalies dentaires et les malocclusions complexes en analysant les images radiographiques et les scans 3D des dents et de la mâchoire. Cette technique permet de détecter les anomalies invisibles à l'œil nu et d'améliorer la précision du diagnostic.
Surveillance des progrès	L'IA peut aider à suivre avec précision la position des dents au fil du temps, ce qui est particulièrement utile pour les patients atteints de malocclusions complexes. Cette technique peut aider à prévenir les mouvements dentaires indésirables et à optimiser le traitement orthodontique.

2.2.3. L'odontologie conservatrice

La carie dentaire est une maladie multifactorielle dont l'étiologie microbiologique est constituée de *Streptococcus mutans*, Elle touche plus de 3 milliards d'individus dans le monde et génère des coûts et un fardeau sanitaire importants (29). En partant du principe que les lésions carieuses initiales (non cavitaires) peuvent être arrêtées de manière non invasive ou micro-invasive (par exemple, application de vernis fluoré, scellement, infiltration), la thérapie invasive/reconstructrice traditionnelle des caries est limitée aux lésions avancées, principalement parce qu'il a été démontré que la pose de restaurations initie une spirale de retraitements croissants et de plus en plus coûteux (Frencken et al. 2016 ; Schwendicke, Splieth, et al 2019). (50)

La prise en charge précoce des lésions non cavitaires nécessite d'abord leur détection. Les dentistes utilisent principalement des sondes dentaires. En observant la texture et la décoloration, ils peuvent déterminer si la dent est saine ou non. Cette méthode est très subjective et repose sur l'expérience du dentiste. En particulier, les surfaces proximales peuvent poser problème lors de l'examen dentaire.

Selon Gimenez et al (2015), la stratégie de diagnostic standard (l'inspection visio-tactile), ne permet généralement pas de détecter les lésions précoces sur les surfaces non évaluables (par exemple, proximales). (22)

Une méthode supplémentaire courante pour détecter les lésions précoces sur les surfaces proximales et pour évaluer leur étendue est la radiographie rétrocoronaire (Schwendicke, Stolpe, et al. 2015). Bien qu'elle soit plus sensible pour la détection des lésions précoces que l'évaluation visio-tactile, l'évaluation des radiographies s'accompagne d'une variance importante entre les dentistes et d'une proportion considérable de détections faussement positives ou faussement négatives (Schwendicke, Stolpe, et al. 2015)(50).

Les radiographies rétro-alvéolaires et les radiographies panoramiques sont aussi utilisées pour la détection des caries. Le CBCT est moins fréquemment utilisé pour leurs détections.

En plus de l'analyse d'images, l'IA peut également être utilisée pour aider à prédire les résultats de certains traitements de restauration dentaire. En effet des logiciels de simulation de traitement tels que Romexis® smile design peuvent permettre aux patients de voir à quoi ressemblera leur sourire après un traitement cosmétique dentaire, et les aider à prendre des décisions éclairées sur leur traitement.

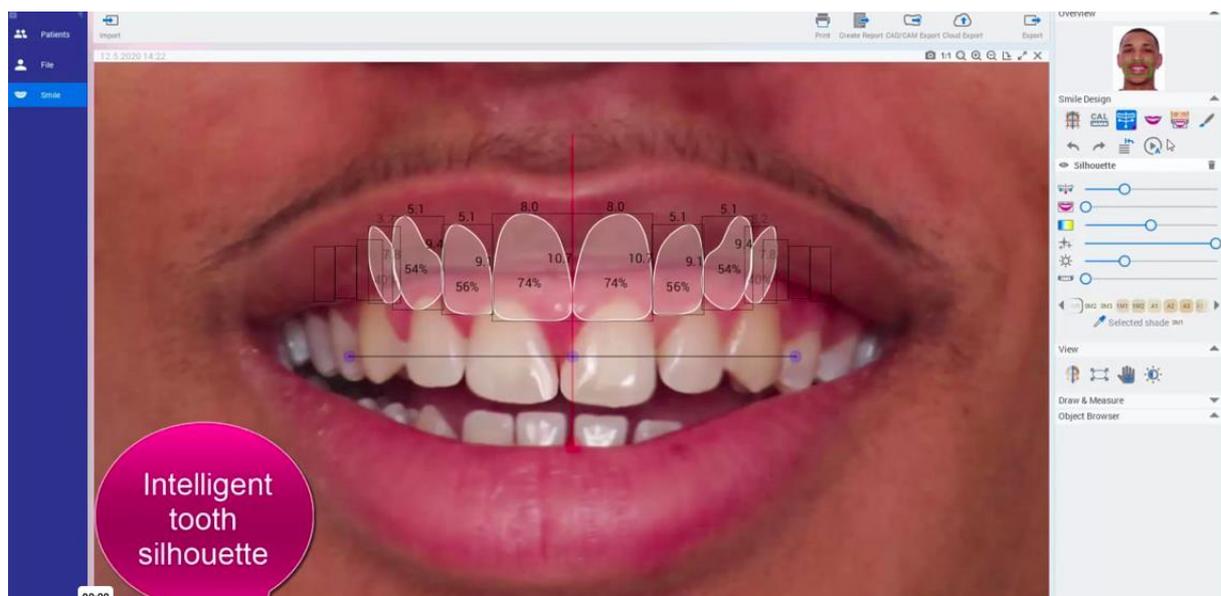


Figure14 : interface du logiciel Romexis Smile

Source : Romexis® Smile Design : <https://www.planmeca.com/fr/logiciel/modules-du-logiciel/planmeca-romexis-smile-design/>

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en odontologie conservatrice

Utilisation de l'IA en odontologie conservatrice	Description
Diagnostic des caries dentaires	L'IA peut aider à détecter les caries à un stade précoce et à évaluer leur profondeur.
Planification du traitement	L'IA peut être utilisée pour aider à la planification des restaurations dentaires.
Prédiction des résultats	L'IA peut être l'IA peut également être utilisée pour aider à prédire les résultats traitements de restauration dentaire.

2.2.4. La parodontologie

La parodontite est une maladie très répandue qui concerne des milliards de personnes dans le monde et qui, si elle n'est pas traitée, entraîne la mobilité des dents et, dans les cas graves, leur perte. Pour éviter cela, il est nécessaire de détecter la maladie à un stade précoce et de mettre en place un traitement efficace. Pour obtenir un diagnostic fiable, un examen physique méticuleux doit être effectué. C'est pourquoi on procède à un sondage dentaire pour mesurer la profondeur des poches et la perte d'attache clinique. Le sondage parodontal a une précision limitée en raison de l'évaluation individuelle du dentiste. Les examens complémentaires couramment utilisés sont les radiographies dentaires, dont l'évaluation dépend également de l'expérience du dentiste. (16)

Certaines études démontrent que l'intelligence artificielle a déjà fait ses preuves en parodontologie tels que l'étude de Michalakis et Kapsampeli, *Artificial intelligence and its potential applications in periodontics: A literature review* publiée en 2020, qui a examiné les avantages potentiels de l'utilisation de l'IA dans la planification des traitements parodontaux. Les auteurs ont souligné que l'IA pourrait aider les cliniciens à diagnostiquer avec précision les maladies parodontales, à planifier les traitements et à prédire les résultats à long terme. Ils ont également noté que l'utilisation de l'IA pourrait permettre une personnalisation plus efficace des traitements en fonction des caractéristiques uniques de chaque patient. Cependant, ils ont également souligné que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour valider l'efficacité de l'IA dans la pratique clinique en parodontologie. (41)

Une autre étude a été publiée en 2021 dans le journal de parodontologie portant sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour prédire l'épaisseur des tissus gingivaux dans le cadre de greffes gingivales autogènes. Les résultats de l'étude montrent que l'utilisation de l'IA pour prédire l'épaisseur des tissus gingivaux est plus précise que la méthode traditionnelle de mesure manuelle. Cela suggère que l'IA peut être un outil utile pour les professionnels de santé dentaire pour planifier et réaliser des greffes gingivales plus précises et efficaces. Cependant, il est important de noter que cette

étude a été menée sur un échantillon limité de patients et qu'il est nécessaire de mener des recherches supplémentaires pour confirmer ces résultats avant de généraliser cette méthode. (24)

En conclusion, l'utilisation de l'intelligence artificielle en parodontologie présente un potentiel prometteur pour améliorer la précision des diagnostics, des traitements et des prévisions de résultats. Cependant, il est important de noter que la recherche sur l'IA en parodontologie est encore relativement nouvelle et limitée, et que des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer pleinement son efficacité.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en parodontologie

Utilisation de l'IA en parodontologie	Description
Détection précoce de la maladie parodontale	Les algorithmes d'IA peuvent aider à détecter les signes précoces de la maladie parodontale, tels que la perte d'os et la récession gingivale, avant qu'ils ne deviennent visibles à l'œil nu.
Planification des traitements parodontaux	En utilisant des données radiographiques et des images 3D des dents et des gencives, l'IA peut prédire les résultats potentiels du traitement parodontal, aidant ainsi les dentistes à élaborer des plans de traitement plus efficaces et plus personnalisés pour chaque patient.
Surveillance de l'évolution de la maladie parodontale	Les algorithmes d'IA peuvent analyser les images radiographiques et les scans 3D des patients pour suivre l'évolution de la perte osseuse et de la récession gingivale, permettant ainsi aux dentistes de surveiller les progrès du traitement et d'adapter les plans de traitement en conséquence.
Prédiction des résultats à long terme des traitements parodontaux	En utilisant des données historiques de patients et des algorithmes de machine learning, l'IA peut prédire avec précision les résultats à long terme des traitements parodontaux, aidant ainsi les dentistes à conseiller leurs patients sur les résultats attendus.

2.2.5.L'endodontie

L'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) en endodontie est une nouvelle technique de traitement qui est de plus en plus utilisée pour améliorer les résultats cliniques et réduire les erreurs humaines dans les procédures endodontiques. Les algorithmes d'apprentissage automatique et les réseaux neuronaux artificiels sont utilisés pour aider à la planification du traitement, à la visualisation en 3D des structures dentaires, à la détection de fractures radiculaires et à la mesure de la longueur des canaux radiculaires dentaires. (25)

L'une des applications les plus courantes de l'IA en endodontie est l'automatisation de la mesure de la longueur des canaux radiculaires dentaires à partir d'images radiologiques. Les réseaux neuronaux artificiels peuvent être formés sur de grandes bases de données d'images radiologiques pour reconnaître les caractéristiques des canaux radiculaires dentaires et estimer leur longueur. Des études tel que la recherche de Ren Set al. (2021) intitulé Automatic measurement of root canal length from periapical radiographs using a deep learning model publié dans le Journal of Endodontics, ont montré que l'utilisation de réseaux neuronaux pour la mesure de la longueur des canaux radiculaires dentaires peut fournir des mesures précises et réduire les erreurs de mesure humaines. (47)

L'IA peut également être utilisée pour aider la planification du traitement endodontique en permettant la visualisation en 3D des structures dentaires. Les modèles dentaires en 3D peuvent être générés à partir d'images radiologiques et utilisés pour planifier les procédures de traitement endodontique. Cette technique peut aider à localiser les canaux radiculaires dentaires, à déterminer la forme et la taille des instruments endodontiques et à simuler les procédures d'obturation. (9)

En outre, l'IA peut être utilisée pour détecter les fractures radiculaires, qui peuvent être difficiles à identifier sur les images radiologiques conventionnelles. Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être formés pour reconnaître les caractéristiques des fractures radiculaires à partir d'images radiologiques et les signaler aux cliniciens. (39)

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en endodontie

Applications de l'IA en endodontie	Description
Planification du traitement	Les systèmes d'IA peuvent aider les endodontistes à planifier les traitements en analysant les images radiographiques pour détecter les anomalies et estimer la complexité du traitement.
Visualisation en 3D des structures dentaires	Les technologies de l'IA peuvent créer des modèles en 3D des structures dentaires à partir des images radiographiques, permettant aux endodontistes de visualiser les structures avec une grande précision.
Détection de fractures radiculaire	Les systèmes d'IA peuvent détecter les fractures radiculaire en analysant les images radiographiques pour identifier les anomalies dans les structures dentaires.
Mesure de la longueur des canaux radiculaire dentaire	Les technologies de l'IA peuvent aider à mesurer la longueur des canaux radiculaire dentaire avec une grande précision, en utilisant des algorithmes pour analyser les images radiographiques.

2.1.6. La prothèse

L'utilisation de l'intelligence artificielle en prothèse dentaire a révolutionné la manière dont les prothèses dentaires sont conçues et produites. Les avancées technologiques ont permis de développer des systèmes informatiques sophistiqués capables de traiter des images dentaires en 3D, d'analyser les données de manière rapide et précise et de créer des modèles de prothèses dentaires qui s'adaptent parfaitement à la morphologie du patient. (2)

L'un des avantages de l'utilisation de l'intelligence artificielle en prothèse dentaire est la rapidité de traitement des données. Les systèmes informatiques peuvent analyser des milliers d'images dentaires en quelques secondes, ce qui permet aux dentistes de gagner du temps dans la conception de la prothèse. De plus, les prothèses dentaires créées à l'aide de l'intelligence artificielle sont plus précises et plus adaptées à la morphologie du patient, ce qui permet d'améliorer considérablement le confort et la qualité de vie du patient. (10)

Une des applications les plus prometteuses de l'intelligence artificielle en prothèse dentaire est l'impression 3D de prothèses dentaires. L'utilisation de la technologie de l'impression 3D pour fabriquer des prothèses dentaires est déjà courante, mais l'intelligence artificielle peut améliorer le processus en fournissant des modèles plus précis et en réduisant le temps nécessaire à la conception et à la fabrication des prothèses. Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent également aider à détecter les erreurs et les anomalies dans les scans dentaires, permettant ainsi aux prothésistes dentaires de concevoir des prothèses plus précises et mieux adaptées aux besoins des patients. (26)

Les technologies d'IA peuvent être appliquées à différentes étapes du processus de fabrication des prothèses dentaires, notamment la numérisation, la conception assistée par ordinateur (CAO) et la fabrication assistée par ordinateur (FAO). Cela permet aux praticiens de fournir des prothèses dentaires de haute qualité, parfaitement adaptées aux besoins individuels de chaque patient, tout en réduisant les délais de traitement. De plus, les prothèses dentaires créées grâce à l'IA sont plus précises et

mieux adaptées à la morphologie du patient, ce qui permet d'améliorer considérablement le confort et la qualité de vie du patient. (10)

La première étape dans la fabrication d'une prothèse dentaire est la numérisation de la bouche du patient, réalisée à l'aide de scanners intraoraux pour obtenir une image tridimensionnelle. L'IA est utilisée pour traiter ces données de manière rapide et précise en utilisant des algorithmes pour identifier les zones spécifiques de la bouche où la prothèse doit être placée et les isoler avec précision.

Après la numérisation des données, la CAO permet aux concepteurs de prothèses dentaires de produire des modèles 3D de la prothèse. En utilisant l'IA, les designers peuvent bénéficier de suggestions de conception et automatiser certaines étapes du processus de conception. Cette étape offre également la possibilité de prévisualiser la prothèse avant la fabrication, permettant ainsi aux dentistes et aux patients de visualiser le produit fini à l'avance. L'IA est un outil précieux dans la conception de prothèses dentaires, car elle peut fournir des suggestions de conception et automatiser certaines étapes du processus de conception, tout en permettant aux dentistes et aux patients de visualiser le résultat final avant la fabrication.

Une fois le modèle CAO créé, la FAO est utilisée pour la fabrication de la prothèse, en utilisant des machines de fraisage et d'impression 3D. Grâce à l'IA, les processus de fraisage et d'impression sont optimisés pour réduire les temps de production et améliorer la précision de la fabrication, ce qui contribue à une meilleure qualité de la prothèse finale. (10)

Aussi, l'utilisation de l'intelligence artificielle pour l'analyse de la couleur des dents en prothèse dentaire est un domaine en pleine expansion. Les systèmes d'analyse de la couleur des dents utilisent généralement des caméras pour capturer des images de la denture du patient, puis ces images sont analysées à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique pour déterminer les paramètres de couleur et les teintes les plus appropriés pour la prothèse. Des logiciels basés sur l'intelligence artificielle tels que le Vita Easyshade et le ShadeVision sont souvent utilisés pour l'analyse de la couleur des dents en prothèse dentaire. Ces logiciels et permettent une analyse précise et rapide de la couleur des dents. (30)



Figure 15 VITA Easyshade V

Source : <https://www.dentaltix.com/fr/blog/comment-utiliser-guide-de-couleurs-vita-trouver-le-meilleur-composite-dentaire>

L'IA est également utilisée dans le domaine de la prothèse amovible à infrastructure métallique. Par exemple, le logiciel LUCY de la société Biotech Dental est disponible en ligne et gratuitement pour tous les clients prothésistes du centre de production et de formation Circle (Circle est un centre de production (circle4labs.com), mais aussi un centre de formation, d'accompagnement des laboratoires dans leurs développements, une hotline et un centre de Recherche et de développement)

Ce logiciel peut être utilisé sur diverses plateformes, telles que les ordinateurs portables, les tablettes et les smartphones fonctionnant sur Android ou iOS. LUCY utilise l'IA pour aider les prothésistes à concevoir des prothèses amovibles à infrastructure métallique en suggérant des solutions pour les problèmes de conception, en automatisant certaines étapes de la fabrication, en améliorant la précision des ajustements et en réduisant les temps de production. Cette utilisation de l'IA permet de faciliter le travail des prothésistes tout en offrant des résultats plus précis et efficaces pour les patients. (33)

Aujourd'hui, l'empreinte optique est considérée comme la méthode la plus adaptée pour l'enregistrement des muqueuses, car elle évite les zones de compression difficiles à contrôler lors de l'utilisation de l'empreinte physico-chimique traditionnelle.

Grâce à l'utilisation de l'empreinte optique pour l'enregistrement intermaxillaire, la précision est maximale, ce qui ouvre la possibilité d'une finition directe de la prothèse amovible

Récemment 3Shape a annoncé le lancement de son nouveau scanner intra-oral, la TRIOS 5 Wireless, le processus de nettoyage du scan de la camera optique a été automatisé à l'aide de l'intelligence artificielle (IA). Et maintenant, grâce à leurs nouvelles technologies de numérisation, la simplicité de la prise d'empreinte a atteint un niveau inédit. (17)



Figure 16 : la camera optique trios 5 Wireless
Source : <https://www.3shape.com/fr/software/engagement-apps>

L'interface Circle permet aux prothésistes, aux dentistes et aux patients d'accéder à une plateforme privée pour valider ensemble la modélisation de la prothèse.

Les ingénieurs travaillent actuellement sur l'intégration d'un logiciel qui permettra de dessiner un châssis en 2D sur les données de l'empreinte optique, ce qui indiquera instantanément les préparations nécessaires pour positionner les taquets et les coronoplasties en fonction de l'axe d'insertion à effectuer ou de la couronne à réaliser, en cas d'angulation trop importante.

Il est possible de choisir parmi trois techniques de dessin pour la prothèse : rigide, semi-amortie et amortie. Après avoir préparé la bouche lors d'une même séance, il suffit de re-scanner uniquement les zones qui ont subi des modifications, ce qui permet de gagner beaucoup de temps. Le prothésiste réalise ensuite la modélisation du châssis à l'aide d'un logiciel tel que Partial Dental Wings Photo (tout logiciel de modélisation peut être utilisé), puis exporte les fichiers de scan en les intégrant sur le portail Circle. Grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle et à la collecte de données par LUCY, le prothésiste est informé de la disponibilité du projet, ce qui lui permet de personnaliser le montage et d'ajuster la prothèse en cinq étapes.

Circle produit ensuite le châssis, les dents sur mesure par usinage (avec choix total du matériau) et le moule qui sera utilisé pour l'assemblage final. En résumé, les chirurgiens-dentistes prennent les empreintes, lesquelles sont ensuite envoyées aux prothésistes dentaires pour réaliser les designs. Circle, qui dispose d'une plateforme commune, fabrique toutes les pièces dans son centre de production. Cette plateforme permet également au dentiste, au prothésiste et au patient de valider toutes les prothèses avant leur mise en production, assurant ainsi une meilleure qualité et une plus grande satisfaction des parties impliquées dans le processus. (33)

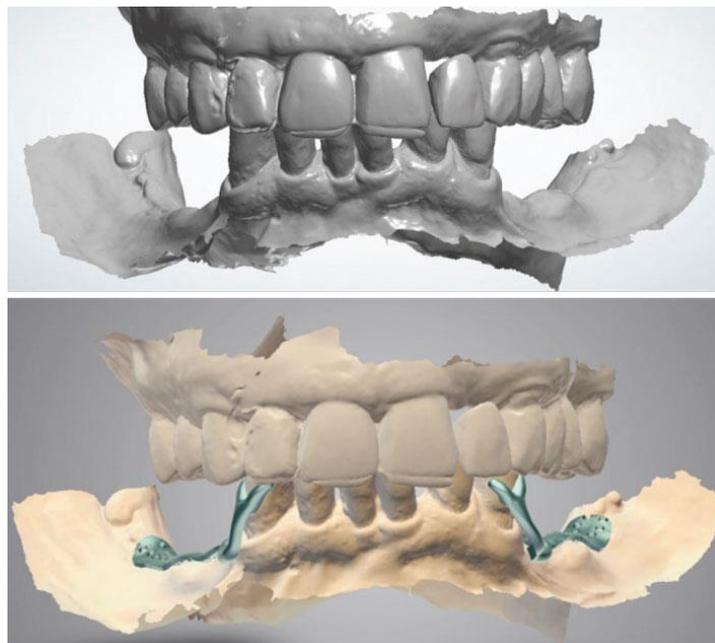


Figure17 : modélisation du châssis avec le logiciel Partial Dental Wings Photo
Par Dr Olivia Kenck et Christophe Sireix le 17 juillet 2018
<https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/lorsque-l-intelligence-artificielle-revolutionne-le-monde-de-la-dentisterie/>

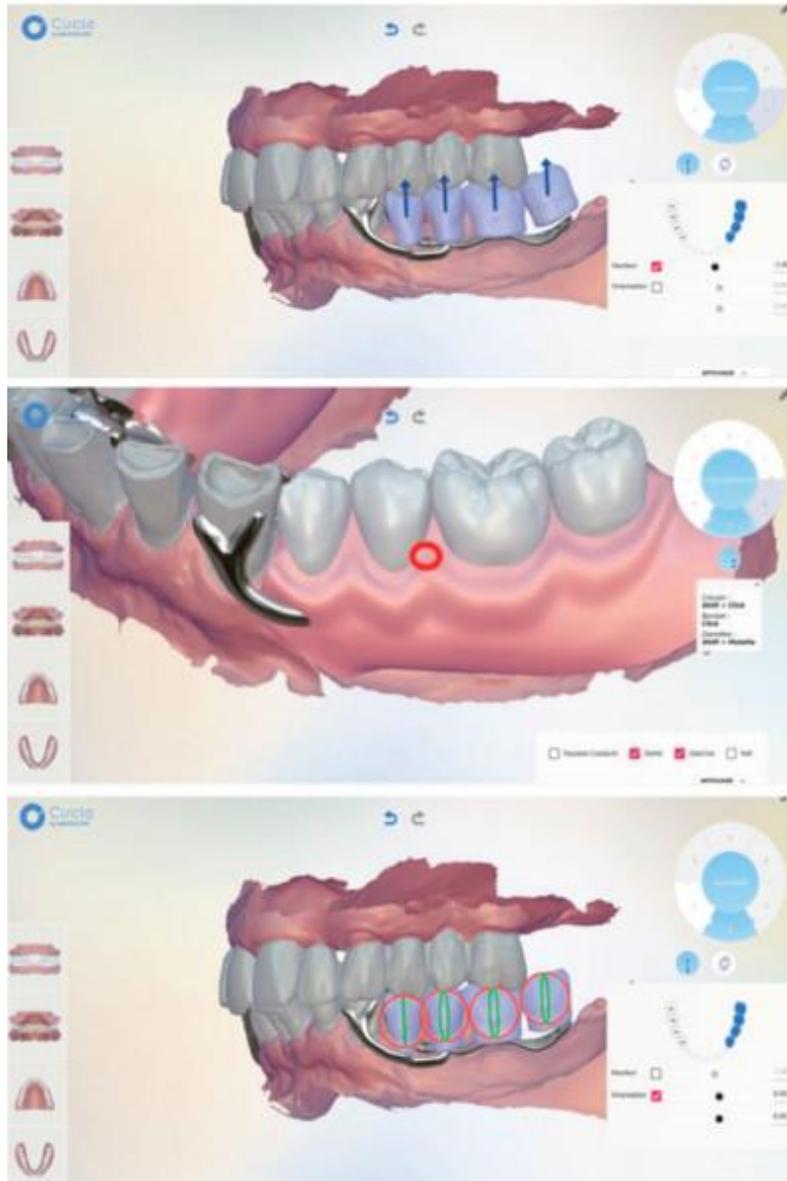


Figure 18 : Personnalisation du montage et réglage de la prothèse avec le logiciel Lucy
Par Dr Olivia Kenck et Christophe Sireix le 17 juillet 2018
<https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/lorsque-l-intelligence-artificielle-revolutionne-le-monde-de-la-dentisterie/>

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en prothèse dentaire

Application de l'AI en prothèse	Description	Logiciels
Conception assistée par ordinateur (CAO)	Utilisation de logiciels pour concevoir des prothèses dentaires en 3D	3Shape Dental System, exocad DentalCAD
Fabrication assistée par ordinateur (FAO)	Utilisation de machines à commande numérique pour fabriquer des prothèses dentaires à partir des modèles 3D	Roland DWX-52DC, Amann Girrbach Ceramill Motion 2, Lucy
Analyse de l'occlusion	Utilisation de logiciels pour analyser la relation entre les dents supérieures et inférieures et ajuster les prothèses en conséquence	T-Scan, Artex
Analyse de la couleur des dents	Précision et harmonie des couleurs dans les prothèses	Vita Easyshade, ShadeVision
Simulation	Modélisation numérique pour prédire les résultats	ANSYS, Abaqus, Simulia

2.1.7. La chirurgie orale

L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée en chirurgie orale pour aider les chirurgiens à planifier et à effectuer des interventions chirurgicales de manière plus efficace et plus précise. (53) Une des principales utilisations de l'IA en chirurgie orale est la planification préopératoire. En utilisant des modèles 3D, les chirurgiens peuvent simuler les interventions chirurgicales et planifier la meilleure stratégie pour chaque patient. Les systèmes de navigation guidée utilisent des images radiographiques du patient pour créer des modèles 3D précis de la structure anatomique. Les chirurgiens peuvent ensuite utiliser ces modèles pour planifier avec précision les incisions, les mouvements de tissus et les emplacements d'implants. L'IA est utilisée pour aider les chirurgiens à suivre les plans préopératoires en temps réel pendant la procédure chirurgicale, en utilisant des informations telles que la position des instruments et la position du patient. (3)



Figure19 : planification implantaire avec le logiciel implant studio de 3 Shape
Source : <https://www.medicalexpo.fr/prod/3shape/product-71366-674044.html>

L'IA est également utile pour la navigation intraopératoire. Elle permet aux chirurgiens de suivre avec précision les instruments lors de la procédure, garantissant ainsi un positionnement précis des implants et une réduction des complications potentielles. Cette méthode permet également d'éviter les erreurs liées à la perte de repères spatiaux, ce qui peut survenir lors de procédures complexes.(21).

Elle est aussi utilisée pour l'évaluation de la densité osseuse, en effet, elle permet aux chirurgiens de déterminer avec précision la densité osseuse locale et de planifier la procédure en conséquence. Les outils d'IA sont capables de produire des cartes de densité osseuse à partir de scans CT, permettant aux chirurgiens de déterminer les zones d'os de faible densité et de planifier la procédure en conséquence. (36)

L'un des systèmes de navigation guidée les plus prometteurs est le système X-Guide, qui utilise une technologie de navigation dynamique pour guider les chirurgiens pendant les procédures chirurgicales. Le système X-Guide utilise des capteurs optiques pour suivre les mouvements de la main du chirurgien et affiche les informations de navigation en temps réel sur un écran d'affichage (34). Le système X-Guide a été utilisé avec succès dans une variété de procédures chirurgicales, notamment l'extraction de dents de sagesse, l'implantologie dentaire et la chirurgie orthognathique.(58) Les avantages de ce système comprennent une précision accrue, une réduction du temps d'opération et une réduction des complications postopératoires. (43)



Figure 20 : forage implantaire guidé par les informations figurant sur l'écran avec le système xguide

Source :

<https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/chirurgie-assistee-par-ordinateur-la-navigation-dynamique-systeme-x-guide>

De plus, la réalité augmentée est également utilisée pour aider les chirurgiens à planifier les interventions chirurgicales. Les images 3D et les modèles anatomiques virtuels sont superposés sur le champ opératoire en temps réel, offrant une vue améliorée de la structure anatomique du patient. Cette technologie permet également une formation améliorée pour les chirurgiens novices, en leur offrant une meilleure compréhension de l'anatomie dentaire. (3)



Figure 21 utilisation de la réalité augmentée lors d'une chirurgie

Source : <https://cordis.europa.eu/article/id/429639-augmented-reality-advances-surgical-procedures>

L'IA peut aussi être utilisée pour améliorer la communication et la collaboration entre les professionnels de santé. Les applications de réalité virtuelle peuvent permettre aux chirurgiens de simuler des interventions chirurgicales en temps réel et de collaborer à distance avec d'autres professionnels de la santé pour discuter des cas difficiles. (37)

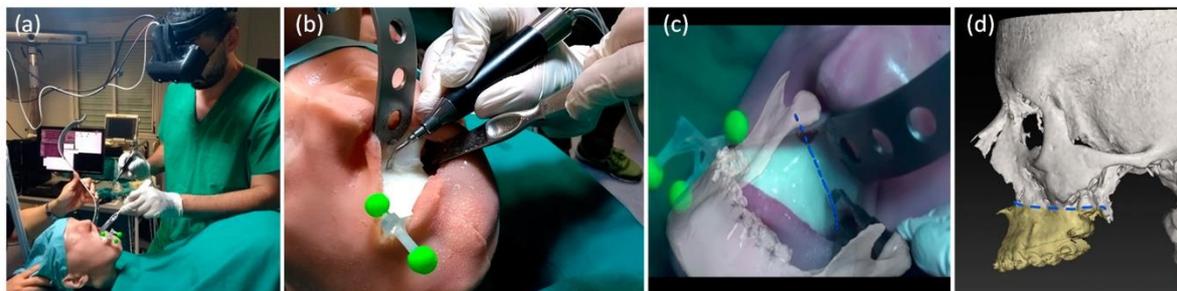


Figure 22 : réalisation de l'ostéotomie de Le Fort 1 sous guidage VOSTARS (a,b), c'est-à-dire en suivant la ligne d'ostéotomie virtuelle affichée (c) issue de la planification chirurgicale préopératoire. D'après : Pedretti A, Galli P, Maffioli D, Biglioli F, Elia G, Marchetti C, et coll. The Wearable VOSTARS System for Augmented Reality-Guided Surgery: Preclinical Phantom Evaluation for High-Precision Maxillofacial Tasks. J Oral Maxillofac Surg. 2020.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des applications de l'IA en chirurgie Orale

Application de l'AI en chirurgie orale	Description	Exemples de technologies
Planification préopératoire	L'IA est utilisée pour aider à planifier les interventions chirurgicales, en fournissant des images en 3D des structures anatomiques, en identifiant les zones à risque et en élaborant des plans de traitement personnalisés. Cela permet une précision accrue et une réduction des complications chirurgicales.	SimPlant, Blue Sky Plan, OnDemand3D
Navigation intraopératoire	L'IA est utilisée pour guider les chirurgiens pendant les interventions, en utilisant des images en temps réel pour aider à identifier les structures anatomiques et à éviter les erreurs. Cela permet une précision accrue et une réduction des complications chirurgicales.	X-Guide, Navident,
Réalité augmentée	L'IA est utilisée pour superposer des images virtuelles sur les images en temps réel de la zone chirurgicale, permettant ainsi aux chirurgiens de visualiser les structures anatomiques et les instruments chirurgicaux en temps réel. Cela permet une précision accrue et une réduction des complications chirurgicales.	DentSim,
Réalité virtuelle	L'IA est utilisée pour créer des environnements virtuels pour la formation et la simulation chirurgicale. Cela permet aux chirurgiens de pratiquer des techniques chirurgicales complexes dans un environnement sans risque, ce qui peut améliorer les résultats chirurgicaux.	CAE Healthcare, Osso VR, VirtaMed

2.2. Les enjeux de l'intelligence artificielle en médecine bucco-dentaire

2.2.1. La relation patient-praticien (5) (57)

L'intelligence artificielle (IA) est en train de révolutionner la pratique de la chirurgie dentaire, offrant de nouvelles possibilités pour les praticiens et les patients.

En effet, l'IA peut être utilisée pour améliorer la communication entre les patients et les praticiens. Les *chatbots** alimentés par l'IA et les assistants virtuels peuvent répondre aux questions des patients sur les traitements et les procédures. Les patients peuvent ainsi se sentir plus impliqués dans leur propre traitement et avoir plus confiance dans le processus de traitement et réduire leurs anxiétés avant les interventions chirurgicales.

Grâce aux outils numériques, les dentistes peuvent montrer à leurs patients des images 3D de leur bouche et leur expliquer les traitements nécessaires de manière plus claire et précise. Les patients peuvent mieux comprendre les enjeux de leur santé bucco-dentaire, ce qui les encourage à prendre en charge leur santé de manière proactive. Cette transparence et cette communication renforcée contribuent à instaurer une relation de confiance entre les patients et les dentistes, qui est essentielle pour garantir une expérience de soins de qualité.

Les systèmes de rappel automatisés peuvent également aider à rappeler aux patients les rendez-vous de suivi, ce qui peut réduire le taux d'absentéisme et améliorer les résultats du traitement.

Cependant, son utilisation soulève également des questions importantes sur la relation patient-praticien. Certains patients peuvent se sentir mal à l'aise avec l'utilisation de l'IA dans leur traitement dentaire, craignant que cela ne réduise l'implication personnelle de leur praticien. Il est important que les chirurgiens-dentistes prennent le temps d'expliquer aux patients comment l'IA est utilisée dans leur traitement et comment cela peut améliorer leur santé dentaire. De même, il est essentiel que les praticiens travaillent en étroite collaboration avec leurs patients pour comprendre leurs besoins et leurs préférences en matière de soins dentaires, et pour

s'assurer que l'utilisation de l'IA est intégrée dans une approche globale et personnalisée de la prise en charge des patients.

L'IA ne doit être qu'un outil pour améliorer les soins. La relation entre le praticien et le patient est un élément crucial du processus de guérison et doit être maintenue.

On peut citer comme exemple, l'application allisone, cette dernière donne la possibilité au praticien d'envoyer un mail au patient contenant des informations détaillée sur son plan de traitement ainsi que des fiches pédagogiques contenant des définitions simples et vulgarisées permettant au patient de mieux comprendre son plan de traitement.

*Un chabot, également appelé agent conversationnel ou assistant virtuel, est un programme informatique conçu pour simuler une conversation humaine, en utilisant des techniques d'intelligence artificielle et de traitement du langage naturel. Les chatbots peuvent être utilisés pour répondre aux questions des utilisateurs, fournir des informations, offrir un support technique, ou même pour divertir les utilisateurs

La carie simplement

Définition

La carie est une dégradation de l'émail pouvant être liée à de l'acide ou des sucres.

Signe d'une carie

Douleur au chaud et/ou au froid.

Stades d'évolution

Une carie atteint d'abord l'émail. Si la carie n'est pas traitée, elle va atteindre ensuite la dentine. Si elle n'est toujours pas traitée, la carie atteint la pulpe, donc le nerf de la dent, et entraîne une rage de dent



Traitements



Inlay ou restauration

2.2.2. L'éthique et la sécurisation des données

L'utilisation de l'IA en odontologie doit être encadrée par une éthique rigoureuse pour garantir la sécurité et la confidentialité des données des patients. Les données collectées lors des examens dentaires et des traitements peuvent inclure des informations sensibles telles que des antécédents médicaux, des radiographies et des images de la bouche et des dents. Il est donc essentiel que ces données soient stockées et utilisées de manière sécurisée et confidentielle de préférence dans des serveurs protégés par mot de passe et cryptés pour éviter toute violation de sécurité. Les dentistes doivent utiliser des logiciels de sécurité pour protéger les données des patients. Des programmes tels que les pare-feux, les antivirus et les outils de détection d'intrusion peuvent aider à prévenir les violations de sécurité. Des lois telles que la Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques (LPRPDE) et le Règlement général sur la protection des données (RGPD) doivent être respectées pour garantir la confidentialité et la sécurité des données des patients. (59)

Un autre enjeu éthique important est la responsabilité des professionnels de la dentisterie qui utilisent l'IA. Les dentistes et les professionnels de la santé doivent être en mesure de garantir que l'utilisation de l'IA ne porte pas préjudice aux patients. Cela implique de comprendre les limites et les avantages de l'IA, ainsi que de prendre des mesures pour éviter les erreurs et les inexactitudes. (35)

Un troisième enjeu éthique est le biais potentiel de l'IA en dentisterie. En effet. Les algorithmes d'IA utilisent souvent des données historiques pour apprendre et prendre des décisions. Cependant, si ces données historiques contiennent des biais, ces biais peuvent être amplifiés par l'IA, entraînant des décisions injustes ou discriminatoires (45). Voici quelques exemples de biais potentiel dans l'utilisation de l'IA en dentisterie :

Biais algorithmique : Ces biais peuvent se produire pour différentes raisons, notamment en raison de la qualité des données d'entraînement, de l'utilisation de modèles statistiques mal conçus ou de l'absence de diversité dans l'échantillon de données. Par exemple, un modèle de recrutement basé sur l'IA pourrait reproduire les

préjugés existants en matière de genre ou de race, si les données d'entraînement utilisées ne sont pas suffisamment diversifiées.

Biais de sélection des échantillons : Les données d'entraînement de l'IA doivent être représentatives de la population globale. Cependant, si les échantillons utilisés pour l'entraînement de l'IA sont biaisés en termes de genre, d'âge ou d'autres caractéristiques, cela peut entraîner des biais dans les décisions prises par l'IA.

Biais de diagnostic : L'IA peut également avoir des biais de diagnostic. Par exemple, une étude a montré que les algorithmes d'IA utilisés pour diagnostiquer les caries dentaires étaient plus précis pour les dents antérieures que pour les dents postérieures. Cela peut être dû à des différences dans la qualité de l'image ou à des différences dans la présentation des caries entre les dents antérieures et postérieures.

Biais en matière de traitements : L'IA peut également être biaisée en termes de recommandation de traitements. Par exemple, si les données utilisées pour l'entraînement de l'IA montrent que certains traitements sont plus courants pour certains groupes de patients, l'IA peut recommander ces traitements de manière disproportionnée pour ces groupes de patients.

Il est donc important de surveiller et de limiter les biais dans l'utilisation de l'IA en dentisterie pour éviter des décisions injustes ou discriminatoires pour les patients. (42)

En outre, l'utilisation de l'IA en dentisterie soulève également des questions de consentement éclairé. Les patients doivent être informés de l'utilisation de l'IA dans leur traitement et doivent donner leur consentement éclairé avant que leurs données ne soient collectées et utilisées. Les professionnels de la dentisterie doivent donc être en mesure d'expliquer clairement les avantages et les limites de l'IA aux patients. (35)

3. Panorama des applications de l'IA du secteur dentaire sur le marché international (53)

3.1. Pearlii

Pearlii est un exemple parfait d'application dentaire alimentée par l'IA. Son objectif est d'améliorer la santé bucco-dentaire de tous. À cet égard, Pearlii propose une solution d'examen dentaire gratuit. Ceci est rendu possible grâce à de simples caméras de smartphone. Cette application exploitant l'IA utilise l'apprentissage automatique pour évaluer les problèmes de santé dentaire tels que la gingivite et la carie dentaire. Il fournit ensuite aux utilisateurs des résultats personnalisés ainsi que des suggestions de soins dentaires appropriés pour améliorer la santé dentaire globale et éviter que les problèmes existants ne s'aggravent. L'application est actuellement disponible pour Android et sera bientôt disponible pour les appareils iOS.



Figure 23 :l' application pearlii (78)

D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

<https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire/>

3.2. VideHealth

VideaHealth est une application d'IA très prisée aux États-Unis qui utilise la technologie d'apprentissage automatique pour permettre un diagnostic plus précis des maladies dentaires. Son service de reconnaissance d'images aide les praticiens à gérer leur flux de travail et leur charge de travail, ce qui est particulièrement bénéfique pour les personnes vivant dans des zones éloignées où l'accès aux soins dentaires est limité.

3.3. Denti.AI

Denti.AI utilise une approche automatisée d'analyse radiographique en dentisterie qui permet de détecter plus de 30 % de pathologies potentielles supplémentaires par rapport à une observation manuelle du praticien. Cette performance est rendue possible grâce à l'utilisation de réseaux neuronaux profonds, qui sont entraînés sur une grande quantité d'images radiographiques dentaires. En seulement 4 secondes, l'application est capable de détecter les pathologies probables, de créer un diagramme et de mettre en évidence les résultats sur l'image. Les résultats sont ensuite traités pour générer un rapport de présentation détaillé qui peut être exporté. En conséquence, Denti.ai aide les praticiens à améliorer la qualité de leurs diagnostics, à gagner du temps et à accroître leur rentabilité, offrant ainsi une solution efficace pour une meilleure prise en charge des patients en dentisterie.



Figure 24 : Le logiciel Denti.ai
D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

<https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire/>

3.4. DentalMonitoring

DentalMonitoring apporte des solutions qui réinventent l'expérience patient et praticien à travers la pratique professionnelle virtuelle d'un orthodontiste, dans le but de contribuer au développement d'une pratique dentaire élargie et de maximiser l'efficacité des traitements orthodontiques créés. Leur service permet le recrutement de nouveaux patients, le suivi des soins et le suivi dentaire à distance des traitements assignés. Il permet aux professionnels de s'engager avec les patients de nouvelles façons en utilisant des analyses cliniques automatisées alimentées par l'IA, des appels vocaux et vidéo intégrés dans l'application, une plate-forme de messagerie bidirectionnelle et la planification des rendez-vous. Les services sont disponibles pour iPhone, Android, Mac, Windows et iPad.



Figure 25 :scan box de dentalmonitoring

D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

<https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire>

3.5. TeleDentists

TeleDentists est une plateforme qui offre des services dentaires à distance disponibles 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. En réponse à la pénurie de dentistes, TeleDentists a créé une solution de consultation rapide pour les urgences dentaires et la douleur. Cette solution utilise l'IA et des chatbots pour évaluer les symptômes des patients et les orienter vers les professionnels de santé appropriés en fonction des soins nécessaires. La plateforme facilite ainsi la mise en relation entre les patients et les dentistes, permettant un accès plus facile aux soins.

3.6. Toothscan

Toothscan est une *startup* qui révolutionne l'hygiène dentaire grâce à une innovation technologique : un scanner intelligent combinant l'IA et l'Internet des Objets idO (qui est un réseau de différents objets physiques tels que des appareils électroniques, des véhicules, des bâtiments et bien d'autres encore, qui sont connectés à Internet et échangent des informations entre eux. Cela permet de créer un système intelligent et autonome qui peut être utilisé pour surveiller, analyser et contrôler différents systèmes.). (4)

Cette application mobile innovante est conçue pour fonctionner en tandem avec un scanner dentaire, De la taille d'une brosse à dents, cet appareil novateur permet de surveiller et d'analyser la santé dentaire de ses utilisateurs. Le système utilise la spectrométrie et émet une lumière puissante qui est réfléchiée sur la surface des dents. Les réflexions sont mesurées et interprétées par le logiciel pour détecter d'éventuelles maladies dentaires. L'application fournit des conseils personnalisés en temps réel, basés sur l'analyse clinique établie par l'appareil.



Figure 26 :L' application Tooth scan
D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

<https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire/>

3.7. Beam Dental

Beam Dental est une la première compagnie d'assurance dentaire numérique innovante qui utilise l'Internet des Objets pour encourager les membres de sa communauté à maintenir une bonne hygiène dentaire en ajustant leur tarification. Leur plateforme d'assurance en ligne utilise l'IA pour l'inscription et est associée à une brosse à dents intelligente, la Beam Brush. Cette brosse à dents est synchronisée avec une application qui permet à l'entreprise d'évaluer la régularité avec laquelle les utilisateurs maintiennent leur santé dentaire. Les membres peuvent ainsi bénéficier d'économies sur leurs primes mensuelles en fonction de leur niveau d'hygiène dentaire.



Figure 27 : Le kit beam dental

D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

<https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire/>

3.8. Smart Mouth Guard

Smart Mouth Guard est une application liée à IdO qui permet de lutter contre le bruxisme. Cette application utilise des capteurs pour détecter les zones des dents les plus touchées. Grâce à ces données, le dentiste peut élaborer des plans de traitement et de restauration efficaces pour aider les patients à résoudre leurs problèmes de bruxisme.

3.9 IoT Diet Wearable

Des scientifiques de l'Université Tufts ont développé l'IoT Diet Wearable dans le but d'étendre les mesures préventives en dentisterie. Ce dispositif est un capteur qui peut être fixé sur une dent pour suivre le régime alimentaire de l'utilisateur, y compris la consommation de glucose, de sel et d'alcool. Le capteur analyse les changements chimiques détectés dans la bouche et communique sans fil avec un appareil mobile. Cette innovation pourrait être utile pour prévenir l'aggravation des caries dentaires en aidant les utilisateurs à maintenir une alimentation saine et équilibrée.

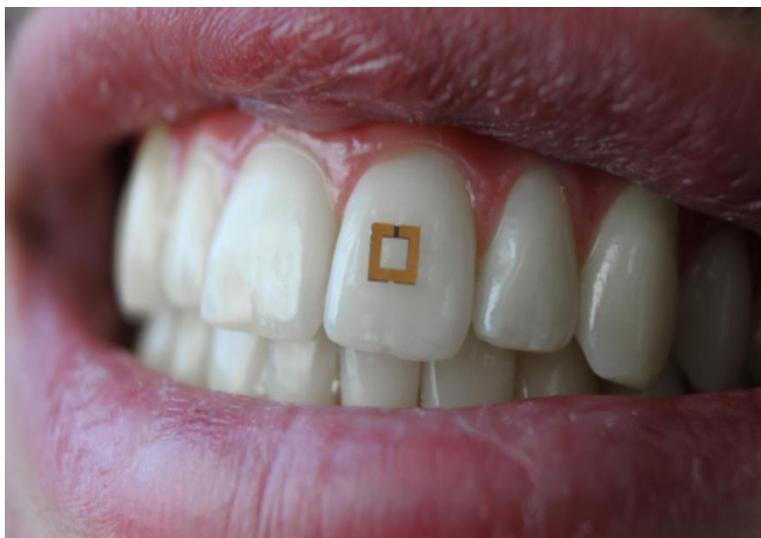


Figure 28 :Le capteur IoT Diet Wearable

D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

<https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire/>

3.10. Le Smart Dental Implant

Le Smart Dental Implant est un système d'implant dentaire cyber physique (système intelligent qui combine des capteurs, des actionneurs, des algorithmes de traitement de données et des logiciels pour surveiller et contrôler des processus physiques en temps réel) conçu pour améliorer la qualité de vie des patients et leur santé en général. Ce dispositif permet de récupérer des données émises par un capteur intégré dans l'implant du patient, telles que le taux d'ostéointégration de l'implant. Les signaux sont enregistrés sur une application mobile pour faciliter l'évaluation de l'évolution de la mobilité des implants et pour détecter rapidement toute défaillance. Cette solution est

particulièrement utile pour les patients ayant des problèmes de santé affectant leurs os ou ayant reçu un traitement contre le cancer, offrant ainsi une option de traitement révolutionnaire.

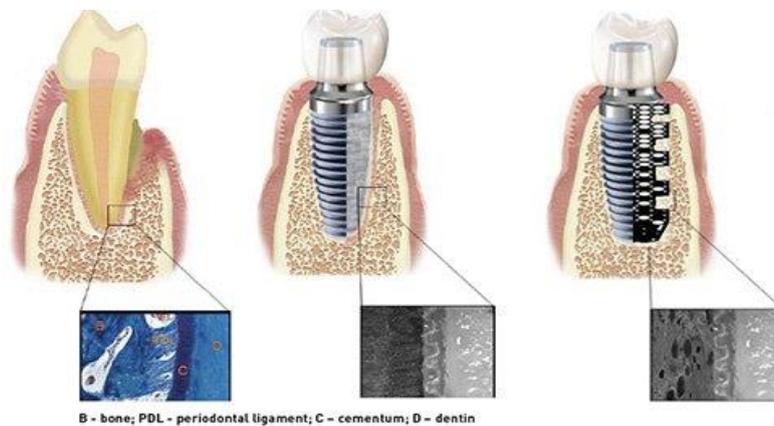


Figure 29 ; smartdental implant

D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

<https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire/>

3.11. Neocis

La *startup* Neocis a développé le robot Yomi pour assister les chirurgies d'implants dentaires. Ce robot a pour fonction de suivre les patients, de gérer les traitements et d'aider les dentistes à être plus précis dans le traitement des soins implantaires. La robotique continue d'évoluer en dentisterie, et l'objectif est que les robots puissent à l'avenir effectuer des procédures complètes en toute autonomie, ce qui permettrait de minimiser les erreurs médicales à long terme (13)



Figure 30 : Le robot Yomi

D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

<https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire/>

3.12. Diagnocat

Diagnocat utilise l'intelligence artificielle pour aider les dentistes à améliorer leur processus décisionnel en matière de soins dentaires. En collectant et stockant les données des patients, cette solution permet aux dentistes d'obtenir une vue complète de leur santé dentaire en analysant les images dentaires et en identifiant les conditions et anomalies pertinentes. Grâce à ces informations, Diagnocat sert d'assistant personnel dentaire pour aider les dentistes à fournir un avis médical complet et éclairé à leurs patients.

3.13. Spotimplant.com

Spotimplant.com est un site web destiné aux dentistes, développé par un implantologue et une équipe d'experts en intelligence artificielle (IA), afin de faciliter la traçabilité des implants dentaires. Grâce à un système d'identification automatique basé sur l'IA, les praticiens peuvent télécharger une radiographie d'implant et recevoir un rapport d'identification complet contenant une liste des implants les plus probables de correspondre à celui de la radiographie. Spotimplant fournit également les informations nécessaires pour commander les pièces compatibles avec le système implantaire identifié, telles que la référence exacte, les caractéristiques techniques, les dimensions et les catalogues du fabricant. En outre, Spotimplant dispose d'un moteur

de recherche d'implants en libre accès sur son site internet, qui référence déjà plus de 300 marques et 3500 modèles, ce qui en fait la plus grande base de données d'implants au monde.

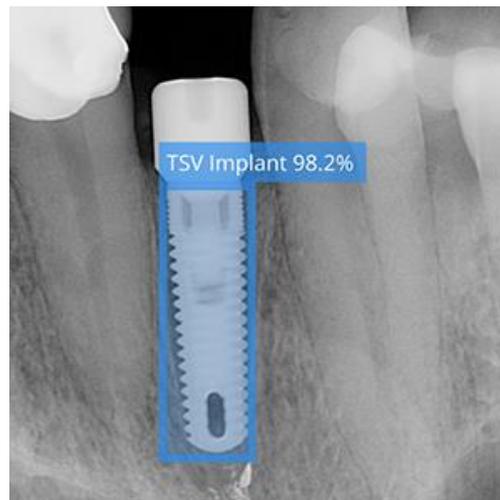


Figure 31 : Implant tsv reconnu par le logiciel spotimplant
D'après blog spotimplant : 19 avril 2021

3.14. TOOTY VR

La jeune entreprise TOOTY VR® a vu le jour à Cannes en Octobre 2018, suite à l'initiative d'un Chirurgien-Dentiste. Spécialisée dans la réalité virtuelle (VR) en 3D, elle vient de lancer la première application de services en ligne destinée aux dentistes et à leurs patients. Pour ce faire, TOOTY VR® s'appuie sur des ingénieurs, des développeurs web, des spécialistes en 3D et VR. L'application offre plusieurs fonctionnalités, dont la visualisation de scans dentaires et de modèles dentaires de démonstration, ainsi que la possibilité pour les patients de se détendre durant les soins dentaires. (11)



Figure 32 :Le casque de réalité virtuelle Tooty

Source : <https://www.dentisfuturis.com/la-startup-francaise-tooty-vr-fait-entrer-la-realite-virtuelle-au-cabinet-dentaire/>

4. L'intelligence artificielle en évolution dans les cabinets dentaires en France

4.1. La situation actuelle

L'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) en chirurgie dentaire est en constante progression en France. En effet, de nombreux dentistes français utilisent déjà l'IA pour améliorer la qualité des soins et optimiser leurs interventions chirurgicales. Cependant, les chirurgiens-dentistes français n'ont pas à s'inquiéter, à court-terme, d'être remplacé par des robots. En réalité, la France n'est pas encore prête à accepter que les chirurgiens-dentistes soient cantonnés à un rôle de prévention, laissant l'intelligence artificielle et la robotique prendre en charge les patients.

Les autorités sanitaires freinent les tendances qui mènent à la dépersonnalisation des soins médicaux, une pratique que d'autres pays ont déjà adoptée, mais qui est rejetée par ceux-ci. Les autorités publiques sont d'avis que le dentiste doit demeurer le seul responsable en matière de santé bucco-dentaire, bien que les progrès techniques ne doivent pas être ignorés ou supprimés. (14)

Depuis septembre 2018, un robot patient doté de plus de 200 capteurs est utilisé par les étudiants en chirurgie dentaire à la faculté de Strasbourg pour s'exercer dans des conditions proches de la réalité. Cette technologie devrait finalement être accessible à tous les futurs dentistes en France. Par conséquent, la France a adopté une approche équilibrée en ce qui concerne la robotisation dans le domaine de la santé, préservant le statut de professionnel de santé pour l'ensemble des chirurgiens-dentistes français. (55)



Figure 33 : robot patient de la faculté d'odontologie de Strasbourg.
Source https://www.sciencesetavenir.fr/sante/os-et-muscles/un-mannequin-qui-saigne-et-crie-pour-former-les-dentistes_127991

4.2. L'avenir

Le samedi 23 septembre 2017, dans la province de Shanxi en Chine, un robot a réussi à réaliser une chirurgie dentaire complète sur un patient sans aucune intervention humaine. La machine a posé avec succès deux implants dentaires avec une grande précision, effectuant l'opération délicate au millimètre près.(12)

Le robot-dentiste a utilisé la modélisation en 3D pour planifier les implants qu'il a ensuite posé dans la bouche de sa patiente. Grâce à sa grande habileté à naviguer dans l'espace restreint de la cavité buccale, le robot a pu s'adapter aux mouvements, même minimes, de la patiente. (12)



Figure 34 : Un robot dentiste posant deux implants

Source : <https://www.dentisfuturis.com/en-chine-un-robot-dentiste-a-effectue-une-premiere-chirurgie-dimplants-de-maniere-autonome-en-fixant-deux-nouvelles-dents-a-une-femme-ont-rapporte-plusieurs-medias-meme-si-des-membres-du-p/>

Bien que la Chine soit le premier pays à autoriser l'utilisation exclusive des robots pour effectuer des opérations dentaires, de nombreux pays ont déjà accepté leur utilisation en tant qu'assistants chirurgicaux, comme le robot Yomi actuellement en activité aux États-Unis. Yomi est un dispositif chirurgical assisté par robot développé par la start-up de santé Neocis. En 2016, la FDA a accordé l'autorisation d'utilisation de ce dispositif pour les procédures d'implants dentaires générales, et en

2020, pour les procédures d'implants dentaires à arcade complète. Depuis sa création, Yomi est devenu de plus en plus populaire, et le fabricant a récemment annoncé que plus de 10 000 implants dentaires avaient déjà été posés avec l'aide de cette plateforme robotique dentaire par des cliniciens. (15)



Figure 35 : Le robot Neosis

Source : <https://www.dentaire365.fr/clinique/numerique/implantologie-un-robot-pour-assister-les-dentistes-americains/>

L'avenir de l'utilisation de l'IA en dentisterie semble très prometteur. Les progrès dans les domaines de l'imagerie, de la simulation et des outils de diagnostic permettent d'améliorer considérablement la qualité des soins dentaires. Cependant, il est important de noter que l'IA ne remplacera jamais les professionnels de la santé dentaire. Les robots-dentistes ne peuvent pas remplacer l'expertise et la sensibilité humaines, mais peuvent plutôt les compléter et améliorer les résultats des interventions chirurgicales.

Conclusion

L'intelligence artificielle est en train de révolutionner la pratique de la dentisterie moderne, elle offre de nombreuses applications prometteuses tels que allisone , visident, Denti.AI pour améliorer la précision des diagnostics, optimiser la planification et la réalisation des interventions, et offrir aux patients une expérience plus sûre et plus personnalisée.

En particulier, l'imagerie radiologique et la prothèse dentaire et la chirurgie orales sont des domaines clés de l'odontologie qui peuvent bénéficier grandement des avantages de l'IA. L'analyse des images radiologiques à l'aide de techniques d'apprentissage automatique peut permettre une détection précoce des caries, des fractures dentaires et des lésions kystiques, ainsi qu'une analyse plus fine de la structure parodontale et une optimisation de la qualité d'image. En outre, l'utilisation de la CAO/FAO en prothèse dentaire assistée par ordinateur peut améliorer la rapidité et la précision de la conception et de la fabrication de prothèses dentaires personnalisées. En chirurgie orale, l'IA a été utilisée pour la planification des interventions chirurgicales, en analysant les images radiographiques pour fournir des informations précises sur la position et la taille des dents, des os et des nerfs. L'IA a également été utilisée pour la fabrication de guides chirurgicaux sur mesure permettent une meilleure planification préopératoire et une exécution plus précise des procédures chirurgicales.

Bien que les progrès dans ce domaine soient extrêmement prometteurs, il est également important de prendre en compte les limites de l'IA en odontologie. En particulier, l'IA ne doit jamais remplacer l'expertise et la sensibilité cliniques humaines, qui sont des éléments essentiels pour établir un diagnostic précis et personnalisé. Il est également important de considérer les problèmes d'éthique et de confidentialité liée à l'utilisation des données des patients dans l'IA.

En fin de compte, il est clair que l'IA en chirurgie dentaire a le potentiel de transformer radicalement la pratique de l'odontologie. Cependant, il est essentiel que les professionnels de l'odontologie continuent de travailler en étroite collaboration avec les développeurs de technologies d'IA pour assurer une intégration judicieuse et éthique de ces outils dans la pratique clinique. Avec une telle collaboration, l'avenir de l'IA en chirurgie dentaire est très prometteur.

Références bibliographiques :

1-Ahmed N, Abbasi M, Zuberi F, Qamar W, Bin Halim M, Maqsood A, et coll. Artificial Intelligence Techniques: Analysis, Application, and Outcome in Dentistry: A Systematic Review. *Biomed Res Int.* 2021 ; 9751564.

2-Alghamdi HS, Khurshid Z. Applications of artificial intelligence in prosthodontics: A literature review. *Saudi Dent J.* 2020; 32(2): 73-81.

3-Almeida-Leite CM, De Nardi AB. Augmented reality in oral and maxillofacial surgery. *Oral Maxillofac Surg.* 2021; 25(1): 1-8.

4-Atzori L, Iera A, Morabito G. Internet of Things: Review and open research issues. *Int J Comput Sci Netw Secur.* 2017; 17(8): 1-13.

5- Banerjee A, Banerjee R, Singh A. Artificial intelligence in dentistry: hype or reality? *J Family Med Prim Care.* 2019; 8(4): 1299-1304.

6- Breton O, Leclercq P. Apport du numérique en orthodontie. *Orthod Fr.* 2021 ; 92(1) : 1-8.

7-Canal P. L'orthodontie à l'ère de l'intelligence artificielle. *Rev Orthop Dento Faciale.* 2019 ; 53(2) : 143-8.

8-Chae H, Kang H, Kim J. Factors affecting dentists' adoption of electronic dental records in South Korea. *BMC Med Inform Decis Mak.* 2016; 16(1): 1-10.

9- Chen H, Yang J, Zhang J, Zhang Y, Li J, Chen X. A review of artificial intelligence applications in endodontics. *J Endod.* 2019 ;45(12):1415-21.

10-Chen C, et al. Accuracy and Efficiency of Digital Impressions for Full-Arch Restorations: A Systematic Review. *J Prosthodont.* 2020; 29(1): 20-30.

18-Elbaz L, Mayard H. L'intelligence artificielle au service de la santé et la pratique dentaire. Dans : *Intelligence artificielle et santé.* Paris : Springer, 2021. p. 161-174.

19-Engels P, Meyer O, Schonewolf J, Schlickerrieder A, Hickel R, Hesenius M, Gruhn V, Kühnisch J. Automated detection of posterior restorations in permanent teeth using artificial intelligence on intraoral photographs. *J Dent.* 2022; 121: 104124.

20-Finkelstein J, Chen H. Artificial Intelligence in Dentistry: Current Applications and Future Perspectives. *J Dent Educ.* 2021; 85(1): 49-58.

21-Goel M, Nanda S, Sharma R. Role of navigation in maxillofacial surgery: A review. *Natl J Maxillofac Surg.* 2021; 12(1): 3-10.

- 22-Gimenez T, Braga MM, Raggio DP, Deery C, Ricketts DN, Mendes FM. Fluorescence-based methods for detecting caries lesions: systematic review, meta-analysis and sources of heterogeneity. *PLoS one*. 2013; 8(4):e60421.
- 23-Hegde V, Bhandary S, Kumar A. The Potential of Artificial Intelligence in Oral Health Care. *J Contemp Dent Pract*. 2020; 21(8): 867-871.
- 24-He X, Tian J, Chen X, Chen X, Liu L, Wei J. Predicting gingival tissue thickness using artificial intelligence for autogenous gingival grafting. *J Periodontol*. 2021; 92(5): 698-705.
- 25- He W, Zhong L, Chen X, Liu J, Zhang D, Qin X. Automated measurement of root canal length using a deep learning-based algorithm. *Sci Rep*. 2020; 10(1): 38-45.
- 26- Huang Y, Zhao K, Liu Y, Zhang C, Mao T, Shi Y, et coll. Evaluation of the mechanical performance of dental restorations using finite element analysis: A review of the literature. *J Dent Res*. 2018; 97(6): 642-650.
- 27-Faure j.ODF et I A un mal incontournable. *Rev Orthop Dento Faciale*. 2019 ; 53 : 327-331.
- 28 -Khanagar S, Al –Ehaideb A, Maganur P, Vishwanathaiah S, Patil S, Baeshen H, Sarode S, et coll. Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry e A systematic review. *J Dent Sci*. 2021; 16: 508-522.
- 29 -Kassebaum NJ, Smith B, Bernabé E, Fleming T, Reynolds B, Vos M, et coll. Global burden of oral conditions in 1990-2017: A systematic analysis from the Global Burden of Disease 2017 study. *J Dent Res*. 2019; 98(3): 296-303.
- 30- Karpagam S, Nandhini J, Manju V. Digital shade analysis in dentistry: A review. *J Pharm Bioallied Sci*. 2019; 11(Suppl 2): S230-S235.
- 31-Lee S, Oh S, Jo J, Kang S, Shin Y, Park J. Deep learning for early dental caries detection in bitewing radiographs. 2021 ; 11 : 16807.
- 32-Levallois B. Intelligence artificielle : le futur de l'Orthodontie ? *Rev Orthop Dento Faciale*. 2019; 53(3): 225-226.
- 35- Liao J, Al-Khalifa K. Ethics of artificial intelligence in dental care. *J Dent Res*. 2019; 98(2): 135-142.
- 36- Liu S, Han J, Zhang J, Zhao X. Application of Artificial Intelligence in Oral and Maxillofacial Surgery. *J Healthc Eng*. 2021; 2021: 6673618.
- 37- Liu Y, Hou B, Xiao Q, Wang Z, Wang L, Guo H, et coll. Application of Augmented Reality Technology in Craniofacial Surgery: A Systematic Review. *J Healthc Eng*. 2020; 35(8): 6676724.

- 38- Li Y, Liu J, Qu H, Zhou Y, Sun Y. Digital smile design: A systematic review. *J Prosthet Dent.* 2019; 122(3): 411-7.
- 39- Li Y, Li H, Liang Y, Li J, Liang C, Li Y, et coll. Automatic measurement of root canal length using a deep learning-based algorithm. *J Endod.* 2020; 46(6): 855-859.
- 40- Mallanca O, Read J. Principes généraux et définitions en Intelligence Artificielle. *Revue d'Intelligence Artificielle.* 2019 Jun 1;33(3-4):135-49.
- 41-Michalakakis K, Kapsampeli V. Artificial intelligence and its potential applications in periodontics: A literature review. *Quintessence Int.* 2020; 51(1): 14.
- 42-O'Donoghue S, Singla A, Duta D, Tadinada A. Ethical considerations of using artificial intelligence in dentistry. *Br Dent J.* 2020; 229(8): 525-530.
- 47- Ren S, Zhong L, Chen X, Liu J, Qin X. Automatic measurement of root canal length from periapical radiographs using a deep learning model. *J Endod.* 2021; 47(1): 96-101.
- 48-Righolt AJ, Jevdjevic M, Marcenes W, Listl S. Global-, regional-, and country-level economic impacts of dental diseases in 2015. *J Dent Res.* 2018; 97(5): 501-507.
- 49-Schleyer TK, Thyvalikakath TP, Spallek H. Clinical decision support in dentistry: A systematic review. *J Dent Educ.* 2012; 76(11): 1485-1500.
- 50- Schwendicke F, Rossi G, Göstemeyer G, Elhennawy K, Cantu AG, Gaudin R, et coll. Cost-effectiveness of Artificial Intelligence for Proximal Caries Detection. *J Dent Res.* 2021; 100(4): 369-376.
- 51-Schwendicke F, Krois J, Bolla M, . Artificial intelligence in dentistry: chances and challenges. *J Dent Res.* 2021; 100(1): 5-14.
- 52-Shortliffe EH, Cimino JJ, editors. *Biomedical informatics: computer applications in health care and biomedicine.* New York: Springer; 2014.
- 44-Organisation mondiale de la santé. Plan d'action mondial pour la santé bucco-dentaire 2019-2025. Genève : OMS ; 2020.
- 45- Pani SC, Shukla S, Sahu SE. Ethical challenges in artificial intelligence and dentistry: A systematic review. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2020; 10(2): 205-210.
- 54-Sternberg RJ. *Beyond IQ: A triarchic theory of human intelligence.* Cambridge: Cambridge University Press; 1985.
- 56-Sun Y, Sun Y, Tang X, Zhao Y, Zhang Z. Artificial intelligence in orthodontics: A review of current applications and future prospects. *J Orthod Sci.* 2019; 8(1): 4-13.
- 57- W Kim EK, Lee S . Artificial intelligence in dentistry: A systematic review. *J Adv Prosthodont.* 2021; 13(2): 83-91.

59-Yan J, Zhang S. Data security and privacy protection in dental healthcare using artificial intelligence. *J Med Syst.* 2021; 45(3) : 1-9.

Références bibliographiques électroniques:

11-Dentisfuturis. La start-up Française TOOTY VR® fait entrer la Réalité Virtuelle au cabinet dentaire [Internet]. 2018 [Consulté le 1 mars 2023]. Disponible sur : <https://www.dentisfuturis.com/la-startup-francaise-tooty-vr-fait-entrer-la-realite-virtuelle-au-cabinet-dentaire/>

12-Dentisfuturis. En Chine, un robot dentiste a effectué une première chirurgie implantaire de manière autonome [Internet]. 2017 [Consulté le 7 avril 2023]. Disponible sur : <https://www.dentisfuturis.com/en-chine-un-robot-dentiste-a-effectue-une-premiere-chirurgie-dimplants-de-maniere-autonome-en-fixant-deux-nouvelles-dents-a-une-femme-ont-rapporte-plusieurs-medias-meme-si-des-membres-du-p/> MEME REF 16 supp

13-Dentaire365. Implantologie : un robot pour assister les dentistes américains [Internet]. Taupin A .2022 [Consulté le 7 février 2023]. Disponible sur : <https://www.dentaire365.fr/clinique/numerique/implantologie-un-robot-pour-assister-les-dentistes-americains/>

14-Dentastique. Les robots dentistes sont-ils une menace pour les cabinets dentaires ? [Internet]. Année [Consulté le 1 mars 2023]. Disponible sur : <https://dentastique.fr/innovation-dentaires/les-robots-dentistes-sont-ils-une-menace-pour-les-cabinets-dentaires/>

15-Dentaltribune. Plus de 10 000 implants dentaires posés à l'aide du robot Yomi [Internet]. Ramonaite I .2022 [Consulté le 1 mars 2023]. Disponible sur : <https://fr.dental-tribune.com/news/plus-de-10-000-implants-dentaires-poses-a-laide-du-systeme-robotique-yomi/>

16-Dynamique dentaire. L'intelligence artificielle est prometteuse pour l'interprétation des radiographies dentaires [Internet]. 2022 [Consulté le 27 octobre 2022]. Disponible sur : <https://www.dynamiquedentaire.com/lintelligence-artificielle-est-prometteuse-pour-linterpretation-des-radiographies-dentaires/>

17-Dynamique dentaire. 3Shape annonce le lancement de son nouveau scanner intra-oral TRIOS 5 Wireless [Internet]. 2021[Consulté le 9 avril 2023]. Disponible sur : <https://www.3shape.com/fr/press/2021/meet-3shape-automate-worlds-first-ai-powered-design-service-for-labs> Informations et URL non cohérents : vous devez indiquer les informations telles qu'elles apparaissent sur l'URL indiquée. Choisissez entre la page de 3shape et réécrivez les informations en conséquence, ou bien rectifiez l'URL pour mener vers la page web du site Dynamique dentaire.

33-Le fil dentaire. Lorsque l'intelligence artificielle révolutionne le monde de la dentisterie [Internet]. Kenck O, Sireix C. 2018 [Consulté le 28 février 2023]. Disponible sur : <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/lorsque-l-intelligence-artificielle-revolutionne-le-monde-de-la-dentisterie/>

34-Le fil dentaire. Chirurgie assistée par ordinateur la navigation dynamique système x-guide. [Internet]. Le Gac O. 2018 [Consulté le 28 février 2023]. Disponible sur : <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/chirurgie-assistee-par-ordinateur-la-navigation-dynamique-systeme-x-guide/>

43-OECD (Organisation de coopération et de développement économiques). The history of intelligence artificielle [Internet]. 2019 [Consulté le 14 octobre 2022]. Disponible sur : <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/78af3a32-fr/index.html?itemId=/content/component/78af3a32-fr>

46-Pourquoi docteur. Implants dentaires : un robot les pose sans assistance [Internet]. Levallois J.2017 [consulté le 28 février 2023]. Disponible sur : <https://www.pourquoidocteur.fr/Articles/Question-d-actu/22974-Implants-dentaires-robot-pose-assistance>

53-Spotimplant. Panorama des applications de l'IA du secteur dentaire [Internet]. 2021 [Consulté le 1 mars 2023]. Disponible sur : <https://www.spotimplant.com/fr/blog/panorama-des-applications-de-lia-du-secteur-dentaire/>

55-Science et avenir. Un mannequin qui saigne, transpire et crie pour former les futurs dentistes [Internet]. 2018 [Consulté le 7 avril 2023]. Disponible sur : https://www.sciencesetavenir.fr/sante/os-et-muscles/un-mannequin-qui-saigne-et-crie-pour-former-les-dentistes_127991

58-X-Guide. Dentsply Sirona website [Internet]. 2020 [Consulté le 7 avril 2023]. Disponible sur : <https://www.dentsplysirona.com/en-us/products/implants/x-guide.html> .

Vu la demande du doyen de la faculté d'odontologie de Lorraine sur le rapport du jury :

Président : J.M. MARTRETTE – Professeur des universités
Membre du jury : C. EGLOFF-JURAS – Maître de conférences des universités (Directrice de thèse)
Membre du jury : P. CORNE – Maître de conférences des universités
Membre du jury : C. DENIZART-GERBER – Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux

la présidente de l'université de Lorraine autorise

Madame Melissa SAMER

née à TIZI OUZOU (Algérie) le 9 août 1994,

à soutenir et imprimer sa thèse en vue d'obtenir le diplôme d'État de docteur en chirurgie dentaire intitulée :

**« L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN CHIRURGIE DENTAIRE :
ÉTAT DES CONNAISSANCES EN 2022. »**

Nancy, le 22 mai 2023

N° autorisation : 12988 C

La présidente de l'université de Lorraine

