



**HAL**  
open science

## Intelligence artificielle en médecine dentaire : quelles utilisations actuelles et perspectives d'avenir pour améliorer l'accès au soin ?

Raphaël Amico

### ► To cite this version:

Raphaël Amico. Intelligence artificielle en médecine dentaire : quelles utilisations actuelles et perspectives d'avenir pour améliorer l'accès au soin ?. Médecine humaine et pathologie. 2023. dumas-04409041

HAL Id: dumas-04409041

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04409041>

Submitted on 22 Jan 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## THÈSE

### ***POUR OBTENIR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE***

Présentée et publiquement soutenue devant

Aix-Marseille Université  
(Président : Monsieur le Professeur Éric BERTON)

Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales  
(Doyen : Monsieur le Professeur Georges LEONETTI)

Ecole de Médecine Dentaire  
(Directeur : Monsieur le Professeur Bruno FOTI)

## ***Intelligence artificielle en médecine dentaire : quelles utilisations actuelles et perspectives d'avenir pour améliorer l'accès au soin ?***

Présentée par

**AMICO Raphaël**

Né le 25/01/1997

À Marseille

Thèse soutenue le **Judi 02 mars 2023**

Devant le jury composé de

**Président : Professeur RUQUET Michel**

**Assesseurs : Professeur RASKIN Anne**

**Docteur TOSELLO Alain**

**Docteur FERRÉ Enzo**

**Invité : Docteur SEBBAN Frédéric**





## ADMINISTRATION

### **Doyens Honoraires**

Professeur	Raymond SANGIUOLO†
Professeur	Henry ZATTARA
Professeur	André SALVADORI
Professeur	Jacques DEJOU

### **Directeur**

Professeur	Bruno FOTI
------------	------------

### **Directeurs adjoints**

Professeur	Michel RUQUET
Professeur	Anne RASKIN

### **Chargés de missions**

Formation Initiale

Professeur	Michel RUQUET
------------	---------------

Recherche

Professeur	Anne RASKIN
------------	-------------

Formation Continue

Professeur	Frédéric BUKIET
------------	-----------------

Relations Internationales

Professeur	Hervé TASSERY
------------	---------------

Internat et Diplômes d'études spécialisées

Professeur	Virginie MONNET-CORTI
------------	-----------------------

Affaires générales

Docteur	Alain TOSELLO
---------	---------------

### **Responsable Administrative**

Madame	Katia LEONI
--------	-------------

### PROMOTIONS :

2019 Raymond SANGIUOLO

2020 Gaston BERGER

2021 Joseph MIGOZZI

2022 Jérôme GALLION

# LISTE DES ENSEIGNANTS

## **PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS DES CSERD**

BUKIET Frédéric (58-01)  
FOTI Bruno (58-02)  
LE GALL Michel (56-01)  
MONNET-CORTI Virginie (57-01)  
RASKIN Anne (58-01)  
RUQUET Michel (58-01)  
TARDIEU Corinne (56-01)  
TARDIVO Delphine (56-02)  
TASSERY Hervé (58-01)  
TERRER Elodie (58-01)

## **PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS**

ABOUT Imad (65)

## **PROFESSEURS ÉMÉRITES**

DEJOU Jacques (58-01)  
HUE Olivier (58-01)

## **MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS DES CSERD**

ABOUDHARAM Gérard (58-01)	LAN Romain (56-02)
ANTEZACK Angeline (57-01)	LAURENT Michel (58-01)
BELLONI Didier (57-01)	MAILLE Gérald (58-01)
BOHAR Jacques (56-01)	MENSE Chloé (58-01)
CAMOIN Ariane (56-01)	PHILIP-ALLIEZ Camille (56-01)
CAMPANA Fabrice (57-01)	POMMEL Ludovic (58-01)
CATHERINE Jean-Hugues (57-01)	PRECKEL Bernard-Éric (58-01)
GAUBERT Jacques (56-01)	RÉ Jean-Philippe (58-01)
GIRAUD Thomas (58-01)	ROCHE-POGGI Philippe (57-01)
GIRAUDEAU Anne (58-01)	SILVESTRI Frédéric (58-01)
GUIVARC'H Maud (58-01)	STEPHAN Grégory (58-01)
JACQUOT Bruno (58-01)	TOSELLO Alain (58-01)
LABORDE Gilles (58-01)	

## MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS ASSOCIÉS

BALLESTER Benoît (58-01)  
BLANCHET Isabelle (58-01)  
CASAZZA Estelle (58-01)

## CHEFS DE CLINIQUE DES UNIVERSITÉS - ASSISTANTS DES HÔPITAUX

ARNIER Canelle (56-01)	PASCHEL Laura (58-01)
BAUDINET Thomas (58-01)	PRINCE Fanny (58-01)
BOREL Guillaume (56-02)	RANCHAIN Théo (57-01)
BRINCAT Arthur (57-01)	RAYNAUD Camille (58-01)
BROS Agnès (56-01)	REYNAL Florence (56-01)
CHAMAYOU Chloé (56-01)	ROMAO Vincent (57-01)
DUPRAT Florence (56-01)	ROOSEN Amandine (58-01)
FERRE Enzo (58-01)	ROUSCOFF Eva (57-01)
FOUQUES Agathe (56-01)	SADOWSKI Camille (57-01)
HAMMOUTENE Stéphane (57-01)	STALLA Martin (58-01)
LAFONT Jacinthe (57-01)	TERRER Jérémy (58-01)
OHANESSIAN Romain (57-01)	VEILLARD Pierre (56-01)
ONGHENA Tom (56-01)	

## ASSISTANTE DES UNIVERSITÉS ASSOCIÉ

BROTONS Adèle (56-01)

### Intitulés des sections CNU :

#### 56<sup>ème</sup> section : Développement, croissance et prévention

56-01 Odontologie pédiatrique et orthopédie dento-faciale

56-02 : Prévention – Epidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale

#### 57<sup>ème</sup> section : Chirurgie orale, Parodontologie, Biologie Orale

57-01 : Chirurgie orale – Parodontologie – Biologie orale

#### 58<sup>ème</sup> section : Réhabilitation orale

58-01 : Dentisterie restauratrice – Endodontie – Prothèses – Fonction-Dysfonction – Imagerie – Biomatériaux

L'auteur s'engage à respecter les droits des tiers, et notamment les droits de propriété intellectuelle. Dans l'hypothèse où la thèse comporterait des éléments protégés par un droit quelconque, l'auteur doit solliciter les autorisations nécessaires à leur utilisation, leur reproduction et leur représentation auprès du ou des titulaires des droits. L'auteur est responsable du contenu de sa thèse. Il garantit l'Université contre tout recours. Elle ne pourra en aucun cas être tenue responsable de l'atteinte aux droits d'un tiers.

## **REMERCIEMENTS**

Aux membres du jury,

**À Monsieur le Professeur Michel RUQUET,**

Docteur en Chirurgie-Dentaire

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier

Chef du Service de Réhabilitation Orale, Implantologie orale

Je vous remercie de me faire l'honneur de présider mon jury de thèse.

Je vous suis reconnaissant pour nous avoir accompagné avec bienveillance depuis nos premiers TP en 2<sup>ème</sup> année jusqu'à la fin de nos études au pavillon.

Merci de vous être rendu disponible pour répondre à nos nombreux questionnements lors de la préparation du concours d'internat.

Veillez recevoir le témoignage de mon plus profond respect et ma reconnaissance.

**À Madame le Professeur Anne RASKIN,**

Docteur en Chirurgie-Dentaire

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier

Cheffe du Service Odontologie Hospitalière - Urgence Odontologique

Cheffe du Pôle Odontologie, Pavillon 5, Hôpital de la Timone

Je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je vous suis reconnaissant pour votre équité et votre implication auprès des étudiants.

Merci pour votre sollicitude, en particulier lors des vacances d'Odontologie Hospitalière  
les vendredis matin.

Ça a été une expérience enrichissante de vous assister dans ce cadre lors des soins  
sur les patients d'Handident, et j'en garderai toujours un excellent souvenir.

Merci pour votre vision avant tout humaine de notre profession, votre ouverture d'esprit et  
vos conseils qui auront rendu nos fins de vacances plus agréables.

Veillez trouver ici l'expression de mon profond respect et de ma gratitude.



**À Monsieur le Docteur Alain TOSELLO,**

Docteur en Chirurgie-Dentaire

Maître de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier

Service de Réhabilitation Orale, Implantologie Orale

Je vous remercie de me faire l'honneur de siéger au sein de mon jury de thèse.

Je vous remercie pour nous avoir partagé toutes vos connaissances et votre expérience à la faculté et lors de nos vacances dans le service de Réhabilitation Orale à l'hôpital.

Merci pour votre sympathie quotidienne lors de ces vacances  
et pour l'intérêt que vous avez pu porter à ce travail.

Veillez trouver ici l'expression de mon profond respect.

**À Monsieur le Docteur Enzo FERRÉ,**

Docteur en Chirurgie-Dentaire

Chef de Clinique des Universités - Assistant des Hôpitaux

Service de Réhabilitation Orale, Implantologie Orale

Je vous remercie d'avoir accepté la direction de cette thèse.

Merci de m'avoir accompagné durant mes vacances de prothèse les lundis  
(et parfois hors de mes vacances...) et de m'avoir incité à me lancer  
dans des traitements que je n'aurai pas envisagé seul.

Je vous remercie de m'avoir fait confiance pour cela  
et pour vous remplacer à plusieurs reprises dans votre cabinet.

Merci de m'y avoir accueilli avec la générosité et la gentillesse qui vous caractérise.

Veillez recevoir dans ces mots le témoignage de mon estime et de mon amitié.

**À Monsieur le Docteur Frédéric SEBBAN,**

Docteur en Chirurgie-Dentaire

Ancien Chef de clinique des Universités - Assistant des Hôpitaux

Service de Réhabilitation Orale, Implantologie Orale

Pratique privée - Marseille

Je tenais particulièrement à votre présence ce jour  
et je vous remercie d'avoir accepté d'être l'invité de mon jury de thèse.

Je vous remercie de m'avoir accompagné dans la rédaction de ce travail.  
Conscient de tout votre travail quotidien, je vous suis très reconnaissant  
pour votre disponibilité et vos conseils.

Merci pour avoir partagé ouvertement votre savoir et votre technique  
lors de mon stage d'insertion à la vie professionnelle.

Vous êtes un exemple de réussite pour les omnipraticiens.

Je vous adresse ici le témoignage de mon profond respect et de mon amitié.

# TABLE DES MATIERES

<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>I. L'intelligence artificielle</b> .....	<b>2</b>
<b>I.1. Définition</b> .....	<b>2</b>
I.1.1. Les systèmes de traitement du langage naturel ( <i>natural language processing NLP</i> ) .....	2
I.1.2. Le traitement du signal audio (audio processing) .....	3
I.1.3. Les systèmes experts .....	3
I.1.4. La vision par ordinateur (computer vision) .....	3
<b>I.2. Historique de l'Intelligence Artificielle</b> .....	<b>3</b>
<b>I.3. Principes de fonctionnement</b> .....	<b>6</b>
I.3.1. Les algorithmes .....	6
I.3.2. Les arbres de décision .....	7
I.3.3. Les données .....	7
I.3.4. L'apprentissage automatique (ou machine learning ML) .....	7
I.3.5. Les réseaux de neurones artificiels (RNA ou artificial neural networks) .....	10
I.3.6. L'apprentissage profond (ou deep learning DL) .....	13
I.3.7. Les réseaux de neurones convolutifs (convolutionnal neural network CNN) .....	13
I.3.8. La vision par ordinateur et la reconnaissance d'image .....	15
I.3.9. Les systèmes experts .....	17
<b>I.4. L'IA dans la vie quotidienne</b> .....	<b>18</b>
<b>I.5. Applications actuelles en odontologie</b> .....	<b>19</b>
I.5.1. Prévention .....	19
I.5.1.1. Détection de la plaque dentaire .....	19
I.5.1.2. Brosses à dents connectées .....	20
I.5.2. Odontologie prothétique .....	22
I.5.2.1. Conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO) .....	22
I.5.2.2. Les caméras intra-orales .....	22
I.5.2.3. Projet esthétique .....	23
I.5.2.4. Préparation corono-périphérique .....	24
I.5.3. Implantologie .....	24
I.5.3.1. Identification du modèle implantaire .....	24
I.5.3.2. Planification implantaire .....	25
I.5.3.3. Chirurgie implantaire .....	26
I.5.4. Orthodontie .....	28
I.5.5. Odontologie restauratrice et endodontie .....	31
I.5.5.1. Formule dentaire et bilan bucco-dentaire .....	31
I.5.5.2. Détermination de l'âge dentaire .....	33
I.5.5.3. Détection des anomalies dentaires .....	33
I.5.5.4. Détection des lésions carieuses .....	34
I.5.5.5. Détection des lésions péri-apicales et de la morphologie radiculaire .....	37
I.5.6. Parodontologie .....	38
I.5.6.1. Perte osseuse .....	38
I.5.6.2. Péri-implantite .....	41
I.5.6.3. Gingivite .....	41
I.5.7. Chirurgie orale .....	42
I.5.7.1. Avulsion des 3èmes molaires .....	42
I.5.7.2. Sinusites maxillaires .....	44
I.5.7.3. Détection des kystes et tumeurs maxillo-mandibulaire .....	45
I.5.7.4. Détection des lésions dermatologiques buccales et cancers oraux .....	46

<b>II.</b>	<b>Répartition de la population de patients .....</b>	<b>49</b>
<b>II.1.</b>	<b>Classification des patients par âge .....</b>	<b>49</b>
II.1.1.	Dans la population générale.....	49
II.1.2.	Répartition sur le territoire.....	50
<b>II.2.</b>	<b>Classification des patients par catégorie socio-économique .....</b>	<b>51</b>
<b>II.3.</b>	<b>Soins spécifiques : patients handicapés et âgés dépendants en EHPAD .....</b>	<b>53</b>
II.3.1.	Patients handicapés .....	53
II.3.2.	Personnes âgés dépendantes en EHPAD .....	55
<b>II.4.</b>	<b>Intérêt de la segmentation et apport des nouvelles technologies .....</b>	<b>57</b>
II.4.1.	Vieillesse de la population .....	57
II.4.2.	Désertification médicale dans les territoires ruraux.....	57
II.4.3.	Apport du numérique pour les patients handicapés .....	58
II.4.4.	Le dispositif ORALIEN .....	58
<b>III.</b>	<b>Répartition démographique des chirurgiens-dentistes en France et conséquences .....</b>	<b>60</b>
<b>III.1.</b>	<b>Etat des lieux .....</b>	<b>60</b>
III.1.1.	Densité des chirurgiens-dentistes .....	60
III.1.2.	Profil des chirurgiens-dentistes : âge, sexe et mode d'exercice.....	61
<b>III.2.</b>	<b>Analyse des données existantes .....</b>	<b>63</b>
III.2.1.	Numerus Clausus .....	63
III.2.2.	Répartition des facultés .....	64
III.2.3.	Diplôme européen .....	64
III.2.4.	Spécificité d'exercice .....	65
<b>III.3.</b>	<b>Soins spécifiques des zones faiblement dotées ou sous-dotées .....</b>	<b>66</b>
<b>IV.</b>	<b>Applications futures de l'IA et nouveaux modes de prise en charge.....</b>	<b>68</b>
<b>IV.1.</b>	<b>Essor de la télédentisterie .....</b>	<b>68</b>
<b>IV.2.</b>	<b>Aide au diagnostic/diagnostic à distance par IA.....</b>	<b>71</b>
<b>IV.3.</b>	<b>Coordonner les installations et nouveaux modes d'exercice.....</b>	<b>78</b>
IV.3.1.	Mesures de prises en charge face aux nouveaux modes d'installation .....	78
IV.3.2.	Nouveau rôle des assistants dentaires.....	79
<b>IV.4.</b>	<b>Aspect éthique et garantie humaine de l'IA .....</b>	<b>80</b>
<b>V.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>83</b>
<b>VI.</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>A</b>
<b>VII.</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>I</b>

## **Introduction**

L'intelligence artificielle (IA) n'est pas une invention récente : elle existe depuis le milieu des années 50. Après un demi-siècle de recherche, l'IA fait désormais partie de notre vie quotidienne. Avec l'avènement du Big Data et de l'apprentissage automatique, les machines imitant les capacités cognitives humaines sont devenues plus puissantes, pouvant parfois même rivaliser avec l'humain.

Face aux grandes capacités d'apprentissage et d'analyse des systèmes, l'IA s'est très vite développée dans le milieu médical pour devenir indispensable dans certaines spécialités. Aujourd'hui, elle est également utilisée en médecine dentaire et son intérêt est exponentiel : le nombre de publications sur le sujet entre 2018 et 2022 a été multiplié par 7. L'existence de systèmes d'IA présentant des performances identiques voire supérieures dans la détection de pathologies incite à se poser des questions sur les facteurs humains, et c'est le caractère anthropologique de l'IA qui explique en grande partie les réactions extrêmes quant à son utilisation. L'un des objectifs de l'IA en santé est de réduire le différentiel de compétence en limitant les biais et le bruit entre chirurgiens-dentistes. En apportant une vision supplémentaire ou une seconde opinion au praticien, elle permet également une meilleure prise en charge du patient.

Dans un premier temps, nous parlerons de l'histoire du développement de l'IA et des principaux concepts fondamentaux qui sont à la base de son fonctionnement, en insistant sur le domaine d'IA principalement utilisé en médecine dentaire. Nous mettrons en avant les différentes utilisations actuelles de l'IA dans notre discipline.

Puis, nous évoquerons la répartition inégale des chirurgiens-dentistes sur le territoire français et le manque d'accès au soin des populations dans les zones sous-dotées, phénomène qui touche particulièrement les populations avec des besoins de soins spécifiques.

Enfin, nous envisagerons les alternatives utilisant ces nouveaux outils numériques pour optimiser la prise en charge et le suivi bucco-dentaire de ces populations isolées. Nous discuterons des hypothèses de l'utilisation de l'IA dans ce cadre.

# **I. L'intelligence artificielle**

## **I.1. Définition**

Il n'y a pas de consensus sur la définition exacte de ce qu'est l'intelligence artificielle.

Selon le Conseil Européen, l'intelligence artificielle (IA) est une « discipline jeune d'une soixantaine d'années, qui réunit des sciences, théories et techniques (notamment logique mathématique, statistiques, probabilités, neurobiologie computationnelle et informatique) et dont le but est de parvenir à faire imiter par une machine les capacités cognitives d'un être humain ». (1)

Ainsi, on pourrait qualifier d'intelligence artificielle tout système dont le but est de mimer les capacités de raisonnement humain.

L'ordinateur va recevoir des données, les analyser et réagir en fonction. Mais ce qui va caractériser l'IA, c'est sa capacité à travailler de manière autonome en analysant les effets produits par ses actions précédentes pour adapter son comportement. (2)

L'IA comprend un ensemble de technologies qui vont permettre à la machine de percevoir, d'apprendre, de comprendre et d'agir de façon comparable à un être humain.

Il faut faire une distinction entre 2 types d'IA :

- Les IA logicielles comme les algorithmes publicitaires de recommandations personnalisées ou les assistants personnels
- Les IA incarnées comme les voitures autonomes ou les robots

Dans cette thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement aux IA logicielles qui sont en plein essor dans le domaine de la santé.

On retrouve notamment 4 principaux systèmes d'IA.

### **I.1.1. Les systèmes de traitement du langage naturel (*natural language processing NLP*) (3) (4)**

Ces systèmes sont le plus souvent des algorithmes d'analyse et de synthèse de texte. Ils vont permettre aux machines de comprendre, de traduire ou de générer du langage humain. On retrouve ce principe dans les chatbots ou les logiciels de traduction.

Dans le domaine médical, ils vont permettre par exemple de réaliser des comptes rendus automatisés ou de classer la documentation clinique du patient.

Depuis décembre 2022, l'entreprise OpenAI a lancé ChatGPT, un modèle d'agent conversationnel utilisant l'IA. Il s'agit d'une interface accessible gratuitement sur Internet et spécialisée dans le dialogue sur un univers thématique très large. À partir d'une question ou d'une phrase entrée par l'utilisateur, le logiciel est capable de produire une réponse élaborée sous forme de texte et sur un grand nombre de sujets.

Contrairement aux autres IA conversationnelles, ChatGPT s'est entraîné sur une immense base de données (romans, scripts de films, article de journaux, conversations en ligne...) et s'adapte à toute forme de langage ou de contexte, ce qui en fait un logiciel de traitement du langage naturel particulièrement développé. Cependant, ChatGPT n'est pas connecté à internet et ne base ses réponses que sur les connaissances qu'il a acquises lors de son apprentissage.

Il ne peut donc pas parler d'événements survenus postérieurement à son apprentissage. Le logiciel est encore en phase de test, et s'améliore au fur et à mesure de ses échanges avec les utilisateurs pour devenir plus performant dans sa capacité à simuler une conversation humaine. (5)

### **I.1.2. Le traitement du signal audio (audio processing) (6)**

C'est un système dans lequel des algorithmes sont appliqués aux signaux audio. Ils vont capter les signaux sonores sous la forme de signaux analogiques (électriques) puis traduits en signaux numériques (binaires, en langage informatique). Ce processus permet la modification des sons, notamment en supprimant les bruit indésirables, l'écho ou la distorsion pour obtenir une bonne qualité sonore. Ce système est notamment utilisé dans la reconnaissance vocale ou les logiciels de reconnaissance musicale comme Shazam®.

Couplé au NLP, l'audio processing permet le traitement automatique de la parole. C'est ce principe qui permet l'interaction avec les assistants vocaux comme Siri® ou Alexa®.

### **I.1.3. Les systèmes experts (7)**

Un système expert est un programme d'IA dont le but est de simuler le savoir-faire et les connaissances d'un spécialiste humain dans un domaine bien déterminé. Il permet de reproduire le raisonnement d'un expert humain pour faire des prédictions ou des conclusions, mais aussi d'expliquer la façon dont il est arrivé à ce résultat.

Ce type de système est notamment utilisé comme outil d'aide à la décision ou d'aide au diagnostic dans le milieu médical.

### **I.1.4. La vision par ordinateur (computer vision) (8)**

Cette technologie permet aux ordinateurs d'analyser en entrée des données visuelles comme des images ou des vidéos, et d'en sortir des informations. La computer vision permet de faire la distinction entre des objets, d'évaluer la distance entre eux ou encore de repérer des caractéristiques précises dans une image. Ce système est utilisé notamment pour l'analyse des documents d'imagerie médicale (IRM, radios, CBCT).

Nous détaillerons les systèmes experts et la computer vision dans la suite de ce travail, ces systèmes étant les plus utilisés actuellement dans le domaine de la santé.

## **I.2. Historique de l'Intelligence Artificielle**

La paternité du concept d'intelligence artificielle revient au mathématicien Alan Turing, qui évoqua en **1950** dans son article « Computing machinery and intelligence » l'idée qu'une « thinking machine » pourrait tromper un être humain dans son jeu de l'imitation. (9) Il a notamment décrit les processus d'apprentissage nécessaires pour créer la machine de son expérience, qui représentent les prémices de la programmation.



Avant lui, deux précurseurs de l'informatique, Warren McCulloch et Walter Pitts, ont mis au point le neurone formel en **1943**. (10) Il s'agit d'un neurone binaire qui émet un signal (sortie = 1) ou non (sortie = 0). Pour prendre cette décision, le neurone formel effectue la somme des données reçues par les neurones auxquels il est connecté.

En **1951**, un mathématicien américain du nom de Marvin Minsky crée le premier simulateur de réseau neuronal, le SNARC (Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator).

En **1956**, le terme « d'intelligence artificielle » est prononcé pour la première par John McCarthy lors d'une conférence au Dartmouth College. Il énonce au cours de cette conférence que « chaque aspect de l'apprentissage ou toute autre caractéristique de l'intelligence peut en principe être décrit avec une telle précision qu'une machine peut être conçue pour le simuler ». L'IA devient donc un domaine de recherche à part entière (11)

En **1957**, Franck Rosenblatt crée un réseau de neurones artificiels monocouche, le Perceptron. (12) Il s'agit d'une couche de neurones formels connectés d'un côté à des cellules sensorielles et de l'autre à des cellules d'activation.

Le tout représentait un modèle très simple de rétine artificielle dont le but était de reconnaître des lettres de l'alphabet. En fonction de la quantité de lumière reçue, les neurones prennent ou non la décision d'activer les cellules lumineuses qui forment la lettre reconnue. En fonction de chaque résultat (bon ou mauvais), les poids synaptiques des connexions cellules-neurones étaient ajustés.

On pourrait considérer ce modèle comme le premier pas vers le machine learning.

Cependant, dans un livre paru en **1969**, Marvin Minsky expose les limites du modèle perceptron et de l'apprentissage machine, les algorithmes d'apprentissage étant trop complexes pour fonctionner correctement sur des réseaux de neurones monocouche. (13)

À la fin des années **1960**, les recherches en intelligence artificielle connaissent un fort ralentissement, on parle du « premier hiver » de l'intelligence artificielle. Les subventions publiques et les investissements dans le domaine diminuent à la suite de résultats plus décevants que ceux attendus. On observe à cette période également une défiance de la population, probablement accentuée par le film *2001, l'Odyssée de l'Espace* sortie en 1968.

En **1972**, un mathématicien anglais, Michael James Lighthill, rédige un rapport d'évaluation commandé par le Parlement sur la recherche dans le domaine de l'IA. Il expose une vision pessimiste de l'IA et ne voit qu'un faible pronostic pour qu'elle ait un impact majeur dans la société future. Il débatta de son point de vue avec d'autres experts sur la chaîne BBC, ce qui entraînera un gel des financements européens pour la recherche dans ce domaine. (14)

Le développement de l'IA a ensuite été étroitement mêlé au développement de l'informatique. Il faudra attendre la fin des années 1970 et le développement des premiers microprocesseurs pour voir un nouvel essor de l'IA.

Au début des années **1990**, IBM développe Deep Blue, un superordinateur spécialisé dans le jeu d'échec.

En **1996**, l'ordinateur d'IBM est confronté pour la première fois au champion du monde d'échecs, Garry Kasparov, lors d'un match en 6 manches remporté par ce dernier. Néanmoins l'ordinateur avait déjà réussi à remporter une partie.

Un an plus tard, après plusieurs mises à niveau du logiciel, une nouvelle confrontation a lieu. Cette fois-ci elle sera remportée par l'ordinateur 3,5 à 2,5 manches. L'ordinateur a alors en mémoire plus de 600 000 parties et peut analyser 200 millions de positions par secondes, prouesse qu'un humain ne pourrait réaliser. Ce match marque un tournant dans l'histoire de l'IA car c'est la première fois qu'un humain est battu par un ordinateur. (15)

Depuis le début des années **2000** avec le développement d'internet et des ordinateurs, l'intérêt pour l'IA et les recherches dans ce domaine se sont accélérés.

Le perfectionnement des processeurs graphiques a permis d'accélérer le calcul des algorithmes d'apprentissage, tout en diminuant les coûts financiers. Les processeurs actuellement permettent de faire fonctionner des réseaux de plusieurs millions de neurones. De plus, avec l'apparition du phénomène de Big Data, les algorithmes ont également accès à une très grande quantité de données leur permettant un apprentissage plus fin et facilité.

Tout cela a permis le développement d'algorithmes basés sur des réseaux de neurones beaucoup plus sophistiqués : les réseaux de neurones convolutifs (CNN), les réseaux de neurones récurrents (RNN), les réseaux de mémoire à long et court terme (LSTM), etc.

En **2011**, le programme d'IA Watson, conçu par la société IBM pour répondre à des questions en langage naturel, réussit à battre les 2 meilleurs joueurs au célèbre jeu américain *Jeopardy!*. Il s'agit d'un jeu télévisé dans lequel 3 joueurs s'affrontent dans le but de retrouver la question correspondant à une réponse. Le premier joueur à buzzer peut donner sa réponse, sachant que chaque bonne réponse rapporte un gain tandis qu'une mauvaise réponse le fait perdre. Il s'agit donc à la fois d'être rapide mais également d'évaluer la certitude de notre réponse parmi celles possibles. De plus, les questions portent sur des sujets différents et sont formulées dans un langage naturel riche et varié.

Watson était donc capable de comprendre une question en langage naturel, buzzer et trouver une réponse en quelques secondes, l'énoncer grâce à un système de synthèse vocale, choisir le thème et le montant de la question suivante. (16)

À partir de cette victoire, IBM a cherché à développer ce même programme dans d'autres secteurs, notamment dans la santé en vue de répondre à des questions d'ordre médical basées sur des preuves cliniques (diagnostic de cancer, aide à la prise de décision).

En **2016**, c'est au tour de Google qui réussit à battre le champion du monde de jeu de go avec son programme d'IA AlphaGo. Le jeu de go est considéré comme bien plus complexe à jouer qu'une partie d'échec, et le programme n'a perdu qu'une partie sur les 5 face au champion du monde. (17)

L'année suivante, Google met au point une version améliorée du logiciel, AlphaGo Zero. Ce dernier connaît uniquement les règles du jeu de go et s'entraîne en jouant contre lui-même par auto-apprentissage. Cette version réussit à battre la version précédente après seulement 3 jours d'apprentissage. Contrairement à la première version, AlphaGo Zero n'a pas appris à partir de l'analyse de milliers de parties jouées par des humains mais uniquement en jouant contre lui-même et en utilisant un apprentissage par renforcement.

Plus récemment, en mars **2018**, a eu lieu une conférence française « AI for Humanity » au cours de laquelle Cédric Villani présente un rapport sur l'intelligence artificielle. Il y expose les principales orientations que devrait prendre la recherche française dans ce domaine. (18)

### **I.3. Principes de fonctionnement**

#### **I.3.1. Les algorithmes (19–21)**

Les algorithmes sont la base du fonctionnement de l'intelligence artificielle. Un algorithme correspond à une suite finie d'instructions qui, à partir de données fournies en entrée, offre un ou plusieurs résultats en sortie. L'objectif de cet algorithme va être de réaliser une prédiction sur la valeur de sortie par rapport aux données de départ.

Ces algorithmes sont conçus à partir de modèles statistiques et sont transcrits en langage informatique (Java, Python...) pour être traités par une machine, c'est un programme ou logiciel informatique. Ces programmes vont permettre à la machine de réaliser certaines tâches de façon automatique.

Parmi les différents algorithmes utilisés en IA, l'un des plus fréquents est la régression linéaire simple ou multiple, en fonction du nombre de variables explicatives.

Il s'agit d'un algorithme d'apprentissage automatique qui à partir d'une ou de plusieurs variables explicatives (X) va faire des prédictions pour atteindre une variable à expliquer (Y).

L'objectif est de trouver une fonction dite de prédiction qui à partir des valeurs connues d'une variable X arrive à donner une approximation des valeurs de Y.

La fonction sera de la forme  $Y=f(X)$  où  $f(X)$  est une fonction linéaire.

Ce modèle est utilisable uniquement si notre ensemble de données de départ ( $X_i ; Y_i$ ) présente une tendance à la linéarité.

Un algorithme de régression linéaire simple serait :  $Y = aX + b + \varepsilon$

Avec Y la variable cible, a et b des coefficients à déterminer lors de l'apprentissage, X la donnée explicative et  $\varepsilon$  la variable qui représente l'erreur, c'est-à-dire l'écart entre la valeur réelle de Y et la valeur  $aX+b$  donnée par l'algorithme.

Même si l'ensemble de données suit une relation linéaire, en général les données mesurées ne confirment pas précisément cette relation. C'est pourquoi lors de la construction de l'algorithme, on tient compte des erreurs observées.

Ainsi, les prédictions de (Y) sont effectuées par l'algorithme en comparant les équations calculées avec de nouvelles données de (X), tout en tenant compte d'un taux d'erreur moyen. Ce qui fait que ce type d'algorithme entre dans le cadre de l'IA est la capacité du logiciel à ajuster automatiquement les paramètres a et b à partir des exemples fournis, afin d'arriver à la meilleure estimation de la variable cible.

Par exemple, si l'on veut prédire qu'un patient de 30 ans complètement denté aura toujours ses dents en bouche à 80 ans, on va utiliser une régression linéaire pour évaluer la relation entre l'âge et l'édentement.

### **I.3.2. Les arbres de décision (22)**

Les arbres décisions sont un autre type d'algorithme très utilisé dans le domaine médical pour les systèmes d'aide à la décision clinique.

Il s'agit d'un algorithme d'apprentissage supervisé, utilisé pour des tâches de classification ou de régression. C'est un algorithme avec une structure bien hiérarchisée.

L'arbre de décision commence par un nœud racine, qui ne possède pas de branches entrantes. Des branches sortantes de ce nœud racine se dirigent vers des nœuds internes appelés nœuds de décision. Sur la base des informations disponibles, les nœuds racine et internes effectuent des évaluations sur des sous-ensemble homogènes appelés nœuds terminaux. En fonction, la sortie d'un nœud interne peut se diriger soit directement sur un nœud terminal soit sur un autre nœud interne.

Les nœuds terminaux représentent tous les résultats possibles en sortie de l'algorithme.

L'avantage des arbres de décision est la représentation qui suit un chemin logique pour arriver à un résultat, permettant de bien comprendre comment la décision a été prise par l'algorithme. De plus, la hiérarchisation permet de mettre en évidence les attributs qui sont les plus importants pour la prise de décision.

### **I.3.3. Les données (23)**

Pour fonctionner, un algorithme a besoin de données. Ces données représentent des informations qu'on rentre dans l'algorithme au départ ou bien qu'il récupère lui-même en fonction des algorithmes (données récupérées sur l'internet par exemple). Elles peuvent être de toutes sortes : photographie, image radiologique, vidéo, son, mot clé dans un moteur de recherche...

La quantité de données disponibles pour faire fonctionner les algorithmes a explosé avec l'arrivée de l'Internet. Les algorithmes peuvent maintenant utiliser des données venant du monde entier, plus nombreuses et plus variées, ce qui a permis le développement de différentes voies dans la recherche en intelligence artificielle. En effet, plus l'algorithme a accès à un nombre conséquent de données, plus il aura d'exemples pour apprendre et affiner son fonctionnement, et ainsi augmenter la précision du résultat.

### **I.3.4. L'apprentissage automatique (ou machine learning ML) (23–28)**

Le machine learning est un sous-ensemble de l'IA. Contrairement à un algorithme classique, où la machine suit des instructions précises pour arriver à un résultat, l'apprentissage automatique consiste à programmer la machine pour qu'elle apprenne à partir de données d'exemples en se basant sur des techniques statistiques et sur des analyses prédictives. La machine va pouvoir réaliser des tâches comme reconnaître une nouvelle dent cariée sans y avoir été explicitement programmée, mais en reconnaissant des modèles spécifiques au sein de l'image.

Il existe des milliers d'algorithmes d'apprentissage automatique qui peuvent être regroupés en fonction du style d'apprentissage ou de la nature du problème qu'ils résolvent.

On distingue 3 techniques d'apprentissage automatique :

### ➤ **L'apprentissage supervisé**

Dans ce type d'apprentissage, la machine apprend sous la supervision de l'être humain. On va fournir à la machine des couples de données entrée-sortie, et on va l'entraîner à ce qu'elle trouve la relation entre les 2 sous la forme d'une fonction de l'entrée vers la sortie. Par exemple, on va fournir à la machine des images représentant des chats accompagnées chacune d'une sortie annonçant « chat » : on appelle cela une étiquette. L'objectif pour l'algorithme est de déterminer les caractéristiques qui définissent l'image de chat, sous la forme d'une fonction, pour qu'à l'examen d'une nouvelle image de chat il prédise automatiquement la bonne étiquette « chat ».

Pour arriver à un résultat efficace, cet apprentissage se fait en 3 phases :

- Une phase d'entraînement, au cours de laquelle on fournit à l'algorithme de nombreuses photos différentes de chats toutes étiquetées « chat » par un expert humain.
- Une phase de validation, au cours de laquelle on fournit des photos non étiquetées et on évalue la performance de l'algorithme. En fonction de la précision de réponse, on va ajuster les paramètres de l'algorithme pour diminuer son taux d'erreur.
- Une phase de test, au cours de laquelle on présente à l'algorithme des photos de chats qu'il n'a jamais vu auparavant et on contrôle la précision des réponses. L'objectif est d'obtenir à la phase de test un pourcentage de précision similaire à celui qu'on a cherché à obtenir lors de la phase de validation.

Le but est d'apprendre au modèle à généraliser, pour prédire correctement l'étiquette d'une nouvelle donnée jamais observée.

L'apprentissage supervisé est utilisé pour résoudre des problèmes de régression et de classification.

Dans les problèmes de classification, on utilise un algorithme pour affecter les données d'entrées à des catégories en sortie. L'algorithme reconnaît des entités spécifiques dans l'ensemble des données et détermine comment ces données doivent être étiquetées. Les algorithmes de classification les plus courants sont les machines à vecteurs de support (SVM), les k-plus proches voisins, les arbres de décision et surtout les réseaux de neurones qui seront détaillés plus loin.

Dans les problèmes de régression, l'algorithme cherche à comprendre la relation entre des variables dépendantes et indépendantes, pour prédire des valeurs. C'est utilisé le plus souvent pour faire des prévisions comme évaluer le chiffre d'affaires d'une entreprise.

### ➤ **L'apprentissage non-supervisé**

Dans ce type d'apprentissage, on utilise des algorithmes pour analyser et regrouper des ensembles de données brutes, non étiquetées. L'algorithme va analyser les données en entrée pour déterminer les similarités et les différences entre elles. Il cherche à détecter des modèles ou des groupements naturels entre ces données pour les classer en différentes catégories. Cependant, la machine n'est pas capable de définir elle-même l'étiquette de la catégorie.

Cela permet de faire du clustering, c'est-à-dire de déterminer des groupes voire des sous-groupes à l'intérieur d'un ensemble de données, ou bien de la détection d'anomalies.

Les modèles identifiés dans ce type d'apprentissage doivent être évalués pour leur utilité, par interrogation humaine ou par application dans une tâche d'apprentissage automatisé. Les algorithmes les plus utilisés dans ce cas sont les réseaux de neurones et les K-moyennes.

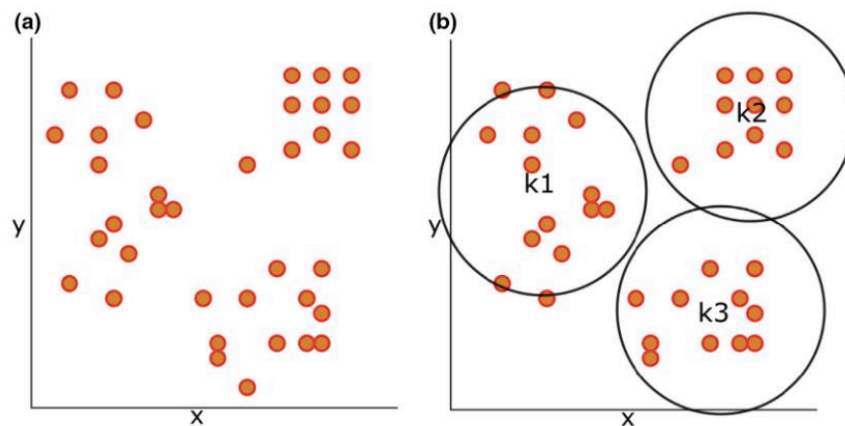


Figure 1. Exemple de clustering utilisant l'algorithme des K-moyennes (29)

### ➤ L'apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement est la technique d'entraînement d'un algorithme pour une tâche spécifique pour laquelle aucune réponse unique n'est correcte, mais où l'on cherche un résultat global. L'algorithme va chercher la façon optimale d'atteindre ce résultat ou d'améliorer les performances d'une tâche spécifique. Au fur et à mesure des actions, l'algorithme obtient des retours d'information, positif ou négatif. Pour faire ses choix, il va s'appuyer sur les enseignements tirés des actions précédentes et sur l'exploration de nouvelles actions permettant d'offrir un gain supérieur ou non.

C'est le cas par exemple dans l'apprentissage d'un jeu de stratégie comme le jeu d'échec ou le jeu de go. En fonction du coup qu'il a joué précédemment et de son influence sur la partie, l'algorithme analysera si c'est un bon ou un mauvais coup ce qui lui permettra d'améliorer sa technique pour les parties suivantes.

Il s'agit d'un processus itératif : plus il y a de retour d'information (feedback), plus la stratégie de l'algorithme s'améliore.

On retrouve deux contraintes principales dans l'apprentissage automatique :

- Le **sous-ajustement** (*underfitting*) : le problème dans ce cas est que l'algorithme n'arrive pas à créer de relation entre la donnée en entrée et la variable cible en sortie. Cela entraîne une erreur élevée dans les échantillons test et non observés, le modèle est incapable d'apprendre à partir des données d'apprentissage. Cela se produit le plus souvent lorsque les données d'entrées contiennent du bruit ou sont mal annotées, ou encore que les données sont trop variées.
- Le **sur-ajustement** (*overfitting*) : le problème dans ce cas est que l'algorithme ne parvient pas à généraliser les ensembles de données et à obtenir de bons résultats dans le cas de données inédites. Ce problème est dû à une quantité insuffisante de données d'apprentissage qui oblige le modèle à s'entraîner plusieurs fois sur les mêmes données, ou lorsque les données d'apprentissage ne sont pas suffisamment claires.

L'algorithme va s'attacher à des caractéristiques trop précises sur les données d'entraînement et n'arrivera pas à retrouver ces caractéristiques sur de nouvelles données, donc ne les reconnaîtra pas.

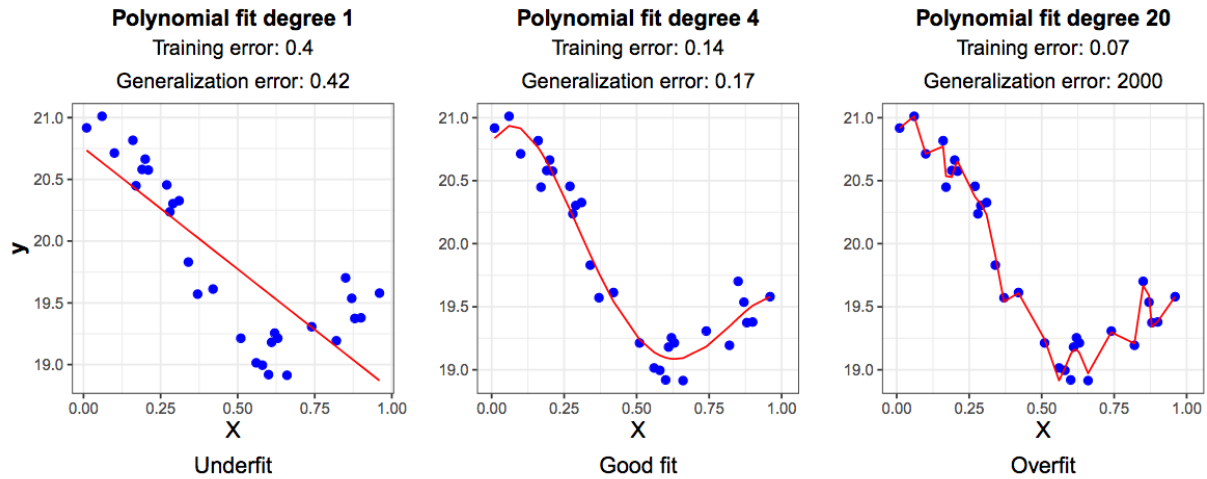


Figure 2. Illustration du phénomène de sous/surajustement sur un exemple de simple régression linéaire (24)

### I.3.5. Les réseaux de neurones artificiels (RNA ou artificial neural networks) (30–32)

En intelligence artificiel, le processus d'apprentissage va reposer sur l'utilisation de réseaux de neurones artificiels dont le principe de fonctionnement s'est inspiré du cerveau humain.

Un neurone biologique est composé schématiquement d'un corps cellulaire avec des dendrites, d'un axone et de synapses à sa sortie.

Lorsque que le corps cellulaire reçoit un signal sous la forme d'un potentiel d'action, il va entraîner une dépolarisation de sa membrane. En fonction de son intensité, cette dépolarisation va générer ou non à son tour un potentiel d'action le long de l'axone puis le transmettre aux neurones suivants par les synapses.

Ainsi, en fonction de la somme des potentiels d'actions reçu par le neurone biologique, ce dernier va s'activer ou non, et propager l'information aux neurones auxquels il est relié.

Pour le neurone artificiel ou neurone formel, c'est le même principe. Il est composé de plusieurs entrées (*inputs*), d'une fonction d'activation associée à un seuil (le biais) et d'une sortie (*output*).

Chaque entrée est affectée d'un poids, c'est-à-dire que chaque entrée aura plus ou moins d'influence sur l'activation du neurone.

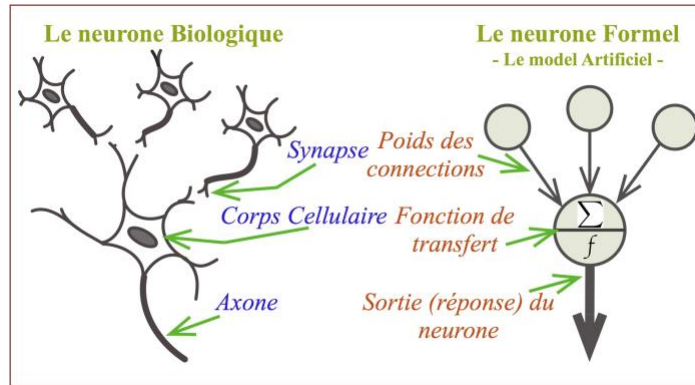


Figure 3. Analogie entre un neurone biologique et un neurone artificiel (33)

La fonction d'activation ou fonction de transfert va être une fonction mathématique spécifique de chaque type de neurone artificiel. Le neurone va calculer la valeur de sortie en appliquant la fonction d'activation à la somme pondérée des valeurs d'entrées. Si cette valeur est au-dessus du seuil d'activation, le neurone sera activé : c'est la propagation.

Par exemple, si on a 3 valeurs en entrée :

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \text{biais}$$

Avec  $x$  qui représente les valeurs en entrée et  $w$  les poids associés à chaque valeur. Le biais est un terme constant.

La valeur obtenue par cette somme est ensuite calculée par la fonction d'activation choisie sous la forme  $f(X) = \text{output}$ , où  $X$  correspondra à la somme pondérée  $\Sigma$ .

Il existe plusieurs types de fonction d'activation comme la fonction linéaire, la fonction seuil, la fonction sigmoïde ou encore la tangente hyperbolique. Le choix de la fonction d'activation se fera selon le type de réseau de neurones que l'on souhaite créer et du problème à résoudre.

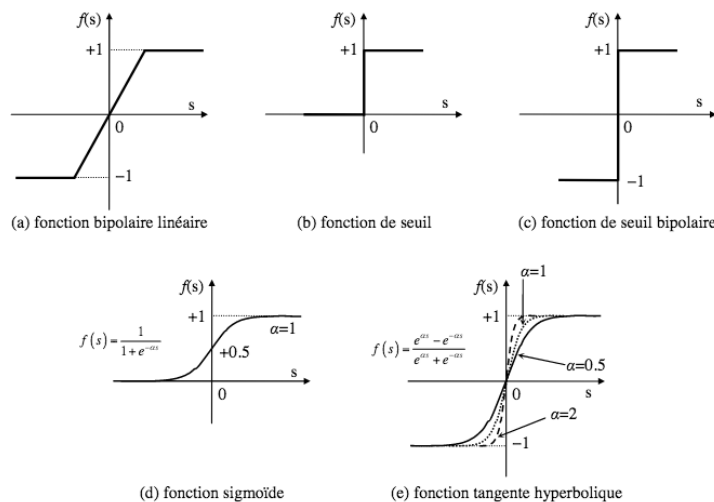


Figure 4. Exemples de fonctions d'activation d'un neurone artificiel (32)

Selon la valeur obtenue en sortie, bonne ou mauvaise réponse, on va ajuster les coefficients de pondération de chaque entrée afin de corriger l'erreur en sortie : c'est la rétropropagation.



La mesure de l'écart entre la sortie du réseau et la sortie souhaitée s'appelle une fonction de coût. Le principe de rétropropagation sera de calculer le gradient de cette fonction de coût par rapport à tous les poids dans le réseau afin de la minimiser.

Un réseau de neurones artificiels est donc constitué d'une multitude de neurones artificiels ou nœuds, organisés en différentes couches et interconnectés. Chaque neurone artificiel d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante, et chaque connexion est affectée d'un poids.

Chaque nœud calcule une somme pondérée de ses entrées, passe le résultat par une fonction de transfert et si le résultat dépasse le seuil donné, envoie sa sortie vers l'entrée des nœuds de la couche suivante.

Les données vont donc être transmises d'une couche à l'autre, on parle de réseau neuronal à propagation avant ou *feed-forward*. On distingue 3 types de couches :

- La **couche d'entrée** (*input layer*) : correspond à l'ensemble des neurones au départ du réseau. Leur nombre peut être très important en fonction des données brutes fournies au réseau neuronal, comme une image composée de milliers de pixels.
- La/les **couche(s) cachée(s)** (*hidden layer*) : ce sont des couches intermédiaires, qui vont permettre de décomposer les données et en extraire les caractéristiques. Leur nombre est très variable également en fonction de la complexité des données à analyser.
- La **couche de sortie** (*output layer*) : correspond à la dernière couche de neurones qui produit le résultat final.

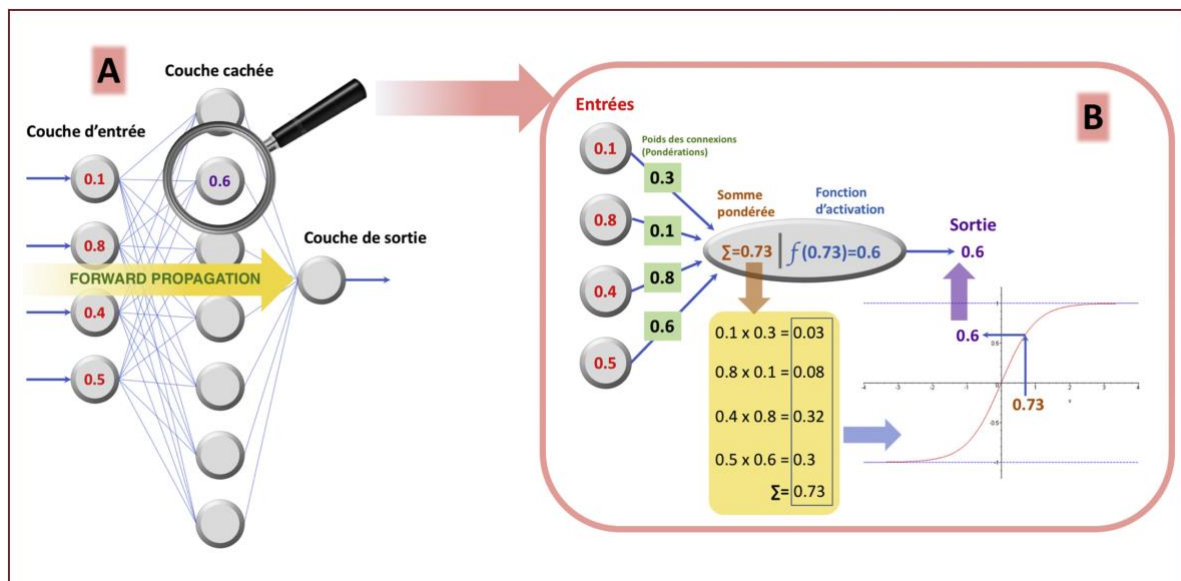


Figure 5. A. RNA à une couche cachée B. Détail d'un nœud du réseau neuronal (33)

Chaque nouvelle itération va permettre d'ajuster les poids des connexions entre les neurones pour aboutir à un résultat plus précis et fiable.

C'est sur ce principe de réseaux de neurones artificiels multicouches que se base l'apprentissage profond.

### I.3.6. L'apprentissage profond (ou deep learning DL) (34–36)

L'apprentissage profond est un sous-ensemble de l'apprentissage automatique qui intègre des réseaux comprenant des millions de neurones formels, afin d'apprendre de manière itérative à partir de grandes quantités de données. Le terme « profond » est associé à la profondeur des couches. Même si les réseaux de neurones utilisés dans le deep learning ressemblent aux réseaux traditionnels, ils comportent beaucoup plus de couches cachées car ils permettent de résoudre des problèmes beaucoup plus complexes.

Le plus souvent, les algorithmes de machine learning nécessitent des données structurées et étiquetées pour faire des prédictions. Ces données doivent être étiquetées par un expert humain auparavant, qui va déterminer la hiérarchie des caractéristiques permettant de comprendre la différence entre les entrées de données lors de l'apprentissage.

Contrairement au machine learning classique, le deep learning permet à la machine d'apprendre à partir de données non étiquetées et non structurées (comme des images ou des sons). L'algorithme automatise l'extraction des caractéristiques des données.

Par exemple, on veut permettre à l'algorithme de classer des images de chats et de chiens en 2 classes. Dans le cas d'un apprentissage profond, l'algorithme déterminera lui-même les caractéristiques (moustache, museau, oreille...) qui permettent de classer une image dans telle ou telle catégorie. Cependant, les données étant moins structurées, un modèle d'apprentissage profond aura besoin d'un plus grand nombre de données pour améliorer sa précision.

La plupart des réseaux neuronaux profonds sont de type *feed-forward*. Mais certains algorithmes sont capables de corriger leur taux d'erreur par un processus de rétropropagation. En fonction de son taux d'erreur en sortie, l'algorithme va ajuster lui-même les coefficients de pondérations de ses connexions en remontant les couches pour diminuer ce taux, sans intervention humaine.

Selon le domaine d'utilisation du deep learning, il existe différents types d'architectures de réseaux de neurones artificiels comme les perceptrons multicouches (utilisés pour faire des prédictions) ou les réseaux de neurones récurrents (utilisés dans la reconnaissance vocale). Ceux qui sont les plus utilisés actuellement dans le domaine médical sont les réseaux de neurones convolutifs, très performants dans le domaine la reconnaissance d'image.

### I.3.7. Les réseaux de neurones convolutifs (convolutional neural network CNN)

Les réseaux de neurones convolutifs sont composés d'un empilement de quatre principaux types de couches :

- Les couches de convolution
- Les couches d'activation (*Rectified Linear Units ReLU*)
- Les couches de regroupement (ou *pooling*)
- La couche entièrement connectée (ou *fully-connected*)

La couche de **convolution** consiste à appliquer un filtre ou matrice mathématique de taille définie à une image, qui correspond à une matrice de pixels. Le filtre va glisser sur l'image et pour chaque pixel, va le multiplier par la valeur correspondante de sa matrice. Un produit scalaire est donc calculé entre les pixels en entrées et le filtre.

Les résultats de chaque case de la matrice vont être additionnés et ce résultat obtenu formera une partie d'une nouvelle image convoluée, appelée *feature map*. La matrice se déplace d'une case à chaque itération jusqu'à ce que la première ligne soit finie. Puis lorsque la première ligne est finie, la matrice descend d'une case et répète le même procédé.

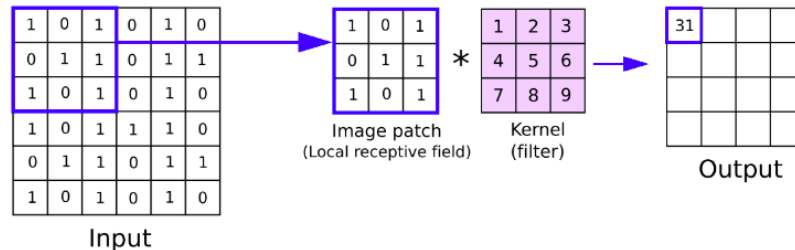


Figure 6. Schéma du processus de convolution. (37) Dans cet exemple, le filtre appliqué à la matrice de pixel permet d'obtenir la somme des produits scalaires suivant :

$$\Sigma = 1 \times 1 + 2 \times 0 + 3 \times 1 + 4 \times 0 + 5 \times 1 + 1 \times 6 + 7 \times 1 + 8 \times 0 + 9 \times 1 = 31$$

La couche d'**activation** correspond à l'application de la fonction ReLU à chaque pixel de l'image après qu'il soit passé par la couche de convolution. Elle permet de remplacer chaque valeur négative par zéro pour ne pas obtenir une fonction linéaire après convolution car aucune fonction d'activation n'est appliquée lors de la convolution.

La couche de **regroupement** reçoit en entrée plusieurs *feature maps* et applique à chacune d'elle une opération de *pooling*. Cela consiste à réduire la taille des images en préservant les caractéristiques importantes. L'image est découpée en cellules régulières et seule la valeur maximale au sein de chaque cellule est retenue, ou bien la valeur moyenne. Cela permet de réduire le nombre de paramètres et de calculs dans le réseau et de diminuer le sur-apprentissage. Par exemple, pour un groupe de 4 pixels, le pixel ayant la valeur maximale est retenue (*max pooling*), ou seule la moyenne des 4 pixels est retenue (*average pooling*).

La couche **entièrement connectée** constitue toujours la dernière couche du CNN. Cette couche reçoit un vecteur en entrée et produit un autre vecteur en sortie, en appliquant une combinaison linéaire voire une fonction d'activation aux valeurs reçues en entrée. Elle permet de classifier l'image en entrée du réseau, en renvoyant un vecteur de taille N, où N est le nombre de classes dans le problème de classification d'images. Chaque valeur du vecteur indique la probabilité que l'image appartienne à telle ou telle classe.

Par exemple, si l'on cherche à identifier les chats ou les chiens sur une image, le vecteur final sera de taille 2. La première valeur donnera la probabilité que l'image appartienne à la classe « chat » et la deuxième valeur la probabilité que l'image appartienne à la classe « chien ». Par conséquent, un vecteur [0.9 0.1] signifie que l'image a 90% de chances de représenter un chat.

Dans un réseau de neurones convolutifs, on va retrouver une alternance de couches de convolution/activation et de couches de *pooling*. La fonction ReLU doit obligatoirement être appliquée après une étape de convolution, mais le *pooling* n'est pas toujours obligatoire. Tous les réseaux de neurones convolutifs commencent par une couche de convolution et finissent par une couche entièrement connectée.

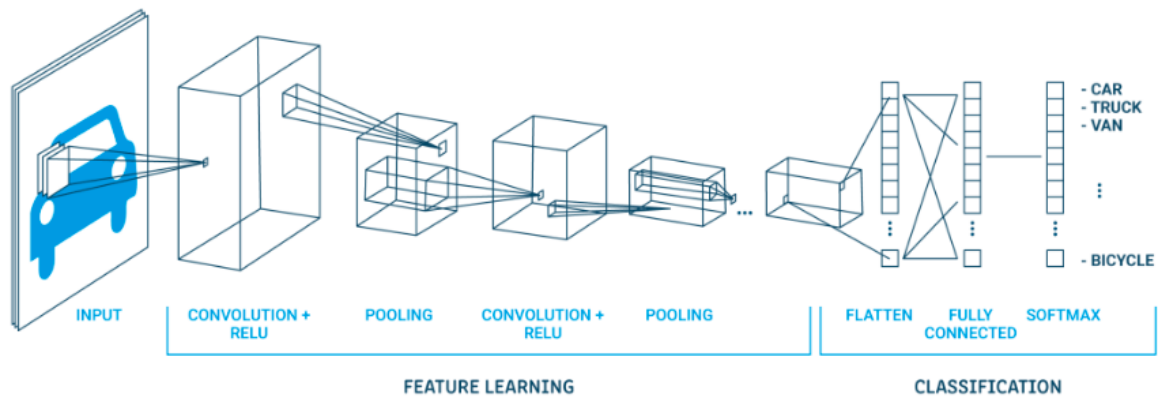


Figure 7. Organisation schématique d'un réseau de neurones convolutifs (36)

### I.3.8. La vision par ordinateur et la reconnaissance d'image (8,38–41)

La vision par ordinateur regroupe l'ensemble des techniques qui permettent à un système d'analyser une donnée visuelle (image, vidéo...) pour en extraire des informations et prendre des décisions.

Ces données visuelles peuvent être des fichiers informatiques ou captés en temps réel par des caméras.

La computer vision est subdivisée en 2 principales branches, la Machine Vision et la reconnaissance d'image.

La Machine Vision est une technique utilisée notamment dans l'industrie. Son fonctionnement se base sur de la géométrie et l'analyse de points d'intérêts prédéfinis, pour déterminer la forme d'un objet à identifier. Elle ne nécessite pas l'utilisation de machine learning car ce système n'a pas besoin d'être entraîné.

La reconnaissance d'image permet d'analyser des images pour l'automatisation d'une tâche spécifique. Elle permet de faire de la classification, de la détection et de la segmentation d'objets.

- **Classification**

Cela consiste pour l'algorithme à reconnaître à quelle catégorie appartient une image parmi un groupe de catégories prédéfinies. Chaque donnée sera obligatoirement associée à une classe (ou étiquette), l'algorithme traite l'image entière comme un tout. La labellisation ou *tagging* est une technique particulière de classification qui permet d'assigner une image à une ou plusieurs catégories (*tag*), afin de former des sous-classes.

- **Détection**

C'est une technique de reconnaissance d'image qui est utilisée pour identifier et localiser un ou plusieurs objets déterminés dans une image ou une vidéo. Les objets reconnus sont alors délimités par un rectangle appelé *bounding box*. On ne s'intéresse pas à une classe unique pour une image mais plutôt aux différents objets associés à différentes catégories au sein d'une même image.

- **Segmentation**

La segmentation repose sur le principe de la détection mais de façon plus précise. Elle permet de détecter un objet au pixel près et donc de délimiter précisément chaque élément d'une image.

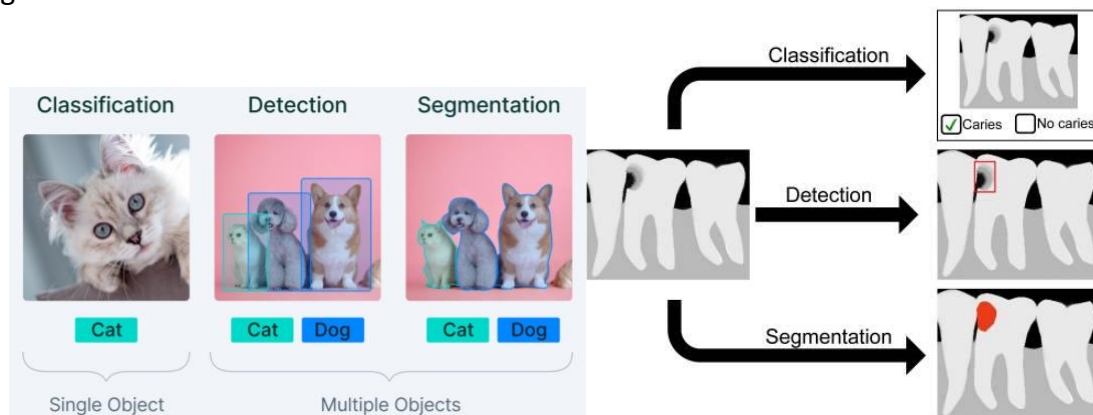


Figure 8. Les tâches les plus courantes dans le domaine de la reconnaissance d'image (42,43)

Le plus souvent, lorsque le programme reconnaît un motif dans l'image par détection ou segmentation, l'annotation du motif est assortie d'un score de confiance. Il s'agit de la probabilité que la prédiction de l'annotation soit juste, c'est-à-dire à quel point l'algorithme est sûr que tel motif dans l'image représente bien un chien ou un chat par exemple.

La reconnaissance d'image s'appuie sur l'apprentissage automatique et les réseaux neuronaux, notamment les CNN.

Le principe de fonctionnement va donc passer par une phase d'entraînement du réseau de neurones artificiels sur des données visuelles définies, afin qu'il puisse reconnaître les modèles recherchés sur une image.

Un fois qu'il est constitué, il est nécessaire d'annoter ou d'étiqueter le jeu de données d'entraînement en indiquant précisément sur chaque image l'objet d'intérêt. Après cette première phase d'annotation, on peut passer à la phase d'entraînement du modèle. Il est donc important que les données d'entraînement soient correctement annotées au départ sinon le programme apprendra de mauvaises associations. De plus, pour avoir un bon taux de réussite, le système nécessite en moyenne 1000 images par type d'objet à reconnaître lors de sa phase d'entraînement, donc l'accès à une grande quantité de données au départ.

La reconnaissance d'image fonctionne de façon similaire à l'œil humain, en analysant chaque pixel qui constitue une image.

Le programme va traiter l'image sous la forme d'une matrice de pixels, dans laquelle chaque pixel prend un ensemble de valeurs représentant la présence et l'intensité des trois couleurs rouge, vert et bleu.

Le programme va effectuer des calculs complexes sur cette matrice à partir des valeurs attribuées à chaque pixel pour déterminer ce que représente l'image. Plus l'image est grande, plus il y aura de pixels et plus la matrice sera grande.

Le principe de la reconnaissance d'image est une des branches d'IA les plus utilisées dans le domaine médical actuellement, notamment pour l'analyse des examens d'imagerie.

### I.3.9. Les systèmes experts (44–46)

Comme nous l'avons évoqué dans le premier paragraphe, il s'agit d'un programme qui effectue les mêmes analyses qu'un expert humain dans un domaine bien défini. Il est utilisé pour réaliser des tâches intellectuelles, basées sur l'exploitation de connaissances. Au départ, le concepteur du système doit donc effectuer l'acquisition des connaissances grâce à une collaboration avec des experts du domaine d'application du système.

Les experts vont enrichir le programme avec des connaissances théoriques ou académiques, mais aussi par leur expérience personnelle.

Un système expert se compose de 3 parties :

- Une **base de règles** : elle contient les connaissances associées au domaine. Ces règles sont exprimées sous une forme « si » (condition) « alors » (conclusion)
- Une **base de faits** : elle contient les données relatives à la demande traitée qui servent au raisonnement. Elle peut également inclure des faits permanents et des faits déduits, c'est-à-dire des solutions intermédiaires ou des conclusions partielles trouvées lors du raisonnement.

La base de faits et la base de règles forment la base de connaissances du programme.

- Un **moteur d'inférence** : c'est un programme qui applique une stratégie de résolution en mettant en relation les règles et le contenu de la base de faits. Il va effectuer des déductions logiques en exploitant les connaissances.  
L'algorithme va analyser si les conditions des règles sont valides ou non. Une règle dont la condition est valide est dite applicable. Chaque condition correspond à un fait, elle est valide si le fait est présent dans la base, fautive si le fait contraire est présent dans la base et inconnu si le fait est absent.

Dans le cas où la condition est valide, la conclusion de la règle peut être une action à effectuer ou un fait à déduire et à rajouter dans la base des faits.

Le moteur d'inférence peut fonctionner de 2 façons différentes :

- **Chaînage avant** : le moteur d'inférence utilise les règles des conditions vers les conclusions. Le raisonnement est guidé par les faits, l'objectif étant de rechercher les règles dont les conditions sont validées par les faits pour aboutir à une conclusion. Il est possible de mettre des priorités sur certaines règles afin de hiérarchiser les connaissances. C'est ce principe qui est utilisé dans le cas du diagnostic où l'on part de l'état observé pour remonter à la cause.
- **Chaînage arrière** : le moteur d'inférence utilise dans ce cas les règles des conclusions vers les conditions. Le raisonnement va être guidé par le but qui est un fait à démontrer.

Parmi les différents types de systèmes experts, on retrouve les systèmes d'aide à la décision médicale. Ce sont des outils qui fournissent au clinicien les connaissances scientifiques relatives à une situation clinique donnée et des recommandations de bonnes pratiques.

#### I.4. L'IA dans la vie quotidienne

Plusieurs exemples de l'utilisation de l'IA sont apparus dans notre vie quotidienne ces dernières années. (47)

Les **moteurs de recherche** fonctionnent sur le principe de l'IA. Ce sont des robots fonctionnant grâce à des algorithmes. Ils sont chargés de collecter une grande quantité de données. Les pages web collectées par le moteur de recherche sont analysées, indexées et classées. Lors d'une recherche par l'utilisateur, le moteur de recherche va analyser les mots clés entrés par l'utilisateur afin de lui proposer les résultats les plus pertinents.

Les derniers moteurs de recherche sont également capables d'améliorer leur algorithme par apprentissage, en fonction de la satisfaction des utilisateurs. (48)

Les **assistants vocaux** sur nos smartphones (Siri®, Google Assistant...) sont également basés sur de l'intelligence artificielle. Ces logiciels reconnaissent un mot clé pour s'auto-activer, captent la question orale de l'utilisateur puis la transcrivent en mots. À partir de ces mots, ils extraient le sens de la requête, définissent quelle réponse y apporter et réalisent une action en conséquence ou énoncent une réponse. (49)

Certains assistants vocaux sont même dotés d'une technologie de biométrie vocale qui leur permet d'identifier la voix d'un utilisateur spécifique.

Plus récemment, la **reconnaissance faciale** s'est intégrée aux réseaux sociaux ou dans certains smartphones. C'est une technologie basée sur l'intelligence artificielle qui permet de reconnaître le visage d'un utilisateur en le comparant avec ceux enregistrés dans sa base de données.

Dans un premier temps, le logiciel analyse et pointe les nombreuses caractéristiques du visage de l'utilisateur comme la distance entre les yeux, la longueur de nez, la forme des joues, etc. Ces caractéristiques sont propres à chaque individu. Des milliers de points sont ainsi collectés et créent un modèle informatique, qui permet de représenter le visage au sein de la base de données. (50)

Lors du déverrouillage du téléphone par exemple, le logiciel va analyser de nouveaux ces points sur le visage de l'utilisateur pour comparer si le modèle en direct est identique ou non à celui enregistré dans sa base de données.

Ce principe est également utilisé sur les réseaux sociaux pour identifier de manière automatique des individus sur des photographies.

Enfin, les **voitures autonomes** sont également un exemple d'intelligence artificielle au quotidien. Même si elles ne sont pas encore totalement autonomes, certaines voitures peuvent se déplacer sans intervention humaine. La présence de nombreux capteurs (visuels, sonores, lumineux...) permet à la voiture d'analyser son environnement, pour reconnaître un piéton par exemple, et réagir en conséquence. Même si actuellement les conditions de circulation des voitures autonomes sont très limitées (portion de route spécifique, vitesse inférieure à 60 km/h), les avancées technologiques et la législation devraient évoluer dans les années à venir. (51)

## **I.5. Applications actuelles en odontologie**

Depuis plusieurs années, les systèmes d'IA utilisant les réseaux de neurones artificiels et la computer vision ont été utilisés pour aider à la prise de décision et au diagnostic dans plusieurs secteurs de la médecine ou pour faciliter la planification du traitement par les médecins.

On retrouve des applications notamment pour le diagnostic, le pronostic et la gestion du traitement de cancers (sein (52), poumon (53)), pour l'analyse histopathologique (54), en ophtalmologie (55), en neurologie (56) ou encore en cardiologie (57).

Les recherches concernant l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le domaine de l'odontologie ont elles aussi considérablement augmenté ces dernières années.

Si on effectue une recherche avancée sur Pubmed avec comme MeshWord « dentistry » et « artificial intelligence » ou « deep learning » sur les 5 dernières années, les publications sur ce sujet sont passées de 3159 publications en 2018 à 19 763 en 2022.

Les récentes études se sont intéressées aux applications de l'IA et notamment de l'apprentissage profond dans les différentes spécialités de la médecine dentaire.

Beaucoup d'études ont porté sur l'utilisation de la computer vision et des CCNs appliqués à l'imagerie dentaire pour faire de l'analyse, de la segmentation et du diagnostic.

Parmi les examens radiographiques, la radio panoramique permet une vue d'ensemble de la dentition du patient tout en étant peu irradiante. Souvent réalisée comme examen de routine, elle a été très utilisée comme donnée de départ dans les premières études. Puis, ont suivi les radiographies rétro-alvéolaires, rétro-coronaires et récemment les images CBCT. D'autres études ont également utilisé les photographies intra et extra-orales.

### **I.5.1. Prévention**

#### **I.5.1.1. Détection de la plaque dentaire**

Les maladies parodontales ou la maladie carieuse ont souvent pour point de départ l'accumulation de plaque dentaire, entraînant un déséquilibre microbien. Par conséquent, la réussite du traitement et l'absence de récurrence de ces maladies implique un bon contrôle de l'élimination de la plaque dentaire par le patient. Cependant, l'identification de la plaque dentaire est souvent difficile pour le patient, surtout quand elle est présente en faible quantité.

You et coll. (58) ont proposé un modèle d'IA basé sur l'apprentissage profond pour détecter la plaque dentaire sur les dents temporaires. Après une phase d'entraînement et de validation sur 886 photographies, 98 nouvelles photos intrabuccales de dents temporaires ont été évaluées par le modèle d'IA. D'autre part, un pédodontiste expérimenté a diagnostiqué la présence de plaque sur ces 98 photos intrabuccales prises par appareil numérique. Un révélateur de plaque a ensuite été appliqué pour contrôler exactement la délimitation de la plaque dentaire. Le test a été effectué une seconde fois une semaine plus tard avec les mêmes photographies.

La précision du modèle d'IA était de 0,736 et celle du dentiste de 0,695. Il n'y avait aucune différence significative entre le diagnostic de la plaque dentaire par l'IA et le dentiste,



montrant bien que la détection par IA n'est pas inférieure à celle du dentiste spécialisé. Ainsi, des technologies d'IA similaires pourraient aider les parents à surveiller l'hygiène bucco-dentaire de leur enfant.

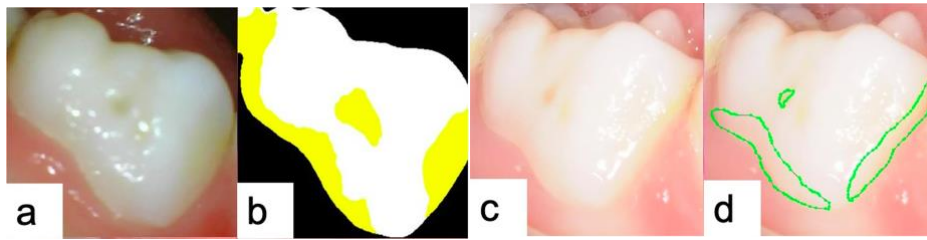


Figure 9. Exemple de détection de la plaque dentaire à l'aide du modèle d'IA. a. photo originale prise par caméra intra-orale b. résultat de la détection et du marquage de la plaque dentaire par le modèle (en jaune) c. photo originale prise par un appareil photo numérique d. annotation de la plaque par le pédodontiste

Dans une étude plus récente (59), la même équipe a développé un modèle similaire pour la détection de la plaque dentaire sur les dents permanentes qui a montré de bons résultats mais nécessite encore un entraînement sur plus de photographies et une comparaison à un expert humain.

#### 1.5.1.2. Brosses à dents connectées (60–63)

La brosse à dents et les mouvements de l'utilisateur sont étroitement associés à l'efficacité de l'élimination de la plaque dentaire par le patient. Une mauvaise technique de brossage peut également entraîner des problèmes dentaires ou parodontaux. Cependant, on ne peut pas être derrière chaque patient pour contrôler qu'il se brosse les dents correctement.

Plusieurs études ont déjà montré l'efficacité du brossage électrique par rapport au brossage manuel mais depuis une dizaine d'année, et notamment grâce à l'avènement des smartphones, des brosses à dents « intelligentes » ont été développées (*Genius X* et *iO10* par Oral-B®, *Hum* et *Connect E2* par Kolibree®).

Ces brosses à dents utilisent des gyroscopes et accéléromètres pour détecter l'emplacement et l'orientation de la brosse, ainsi que des capteurs pour surveiller la pression et le temps de brossage.

Dans le cas des brosses à dents Oral-B®, les données sont envoyées à une application qui utilise un algorithme de deep learning pour identifier en temps réel l'endroit où l'utilisateur se brosse les dents. Cela permet un suivi des dents en 3D sur l'application mobile via Bluetooth, et visible par l'utilisateur.

L'algorithme combine la connaissance de milliers de comportements de brossage individuel et guide l'utilisateur vers une meilleure habitude de brossage.

La brosse à dents est également capable d'analyser la pression exercée et de changer de mode de brossage en cas de pression trop élevée.



Figure 10. Capture d'écran de l'application Oral-B après un brossage avec la brosse à dent iO9

Pour la brosse à dents de Kolibree<sup>®</sup>, les algorithmes de deep learning sont dans un processeur à l'intérieur de la brosse à dent, ce qui permet au système d'apprendre les habitudes de l'utilisateur pour affiner la précision au fur et à mesure de l'utilisation. La brosse à dent peut donc également fonctionner même si elle n'est pas connectée à l'application mobile, les données du brossage étant stockées puis synchronisées une fois l'application ouverte.

Cette interactivité permet à l'utilisateur d'obtenir un retour d'information personnalisé et spécifique à ses besoins en matière d'hygiène bucco-dentaire, le tout dans un cadre plus ludique. Cette technologie permet également au praticien et au patient d'examiner ensemble les données de brossage réelles, afin de discuter des améliorations en matière d'hygiène bucco-dentaire.

Une étude de Erbe et coll. (64) a notamment souligné l'intérêt de l'utilisation de ces brosses à dents connectées chez les adolescents, qui ont tendance à négliger leur brossage biquotidien mais qui utilisent régulièrement des appareils connectés.

Cette étude a évalué l'efficacité de l'élimination de la plaque dentaire ainsi que la durée du brossage avec une brosse à dents interactive par rapport à une brosse à dents manuelle chez 60 adolescents pendant 2 semaines. La différence entre les groupes en matière de réduction de plaque en faveur du groupe des brosses à dents interactives était statistiquement significative. De plus, le temps de brossage dans le groupe des brosses à dents électriques a également augmenté par rapport au groupe témoin resté avec des brosses à dents manuelles. Cela montre donc l'intérêt de ce type de brosse à dents pour certaines catégories de la population.

Cependant, il serait intéressant de comparer l'amélioration du brossage entre une brosse à dents électrique classique et une brosse à dents connectée.

Plus récemment, une étude de Jeon et coll. (65) a analysé les effets d'une formation au brossage des dents basée sur la réalité virtuelle et utilisant une brosse à dents intelligente chez des personnes présentant une déficience intellectuelle. Les résultats ont montré que cette formation était plus efficace qu'une formation à l'aide de matériel visuel.

## **1.5.2. Odontologie prothétique**

### 1.5.2.1. Conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO)

Depuis 40 ans, la CFAO a révolutionné le monde de la dentisterie, que ce soit dans les laboratoires de prothèses pour la conception et l'usinage ou directement au fauteuil avec les caméras intra-orales et la réalisation de prothèse par usineuse comme le système CEREC®.

Aujourd'hui, les logiciels d'IA font partie intégrante de la chaîne de CFAO. Ils permettent d'améliorer la qualité des prothèses et de simplifier les opérations de laboratoire. En effet, les logiciels de CFAO intègrent des algorithmes d'IA qui permettent d'assister le prothésiste dans la réalisation d'une prothèse fixe idéale en termes de forme, d'esthétique et de fonction. Le logiciel analyse l'empreinte de la préparation et propose des choix thérapeutiques.

Pour le traitement des édentations partielles, Chen et coll. (66) ont développé un système d'aide à la décision clinique pour le choix de la conception des prothèses partielles amovibles en fonction du type d'édentement.

Un logiciel d'IA peut également assister le prothésiste lors de la conception d'un châssis métallique pour réaliser la prothèse amovible la plus pertinente.

Enfin, l'IA permet de faciliter l'utilisation de la CFAO au fauteuil, que ce soit lors de l'empreinte optique ou lors de la conception de prothèse la mieux adaptée au patient. (67,68)

### 1.5.2.2. Les caméras intra-orales

Les caméras 3D sont de plus en plus utilisées dans les cabinets dentaires, permettant d'améliorer le flux de travail du praticien.

Depuis leur sortie sur le marché, ces caméras se sont perfectionnées. Auparavant, il fallait un protocole de numérisation plus contraignant, en commençant par exemple sur la surface occlusale d'une molaire, sinon le logiciel avait du mal à se repérer et à créer le modèle de reconstruction en 3D.

Maintenant, les caméras intègrent des logiciels d'IA pour améliorer l'acquisition. On peut commencer l'acquisition à partir de n'importe quelle dent et dans le sens que l'on souhaite. Grâce à un processus de nettoyage du scan utilisant l'IA, au fur et à mesure de la progression de la caméra, le logiciel analyse les images pour réaliser le modèle virtuel de la bouche du patient de manière plus précise.

Le logiciel d'IA permet de compléter automatiquement et de manière fiable certaines zones que l'utilisateur n'a pas réussi à enregistrer (cervicale ou interdentaire par exemple). Ce type de logiciel analyse également si la clarté de la marge ou du point de contact est suffisante pour une reconstitution automatique fiable ou s'il est nécessaire que le praticien réalise une nouvelle empreinte (69).

Le logiciel SmartMargin de Pearl permet, via l'IA, le marquage instantané des marges des préparations coronopériphérique sur les empreintes numériques pour faire gagner du temps au prothésiste. Pour l'empreinte au fauteuil, les logiciels intégrés dans les caméras optiques permettent de déterminer avec précision les limites cervicales de préparations infragingivales. L'IA permet aussi d'accélérer le processus de calage de l'occlusion des 2 arcades en n'ayant besoin de scanner qu'une petite partie seulement de l'occlusion, le positionnement des arcades antagonistes se faisant ensuite automatiquement.

Enfin, le logiciel Trios Patient Monitoring permet de suivre l'évolution de l'état bucco-dentaire du patient en repérant les nouvelles zones d'usure dentaire sur des nouvelles empreintes par rapport à celles réalisées antérieurement. (70)

#### 1.5.2.3. Projet esthétique

Dans la société actuelle, les patients font plus attention à leur sourire et à son importance pour l'acceptation sociale et la confiance en soi. De plus, beaucoup sont confrontés aux modèles présentés comme des références de la beauté sur les réseaux sociaux. Ainsi, la demande de soins esthétiques dans les cabinets dentaires a augmenté ainsi que l'exigence des patients. Pour aider le praticien dans la réalisation du projet esthétique et sa communication avec le patient, des logiciels utilisant l'IA ont été développés.

*Smilecloud* est une application lancée en 2019 basée sur l'IA et permettant de faire de la simulation esthétique automatiquement. (71)

Le praticien réalise une photo du visage du patient en sourire forcé puis la rentre dans l'application. Le logiciel réalise alors une proposition de smile design de manière automatique. Le praticien peut alors modifier la proportion des dents, leur position, les embrasures en fonction de ses propres critères. Une fois les caractéristiques validées, le logiciel propose une simulation esthétique à partir d'une base de données de dents naturelles. Pour faire son choix, le logiciel utilise un algorithme d'IA qui va rechercher des formes de dents similaires au projet et va déterminer automatiquement la teinte la plus adaptée. Le praticien peut là encore modifier la teinte ou la forme des dents.

En juin 2021, une start-up française a sorti *Smile+*, un outil utilisant l'intelligence artificielle pour modéliser le sourire idéal d'un patient à partir de photographies prises avec un smartphone. (72)

À partir d'une photographie réalisée avec puis sans écarteur, le logiciel crée un smile design automatisé en quelques secondes et adapté aux caractéristiques esthétiques du patient. Le logiciel va réaliser la segmentation et la labellisation des dent, puis il va générer le smile design à partir notamment de la détection de points d'intérêts dentaires et faciaux. Le modèle créé peut ensuite être modifié par le praticien. Le modèle est aussi généré en 3D, et une fois validé il peut ensuite être envoyé au prothésiste pour réaliser un mock-up.

Ces types de logiciels permettent donc de faciliter la planification du traitement par le praticien en aidant à la modélisation du projet prothétique idéal, mais aussi dans son explication au patient ou dans la communication avec le laboratoire.

#### 1.5.2.4. Préparation corono-périphérique

En 2015, Otani et coll. (73) ont évalué la précision et l'exactitude d'un système robotique automatisé pour la réalisation d'une préparation dentaire pour facette en céramique. Dix modèles d'incisives centrales maxillaires ont été préparées par le bras robotique à l'aide d'une pièce à main et d'une fraise diamantée. Dix autres modèles d'incisives centrales maxillaires ont été préparées par un clinicien humain afin d'effectuer une comparaison. Chaque incisive était fixée sur un modèle de mâchoire lors de la préparation. Avant la préparation, les incisives ont été scannées et une préparation idéale a été conçue sur une image reconstruite en 3D. Après préparation, le robot a montré une précision légèrement inférieure à l'humain, mais avec tout de même de bons résultats notamment pour la préparation de la ligne de finition cervicale. La préparation du robot se rapprochait aussi beaucoup plus du modèle prédictif. Ce principe pourrait être intéressant pour préparer la dent en fonction de la conception de la préparation virtuelle, et donc pour fabriquer en amont la prothèse définitive qui serait mise en place directement après la préparation.

### **1.5.3. Implantologie**

#### 1.5.3.1. Identification du modèle implantaire

À la suite de l'essor de l'implantologie orale durant la dernière décennie, les fabricants d'implants se sont multipliés, ainsi que la création de différents types de systèmes d'implants. Les traitements implantaires présentent actuellement un excellent taux de réussite et de survie à long terme. Cependant, des complications biologiques (péri-implantites) ou mécaniques (fracture prothétique, dévissage) peuvent nécessiter des réinterventions. Dans ce cas, il est primordial que le praticien prenant en charge le patient puisse identifier la marque et le modèle de l'implant. Si le praticien qui effectue ce suivi n'est pas le même que celui qui a posé l'implant, ou si le patient ne dispose pas de ces informations, cela peut être plus compliqué.

Plusieurs études (74–78) se sont donc intéressées à l'utilisation de l'IA et du deep learning pour aider le clinicien dans la classification d'implants dentaires à partir de radiographies panoramiques. Dans ces études, la classification était basée sur le type d'implant (marque ou modèle) et les précisions obtenues par l'IA allaient de 0,63 à 0,96.

Une étude plus récente de Kohlakala et coll. (79) s'est également intéressée à identifier par des systèmes d'IA le type de connexion implantaire à partir d'une reconstruction en 3D.

Ils ont obtenu une précision de 68,67% pour les systèmes entièrement automatisés, sur des implants insérés dans des mâchoires humaines.

Une autre étude de Lee et coll. (80) a porté sur l'amélioration de la précision de professionnels dentaires dans la classification des implants à partir de radiographies, quand ceux-ci sont assistés par un algorithme de deep learning. L'utilisation de l'algorithme a entraîné une amélioration statistiquement significative de la précision dans la classification des dispositifs implantaires par les professionnels dentaires. Les chirurgiens-dentistes non spécialisés en implantologie ont notamment montré la plus grande amélioration, en atteignant une précision moyenne similaire à celle de l'algorithme.

Enfin, une start-up française, *Spotimplant*, a lancé en 2020 un site internet d'identification d'implant dentaire utilisant l'apprentissage profond. À partir d'une radiographie rétro-alvéolaire de l'implant à identifier, le logiciel analyse l'image et la compare à sa base de données comprenant plus de 3500 références. Le rapport d'identification est contrôlé par un expert en implantologie, puis transmis au praticien. En plus de donner la marque et le modèle de l'implant, le logiciel y ajoute le score de confiance et les caractéristiques de l'implant comme le type de connectique, la forme du corps ou les dimensions de l'implant. (81)

#### 1.5.3.2. Planification implantaire

La mise en place d'implant dentaire chez un patient nécessite tout un travail d'étude du cas en amont, avec notamment une étape planification implantaire à l'aide d'un logiciel spécifique permettant de déterminer la faisabilité ou non du traitement.

Une étude de Bayrakdar et coll. (82) s'est intéressée à la possibilité d'utilisation de RNA pour réaliser la planification des implants en utilisant des images CBCT. Un praticien ayant plus de 8 ans d'expérience a effectué l'analyse des images CBCT de 75 patients comme pour une planification implantaire, en prenant en compte les limites des structures anatomiques. Après cette évaluation, les fichiers ont été analysés par le CNN de *Diagnocat Inc.* afin de déterminer la localisation du canal mandibulaire, des sinus et fosses nasales, ainsi que la hauteur et largeur de l'os dans les zones de dents absentes.

Les données obtenues par évaluation manuelle et par le réseau de neurones artificiels ont été comparées. Les régions de dents manquantes ont été correctement détectées par l'IA à 95,3%, le canal mandibulaire à 72,2% (avec 97,5% au niveau molaire) et les sinus à 66,4%. Pour les mesures de hauteur d'os, il n'y avait pas de différences statistiquement significatives entre les mesures de l'IA et manuelles, mais il y avait des différences statistiquement significatives entre les mesures d'épaisseur d'os.

Auparavant, une étude de Kwak et coll. (83) s'était déjà intéressée à la localisation automatique du canal mandibulaire sur des images issues de CBCT à l'aide de trois types différents de CNN. Ils avaient obtenu une précision de 0,99 avec le U-Net 3D, et le SegNet 2D présentait également une précision élevée de 0,96.

La densité osseuse de la région d'intérêt où l'on souhaite poser notre implant va également influencer le choix de l'implant, la séquence de forage ou encore la stabilité primaire de l'implant.

Dans une étude de Xiao et coll. (84), une méthode d'IA utilisant l'apprentissage profond a été utilisée pour déterminer les types de densité osseuse à différents endroits des sites d'implantation à partir de données radiologiques obtenues par CBCT. L'objectif était d'obtenir une méthode automatique de classification de la densité osseuse de l'os en 5 catégories. Ces données ont été séparées en 605 ensembles d'entraînement et classées en 5 types en fonction de la valeur de l'unité Hounsfield (HU). Quatre médecins formés ont classé manuellement les zones du niveau de densité osseuse de la mâchoire sur l'image à l'aide d'un logiciel, puis confirmé par un expert.

Les valeurs moyennes HU des différentes catégories marquées par les spécialistes ont ensuite été comparées aux valeurs moyennes détectées par le modèle d'IA. Après l'entraînement, les résultats statistiques des valeurs moyennes HU détectées par le modèle étaient presque identiques à celles de l'annotation par les spécialistes.

L'IA permettrait donc de mieux guider le praticien peu expérimenté dans sa pratique, et de prévoir les difficultés de stabilité primaire en fonction du site et de sa densité osseuse.

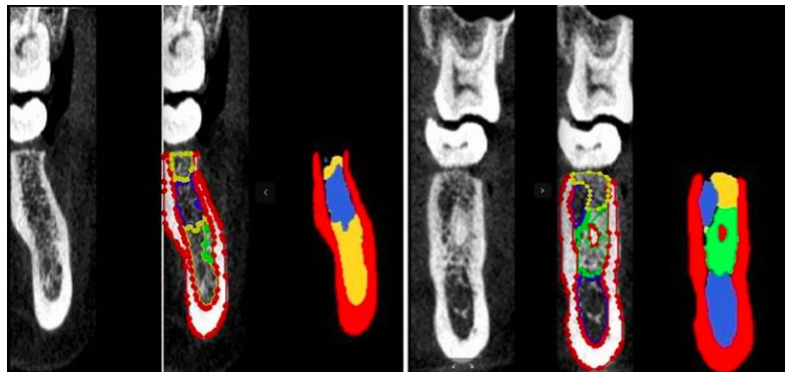


Figure 11. Section de la densité minérale osseuse et sa cartographie d'identification. De gauche à droite, image CBCT originale, labellisation par l'expert, cartographie par le modèle d'IA (84)

Ces études donnent déjà des perspectives pour l'utilisation de l'IA dans la planification du traitement implantaire, mais il faudra des études approfondies pour améliorer la mesure de l'épaisseur et la localisation des sinus et fosses nasales avant de l'utiliser en situation clinique.

#### 1.5.3.3. Chirurgie implantaire

Enfin, l'IA peut dorénavant intervenir au niveau de la phase chirurgicale. La chirurgie guidée par robot présente l'avantage d'une meilleure stabilité, d'une efficacité et d'une précision supérieures. (85)

La start-up *Neocis Inc.* a développé un robot d'assistance à la chirurgie implantaire nommé *Yomi*<sup>®</sup>. Il a obtenu l'autorisation de la FDA pour son utilisation dans les procédures de pose d'implants dentaires simple ou en arcade complète, ainsi que pour les réductions osseuses (86). Selon *Neocis*, le robot *Yomi*<sup>®</sup> a déjà été utilisé pour la pose de plus de 21 000 implants dentaires depuis son lancement.

Ce système est équipé d'un bras robotique permettant d'accompagner le praticien lors de la chirurgie en utilisant un guidage physique avec un retour de force haptique, afin que le chirurgien réalise l'ostéotomie et la mise en place des implants avec une meilleure précision. Le bras robotique vient restreindre le mouvement du contre angle chirurgical pour le placer dans la position idéale, et prévenir toute déviation du bras du chirurgien lors du forage.

Le système comprend également un bras avec un traceur qui est fixé sur le patient lors de la chirurgie pour permettre au robot de se repérer et de suivre les éventuels mouvements du patient.

Le chirurgien peut contrôler à l'écran l'ensemble des paramètres (axe, profondeur de forage...) en temps réel, la planification ayant été rentrée au préalable dans le système.



Figure 12. Photographie du robot Yomi® (87)

Concernant la mise en place d'implants sur arcade complète, les résultats de l'étude de Bolding et coll. (88) démontrent une précision élevée avec une déviation angulaire de seulement  $2,56 \pm 1,48$  degrés par rapport à la planification, et une déviation du col de l'implant de  $1,04 \pm 0,70$  mm. La déviation moyenne de profondeur était de  $0,42 \pm 0,46$  mm. Les résultats comparés à des études utilisant des guides statiques ou une navigation dynamique ont montré que le guidage robotique était au moins aussi précis que le guidage statique ou la navigation dynamique.

Une étude de cas de 2020 (89) a également mis en évidence une moindre déviation de la position de l'implant comparativement à la planification lors d'une chirurgie guidée par robot, par rapport à une chirurgie guidée par guide stéréolithographique.

En 2021, un système robotique autonome de chirurgie nommé *Remebot*®, initialement développé pour la neurochirurgie, a été approuvé pour la chirurgie des implants dentaires par l'Administration Nationale des produits médicaux en Chine (90). Il a été classé comme un système robotique semi-actif et autonome. L'ostéotomie et la mise en place de l'implant sont réalisées automatiquement par le robot, et les chirurgiens peuvent surveiller en parallèle ses performances lors de l'opération. Le système robotique comprend un bras articulé, un traceur optique, un marqueur de positionnement et un logiciel d'exploitation. Selon le fabricant, la précision moyenne de positionnement est de 0,156 mm.

Récemment, Yang et coll. (90) ont publié un rapport de cas présentant une chirurgie implantaire totale du maxillaire réalisée de manière autonome par le robot *Remebot*®. Le robot a réalisé avec succès la pose de 6 implants au maxillaire supérieur pour une mise en charge immédiate d'une prothèse complète. Les moyennes de déviations axiale et angulaire étaient toutes inférieures à 1.



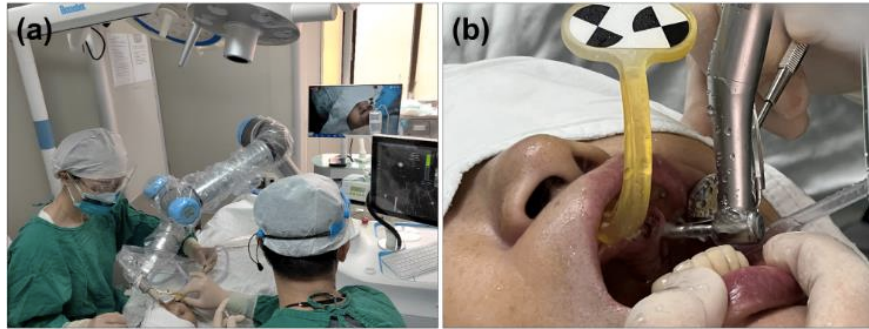


Figure 13. Image per-opératoire de la chirurgie et de l'ostéotomie autonome

Ces 2 types de protocoles, bras du chirurgien guidé par le robot ou chirurgie entièrement automatisée, ouvrent de nouvelles perspectives pour la chirurgie implantaire.

#### I.5.4. Orthodontie

En plus d'un examen clinique, le diagnostic orthodontique s'appuie sur un ensemble de données issues d'examens complémentaires : empreintes d'étude, photographies, radiographies panoramiques et téléradiographies. L'analyse de l'ensemble de ces examens permet à l'orthodontiste d'envisager le traitement le plus adéquat à chaque cas et sa planification.

Plusieurs études se sont donc intéressées à l'utilisation de l'IA afin de faciliter l'exploitation de ces données voire même de l'automatiser afin d'aider les orthodontistes dans la planification du traitement.

L'IA est principalement utilisée dans le domaine de l'orthodontie pour identifier les repères céphalométriques, améliorer la prise de décision d'extraction dentaire, l'analyse du visage, la détermination de l'âge osseux, la prédiction de chirurgie orthognatique ou la nécessité et la réalisation d'un traitement orthodontique (91) (92).

Une revue systématique de Schwendicke et coll. (93) a dénombré 19 études utilisant les réseaux de neurones convolutifs pour l'automatisation de l'identification des repères céphalométriques sur les téléradiographies de profil.

Les études les plus récentes sur ce sujet montrent d'excellent résultats dans l'identification des repères céphalométriques ainsi que l'analyse automatique des mesures à partir de ces repères, avec une précision similaire à un expert humain. (94–97)

Kim et coll. (98) ont proposé une analyse céphalométrique entièrement automatisée grâce à l'utilisation d'un CNN en cascade. L'efficacité du réseau de neurones était comparable à celle de l'expert humain, son erreur moyenne étant de  $0,79 \pm 0,91$  mm et celle de l'orthodontiste de référence de  $0,80 \pm 0,79$  mm. Il pourrait donc être appliqué dans la pratique clinique.

Actuellement, plusieurs sociétés ont sorti des applications logicielles céphalométriques qui sont ainsi disponibles pour les orthodontistes comme *CephX*<sup>®</sup>, *WebCeph*<sup>®</sup> ou *Dolphin*<sup>®</sup>.

*CephX*<sup>®</sup> est la solution d'analyse céphalométrique de la société *ORCA Dental AI*. Les algorithmes du logiciel permettent un tracé automatique des points de repères et une analyse céphalométrique 2D en quelques secondes. Le choix des références utilisées peut être modifié par l'utilisateur, de même que la position des points une fois l'analyse par IA effectuée.

Il permet également de superposer les téléradiographies pour mesurer et suivre les changements au cours du traitement.

Enfin, le logiciel permet une analyse des volumes des voies respiratoires et une segmentation des dents sur CBCT (isolation des dents incluses ou surnuméraires).

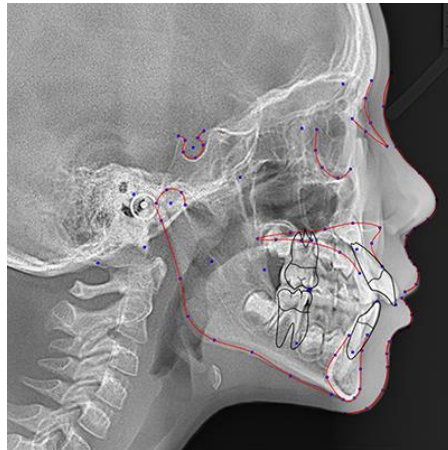


Figure 14. Exemple de tracé céphalométrique automatique par le logiciel Ceph-X®(99)

Une étude de 2016 (100) a montré qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les mesures céphalométriques par méthodes traditionnelles et par le logiciel *CephX*®. Depuis, le logiciel s'est encore perfectionné et il est utilisé en pratique courante par de nombreux praticiens permettant de réduire le temps nécessaire au diagnostic.

L'intelligence artificielle intervient également dans la planification du traitement orthodontique, notamment pour les traitements par aligneurs avec par exemple le *Clinchek*® d'*Invisalign*®.

Depuis une vingtaine d'année, le système *Invisalign*® est une technique de traitement orthodontique par aligneurs transparents qui a déjà traité près de 14 millions de patients dans le monde (101). *ClinchekPro*® est un logiciel basé sur de l'IA et utilisé pour réaliser automatiquement la planification de l'ensemble du traitement, à partir d'empreintes numériques des arcades du patient.

Le praticien prescrit au logiciel les mouvements dentaires et les objectifs du traitement pour arriver au résultat final sur le patient. Le logiciel génère alors une simulation des mouvements des dents nécessaires pour arriver à ce résultat, ainsi que la position des taquets, les zones de stripping, le nombre de gouttières nécessaire et donc la durée totale du traitement.

Le logiciel permet de visualiser toutes les étapes du traitement par une modélisation tridimensionnelle des mouvements dentaires (102,103). Le praticien peut ensuite examiner la simulation du *Clinchek*® et y apporter des modifications.

Dans la dernière version, lorsque le praticien réalise une modification sur le set up comme déplacer une dent ou un taquet par exemple, le logiciel modélise en temps réel l'influence de ce changement sur l'ensemble de l'arcade et donc du set up. Un autre élément intéressant est l'apparition d'un code couleur en fonction des mouvements qu'on souhaite réaliser, qui va indiquer à l'utilisateur la difficulté voire l'impossibilité de réalisation de ce mouvement (104).

Une entreprise française a développé depuis 2015 une application de télédentisterie, *DentalMonitoring*<sup>®</sup>, basée sur l'IA et permettant un suivi à distance des patients en cours de traitement orthodontique. Il s'agit d'une application utilisable sur tous les types de smartphones qui permet de suivre les déplacements dentaires au cours du traitement, à partir de photos et vidéos à balayage prise par le patient avec un écarteur de joues spécifique et une *ScanBox*<sup>®</sup> (105,106).



*Figure 15. Réalisation d'un balayage vidéo endobuccal à l'aide d'un smartphone et du dispositif ScanBox<sup>®</sup> fourni par le fabricant (107)*

Ce système est conçu pour faciliter et normaliser la prise de photos intra-buccales par le patient avec son smartphone, afin de garantir une qualité suffisante des images cliniques. Des instructions sont données à chaque étape pour guider le patient. Après avoir rentré les données dans l'application, le patient peut suivre le protocole choisi par l'orthodontiste. Il s'agit d'un ensemble de commandes qui va indiquer au système d'IA ce qu'il doit surveiller et notifier au praticien référent, afin d'avoir un suivi personnalisable pour chaque patient.

L'application utilise un algorithme d'apprentissage profond qui va effectuer une analyse préliminaire des données provenant des photos intrabuccales prise par le patient, et donne des informations validées en temps réel.

Le logiciel peut envoyer une alerte à l'orthodontiste lorsqu'une anomalie est détectée automatiquement, comme l'endommagement de crochets ou ligatures, un désengagement des arcs, des interférences occlusales, le décollement d'un bracket, une mauvaise hygiène buccale, une récession gingivale, une éruption dentaire ou encore une lésion dentaire.

En particulier dans le cas des traitements orthodontiques par gouttières transparentes, le suivi à distance à chaque changement d'aligneur permet d'évaluer l'intégrité des attaches et le maintien des boutons et élastiques. Après le scan intra-oral, sur la base de l'analyse par l'IA, l'application indique au patient s'il peut passer à la gouttière suivante (signal « Go ») ou s'il doit conserver la gouttière actuelle (signal « No Go »). (108)

Ce logiciel permet donc d'améliorer le suivi tout le long du traitement en limitant les visites inutiles ou en détectant précocement certains problèmes nécessitant un rendez-vous.

## I.5.5. Odontologie restauratrice et endodontie

### I.5.5.1. Formule dentaire et bilan bucco-dentaire

Chen et coll. (109) ont comparé la précision d'un algorithme R-CNN pour la détection et la numérotation automatique des dents sur radiographies rétro-alvéolaires, avec 3 chirurgiens-dentistes ayant entre 1 et 4 ans d'expérience. L'algorithme a montré d'excellents résultats pour la détection des dents, et des bons résultats pour la numérotation automatique, très proche de ceux du dentiste junior qui a servi de témoin.

Tuzoff et coll. (110) ont proposé un modèle de CNN pour automatiser la détection et la numérotation des dents sur des radiographies panoramiques, afin de faire gagner du temps au clinicien. Pour la détection des dents, le modèle a une précision de 0,9945 quasiment identique à l'examineur humain. Les erreurs de détection du modèle sont souvent dues à des chevauchements, la présence d'appareils prothétiques induisant des artefacts ou des restes radiculaires trop délabrés pour être identifiés comme une dent.

Pour la numérotation des dents, la sensibilité du modèle est de 0,98 et la spécificité de 0,9994, également très proche de celle de l'examineur. Les erreurs sont ici souvent dues à des absences de dents entraînant des versions des dents adjacentes.

Cette étude montre qu'un système d'IA peut détecter et numérotter correctement des dents sur radiographies panoramiques à des fins d'établissement automatique du schéma dentaire du patient. Cette équipe a depuis commercialisé un logiciel de diagnostic radiographique automatique, *Denti.AI*.

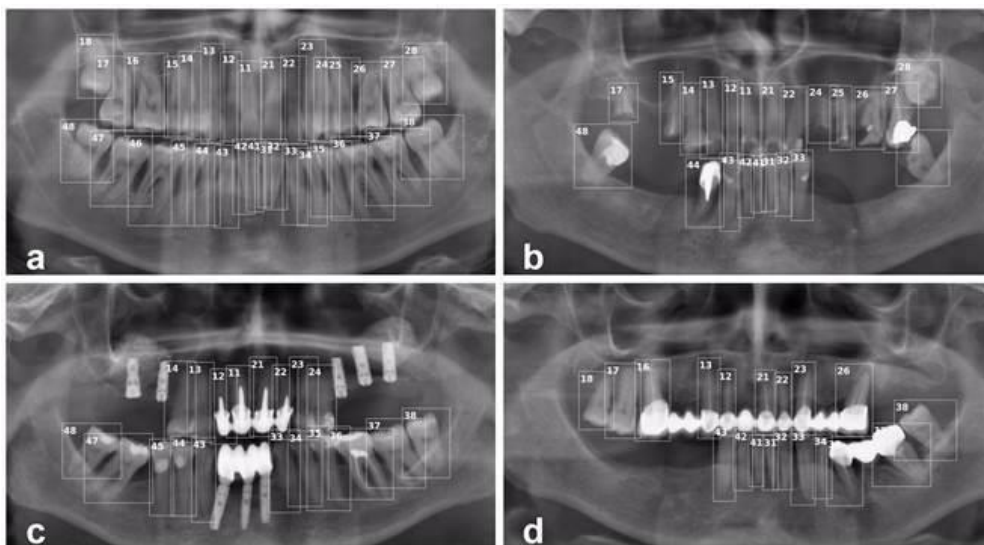


Figure 16. Exemples de radiographies correctement annotées par le logiciel

Une étude de De Angelis et coll. (111) s'est intéressée à la détermination de la formule dentaire, la présence d'obturations, de couronnes, d'implants ou de restes radiculaires sur des radiographies panoramiques à l'aide d'un logiciel d'IA. Ce logiciel permet une identification et une segmentation des dents et des éléments prothétiques, avec des codes couleurs différents pour distinguer les groupes de dents saines/atteintes. Après contrôle par des experts humains des radiographies annotées par le logiciel, ce dernier présentait une sensibilité globale de 0,89 et une spécificité de 0,98.

Les résultats montrent donc des valeurs élevées et donc l'intérêt de ce type de logiciel pour améliorer le travail du dentiste et la prise en charge du patient, en permettant notamment un gain de temps grâce à l'annotation automatique.

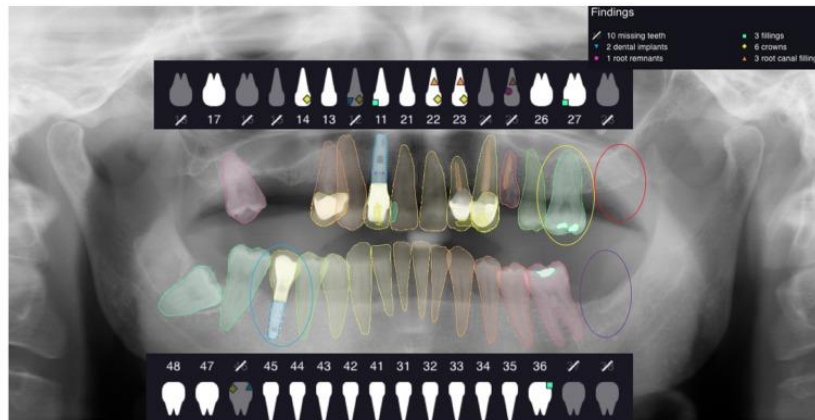


Figure 17. Exemple d'analyse d'une radiographie panoramique par le logiciel

**Allisone** est une entreprise française qui propose un logiciel utilisant l'IA afin d'analyser des radiographies panoramiques.

Le but du logiciel n'est pas de faire du diagnostic mais d'avoir un outil visuel pour faciliter la communication avec le patient et son adhésion au plan de traitement.

Le praticien rentre le fichier radiographique dans le logiciel et en quelques secondes la radiographie est analysée et annotée. Le logiciel identifie le numéro des dents et 10 types d'éléments différents sur la radiographie : amalgame, bridge, couronne, traitement endodontique, image radioclaire (lésion carieuse ou péri-apicale), implant, inlay/onlay, inlay-core, racine dentaire, absence de dent. Le logiciel repère également la ligne parodontale. Pour chaque annotation, le logiciel y ajoute le score de confiance.

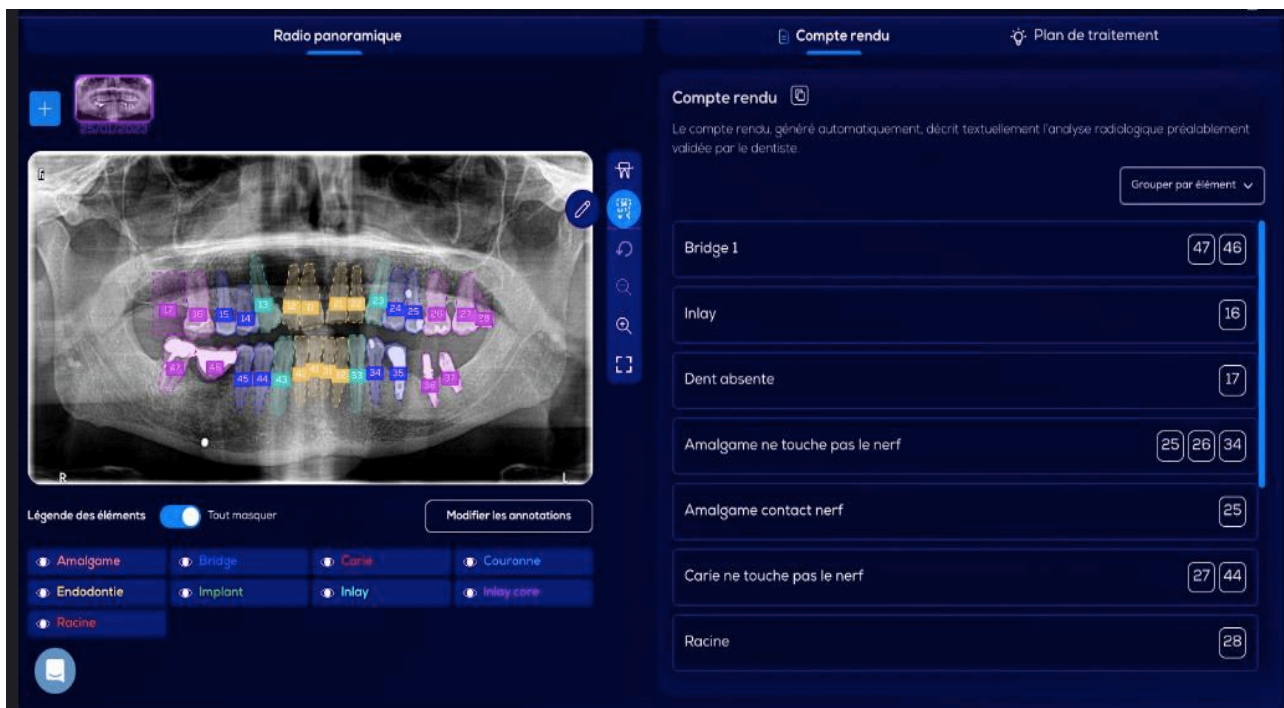


Figure 18. Capture d'écran du logiciel après analyse

Le logiciel a également un partenariat avec Spotimplant qui permet l'identification précise du type d'implant sur la radiographie panoramique en 24h.

Le praticien peut ensuite corriger les annotations si le logiciel a commis des erreurs (oubli de détection d'une lésion carieuse ou au contraire mauvaise annotation). Ainsi, l'algorithme se développera automatiquement en fonction des retours d'annotations des utilisateurs du logiciel.

Enfin, le logiciel devrait pouvoir effectuer les mêmes analyses sur des radiographies rétro-alvéolaire et des images CBCT d'ici la fin de l'année. (112)

#### 1.5.5.2. Détermination de l'âge dentaire

L'âge dentaire est souvent utilisé pour déterminer l'âge d'un individu. Les logiciels d'IA peuvent actuellement déterminer l'âge du patient à partir de l'analyse de radiographies.

Dans une étude de 2021, Zaborowicz et coll. (113) ont utilisé un RNA se basant sur 21 critères dentaires et osseux pour déterminer l'âge du patient. Le réseau a analysé 619 radios panoramiques issus d'enfants âgés de 4 à 15 ans et a obtenu une erreur moyenne de prédiction de 4,61 mois seulement. Il serait intéressant d'évaluer à l'avenir l'erreur de prédiction du réseau sur des radiographies de patients adultes, certaines études ayant déjà présenté des résultats sur des adultes mais avec une erreur moyenne de plusieurs années (114).

Kim et coll. (115) ont étudié la capacité d'un modèle de CNN pour classer des patients en 5 groupes d'âge allant de 0 à 19, 20 à 29, 30 à 39, 40 à 49 et plus de 50 ans. Pour cela, le réseau se basait sur l'analyse des premières molaires à partir de radiographies panoramiques. La précision du modèle était entre 87 et 88%. Cependant, le modèle permet d'assigner le patient dans une classe de 10 ans et ne permet pas encore de donner l'âge précis du patient.

#### 1.5.5.3. Détection des anomalies dentaires

L'analyse des radiographies panoramiques par intelligence artificielle pourrait également permettre de repérer des anomalies dentaires. Une étude de Okazaki et coll. (116) a évalué les performances d'un modèle de deep learning pour la détection des dents surnuméraires ou des odontomes. Les résultats montrent une précision de 87% et une bonne sensibilité, appuyant l'intérêt de l'apprentissage automatique pour la détection radiographiques d'anomalies dentaires.

Une autre étude de 2022 (117) s'est intéressée à la détection d'anomalies dentaires par IA en analysant des photographies intra-orales issues d'enfants présentant des fentes orofaciales, ces derniers ayant une proportion d'anomalies dentaires supérieure à la population générale. Le réseau neuronal analyse la photographie et prédit plus rapidement qu'un praticien si le patient présente une ou plusieurs des 10 anomalies les plus courantes. Les résultats montrent que le modèle a une efficacité similaire à celle d'un dentiste ayant 8 ans d'expérience pour la détection de 7 des 10 anomalies, mais présente plus de difficulté pour la détection des mamelons, hypoplasie et rotation.

#### 1.5.5.4. Détection des lésions carieuses

La carie dentaire est une des maladies infectieuses les plus répandues dans le monde. Son développement peut entraîner des douleurs, la perte de la vitalité de la dent voire même la perte totale de la dent en l'absence de traitement. La détection des lésions carieuses à un stade précoce est donc d'un intérêt majeur afin de proposer des traitements les moins invasifs possible et d'améliorer le pronostic des dents concernées.

Zhu et coll. (118) ont développé CariesNet, une architecture d'apprentissage profond pour la segmentation des lésions carieuses sur des radiographies panoramiques en 3 stades : superficielle, modérée ou profonde. Le modèle d'apprentissage profond a montré des résultats supérieurs aux autres modèles avec une segmentation précise des 3 types de lésions carieuses. Ce système est intéressant notamment pour la détection des lésions précoces, plus difficiles à repérer sur une radiographie panoramique.

Plusieurs études (119–121) ont appliqué les réseaux de neurones à la détection des lésions carieuses sur des bite-wing, examen complémentaire le plus souvent pratiqué dans le suivi des patients à risque carieux. Après entraînement, les résultats en phase de test de ces études ont montré une très bonne précision des réseaux de neurones convolutifs pour la détection des lésions carieuses interproximales.

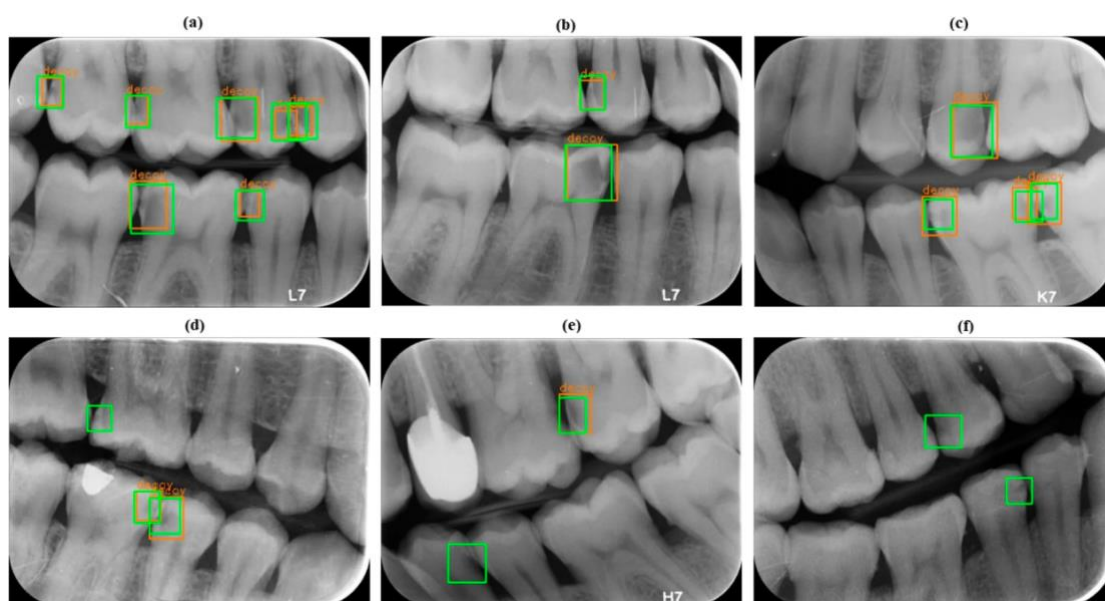


Figure 19. Exemple de détection du modèle de CNN (en orange) par rapport à la réponse attendue en (vert), avec la présence de faux négatifs sur d, e, f.

Deux autres études (122,123) se sont intéressées à l'amélioration de la détection de lésions carieuses amélares sur radiographie par des chirurgiens-dentistes lorsqu'ils sont assistés par une IA. On retrouve une différence statistiquement significative entre les 2 groupes (dentiste assisté par IA ou non), avec une amélioration de la sensibilité pour le groupe assisté par IA, mais une aussi une réduction de la spécificité (plus de faux positifs également). Cependant, les caries amélares ne nécessitant pas de traitement invasif, ces résultats indiquent l'intérêt de l'utilisation de l'IA pour améliorer la détection des caries précoces et faire de la prévention.

**Overjet** est une société créée en 2018 et qui propose un logiciel d'analyse radiographique dentaire basée sur l'IA, pour la détection des caries, du tartre et la mesure des niveaux osseux notamment. Le logiciel donne un code couleur différent selon le stade la lésion carieuse (atteinte dentinaire ou seulement amélaire) pour indiquer la nécessité ou non d'un traitement invasif. Le logiciel annote automatiquement les radiographies avec des couleurs différents selon les éléments (couronne, traitement endodontique) et donne des informations sur les possibilités de traitement en examinant le dossier patient. Le logiciel permet de garder en mémoire les données pour évaluer la réussite ou l'échec des soins effectués sur 18 mois. Il peut également analyser les anciennes radiographies pour identifier les caries ou les maladies parodontales qui n'ont pas été diagnostiquées.

L'université de Floride a récemment annoncé un partenariat avec la société pour former les étudiants à l'IA afin d'améliorer la prise de décision et la relation patient-praticien. (124)

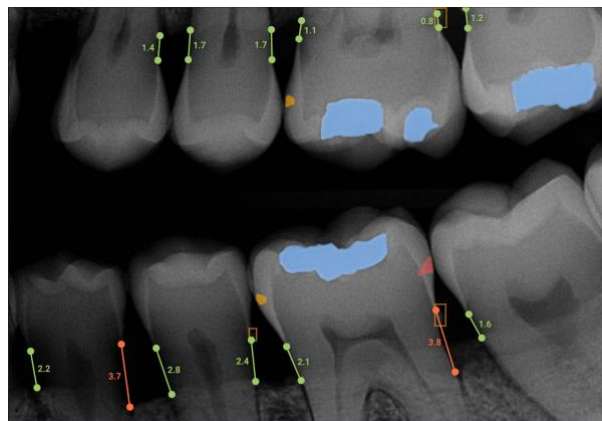


Figure 20. Capture d'écran du logiciel Overjet après analyse

**Videahealth** est une plateforme d'IA dentaire qui a lancé le logiciel Dentrix Detect AI pour l'analyse des radiographies en temps réel. Ce logiciel est directement intégré dans un logiciel de radiographie ce qui évite la nécessité d'import des radiographies dans un nouveau logiciel, l'image étant ici analysée automatiquement. Cela aide le praticien à évaluer plus rapidement les radiographies et à améliorer la prise de décisions. Cela offre également une plus grande transparence pour le patient et améliore la confiance dans le plan de traitement. La base de données du système d'IA est alimentée par des millions de dossiers patients qui ont été étiquetés et examinés par des experts dentaires. Lors de l'essai en collaboration avec Heartland Dental, les chirurgiens-dentistes utilisant l'IA détectaient un plus grand nombre de lésions carieuses, et montraient une réduction de 15% des détections erronées. Cela permettrait de poser un diagnostic plus précis et d'améliorer le soin préventif. (125,126)

En plus de la radiographie, il existe d'autres méthodes complémentaires pour améliorer la détection des lésions carieuses interproximales lors de l'examen clinique comme la fluorescence laser ou la transillumination.

Casalegno et coll. (127) ont donc réalisé une étude pour évaluer le potentiel d'utilisation de l'apprentissage profond dans la détection des lésions carieuses par transillumination. L'ensemble de données comprenait 217 images en niveaux de gris de molaires et prémolaires, obtenues avec le système DIAGNOcam. L'objectif de l'algorithme était de segmenter les données selon 5 classes (fond, émail, dentine, caries occlusales et proximales) puis de déterminer les dents saines ou atteintes.



La précision de segmentation de l'émail et de la dentine était assez élevée (> 80%) mais une segmentation des lésions carieuses proximales et occlusales plus faible (précision de 49%). Cependant, pour l'annotation entre dent saine ou cariée, la précision était atteignait environs 85%

Il serait intéressant de développer ce système et de le coupler à la caméra DIAGNOcam pour obtenir une identification des lésions en temps réel directement par la caméra, à des fins de dépistage notamment.

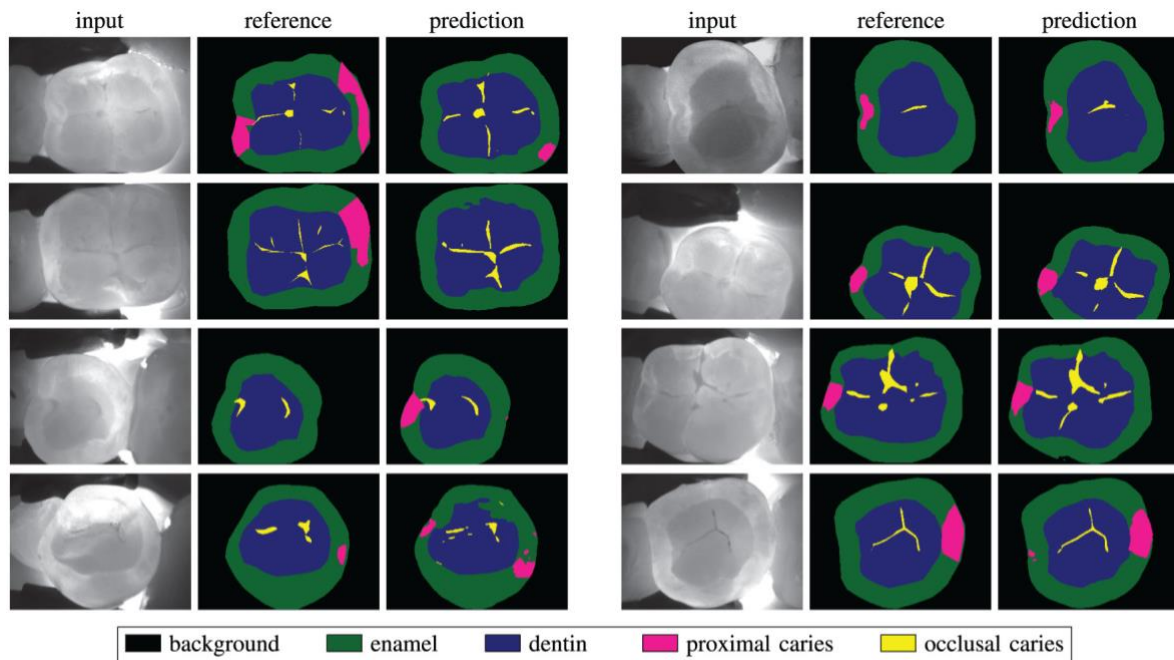


Figure 21. Exemple de segmentation lors de la phase de test : à gauche les prédictions du modèle et la référence montrent des divergences, à droite on retrouve une bonne concordance entre les prédictions du modèle et la segmentation de référence

La 4<sup>ème</sup> version de la caméra pour empreinte numérique TRIOS4<sup>®</sup> a également été équipée d'un système de détection des lésions carieuses occlusales basé sur la fluorescence. Dans une étude in vivo, Michou et coll. (128) ont comparé la précision de classification des lésions sur des 3<sup>èmes</sup> molaires par le scanner intra-oral par rapport à un examen visuel effectué par un expert humain. Les résultats ont montré une performance diagnostique des algorithmes comparable à l'examen visuel basé sur la classification ICDAS.

Ce système permettrait d'aider à la détection et au suivi des lésions carieuses.

Enfin, la détection des lésions carieuses passe obligatoirement par un examen visuel des surfaces dentaires.

Les études de Zang et coll. (129) et Ding et coll. (130) se sont intéressées à la détection des lésions carieuses sur des photographies intra-orales en utilisant des algorithmes de deep learning. Les 2 modèles ont obtenu de très bons résultats pour la détermination de la présence ou non de lésion carieuse sur la photographie, et des résultats corrects pour la détection de la lésion carieuse par bounding box. L'intérêt de ces 2 études est l'ensemble des données d'entrées qui sont issues de photographies prises en mode conventionnel, sans équipement professionnel, et avec différents smartphones (Huawei, Honor, Samsung, Iphone).

Cela permet de se rapprocher le plus possible des conditions réelles d'une photographie prise par un patient, dans l'optique de réaliser du diagnostic à distance.

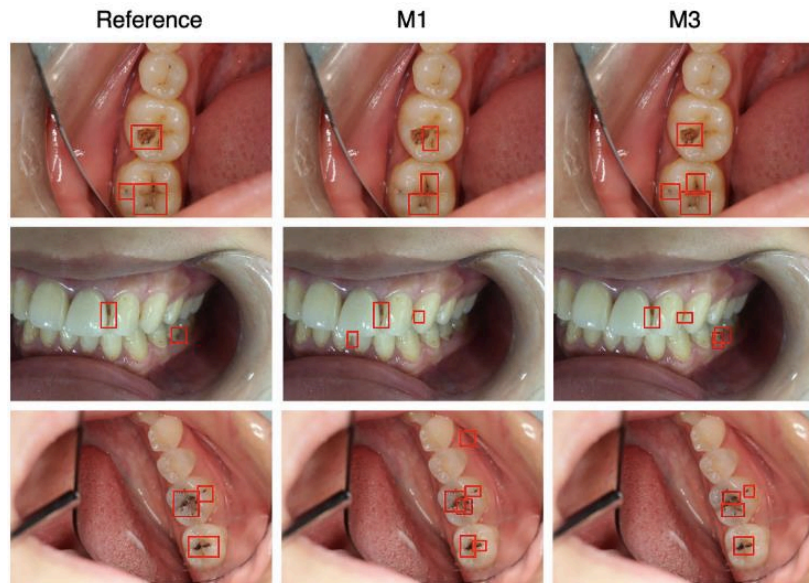


Figure 22. Exemples de détections des lésions carieuses par bounding box

#### 1.5.5.5. Détection des lésions péri-apicales et de la morphologie radiculaire

L'automatisation de la détection des lésions péri-apicales permet un gain de temps pour le praticien et également un meilleur diagnostic pour le patient.

Song et coll. (131) se sont intéressés à l'utilisation du deep learning pour la détection précoce des lésions péri-apicales sur des radiographies panoramiques. Ce modèle permet une détection rapide des lésions endodontiques et donc un diagnostic plus efficace, avec une précision de 0,83.



Figure 23. A. Radiographie panoramique originale B. Segmentation manuelle des lésions. C. Segmentation automatique des lésions générées par le réseau U-Net (on remarque une erreur de détection au niveau de la racine mésiale de 37)

Une autre étude de Endres et coll. (132) s'est attachée à la performance de détection par un modèle d'IA des lésions péri-apicales radioclares par rapport à 24 chirurgiens oraux et maxillofaciaux. Avec une précision moyenne de 0,6, l'algorithme a été plus performant que 14 des 24 chirurgiens de la cohorte, ce qui montre son potentiel à aider les chirurgiens oraux dans leur analyse radiographique.

Une étude de Orhan et coll. (133) a comparé la détection et la segmentation des lésions péri-apicales sur des images CBCT entre un logiciel d'IA (*Diagnocat Inc.*) et un expert humain. Le logiciel a détecté 142 lésions sur 153, soit une fiabilité de 92,8%. Pour la mesure du volume de la lésion, il n'y avait pas de différence significative entre la segmentation par le logiciel et la segmentation manuelle. Le système d'IA peut donc être utile pour détecter des pathologies péri-apicales en application clinique.

Enfin, l'anatomie radiculaire de certaines dents peut engendrer des difficultés lors du traitement endodontique. Il est donc primordial d'anticiper ces difficultés anatomiques avant de commencer un traitement radiculaire. Hiraiwa et coll. (134) se sont intéressés à l'utilisation d'un algorithme d'apprentissage profond pour déterminer la morphologie radiculaire de premières molaires mandibulaires sur des radiographies panoramiques. Les images de 760 molaires n'ayant jamais subi de traitement endodontique ont été analysées. Au final, le système présentait une précision diagnostique de 87,4% pour déterminer si la racine distale était simple ou possédait une racine supplémentaire. En comparaison, le système de deep learning a montré des performances légèrement supérieures à celles des deux radiologues expérimentés, notamment en termes de spécificité.

Cette méthode permettrait de mieux se préparer au traitement endodontique de la dent, même s'il est recommandé de réaliser une radiographie rétro-alvéolaire excentrée de la dent avant le traitement canalaire d'une molaire mandibulaire.

Le CBCT est également de plus en plus utilisé en endodontie avant de commencer un traitement, afin de visualiser plus précisément les anatomies canales complexes.

Duan et coll. (135) ont proposé une solution de segmentation de la cavité dentaire et pulpaire d'une dent à partir d'images CBCT, grâce à des algorithmes d'apprentissage profond. L'analyse se fait en 2 phases, avec tout d'abord l'extraction de chaque dent individuellement puis la segmentation des dents et de la pulpe. L'objectif est d'obtenir en sortie une reconstruction en 3D de l'anatomie radiculaire. L'utilisation du réseau U-Net a permis d'obtenir une segmentation précise des dents et de la pulpe, et une morphologie complète lors de la reconstruction. Pour les dents monoradiculées, la précision obtenue était de 88,6% pour la segmentation de la pulpe et de 87,6% pour les dents pluriradiculées.

Lors de l'analyse d'images CBCT, il peut être difficile pour les praticiens de visualiser une structure en 3D à partir de coupes en 2D. Cet algorithme pourrait donc être intéressant pour faciliter la lecture des images CBCT et la visualisation de la structure interne de la dent avant un traitement endodontique.

## **I.5.6. Parodontologie**

### I.5.6.1. Perte osseuse

La parodontite est une maladie inflammatoire multifactorielle qui affecte les tissus parodontaux. À un stade avancé, elle se caractérise notamment par une perte osseuse alvéolaire horizontale et/ou verticale, qui entraîne une augmentation de la mobilité des dents voire leur perte. Le diagnostic de la maladie et de son stade passe par différents examens, et notamment par une détermination de la perte osseuse alvéolaire analysée sur des radiographies rétro-alvéolaire lors d'un bilan long cône.

La détection précoce de la maladie et de l'ostéolyse pourrait prévenir la perte des dents des patients concernés par un traitement adapté.

Plusieurs études ont présenté des méthodes basées sur l'apprentissage profond pour détecter et quantifier la perte osseuse alvéolaire sur des radiographies panoramiques. Les résultats de ces études ont mis en évidence l'efficacité des réseaux de neurones pour leur utilisation dans ce cas spécifique, avec une bonne fiabilité parfois similaire aux dentistes expérimentés.

Le modèle de Kim et coll. (136), DeNTNet, permet d'analyser la radiographie et de classer chaque région d'intérêt en fonction de l'absence ou de la présence de perte osseuse alvéolaire, mais sans quantifier cette perte osseuse ni la dent précisément.

Chang et coll. (137) ont publié une étude sur un système permettant de détecter avec précision le niveau de perte osseuse et le classer selon le stade de parodontite. Pour détecter et classer la perte osseuse, l'algorithme détecte la ligne parodontale c'est-à-dire le niveau de l'os alvéolaire. Puis il détecte le niveau de la jonction émail-cément et segmente chaque dent sur la radiographie. Les points d'intersection entre l'axe de la dent, la jonction émail-cément et la ligne parodontale sont les points de repères pour mesurer la perte osseuse parodontale. Les prédictions du modèle de diagnostic avaient un coefficient de corrélation de 0,73 avec les radiologues, montrant une bonne corrélation entre l'analyse par le modèle d'IA et les experts.

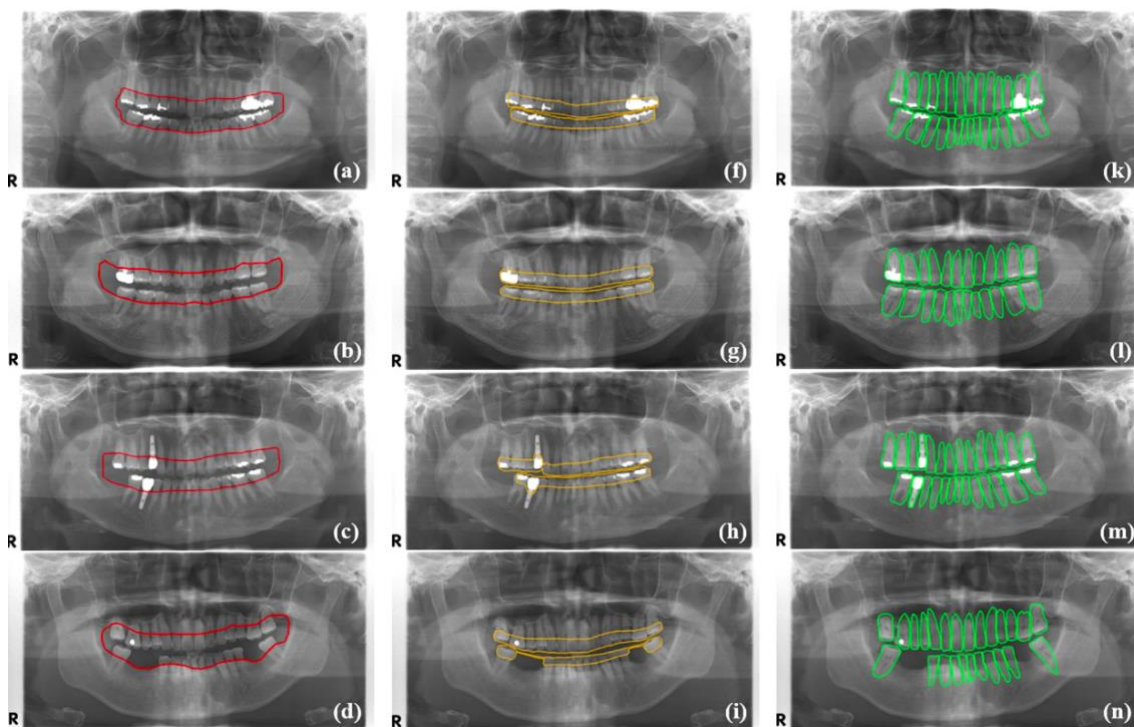


Figure 24. Résultats de la détection du niveau de l'os alvéolaire (rouge), du niveau de la jonction amélo-cémentaire JAC (jaune), des dents et implants (vert)

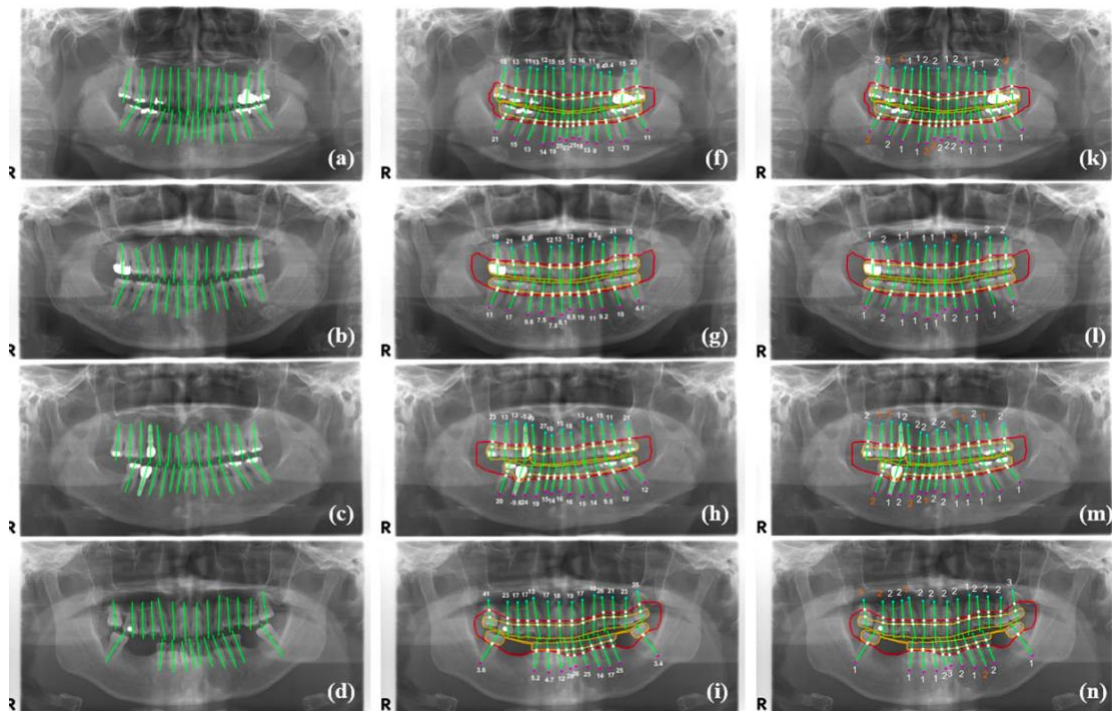


Figure 25. Orientation des axes des dents et implants (a à d), point d'intersection de l'axe de la dent avec le niveau de l'os alvéolaire et de la JEC, et pourcentage de perte osseuse radiographique (f à g), stade de parodontite par dent et par implant (k à n). Les stades sont écrits en blanc si correctement classés et en orange si incorrectement classés.

Dans une étude plus récente de Jiang et coll. (138), la précision et la sensibilité du modèle d'IA était statistiquement significative pour la détection des pertes osseuses de stades précoces (I et II) par rapport aux diagnostics des chirurgiens-dentistes (0,76-0,75 pour l'IA contre 0,57-0,46 pour les cliniciens). Cependant, la valeur minimum de 2mm signalant une perte osseuse étant difficile à définir sur une radiographie panoramique, l'étude n'a pas fait de distinction entre l'absence de résorption (distance entre os alvéolaire et jonction émail-cément inférieure à 2mm) et la résorption osseuse de stade I.

La limite de ces études est justement l'utilisation de radiographies panoramiques. Cela entraîne des superpositions ou des déformations des structures osseuses et dentaires, ainsi qu'une plus faible résolution pour chaque dent individuelle contrairement à la radiographie rétro-alvéolaire, qui est l'examen de référence pour le diagnostic parodontal.

Dans leur étude, Lee et coll. (139) ont développé un modèle de deep learning pour mesurer le pourcentage de perte osseuse radiographique sur des radiographies rétro-alvéolaire, ainsi que la prédiction du stade de résorption et du diagnostic de parodontite. Les résultats ont ensuite été comparés aux diagnostics effectués par des examinateurs indépendants.

Le modèle proposé a atteint une sensibilité, une spécificité et une précision élevée (supérieure à 0,8) pour l'attribution du stade de perte osseuse radiographique (pas de perte, stade I, stade II, stade III). Il n'y avait pas de différence significative dans les mesures du pourcentage de perte osseuse entre le modèle de DL et les examinateurs. Néanmoins, le temps nécessaire pour effectuer la mesure de ce pourcentage était significativement plus long par l'examineur que le temps requis par l'IA.

Enfin, la précision du diagnostic de parodontite par l'algorithme était de 0,85. Ainsi, même si d'autres examens notamment cliniques sont nécessaires, ce modèle d'apprentissage profond permettrait de fournir un diagnostic préliminaire rapide et fiable dans certaines situations.

#### 1.5.6.2. Péri-implantite

Comme pour la dent naturelle, l'inflammation du parodonte péri-implantaire peut entraîner une perte osseuse plus ou moins avancée autour de l'implant, signe d'une péri-implantite. Sa progression peut provoquer une perte de la stabilité de l'implant voir même une désostéointégration. Le niveau de perte osseuse marginale est donc un paramètre à surveiller lors de la maintenance implantaire.

Cha et coll. (140) se sont donc intéressés à l'utilisation d'un réseau de neurones profond pour localiser les implants sur des radiographies rétro-alvéolaires, calculer et classifier la perte osseuse marginale en quatre groupes (normal, précoce, modérée, sévère). Les résultats ont montré que le modèle pourrait être utilisé pour aider les dentistes à diagnostiquer et catégoriser la péri-implantite.

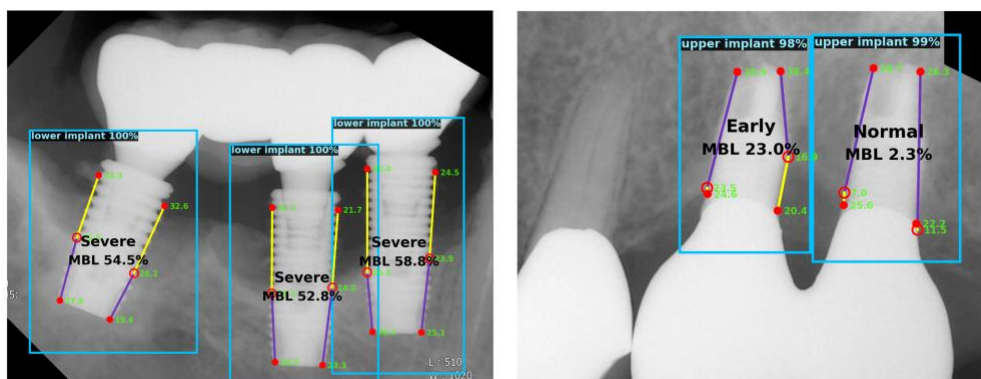


Figure 26. Exemple de résultats obtenus avec l'utilisation de l'algorithme.

Une étude plus récente (141) s'est intéressée également à la détection de la perte osseuse marginale autour des implants en utilisant un algorithme de détection d'objet, puis en comparant les résultats avec ceux de 3 chirurgiens-dentistes. Les implants ont été détectés par le système avec une grande précision, la perte osseuse a été quantifiée de manière similaire aux dentistes résidents mais un peu moins bien que le dentiste expérimenté. Ce résultat conforte l'intérêt de l'utilisation de l'IA comme outil de diagnostic auxiliaire pour la détection de la perte osseuse péri-implantaire, en particulier pour les praticiens qui ne sont pas spécialisés en implantologie.

#### 1.5.6.3. Gingivite

Les saignements gingivaux sont un motif fréquent de rendez-vous de la part des patients, et le développement d'une gingivite non diagnostiquée peut entraîner l'apparition d'une parodontite. La connaissance de sa maladie et de ses causes par le patient peut l'aider à contrôler sa progression.

Dans leur étude, Li et coll. (142) ont utilisé un système d'IA à des fins de dépistage de la gingivite à partir de photographies intra-orales.

Les photographies ont été réalisées avec un appareil photo et différents smartphones. L'ensemble des données ont été divisées en 3 groupes : celles présentant une gingivite, celles présentant du tartre et celles présentant de la plaque dentaire. Lors de la phase de test, l'algorithme a obtenu de bons résultats en termes de classification avec une sensibilité et une spécificité moyenne d'environ 80% pour les 3 groupes. En termes de localisation, la sensibilité moyenne était de 66% pour la gingivite et 45% pour le tartre. La précision de localisation est considérée comme acceptable étant donnée l'utilisation de boîtes englobantes pour la gingivite et le tartre, et de carte thermique pour le dépôt de plaque.

Cependant, cette méthode est intéressante car les photos peuvent être recueillies à l'aide d'un smartphone, objet du quotidien pour beaucoup de patients.

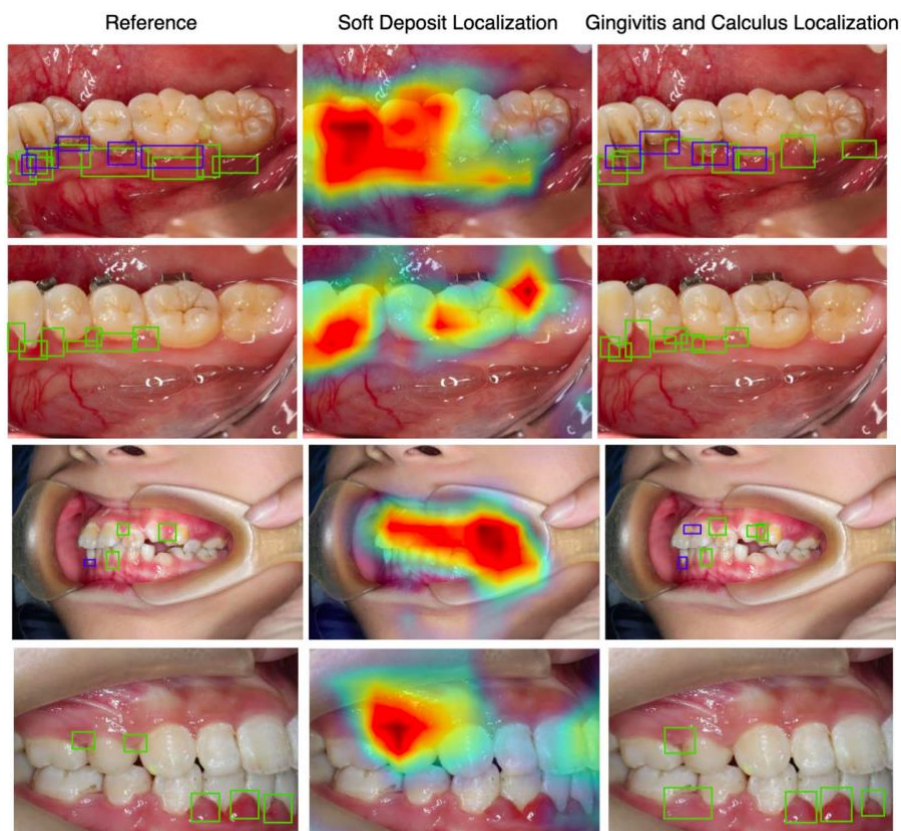


Figure 27. Exemple de résultats de détection sur les données test : dépôt de plaque identifié par carte thermique, tartre et gingivite par boîte englobante (respectivement bleue et verte)

## I.5.7. Chirurgie orale

### I.5.7.1. Avulsion des 3<sup>èmes</sup> molaires

L'avulsion des 3<sup>èmes</sup> molaires mandibulaires (M3) fait partie des actes chirurgicaux les plus fréquemment effectués par les chirurgiens oraux. Néanmoins, cette avulsion n'est pas sans risque anatomique notamment par la proximité avec le nerf alvéolaire inférieur (NAI), dont la lésion peut entraîner des complications post opératoires comme des paresthésies temporaires ou définitives de la région de la lèvre inférieure et du menton.

La réalisation d'une radiographie panoramique est souvent pratiquée avant tout acte chirurgical afin d'évaluer la position du NAI et sa relation avec les M3.

Dans leur étude, Vinayahalingam et coll. (143) ont utilisé une méthode d'apprentissage en profondeur pour détecter et segmenter automatiquement les M3 et le NAI sur des radiographies panoramiques. Les coefficients de précision obtenus étaient de 0,936 pour les M3 et 0,805 pour le NAI sur les données de validation. Ces résultats encouragent l'utilisation de modèles de deep learning pour la détection des M3 et du NAI sur les examens complémentaires.

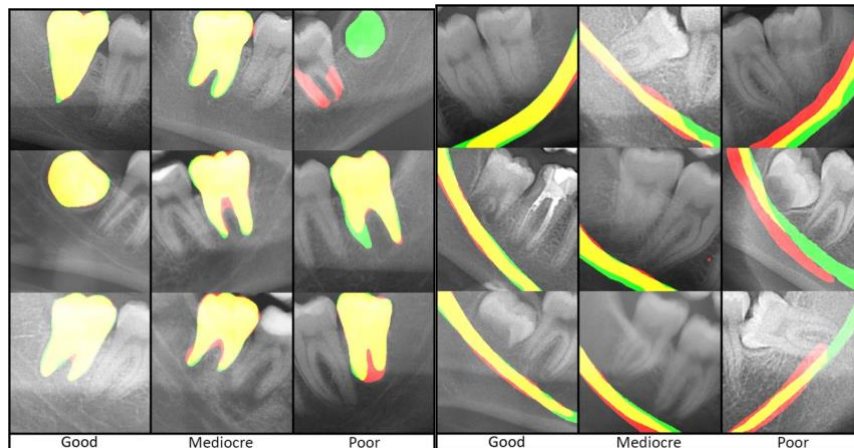


Figure 28. Aperçu de la segmentation des M3 et du NAI. Vert : segmentation manuelle. Rouge : segmentation automatique. Jaune : superposition des 2 segmentations.

Une étude de Choi et coll. (144) s'est intéressée à la détermination grâce à un modèle d'IA de la relation positionnelle des M3 avec le NAI lorsqu'ils se chevauchent sur des radiographies panoramiques. Ils ont ensuite comparé ses performances avec celles de spécialistes en chirurgie orale et maxillo-faciale. Dans les 2 positions, contact réel et position bucco-linguale, le modèle d'IA a montré une précision supérieure par rapport aux spécialistes.

L'étude de Sukegawa et coll. (145) a montré l'efficacité de l'utilisation d'un réseau de neurones convolutifs pour la classification de position des M3 selon les classifications de Pell et Gregory, et de Winter. Elle a mis en évidence que les modèles multi-tâches au-delà de deux tâches étaient moins précis pour la classification que les modèles monotâche.

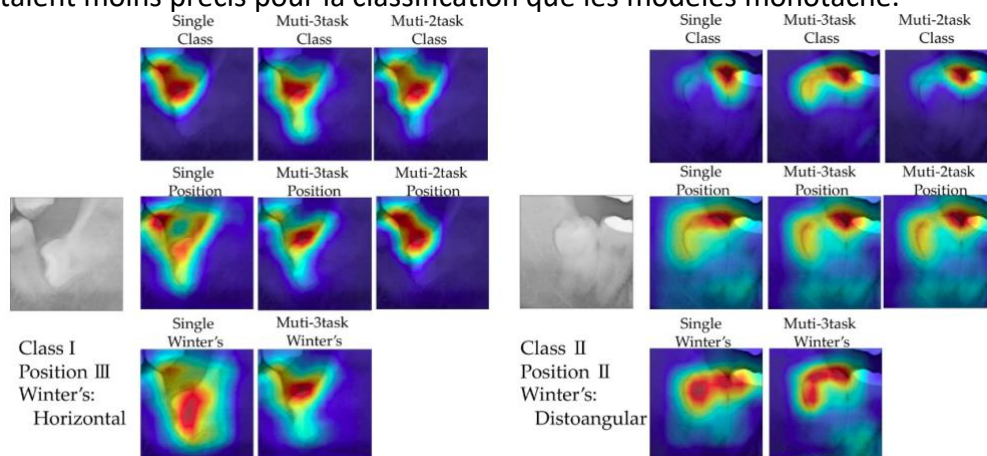


Figure 29. Visualisation de la base de jugement pour la prédiction de la classification par le CNN à l'aide de Grad-CAM



L'article de Yoo et coll. (146) a proposé un modèle de deep learning pour prédire la difficulté d'extraction des M3 à partir d'une radiographie panoramique. La difficulté d'extraction était évaluée sur la base d'un consensus de 3 experts humains pour chaque radiographie, puis corrélée avec les valeurs mesurées par le modèle de deep learning. Les résultats ont confirmé que le modèle de diagnostic pouvait être efficace pour prédire la difficulté d'extraction des M3.

Enfin, un modèle de CNN (147) a été utilisé pour prédire avant l'acte chirurgical la potentielle paresthésie du NAI consécutive à l'extraction, à l'aide de radiographies panoramiques. L'ensemble de données comprenait 100 radiographies de patients ayant eu une paresthésie après opération et 200 de patients n'ayant pas eu de paresthésie. Les résultats lors de la phase de test ont montré que le modèle pouvait aider à prédire la paresthésie du NAI après l'extraction. Cependant, la prédiction à partir de radiographies dans ce cas précis n'est pas suffisante, d'autres facteurs entrant en jeu comme le déroulement opératoire ou la technicité du praticien.

#### 1.5.7.2. Sinusites maxillaires

Murata et coll. (148) ont appliqué un système d'apprentissage profond pour le diagnostic de sinusite maxillaire sur des radiographies panoramiques. Après une phase d'entraînement sur 6000 échantillons d'images de sinus sains et enflammés, la performance du système a été évaluée avec une précision de 87,5%, une sensibilité de 86,7% et une spécificité de 88,3%. Ces valeurs ne présentaient pas de différences significatives par rapport à l'évaluation par des radiologues, et étaient même supérieures à l'évaluation par des chirurgiens-dentistes. Ainsi, ce système pourrait représenter une aide au diagnostic pour les dentistes non expérimentés. Cependant, le recadrage de la zone à diagnostiquer devait être réalisé par un clinicien humain, l'algorithme ne détectant pas automatiquement l'ensemble du sinus sur la panoramique.

Kunawa et coll. (149) ont approfondi ce sujet en utilisant l'apprentissage profond pour la détection automatique des sinus sur les radiographies panoramiques puis la classification des lésions du sinus par rapport au sinus sain. La sensibilité de détection des sinus maxillaires était de 100% et la précision, sensibilité et spécificité pour le diagnostic de sinusite aux alentours de 90%, et proche de 100% pour le diagnostic des kystes du sinus maxillaire.

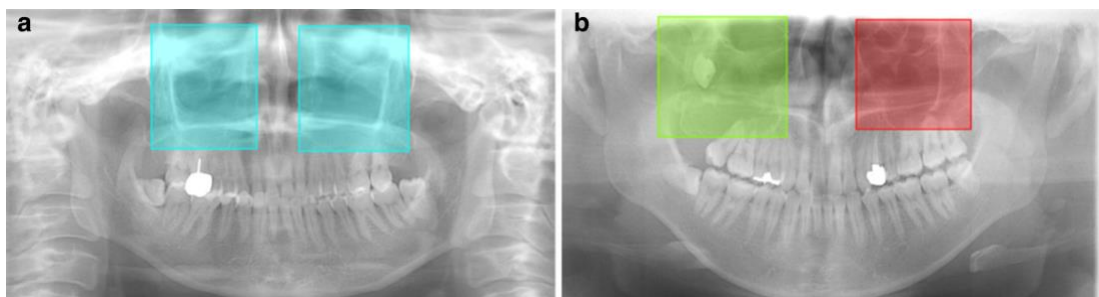


Figure 30. Exemples de détection et diagnostic correct de l'algorithme. A. Sinus maxillaires enflammés (bleu). B. Kératokyste odontogène correctement détecté et diagnostiqué comme kyste dans le sinus droit (vert) et sinus maxillaire gauche sain (rouge)

### 1.5.7.3. Détection des kystes et tumeurs maxillo-mandibulaire

Les kystes et tumeurs odontogènes aux stades initiaux sont généralement asymptomatiques et indolores. Ils deviennent décelables cliniquement lorsqu'ils entraînent un gonflement notable ou une fracture pathologique par affaiblissement des structures osseuses. Avant ce stade, leur découverte est souvent fortuite lors d'un examen radiographique de routine, radiographie panoramique ou CBCT. Leur prise en charge à un stade précoce permet d'améliorer l'impact post-opératoire sur la vie du patient.

Ainsi, Yu et coll. (150) ont proposé dans une méthode basée sur l'apprentissage profond pour le diagnostic des kystes et tumeurs de la mâchoire à partir de radiographies panoramiques. Les résultats montrent que cette méthode peut servir de référence pour effectuer un diagnostic plus approfondi, grâce à une bonne précision de la segmentation de la lésion.

Ariji et coll. (151) ont également développé une technique de deep learning pour la détection et la classification de 5 types de lésions osseuses radioclares à la mandibule : les améloblastomes, les kératokystes odontogènes, les kystes dentigères, les kystes radiculaires et les kystes osseux solitaires. Après 2 phases de test, l'algorithme a détecté tous les kératokystes mais a eu du mal avec la classification des kératokystes (sensibilité de 0,13). La meilleure sensibilité a été obtenue pour la détection et la classification des kystes dentigères, supérieure à 0,8, suivie par les kystes radiculaires (sensibilité de détection de 0,81 et de classification 0,77).

Lee et coll. (152) ont évalué la détection et la classification de 3 types de lésions kystiques odontogènes par un CNN profond, à partir d'images de radiographies panoramiques et de CBCT. Les 3 types de kystes ont été efficacement détectés et diagnostiqués par les réseaux de neurones, et le réseau entraîné à partir des images CBCT atteignait des performances diagnostiques supérieures à celui entraîné avec les radiographies panoramiques.

Yang et coll. (153) ont comparé les performances diagnostic d'un CNN (YOLO v2) avec des chirurgiens oraux et des médecins généralistes, sur des radiographies panoramiques. Les lésions ont été classées et étiquetées en 4 catégories : kyste dentigère, kératokyste odontogène, améloblastome et absence de lésion. Les différences de performances entre l'algorithme et les praticiens étaient statistiquement non significatives ce qui implique des performances diagnostiques similaires entre les 3 groupes. YOLO a même obtenu les meilleures performances, et son temps moyen d'évaluation est nettement plus rapide que celui des cliniciens humains, ce qui monte l'intérêt de ces réseaux de neurones dans la détection des pathologies kystiques et tumorales. Ce type d'algorithme pourrait être intéressant pour les chirurgiens-dentistes non spécialistes dans leur pratique quotidienne.

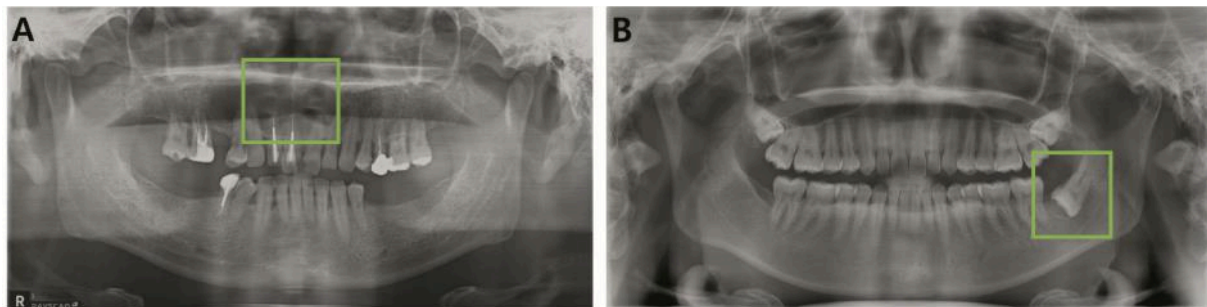


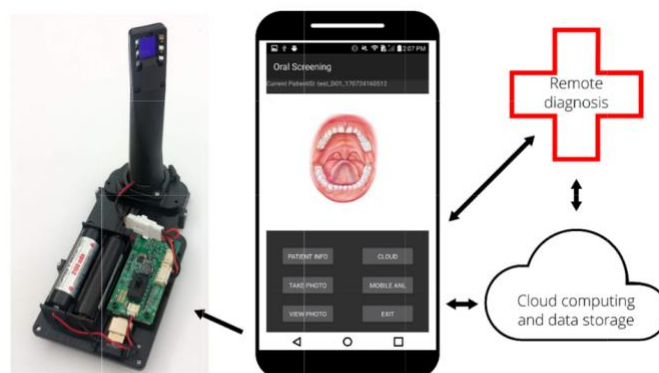
Figure 31. A. Kératokyste correctement détecté et classé par YOLO alors qu'1/3 des cliniciens ne l'ont pas détecté B. Kyste dentigère correctement détecté et classé par YOLO alors que 2/3 des cliniciens de l'ont pas détecté.

#### 1.5.7.4. Détection des lésions dermatologiques buccales et cancers oraux

Keser et coll. (154) ont réalisé une étude visant à développer une méthode d'apprentissage profond pour l'identification des lésions de lichen plan oral à l'aide d'images photographiques rétrospectives. Au total, 65 lésions saines et 72 lésions de lichen oral ont été identifiées et vérifiées par des experts en médecine buccale et en radiologie maxillo-faciale sur les radiographies. Lors de la phase de test, la classification des images par l'algorithme a atteint un taux de réussite de 100%, ce qui montre le potentiel d'utilisation de cet outil. Il sera intéressant à l'avenir de réaliser des études en utilisant un plus grand nombre de données d'entraînement et de test, et de comparer l'identification du lichen plan par rapport à des lésions dermatologiques orales similaires.

Plusieurs études se sont intéressées à la détection des lésions de la muqueuse buccale et leur potentiel de malignité à l'aide de l'apprentissage profond et des réseaux de neurones. En effet, le cancer de la bouche est le cancer de la région tête et cou le plus fréquent dans le monde. Cependant, le dépistage n'est pas suffisamment répandu et il est souvent repéré à un stade avancé. La détection précoce des lésions buccales présentant un fort risque de transformation maligne en carcinome serait donc primordiale pour améliorer le pronostic du patient.

En 2018, Song et coll. (155) ont donc développé un système de détection de cancer buccal sur image utilisant une technique d'autofluorescence et un réseau de neurones convolutifs. Ce système étant applicable sur smartphone, son développement serait intéressant pour faire du dépistage.



*Figure 32. Exemple de la caméra développée par l'équipe de chercheurs et adaptée sur smartphone Android*

Dans une autre étude (156), ils ont développé un réseau de neurones profonds bayésien pour détecter les cancers buccaux à partir d'images intrabuccales issues d'une population à haut risque. Les résultats montrent que des informations significatives sur l'incertitude du diagnostic peuvent être obtenues, permettant d'identifier les cas suspects nécessitant un examen plus approfondi. L'amélioration des performances de cet outil serait intéressante pour le dépistage automatique dans les populations à haut risque.

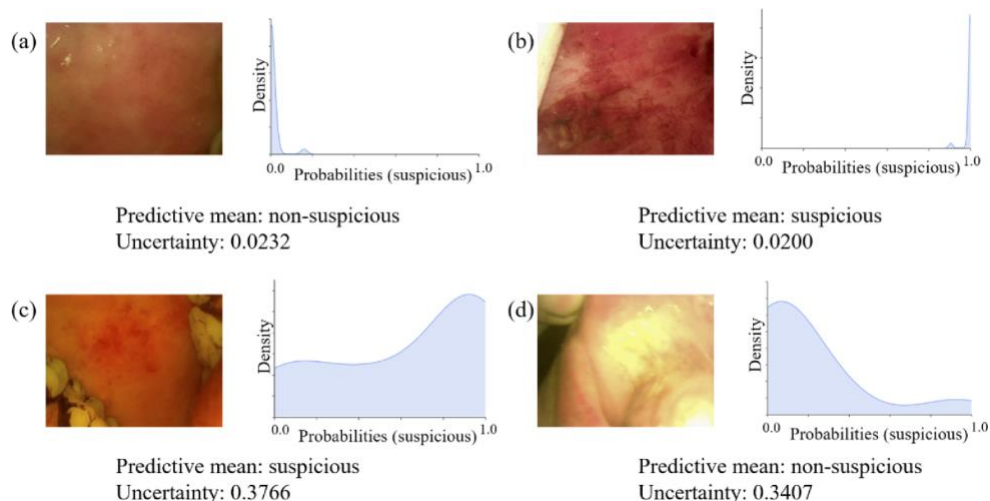


Figure 33. Exemple d'images intra-orale et des prédictions approximatives du réseau Bayésien avec son pourcentage d'incertitude

Dans leur étude, Lin et coll. (157) ont présenté une méthode de diagnostic par imagerie basée sur la photographie à l'aide d'un smartphone et utilisant un algorithme de deep learning pour la détection des cancers buccaux. L'objectif de cette étude était d'obtenir un recadrage central de la lésion et une distance focale cohérente pour différentes photographies, afin de généraliser la méthode d'identification.

Les performances de leur modèle montrent que l'imagerie sur smartphone pourrait être une aide intéressante dans le diagnostic précoce des lésions buccales, notamment dans les cabinets où les praticiens sont moins expérimentés dans ce domaine ou pour faire de l'autodiagnostic patient dans les zones à faible densité de praticien.

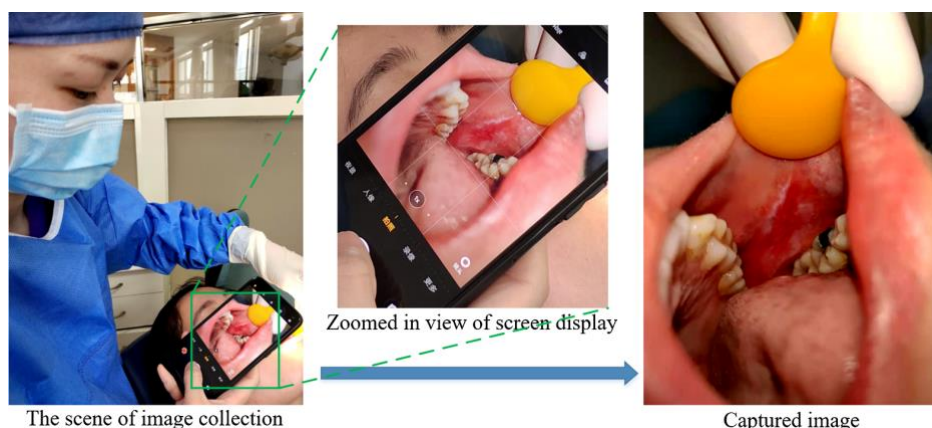


Figure 34. Exemple d'acquisition de donnée montrant bien la lésion au centre de la région d'intérêt

Enfin, Tanriver et coll. (158) ont étudié les perspectives d'un système automatisé d'identification des lésions buccales potentiellement malignes en temps réel, à partir de photographies. Leur modèle basé sur l'apprentissage profond détectait la région d'intérêt et la classait en une des trois catégories : bénigne, lésion potentiellement maligne, carcinome. Les bons résultats de cette étude montrent le potentiel des réseaux de neurones et de la computer vision en tant qu'outil non invasif et facile d'utilisation, afin d'améliorer le processus de dépistage et la détection des lésions orales à potentiel malin.

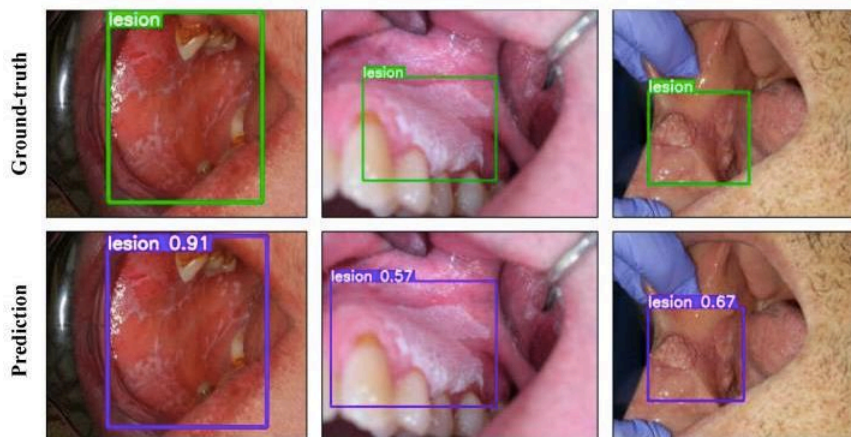


Figure 35. Résultats de la détection de lésion par YOLOv51 sur l'ensemble de données test

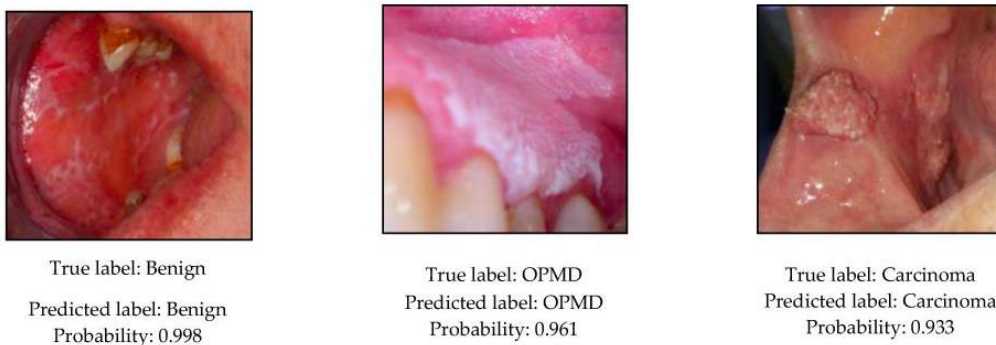


Figure 36. Etiquettes et probabilité de la prédiction sur les données test par le modèle EfficientNet-b4

Ainsi, l'intelligence artificielle touche à toutes les spécialités de la médecine dentaire. Les technologies se développent très rapidement et il est nécessaire d'actualiser régulièrement ses connaissances pour suivre l'innovation. Les principales avancées concernent le domaine de la reconnaissance d'image, avec pour objectif d'améliorer l'efficacité diagnostic du praticien et diminuer la perte de chance pour le patient. Nous avons vu notamment l'utilisation de ces systèmes pour la détection précoce de pathologies bucco-dentaires et son intérêt dans la prévention, mais aussi pour la prise en charge globale du patient.

## II. Répartition de la population de patients

### II.1. Classification des patients par âge

#### II.1.1. Dans la population générale

Au 1<sup>er</sup> janvier 2023, la France compte 68 millions d'habitants, avec une augmentation constante de la population chaque année d'environ 0,3%.

L'espérance de vie en 2022 est de 85 ans pour les femmes et de 79 ans pour les hommes.

Ainsi, la proportion des habitants de plus de 65 ans augmente depuis une trentaine d'année. Depuis le milieu des années 2010, le vieillissement de la population s'accélère avec l'arrivée à ces âges des générations nombreuses du *baby-boom*. Au 1<sup>er</sup> janvier 2023, on compte 21,3% des habitants qui ont 65 ans ou plus en France et ce chiffre devrait avoisiner les 30% à l'horizon 2040. (159)

De plus, le nombre de personnes âgées de plus de 65 ans et de plus de 75 ans est en augmentation constante depuis le début des années 2000. Les projections pour les années à venir sont très frappantes avec une forte différence des effectifs de plus de 65 ans entre 2022 et 2052. Sur l'augmentation totale de la population, l'accroissement du nombre de personnes de 75 ans ou plus représenterait presque les trois quarts de l'augmentation totale de la population. Hormis des événements majeurs (guerre, épidémie), le nombre de personnes âgées dans la population française n'a donc pas fini d'augmenter.

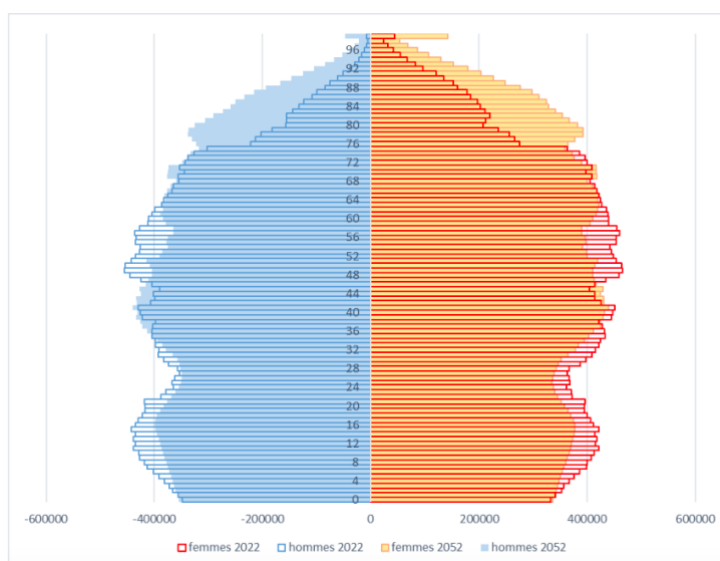


Figure 37. Pyramide des âges en France en 2022 et projection pour 2052 (160)

Concernant les jeunes, la population de personnes de moins de 25 ans représente 29,5% de la population française. Cette population fait partie du cœur de cible pour la prévention en matière d'hygiène bucco-dentaire. En effet, cette tranche d'âge est la plus exposée au risque carieux. Le gouvernement a d'ailleurs récemment étendu l'âge du dispositif d'examen bucco-dentaire « M'Tdents » jusqu'à 24 ans. (161)

Enfin, les personnes âgées de 26 à 60 ans représentent près de la moitié de la population française. Cette tranche d'âge est la plus consommatrice de soins bucco-dentaires. (162)

### II.1.2. Répartition sur le territoire

Même si le vieillissement de la population est un phénomène constant depuis 20 ans, il ne revêt pas la même forme selon les territoires. (163)

Au 1<sup>er</sup> janvier 2022, si l'on observe la part des habitants âgés de 60 ans et plus par département, on remarque qu'elle représente 31% ou plus dans les départements du Sud (Var, Gard, Alpes-de-Haute-Provence...), de l'Ouest (Vendée, Landes, Charente-Maritime...) et surtout du Centre (Creuse, Corrèze, Allier, Indre, Cantal...) de la France.

Ainsi, on retrouve une plus forte proportion de personnes âgées sur le littoral et dans les zones rurales peu denses. Cette répartition met en évidence des besoins de soins dentaires différents selon les régions. (164)

Dans les territoires concernés, on voit apparaître un enjeu pour la prise en charge d'une population dépendante de plus en plus nombreuse. Pour les régions littorales, il faut faire face à un déficit de places d'accueil dans les EHPAD, contrairement aux espaces du Massif central qui ont une bonne couverture sur ce point. Néanmoins, c'est l'isolement des personnes âgées qui est un enjeu pour ces espaces, la proportion de personnes âgées de plus de 65 ans et vivant seules étant supérieure à 35% dans les territoires peu denses. Le problème est la distance pour accéder aux services dans ces zones, nécessitant souvent d'être véhiculé. (163)

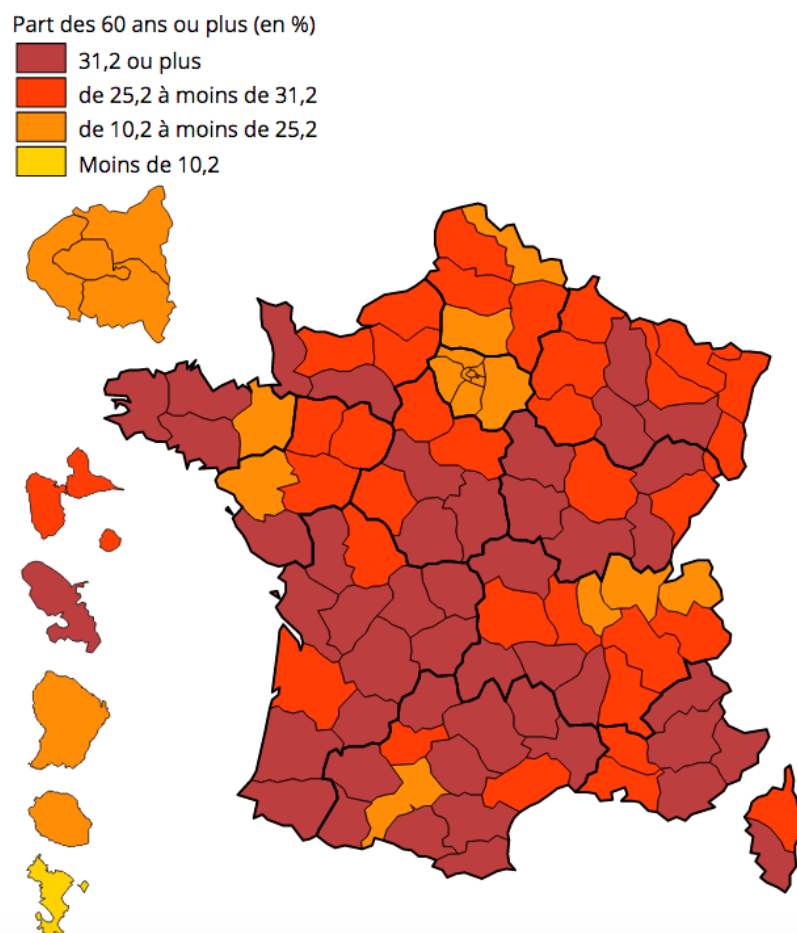
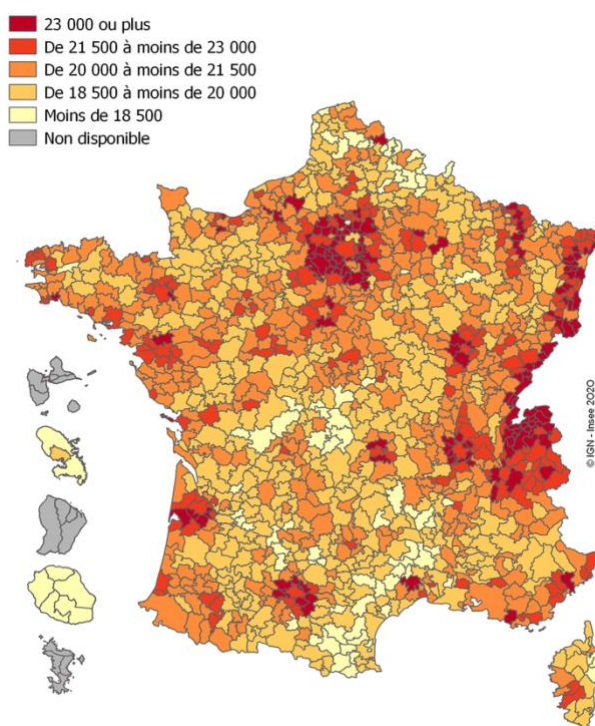


Figure 38. Répartition française de la part des personnes âgées de 60 ans et plus par département (164)

## II.2. Classification des patients par catégorie socio-économique

Selon l'Insee, le revenu médian en France était de 21 030 euros par an en 2017, mais des inégalités de revenus ressortent entre les régions.

Ainsi, on remarque que le niveau de vie annuel médian est plus élevé dans les territoires frontaliers avec la Suisse et l'Allemagne, en Île-de-France, sur la côte Atlantique et sur la côte d'Azur. À l'inverse, les plus faibles niveaux de revenu se situent dans les territoires ruraux du Centre et de l'Occitanie avec un revenu médian inférieur à 20 000 euros par an. (165)



*Figure 39. Niveau de vie annuel médian par établissements publics de coopération intercommunale en 2017*

Le degré d'urbanisation permet également de mettre en évidence cette inégalité de revenus. On retrouve les très hauts revenus principalement dans les grandes aires urbaines, et notamment dans les pôles urbains. Cependant, ils sont parmi les territoires les plus inégalitaires du pays car ils accueillent des très hauts revenus mais également des populations plus pauvres que leur couronne périurbaine. Le revenu médian élevé dans les zones urbaines n'est pas représentatif de l'ensemble de la population car on y trouve les plus grands écarts de revenus.

Dans les territoires ruraux, éloignés des grandes aires urbaines, le revenu médian est inférieur à celui des autres types d'espaces. Même si les inégalités y sont moins prononcées, ces territoires isolés font partie de ceux où la pauvreté des populations est la plus marquée. (166)

Malgré l'existence d'un bon système de santé en France, il existe des inégalités liées à la situation socio-économiques dans le recours aux soins dentaires.

Selon une enquête de 2013 qui mesurait le renoncement aux soins dentaires dans huit pays européens et aux États-Unis, le taux de renoncement en France était deux fois plus important que la moyenne européenne. (167)



Selon une enquête de 2014 (168), parmi les soins ayant été renoncés pour raisons financières, le renoncement aux soins dentaires arrive en tête avec 17% des personnes interrogées âgées de 18 à 64 ans.

Suite à la réforme « 100% Santé » mise en place en 2020, une grande partie des soins dentaires est dorénavant prise en charge à 70% par l'Assurance Maladie Obligatoire. Cependant, le reste à charge pour les ménages peut être conséquent selon les soins, en fonction de leur protection sociale et de la couverture complémentaire.

De plus, le chirurgien-dentiste n'est pas tenu d'effectuer le tiers payant, hormis pour les patients bénéficiant de la complémentaire santé solidaire. Cette avance des frais obligatoire de la part du patient peut être un frein supplémentaire à la prise en charge.

Enfin, une part non négligeable de soins bucco-dentaire n'est toujours pas prise en charge par l'Assurance maladie comme l'implantologie, les soins de parodontologie ou les techniques de restaurations minimalement invasives comme les inlay/onlays ou l'ICON.

Les patients ont une appréhension des coûts des soins dentaires. Dans l'imaginaire collectif, les soins dentaires coûtent chers et cela incite d'autant plus les patients réticents à y renoncer. En plus de renoncer aux soins dentaires, les patients ont donc également tendance à laisser aller leur suivi, entraînant une dégradation de leur état bucco-dentaire. L'état de santé bucco-dentaire reflète le statut économique du patient.

Une étude récente (169) a mis en évidence qu'il existait toujours une corrélation entre les frais prothétiques privés et le besoin de soin non satisfait pour des raisons financières. Le fait de vivre dans une zone où les frais dentaires sont plus élevés augmente de 35% la probabilité d'avoir un besoin de soin dentaire non satisfait pour raisons financières.

Enfin, les analyses démographiques ont montré que le processus d'implantation géographique des chirurgiens-dentistes semble en partie guidé par le niveau de revenu de la population dans certaines zones et non par le besoin de soin. Ainsi, les praticiens continuent de s'installer dans des zones déjà très dotées où sont présents des ménages à plus haut revenus, comme l'Île-de-France ou les zones frontalières.

Le renoncement aux soins est également lié aux besoins perçus. En effet, un patient dont l'état de santé bucco-dentaire ne nécessite pas de soin ne déclarera pas un renoncement.

Des études ont démontré que ce besoin ressenti est différent selon le niveau d'éducation. Les individus éduqués déclareraient davantage de problèmes de santé que les moins éduqués. (170).

Cette inégalité se retrouve au niveau des soins bucco-dentaire et notamment de la prévention chez les enfants. En effet, selon un rapport de la DREES, 8 enfants sur 10 avaient consulté un chirurgien-dentiste au cours de l'année 2008 contre 6 enfants d'ouvriers. Cette inégalité se traduit par un repérage plus tardif des lésions carieuses. Or, une détection précoce des problèmes dentaires permettrait d'éviter des traitements plus complexes et plus onéreux. (171)

## **II.3. Soins spécifiques : patients handicapés et âgés dépendants en EHPAD**

Selon le rapport de 2017 de l'Ordre National de Chirurgiens-Dentistes, ces populations seraient entre 6 et 10 millions, soit environ 10% de la population française. Ces catégories de patients sont particulièrement concernées par des difficultés d'accès aux soins bucco-dentaires. (172)

### **II.3.1. Patients handicapés**

Selon l'article L.114 de la loi du 11 février 2005, un handicap correspond à « une limitation d'activité ou restriction de participation à la vie en société subie dans son environnement par une personne en raison d'une altération substantielle, durable ou définitive d'une ou plusieurs fonctions physiques, sensorielles, mentales, cognitives ou psychiques, d'un polyhandicap ou d'un trouble de santé invalidant ». (173)

Selon l'ONCD, la médecine bucco-dentaire fait partie des spécialités les plus demandées pour les personnes en situation de handicap. Leur perception de la santé bucco-dentaire est moins bonne et leur état bucco-dentaire plus dégradé. (174)

Ainsi, les personnes handicapées représentent une population avec un haut risque de pathologies orales et leur état de santé bucco-dentaire se détériore avec l'âge, plus ou moins rapidement en fonction de leur handicap. Cette mauvaise santé bucco-dentaire a un impact sur leurs relations sociales mais aussi sur leur alimentation. En effet, certaines affections bucco-dentaires peuvent entraîner des répercussions sur leur qualité de vie : douleur, problèmes de mastication ou de communication, etc.

La difficulté de prise en charge de ces patients, tant en termes d'hygiène bucco-dentaire que de soins, entraîne une augmentation de la prévalence des pathologies dentaires et de leur gravité. Des déficiences cognitives ou des troubles physiologiques peuvent limiter la réalisation de soin sur un fauteuil dentaire ou l'accessibilité physique au cabinet.

À cela vient s'ajouter un manque de connaissances de l'entourage (famille, aidants) ou l'absence de coopération de certaines personnes handicapées qui aggravent leur état bucco-dentaire.

Plusieurs études ont mis en évidence une prise en charge bucco-dentaire tardive et un recours au soin inférieur à celui de la population générale. Cette prise en charge tardive est souvent la conséquence d'une absence d'hygiène dentaire et de suivi régulier.

Un rapport publié en 2010 estimait qu'au moins un demi-million de personnes handicapées n'avait pas suffisamment voire pas du tout accès à la santé bucco-dentaire. Il rappelait également l'importance de la santé bucco-dentaire comme « indicateur de santé globale mais également un indicateur d'intégration sociale ». (175)

De plus, une enquête de la Haute Autorité de Santé mettait en évidence que lorsque les enfants handicapés étaient pris en charge, ils recevaient moins de soins et avec des délais d'attente plus importants que leurs frères et sœurs. (176)

Par conséquent, il y a eu une prise de conscience ces dernières années sur la nécessité d'affermir l'intégration de ces patients dans le système de soin bucco-dentaire, avec une prise en charge adaptée à leurs besoins.

Depuis le rapport de 2010, l'ONCD a mis en place des référents handicap départementaux pour répondre aux demandes des patients dans ces situations. Son rôle est de déterminer si un patient peut être pris en charge dans le secteur libéral. Dans le cas contraire, il lui propose d'autres possibilités de prise en charge à travers des associations ou des services hospitaliers. Il peut éventuellement organiser l'intervention d'un chirurgien-dentiste à domicile en cas d'urgence, en fonction des moyens disponibles. (177)

Afin d'améliorer l'accès au soin des personnes atteintes de handicap sévère, l'article 12 de la convention nationale des chirurgiens-dentistes de 2018 a permis de valoriser la prise en charge de cette patientèle par les chirurgiens-dentistes de ville. De plus, elle permet également la prise en charge par l'assurance maladie de l'utilisation du MEOPA dans le cadre de soins sous sédation consciente chez ces patients. (178)

L'objectif est de favoriser la prise en charge du patient handicapé par le chirurgien-dentiste libéral dès que son état le permet afin de limiter la nécessité de structure ou de prise en charge particulière.

Des actions sont également menées par des associations comme l'Union Française pour la Santé Bucco-Dentaire (UFSBD) au niveau national ou HandiDent au niveau régional. L'UFSBD propose des formations destinées au personnel soignant et encadrant (famille, aidant, infirmier...) pour améliorer la prise en charge de l'hygiène dentaire chez les personnes en situation de handicap. Elle propose des outils pour faciliter la communication entre le patient handicapé et le praticien et met également à disposition des accompagnants des fiches conseils sur l'hygiène bucco-dentaire spécifiques aux patients handicapés.

À la suite du rapport de 2010, l'UFSBD a organisé une réflexion regroupant l'ensemble des représentants de la profession pour la réalisation d'une « charte Romain Jacob » spécifique de la prise en charge bucco-dentaire. Elle met en avant les actions essentielles à mettre en œuvre pour améliorer la santé bucco-dentaire des personnes en situation de handicap.

HandiDent Paca est une association pour améliorer l'accès aux soins bucco-dentaires des personnes en situation de handicap et des personnes âgées vulnérables. Elle gère un réseau ville-hôpital regroupant des professionnels de santé motivés et formés à la prise en charge de ces populations et de leurs pathologies. Elle possède également un centre de santé mobile comprenant un bus dentaire et des véhicules de soins dentaires qui se déplacent dans les établissements médico-sociaux de la région avec des chirurgiens-dentistes bénévoles. (179)

Le rapport de 2010 insistait sur la nécessité d'agir au niveau de la prévention pour faciliter la prise en charge de ces patients, car « résoudre le problème de l'accessibilité aux soins, c'est avant tout agir en prévention ». (175)

Les soins préventifs et restaurateurs sont moins invasifs et globalement mieux tolérés par les patients. Éviter la survenue de problèmes bucco-dentaires entraînant dévitalisation, avulsion, etc. est donc primordial pour ces patients. Des mesures sont encore nécessaires pour une meilleure sensibilisation des personnes handicapées, de leur famille et des aidants à l'hygiène bucco-dentaire quotidienne et à la prévention primaire.

Depuis 2022, la Caisse nationale de l'Assurance Maladie a choisi le baromètre Handifaction comme outil de référence afin de mesurer l'accès aux soins des personnes vivant avec un handicap. Il s'agit d'un site sur lequel les personnes handicapées donnent leur opinion sur les soins en remplissant un questionnaire en ligne.

Ainsi, au cours du dernier trimestre de 2022, parmi les types de soins recherchés après avoir subi un refus de soin, les soins dentaires représentaient 11% des réponses. De plus, pour les répondants ayant abandonné leur soin, les soins dentaires arrivaient en 2<sup>ème</sup> position juste derrière les soins liés au handicap. (180)

Malgré les mesures et les dispositifs mis en place, il reste encore beaucoup à faire pour ces populations en termes de prise en charge bucco-dentaire.

### **II.3.2. Personnes âgées dépendantes en EHPAD**

Avec le vieillissement de la population et l'augmentation du nombre de personnes âgées, on observe également un essor du phénomène de dépendance.

Un état bucco-dentaire satisfaisant est primordial chez la personne âgée. Néanmoins, la prise en charge bucco-dentaire des personnes âgées dépendantes nécessite des adaptations en raison du mauvais état de santé général de ces personnes et de leurs difficultés à se rendre dans les cabinets dentaires (perte d'autonomie, démence, transports spécialisés...). Les établissements d'hébergement pour personnes âgées dépendantes (EHPAD) accueillent des personnes âgées de plus de 60 ans qui nécessitent une aide pour effectuer les actes de la vie quotidienne en fonction de leur degré de dépendance. Ces établissements médicalisés comprennent un médecin coordonnateur, des infirmières, des aides-soignants et des professionnels paramédicaux, pour effectuer les soins médicaux permanents nécessaires aux résidents.

Pourtant, une étude (181) publiée en 2013 a mis en évidence que les personnes âgées vivant en EHPAD avaient moins recours à un chirurgien-dentiste que les personnes âgées vivant à domicile, et que l'état de santé bucco-dentaire dans ces établissements était alarmant.

Avec la diminution de la dextérité ou de l'acuité visuelle, maintenir une hygiène bucco-dentaire correcte peut s'avérer compliqué pour les personnes en institution. De plus, l'absence de chirurgien-dentiste sur place entraîne une absence de suivi régulier et un accroissement des problèmes bucco-dentaires chez cette catégorie de patients. À cela s'ajoute un recul du recours aux soins bucco-dentaires au-delà de 80 ans, alors que les besoins de soins sont de plus en plus importants. (182)

Une grande partie des personnes âgées en EHPAD présente un édentement, qu'il soit partiel ou total. Ces édentements sont régulièrement mal ou non compensés, et les patients peuvent avoir du mal à porter leur prothèse. Cela entraîne une diminution de la capacité masticatoire et donc un impact direct sur l'alimentation de ces patients, pouvant entraîner sous-alimentation et perte de poids. Les personnes âgées présentant des dents restantes présentent une meilleure qualité de vie que les personnes âgées édentées. (183)

Par conséquent, maintenir les dents sur arcade le plus longtemps possible est une priorité, d'autant plus que ces patients font face à de nombreux problèmes dentaires qu'il faut prendre en considération.

En raison d'un vieillissement des glandes salivaires et des nombreux traitements médicamenteux pris, les personnes âgées dépendantes présentent souvent une diminution du flux salivaire entraînant une xérostomie. Cette sécheresse buccale entraîne une augmentation du risque carieux, des maladies parodontales et des infections des muqueuses. (184)

Des lésions carieuses sont fréquemment observées chez les personnes âgées dépendantes en institution, avec un indice CAO plus élevé que dans la population générale. Les lésions radiculaires et au collet sont les plus souvent rencontrées, dont la progression peut compromettre plus rapidement les possibilités de restauration de la dent que les caries occlusales. Cependant, la rétraction pulpaire physiologique avec l'âge fait que la symptomatologie de la lésion carieuse se manifeste à faible bruit, entraînant une découverte souvent tardive de la lésion. (185) (186)

L'usure dentaire est aussi régulièrement retrouvée chez les personnes âgées dépendantes. Cette usure dentaire peut avoir pour origine du bruxisme, souvent engendré par des maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer ou de Parkinson. (187)

Elle peut aussi être due à des attaques acides, les patients âgés étant plus sujet au reflux gastro-œsophagien. (188) En plus de réduire les fonctions masticatoires, cette usure dentaire rend également les dents plus sensibles à la maladie carieuse.

Du fait de la difficulté à éliminer correctement la plaque dentaire, les personnes âgées dépendantes sont également plus sujettes à la gingivite et la parodontite. À cela peut s'ajouter la résorption physiologique de l'os alvéolaire qui entraîne donc une augmentation du risque de perte des dents chez ces patients. (184)

Enfin, les lésions des muqueuses sont fréquentes. Des candidoses peuvent être observées en fonction des traitements ou pathologies du patient (diabète, immunodéfiance), accentuées par une mauvaise hygiène des prothèses et une diminution du flux salivaire. Une perlèche peut également être observée chez les patients porteurs de prothèses mal adaptées ou usées, entraînant une diminution de la dimension verticale qui favorise la rétention salivaire au niveau de la commissure labiale. La détérioration des prothèses peut aussi engendrer des lésions traumatiques. (184)

L'état de santé bucco-dentaire et l'état de santé général sont liés puisque les pathologies générales influencent l'état bucco-dentaire et inversement, un mauvais état bucco-dentaire peut aggraver l'état de santé général. Par exemple, il a été clairement défini une interrelation entre le diabète de type II et la parodontite. (189)

Il a également été montré une association entre les maladies bucco-dentaires et la survenue d'athérosclérose et de pathologies cardiovasculaires ischémiques, déjà plus fréquentes dans cette population de patients. (190)

Face à la fréquence accrue des pathologies bucco-dentaires et leur impact sur la santé et la qualité de vie des personnes âgées dépendantes en EHPAD, il est donc primordial d'accentuer les opérations de dépistages pour diagnostiquer les pathologies précocement, et donc d'améliorer le suivi bucco-dentaire de ces populations.

Dans un rapport de 2017 (191), le Conseil de l'Ordre relevait que plusieurs établissements souhaitaient pouvoir établir un bilan bucco-dentaire à l'entrée de chaque résident et procéder à des examens de dépistage. Il mettait déjà en avant l'intérêt du télédiagnostic pour éviter le déplacement du chirurgien-dentiste et des résidents qui sont coûteux et parfois anxiogène pour le patient.

Cela permettrait aussi d'anticiper et de planifier la prise en charge thérapeutique, de grouper les consultations ou les examens complémentaires nécessaires et d'assurer la continuité des soins. L'usage de l'IA dans ce cadre est donc tout à fait indiqué, avec des dispositifs qui commencent à se mettre en place.

## **II.4. Intérêt de la segmentation et apport des nouvelles technologies**

Malgré des difficultés d'accès aux soins dans certains territoires, la demande de soins bucco-dentaires augmente avec le vieillissement de la population, l'amélioration du système de prise en charge et l'essor de la prévention.

### **II.4.1. Vieillessement de la population**

Les besoins de soins bucco-dentaires devraient augmenter avec le vieillissement de la population. En effet, la présence de problèmes dentaires augmente parallèlement à l'âge : 29,6% chez les 15-24 ans contre 47,9% chez les 65-75 ans.

Cependant, les enquêtes de consommation de soins mettent en évidence un recul du recours au soin avec l'âge. Le besoin de soins n'est pas toujours perçu par le patient à un certain âge et ne se traduit donc pas en demande de soins.

Selon l'UFSBD, « les personnes âgées ont des besoins de santé orale différents de ceux de la population générale, qui ne sont plus les mêmes que ceux des précédentes car les personnes âgées gardent leurs dents plus longtemps ». (192) Ainsi, même si les besoins de soins dentaires sont plus importants avec l'âge, beaucoup de personnes n'ont pas recours au soin. Depuis le plan national de prévention en 2006-2011, la santé bucco-dentaire a davantage été prise en compte, avec une stratégie de renforcement de la prévention dans ce domaine afin de réduire la survenue des pathologies dentaires.

L'IA pourrait donc avoir un intérêt majeur avec l'augmentation du nombre de personnes nécessitant un suivi bucco-dentaire régulier, pour accompagner et faciliter les actes de préventions, faire du dépistage à plus grande échelle et anticiper les traitements nécessaires.

### **II.4.2. Désertification médicale dans les territoires ruraux**

Dans certains territoires, les habitants rencontrent de grandes difficultés pour accéder aux professionnels de santé, chirurgiens-dentistes y compris. Les temps d'attente pour obtenir un rendez-vous sont parfois longs avec une moyenne de 28 jours (parfois plusieurs mois) (193), et les distances à parcourir pour atteindre le lieu de consultation également.

Ces inégalités territoriales trouvent leur source dans une répartition inégale des professionnels de santé bucco-dentaire sur le territoire, avec une situation défavorable pour les territoires ruraux à l'instar des autres professions médicales.

Les territoires ruraux sont également confrontés à un vieillissement de leur population. En effet, la carte du vieillissement se superpose à celle de la ruralité. Les espaces français qui présentent une grande part de population âgée de 60 ans ou plus se situent principalement dans les espaces ruraux, sous faible influence des grands pôles urbains ou des territoires frontaliers.

Dans ces territoires, près de 40% des habitants sont âgés de 60 ou plus, contre 25,9% à l'échelle nationale. Ces territoires sont notamment le massif Pyrénéen, le centre de la France et l'arrière-pays de la région Sud.

De plus, la diminution de l'offre de services publics dans les espaces ruraux se poursuit. L'éloignement et le temps de trajet associés aux faibles possibilités de mobilité et de transport dans ces territoires entraîne une renonciation aux droits et services pour les plus âgés.

### **II.4.3. Apport du numérique pour les patients handicapés**

Aujourd'hui, les technologies du numérique font partie dans notre quotidien, mais elles représentent également un outil pour améliorer la prise en charge des patients handicapés dans leur parcours de soins.

L'association SOHDEV a développé une application numérique dans son Programme Autisme et Santé Orale afin de faciliter la préparation des visites chez le chirurgien-dentiste et d'instaurer un brossage quotidien chez les patients. Cette application téléchargeable sur smartphone met à disposition des accompagnants des outils de communications comme des pictogrammes, des bandes dessinées statiques ou animées mais aussi une bande son. L'objectif est de faciliter l'accompagnement des familles en matière d'hygiène bucco-dentaire des personnes avec autisme mais aussi de faciliter la prise en charge au cabinet dentaire en familiarisant le patient avec les bruits et les instruments qu'il va rencontrer. (194)

Une étude de 2018 s'est intéressée à l'intégration de la tablette tactile dans les programmes de prévention bucco-dentaire destinés aux enfants en situation de handicap cognitif. 12 enfants ont été inclus dans cette étude. Un programme d'apprentissage et d'entraînement au brossage a été mis en place sur une période de 8 mois, en utilisant un Ipad® comme support de pédagogie visuelle. Après une évaluation sur 11 mois (dont 3 mois après la fin du programme), l'autonomie des enfants a progressé au fil du temps et ils étaient plus coopérants lors du brossage. (195)

L'utilisation des casques de réalité virtuelle a été envisagée pour diminuer le stress des patients handicapés lors des consultations médicales. Des essais ont déjà été réalisés par l'association HandiDent Paca, avec des résultats intéressants. Les patients observés étaient plus paisibles et appréciaient cette nouvelle expérience. Cela pourrait permettre de diminuer le recours à la prémédication ou au soin sous sédation médicamenteuse. (196)

### **II.4.4. Le dispositif ORALIEN (197,198)**

Face au constat que 85% des personnes âgées dépendantes n'avaient pas de suivi bucco-dentaire, l'UFSBD a mis en place depuis 2018 le programme « ORALIEN ». Il s'agit d'un programme d'accompagnement et de prévention de la santé orale chez les personnes âgées dépendantes vivant en établissement médico-social. Il se base sur l'utilisation de l'IA pour effectuer le suivi régulier des patients par de la télé-surveillance. Le programme ORALIEN s'inscrit en complément d'un suivi annuel en cabinet dentaire pour garder le lien avec le praticien, et anticiper la prise en charge des pathologies bucco-dentaires.

Ce programme repose sur l'utilisation de l'application Oralien, développé par l'UFSBD en partenariat avec la société DentalMonitoring.

Cette application est utilisable sur smartphone. Grâce à des écarteurs de bouche spécifiques fournis à l'établissement, les aides-soignants peuvent réaliser des scans de la bouche de résidents de façon non intrusive. L'application permet également d'enregistrer les réponses des patients à un bref questionnaire médical.

Les informations sont ensuite anonymisées, cryptées et envoyées sur une plateforme sécurisée où elles sont analysées par un algorithme d'IA qui va établir une recommandation personnalisée pour chaque patient, en termes de besoins de soins en fonction de son état bucco-dentaire. Cette analyse est également contrôlée par un chirurgien-dentiste.

Cela permet au personnel médical d'évaluer l'impact des protocoles d'hygiène personnalisée ou d'alerter sur la nécessité de prévoir une consultation chez le chirurgien-dentiste.

Le but est de déterminer s'il y a des défauts d'hygiène mais aussi des besoins de soins.

ORALIEN est un dispositif global qui comprend aussi des séances de formations pour les personnels soignants afin de les associer à la santé bucco-dentaire des personnes prises en charge. Il comprend aussi la réalisation de 2 bilans par an entre le chirurgien-dentiste et le cadre de santé.



### **III. Répartition démographique des chirurgiens-dentistes en France et conséquences**

La profession de chirurgien-dentiste jouit de la libre installation sur l'ensemble du territoire français et les dernières directives européennes ont permis la libre circulation des chirurgiens-dentistes entre les pays de l'Union européenne.

Pour exercer la profession de chirurgien-dentiste, l'article L.41111-1 du Code de Santé Publique stipule que 3 conditions doivent être réunies. Il faut :

- Avoir obtenu son diplôme de docteur en chirurgie dentaire, certificat ou autre titre mentionné dans les articles L.4131-1, L.141-3 ou L4151-5
- Être de nationalité française, de citoyenneté andorrane ou ressortissant d'un Etat membre de l'Union européenne ou partie à l'accord sur l'Espace économique européen ou d'un pays lié avec la France par une convention d'établissement, du Maroc ou de la Tunisie.
- Être inscrit à un tableau de l'Ordre des chirurgiens-dentistes.

S'il remplit ces 3 critères, le chirurgien-dentiste peut exercer la médecine dentaire où il le souhaite sur tout le territoire, à moins qu'il ait signé une clause de non-concurrence avec un confrère ou qu'il soit restreint par un Contrat d'Engagement au Service Public. (199)

L'évolution démographique des chirurgiens-dentistes a été limitée ces 30 dernières années, augmentant moins vite que la population française. Seulement depuis 2012, on observe de nouveau une légère hausse des effectifs de 0,5% par an en moyenne.

De plus, on note une part importante de diplômés étrangers dans les nouvelles inscriptions à l'Ordre, qui pose la question du flux de professionnels à former en France et de la qualité de la formation.

L'étude de la démographie des chirurgiens-dentistes et ses projections est donc un prérequis pour envisager les solutions d'avenir permettant d'améliorer l'accès au soin pour tous les patients.

#### **III.1. Etat des lieux (162,200–203)**

##### **III.1.1. Densité des chirurgiens-dentistes**

Au 19 janvier 2023, on dénombre 44 487 chirurgiens-dentistes (CD) en activité, soit une moyenne de 67 praticiens pour 100 000 habitants. Cette densité est inférieure à la moyenne européenne en 2018 qui est de 74 pour 100 000 habitants. Alors que la densité a augmenté dans la plupart des pays depuis 2006, la France à l'inverse a vu sa densité diminuer. (162)

De plus, les données actuelles montrent une densité très disparate des chirurgiens-dentistes entre les régions. Ainsi, on remarque que les départements du Sud de la France (Hérault, Bouches-du-Rhône, Var, Alpes-Maritimes) et de la côte Ouest (Pyrénées-Atlantiques, Gironde) présentent une plus forte concentration de praticiens que les départements du Centre (Corrèze, Creuse, Indre-et-Loire, Yonne) et du Nord de la France (Calvados, Pas-de-Calais, Somme, Eure). On retrouve une grande concentration de chirurgiens-dentistes en Île-de-France également.

Cette inégale répartition se retrouve même entre proches départements. Par exemple, la densité dans les Bouches-du-Rhône est de 95,4 CD/100 000 habitants, alors qu'elle n'est que de 55,6 CD/ 100 000 habitants dans les Alpes-de-Haute-Provence, en-dessous de la moyenne française. (200)

On remarque également que la densité est plus élevée dans les départements accueillant une UFR d'odontologie. Ainsi, dans les territoires qui ne disposent pas d'une UFR, la densité moyenne des chirurgiens-dentistes est bien inférieure à la moyenne nationale (47/100 000 habitants). (162)

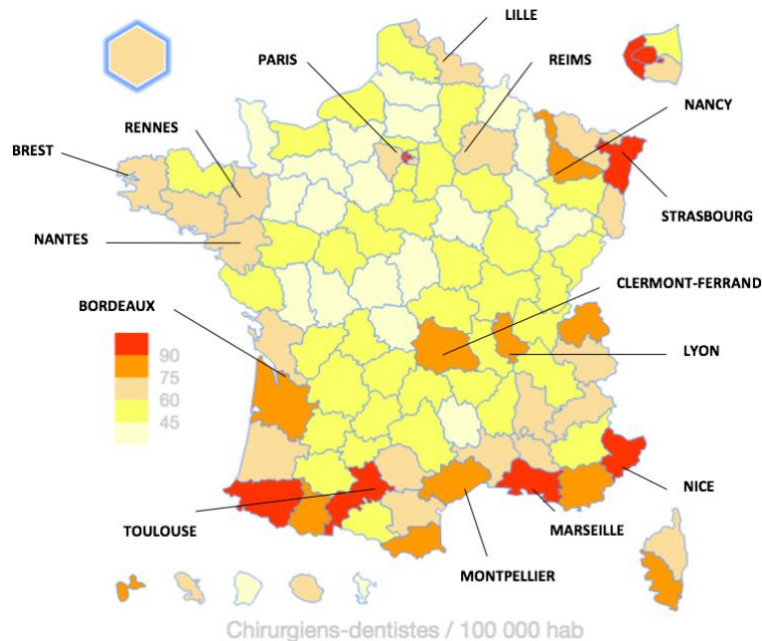


Figure 40. Répartition par département des chirurgiens-dentistes pour 100 00 habitants et localisation des 16 UFR (dont 2 à Paris) (200)

Si on étudie plus précisément cette densité des chirurgiens-dentistes, on observe une concentration des praticiens libéraux autour des grands pôles urbains avec 31% de chirurgiens-dentistes établis dans une aire urbaine de plus de 200 000 habitants en 2017 contre 6% en zone rurale. On trouve également une forte densité près du littoral et des zones frontalières qui recouvrent une part importante de ménages à plus hauts revenus disponibles. (203)

### III.1.2. Profil des chirurgiens-dentistes : âge, sexe et mode d'exercice

Depuis ces dernières années, l'âge moyen tend à diminuer. À la suite d'une baisse du *numerus clausus* dans les années 80 et 90, la population des praticiens vieillissait et l'âge moyen ne faisait qu'augmenter depuis le début des années 2000, passant de 42 ans en 1990 à 48 ans en 2012. Mais depuis 2013, on commence à observer une inversion de cette tendance avec un rajeunissement de la population des chirurgiens-dentistes. L'âge moyen est actuellement de 45,2 ans au 1<sup>er</sup> janvier 2023 (200). Ce rajeunissement s'explique par l'arrivée importante de jeunes praticiens, avec une part de chirurgiens-dentistes de moins de 35 ans qui est passée de 16 à 27% entre 2012 et 2021. (162)

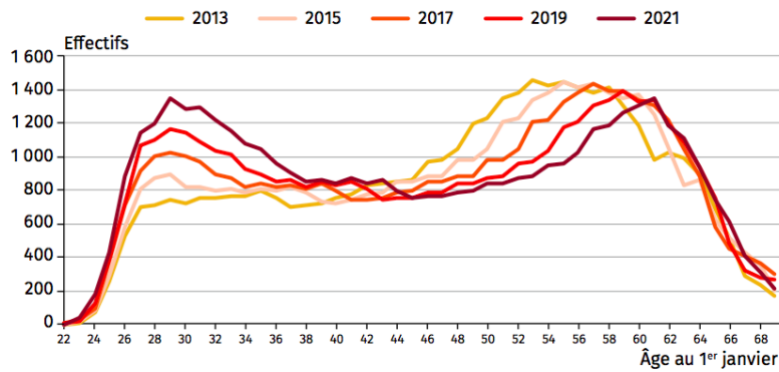


Figure 41. Pyramides des âges des chirurgiens-dentistes de 2013 à 2021 (162)

Cependant, quand on observe la cartographie de la part des chirurgiens-dentistes âgés de 65 ans et plus en janvier 2023, on remarque que dans de nombreuses zones à faible densité de praticiens (Drôme, Lozère ou Calvados par exemple) ils représentent plus de 7% des praticiens en activité. Ainsi, on va retrouver dans ces zones déjà faiblement dotées une part non négligeable de praticiens qui vont bientôt prendre leur retraite, et qui seront potentiellement non compensés.

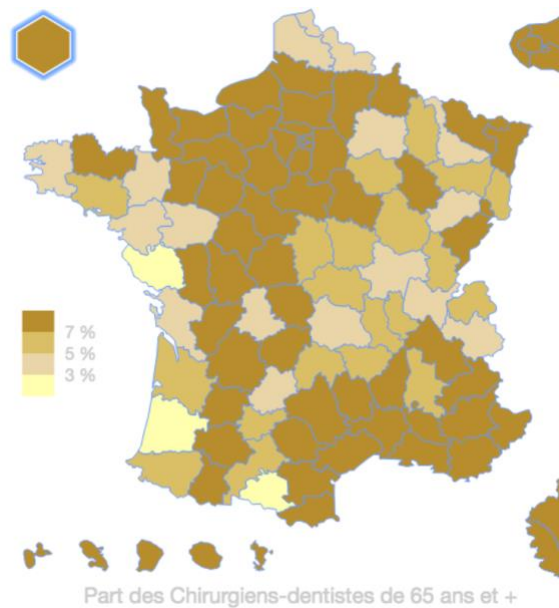


Figure 42. Répartition par région de la part de chirurgiens-dentistes de 65 ans et + (200)

La profession se féminise. Alors que les femmes représentaient moins d'un tiers des chirurgiens-dentistes en 1990, le taux de féminisation est en constante augmentation. La part des femmes a atteint les 48,7% en janvier 2023 (200) soit près de la moitié des chirurgiens-dentistes, contre à peine 40% il y a 10 ans. Cela devrait se poursuivre dans les années à venir car les femmes sont aujourd'hui majoritaires dans la jeune génération (25-29 ans) et dans les nouveaux diplômés. (162)

Concernant les modes d'exercices, l'exercice libéral reste le principal mode d'exercice des chirurgiens-dentistes. Cette proportion de dentistes libéraux est notamment marquée dans les zones à faible densité de chirurgiens-dentistes. (200)

Cependant, une proportion plus importante de dentistes qu'auparavant se tourne vers un exercice en salariat non hospitalier ou en exercice mixte, principalement dans les grandes villes. Cela explique la baisse progressive de la part des libéraux exclusifs, passant de 91% en 2006 à 82,9% en 2023. (200) Ce mode d'exercice en salariat attire plus facilement les jeunes praticiens et notamment les femmes, qui représentent plus de 60% des salariés.

La pratique quant à elle reste principalement de l'omnipratique pour 94% des chirurgiens-dentistes.

Enfin, on retrouve une tendance au regroupement des praticiens. Depuis 2013, l'activité en cabinet individuel a diminué à l'inverse de l'activité en cabinet de groupe qui est maintenant la structure majoritaire avec 54%. (162)

Les caractéristiques d'exercice évoluent également. Les heures de travail chez les jeunes chirurgiens-dentistes diminuent par rapport aux générations précédentes, avec une tendance à condenser le temps de travail sur un nombre restreint de jours (3 ou 4 jours de travail dans la semaine). Alors que le travail des praticiens plus âgés est plutôt réparti sur 4 à 5 jours. (204)

### **III.2. Analyse des données existantes**

Quand on compare l'effectif des chirurgiens-dentistes sur les années passées, il n'a fait qu'augmenter. Le problème n'est donc pas seulement le manque de chirurgiens-dentistes mais leur répartition inégale sur territoire français, qui ne permet pas de garantir une offre de soins homogène. Depuis une quinzaine d'années, on constate les mêmes inégalités régionales avec un écart inter-régions qui peut aller du simple au double.

La concentration en chirurgiens-dentistes est également plus élevée dans les grandes agglomérations que dans les campagnes, ce qui conduit à une désertification des zones rurales.

#### **III.2.1. Numerus Clausus (162,205)**

L'évolution de l'effectif des chirurgiens-dentistes reflète en partie celle du *numerus clausus*. Afin de réguler le nombre de chirurgiens-dentistes sur le territoire français, l'Etat a instauré depuis 1971 un *numerus clausus* fixant chaque année le nombre d'étudiants admis dans la filière d'odontologie. Ce quota était fixé chaque année au niveau national par décret du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et du Ministère de la Santé. Il était de 1938 places à sa création.

Mais dans le contexte politique et social de la fin des années 1970, ce *numerus clausus* fut diminué d'année en année afin de limiter le nombre de praticiens diplômés, atteignant 800 places dans les années 90 et ce jusqu'en 2003.

Cette diminution du nombre d'étudiants formés a entraîné un vieillissement de la profession et une stabilisation des effectifs.

Depuis les années 2000, face à la diminution de l'offre de soin, le *numerus clausus* a commencé à réaugmenter pour l'ensemble des professions médicales dont les chirurgiens-dentistes pour revenir à 1332 places en 2020.

C'est cette régulation de l'entrée des étudiants en médecine dentaire qui est en grande partie à l'origine de la démographie actuelle des chirurgiens-dentistes sur le territoire national.

Depuis la réforme des études de santé entrée en vigueur en 2020, le *numerus clausus* a été supprimé et remplacé par un *numerus apertus*, en fonction de la capacité d'accueil et des places disponibles dans chaque faculté. Cette réforme est dans la continuité d'une poursuite de l'augmentation des admissions en 2<sup>ème</sup> années des études de santé, odontologie y compris. Le nombre de places disponibles pour accéder à la filière odontologie est dorénavant fixé pour chaque région par l'université en collaboration avec l'ARS. (206)

L'objectif de cette réforme est d'anticiper la démographie des professions médicales par une analyse des besoins de santé des territoires et des évolutions des métiers, en conjuguant les besoins réels des différents territoires avec les capacités d'accueil de chaque faculté.

### **III.2.2. Répartition des facultés (207,208)**

Les études statistiques montrent que les praticiens restent le plus souvent dans la zone où ils ont effectué leur cursus de formation. Une fois installés, la mobilité des chirurgiens-dentistes est plutôt faible. Les régions sans UFR d'odontologie sont donc handicapées par l'absence de faculté à proximité ou par un trop faible *numerus clausus* à l'époque dans les universités les plus proches. Avant 2022, on comptait 16 facultés d'odontologie sur le territoire, situées dans les grandes agglomérations : Paris, Marseille, Lyon, Lille, Toulouse, Nice, Montpellier, Bordeaux, Brest, Clermont-Ferrand, Nancy, Reims, Nantes, Strasbourg et Rennes.

En 2021, le gouvernement a donc annoncé la création de 8 nouvelles facultés d'odontologies dans les régions à faible densité démographique en chirurgiens-dentistes : Grenoble, Poitiers, Tours, Besançon, Dijon, Caen, Rouen et Amiens. Le but est de permettre aux étudiants originaires de ces régions d'y rester en sortie de faculté, alors qu'ils devaient auparavant changer de régions pour poursuivre leur étude en odontologie et souvent restaient dans leur région de formation.

Cinq d'entre elles ont déjà ouvert pour la rentrée 2022, et le nombre d'étudiants formés devrait y croître progressivement dans les années à venir.

De plus, un rapport de 2003 a montré que les principaux facteurs d'attractions pour les chirurgiens-dentistes sont : la douceur du climat, la sécurité, la proximité d'écoles d'un bon niveau pour leurs enfants et les possibilités de trouver du travail pour leur conjoint. (209)

### **III.2.3. Diplôme européen (210)**

La baisse importante du *numerus clausus* depuis 1980 aurait pu entraîner une baisse importante de l'effectif des chirurgiens-dentistes en-dessous de 35 000. Mais cela ne s'est pas produit grâce à un flux entrant de praticiens diplômés à l'étranger dont la croissance a été plus importante que prévue.

Depuis la fin des années 70, le Conseil des communautés européennes et la Commission européenne ont cherché à favoriser la libre circulation des professionnels de santé en instaurant un système de reconnaissance mutuelle des diplômes. Afin de s'assurer de la qualité de la formation reçue, la directive 2005/36/CE révisée en 2013 fixe le niveau des diplômes requis pour suivre les formations permettant l'exercice de la profession, ainsi que la durée minimale de ces formations, les connaissances et les compétences nécessairement acquises.

Un chirurgien-dentiste européen dont le diplôme est conforme à la directive 2005/36/CE peut donc exercer en France et son diplôme est reconnu automatiquement.

Ainsi, les chirurgiens-dentistes diplômés à l'étranger sont passés de 5% des nouveaux inscrits à l'Ordre en 1999 à 40% en 2021, dont 39% dans un pays européen. Cet afflux en constante augmentation de praticiens formés à l'étranger a permis le maintien d'une augmentation de la population des chirurgiens-dentistes malgré un faible numerus clausus et des départs à la retraite. La part de chirurgiens-dentistes exerçant en France diplômés à l'étranger a triplé en 9 ans. (162)

Néanmoins, ces chirurgiens-dentistes diplômés à l'étranger ont changé leur comportement d'installation. Auparavant, les praticiens primo-inscrits formés à l'étranger s'installaient davantage dans les régions sans UFR que leurs homologues formés en France. Avec l'augmentation du nombre de dentistes à diplôme étranger, on aurait pu prévoir une amélioration de la situation des régions sans UFR, mais au contraire les installations dans ces régions ont continué de décroître. Comme les diplômés en France, les jeunes praticiens diplômés à l'étranger s'installent maintenant plutôt dans les centres urbains. (162)

#### **III.2.4. Spécificité d'exercice**

L'accès au soin ne dépend pas seulement de la densité de chirurgiens-dentistes mais aussi du temps de travail des praticiens. Actuellement, le temps de travail des chirurgiens-dentistes est inférieur à celui des générations précédentes. Les jeunes praticiens sont plus attentifs à leur qualité de vie, et cherchent à accorder plus de temps à leur formation, leurs loisirs et à leur vie de famille plutôt qu'à leur exercice. (211)

Cela est également due à une amélioration de la productivité horaire.

La féminisation de la profession accentue également cette réduction du temps de travail, les femmes travaillant 4 à 6h de moins que les hommes par semaine selon des études canadiennes et américaines. (212–214)

Le recul de l'âge de départ à la retraite des chirurgiens-dentistes, qui continuent d'exercer après 65 ans, pose la question de la nécessaire mise à jour de leurs connaissances médicales. En effet, le temps et l'argent nécessaire pour se former est plus compliqué à accepter pour les praticiens lorsque leur cessation d'activité se rapproche.

De plus, en fin de carrière, certains praticiens ne voient plus l'utilité d'investir dans du nouveau matériel pour leur temps d'activité restant. (204)

Cela met aussi en avant une partie non négligeable de praticiens qui ne veulent pas cesser leur activité par manque de remplaçant pour reprendre leur cabinet.

Cela s'explique en partie par les nouveaux modes d'exercice. Les anciens cabinets individuels n'attirent plus les jeunes praticiens qui privilégient une installation en groupe. Selon une enquête de l'UNECD, seulement 14% des étudiants interrogés envisagent un exercice individuel. (215)

Enfin, la demande de soins est également plus importante. Le vieillissement de la population crée davantage de besoins de soins, et la nouvelle génération est plus attentive à sa santé et à l'esthétique.

De plus, les récentes mesures gouvernementales qui visent à réduire le coût financier des soins prothétiques incitent les populations qui refusaient de se faire soigner pour des raisons financières à reprendre un suivi chez un chirurgien-dentiste.

### **III.3. Soins spécifiques des zones faiblement dotées ou sous-dotées**

Ces données ne sont pas suffisantes pour expliquer les difficultés d'accès aux soins dans certaines zones. Il faut mettre en parallèle les populations de ces départements pour mettre en évidence les zones qui ont une offre de soin insuffisante.

La densité des chirurgiens-dentistes ne tient pas compte des besoins de soins spécifiques selon l'âge. La structure par âge de la population varie selon les territoires, et donc les besoins de soins sont également différents.

Selon les études statistiques, la consommation de soins dentaires augmente avec l'âge jusqu'à 65 ans puis décroît fortement. Les patients entre 45 et 75 ans ont une consommation de soins supérieure à 30% par rapport à la moyenne de la population. Ainsi, les territoires dont une large partie de la population se situe dans cette tranche d'âge ont des besoins exprimés de soins dentaires plus importants.

Cependant, étant donné l'allongement de l'espérance de vie, on peut supposer que la baisse de la consommation de soins dentaires au-delà de 65 ans résulte de besoins de soins non satisfaits. En effet, il semblerait logique que plus la population atteint un âge avancé, au plus elle nécessiterait de soins dentaires. Ces chiffres mettent donc en évidence une difficulté d'accès aux soins dentaires pour les personnes les plus âgées, au-delà de 65 ans. (201)

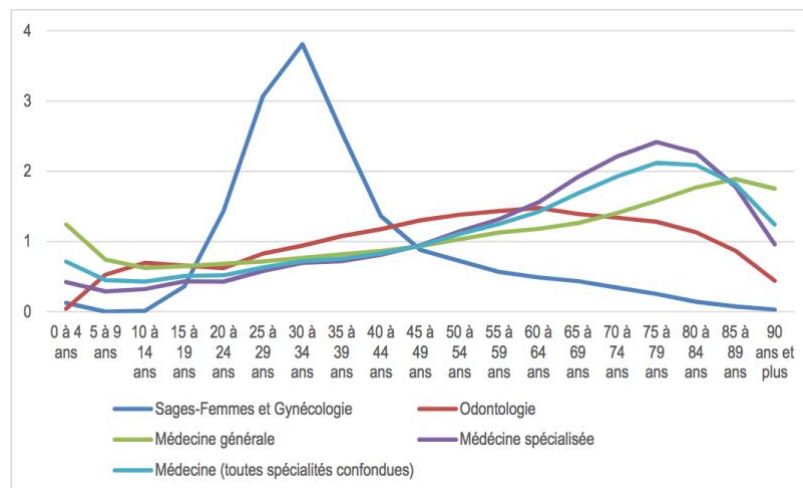


Figure 43. Pondérations issues des consommations de soins relatives par tranche d'âge en 2018

Quand on observe le nombre moyen de patients uniques vus par praticien libéral par département, on remarque que la patientèle des chirurgiens-dentistes est plus importante dans les territoires sous-denses. Le nombre de patients par chirurgien-dentiste et la densité des professionnels sont inversement proportionnels.

Les praticiens qui exercent en région parisienne ou dans le Sud de la France ont une patientèle de 300 à 600 patients. Au contraire, ceux qui exercent dans le Centre et le Nord de la France ont plus de 900 patients. (216)

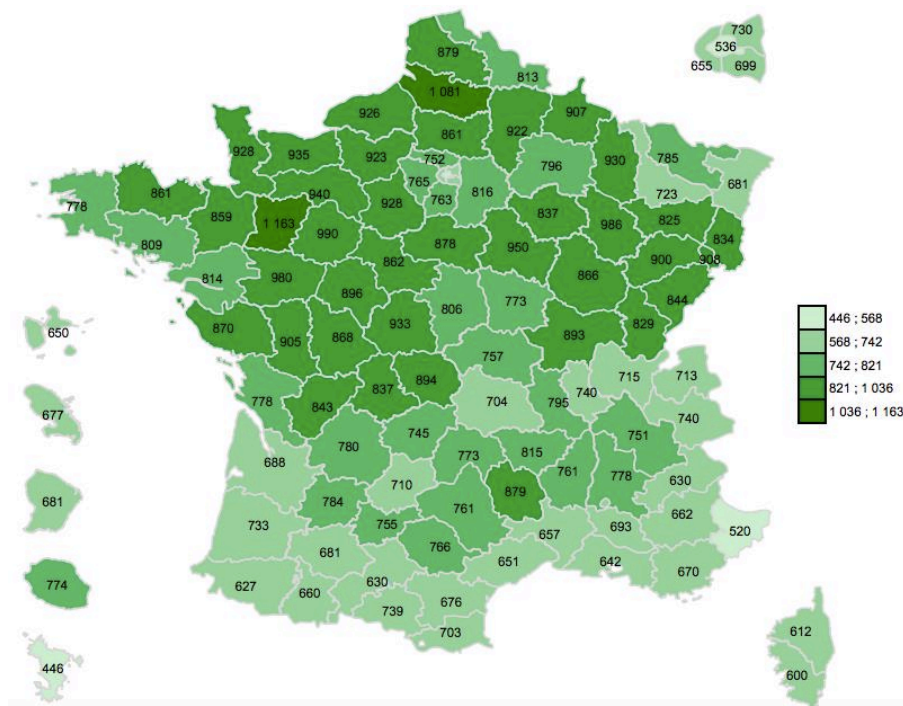


Figure 44. Nombre moyen de patients uniques vus par chirurgien-dentiste libéral par département

Pourtant, la consommation de soins est plus importante dans les territoires sur-dotés. C'est dans les départements les plus denses en chirurgiens-dentistes qu'on observe le plus grand nombre moyen d'actes dentaires par patient.

Ces écarts de consommation de soins dentaires laissent envisager des différences de prise en charge selon les territoires. Néanmoins, il n'est pas possible de savoir précisément si ces risques sont de l'ordre du sous-traitement dans les régions sous-dotées ou du sur-traitement dans les territoires sur-dotés. (162)

Enfin, les délais de prise de rendez-vous pour des soins sont également très disparates selon les régions.

Selon le rapport de la DREES de 2018 (193), il faut en moyenne 1 mois pour obtenir un rendez-vous chez un chirurgien-dentiste. Pour une urgence dentaire, dans la moitié des cas le délai d'attente moyen est de 8 jours. Néanmoins, pour d'autres motifs comme un contrôle périodique, une demande de rendez-vous sur deux dans les zones sous-dotées sera obtenue dans un délai de 21 jours, contre un délai médian de 15 jours pour les zones les plus dotées. D'après une étude d'un site de comparateur de mutuelle paru en 2015, ce délai pouvait même dépasser 2 mois dans les zones très sous-dotées (Manche, Creuse, Nièvre, Orne). Les dentistes arrivaient à la troisième place des spécialités médicales ayant les plus longs délais pour obtenir un rendez-vous. (217)



## **IV. Applications futures de l'IA et nouveaux modes de prise en charge**

### **IV.1. Essor de la télédentisterie**

Depuis l'arrivée des technologies du numériques en santé, la télésanté s'est développée afin de faciliter l'accès au soin pour les populations isolées et réduire les inégalités territoriales. Il s'agit d'une « forme de pratique médicale à distance utilisant les technologies de l'information et de la communication » comme Internet ou les smartphones (218). Elle permet de mettre en relation les professionnels de santé entre eux ou avec un patient. D'abord appliquée à la médecine générale, ce domaine d'activité s'est aujourd'hui étendu à d'autres spécialités, notamment la dentisterie.

En particulier ces dernières années lors de la crise sanitaire liée au Covid-19, avec la fermeture des cabinets, la téléconsultation dentaire est devenue à ce moment la seule alternative au suivi bucco-dentaire des patients. Lors du premier confinement de mars à mai 2020, le Conseil National avait sollicité les praticiens pour la régulation et l'aiguillage des urgences vers les cabinets dentaires de garde. Les praticiens assuraient alors les consultations à distance par téléphone ou par mail afin d'orienter au mieux leurs patients.

La télémédecine en France est réglementée par un décret publié en 2010 (219). La télédentisterie s'est développée en France depuis 2014 avec le projet e-DENT et est considérée comme une application de la télémédecine en dentisterie. Elle englobe plusieurs aspects :

- La téléconsultation, qui permet la consultation à distance depuis le domicile du patient ou d'un EHPAD. Elle peut donner lieu à des hypothèses de diagnostics et la délivrance de prescriptions de médicaments pour soulager le patient, en attendant un rendez-vous en cabinet dentaire. Elle présente un intérêt dans la régulation des urgences, pour déterminer le niveau de l'urgence et orienter le patient vers un cabinet de garde. Elle permet également d'optimiser la planification des rendez-vous et le délai prise en charge des patients, en particulier dans les zones sous-dotées. Enfin, elle présente un intérêt pour les consultations pré-opératoires et le suivi post-opératoire en chirurgie orale ou en parodontologie par exemple.
- La télésurveillance, qui permet le suivi bucco-dentaire des patients à distance. Ce suivi est important pour certains patients en fonction de leur âge, handicap ou état de santé général (maladie systémique en lien avec la santé orale). Il est également nécessaire pour des patients ayant un risque carieux ou parodontal élevé. La télésurveillance permet d'améliorer le suivi de la maintenance parodontale et des traitements orthodontiques, en ayant parfois recours à l'IA, comme évoqué dans les parties I et II de ce travail. La transmission de données est effectuée par le patient ou un professionnel de santé selon le cas.
- La téléexpertise, qui facilite les échanges entre les praticiens et permet d'obtenir à distance l'avis d'un expert sur la pathologie d'un patient. Le chirurgien-dentiste traitant peut se mettre en relation avec le médecin traitant du patient pour adapter son plan de traitement en fonction de ses pathologies, et coordonner le parcours de soin du patient (en cas de maladie chronique par exemple).

Le praticien peut aussi consulter un confrère spécialisé dans un domaine pour choisir les meilleures options thérapeutiques et organiser une prise en charge pluridisciplinaire, faisant par exemple intervenir un spécialiste en endodontie, en implantologie ou en orthodontie. Il peut également avoir recours à un système expert utilisant l'IA pour analyser des images. Cela permet de limiter les déplacements et les délais d'attente pour le patient.

- La téléassistance qui permet à un professionnel médical d'assister à distance un autre praticien au cours de la réalisation d'un acte.

En 2014, un projet de téléconsultation bucco-dentaire a été développé en Languedoc-Roussillon afin d'améliorer la santé orale dans les EHPAD (220). Ce projet, appelé e-DENT, s'appuie sur l'utilisation de la fluorescence comme aide au diagnostic des lésions carieuses et de l'inflammation gingivale. Les résultats ont été très concluants et ce projet s'est étendu depuis.

Dans un premier temps, l'infirmière enregistre une vidéo de la bouche du patient à l'aide d'une caméra intra-buccale, puis rentre dans un logiciel des informations sur l'état de santé général du patient et ses traitements.

Dans un second temps, le chirurgien-dentiste se connecte à distance sur le serveur sécurisé, analyse les vidéos, pose un diagnostic avec un plan de traitement. En fonction de l'état du patient, il propose une prise en charge adaptée à ses besoins. Ces informations sont renvoyées vers l'établissement et rentrées dans le dossier patient informatisé, consultable par l'ensemble de l'équipe soignante.

Ces téléconsultations présentent un gain de temps pour le chirurgien-dentiste, l'analyse de la vidéo étant plus rapide qu'une consultation au fauteuil sur un patient en perte d'autonomie.

Cela permet de prioriser les actes à effectuer, de suivre l'évolution des soins réalisés et les patients ne nécessitant pas de soins économisent des déplacements au cabinet dentaire.

Enfin, grâce à ce dispositif, les infirmières sont également plus attentives au suivi bucco-dentaire des résidents.

Ce projet s'est depuis essoufflé, n'ayant pas trouvé suffisamment d'établissements intéressés notamment à cause de la nécessité d'un matériel spécifique (la caméra intra-orale Soprolife®) demandant une formation du personnel et un investissement important.

Une étude de Queyroux et coll. (221) a évalué la précision de la téléodontologie pour le diagnostic des pathologies dentaires et l'évaluation de l'état des prothèses dentaires des personnes âgées dans des maisons de soins infirmiers en France et en Allemagne. La comparaison a été effectuée par rapport à un examen visuel direct, considéré comme référence. La téléodontologie a montré une excellente précision pour le diagnostic des pathologies dentaires. De plus, les examens par téléodontologie ont été réalisés plus rapidement que les examens visuels directs.

Cette étude a permis de développer le projet « tel-e-dent » dans le département de la Creuse afin de permettre aux résidents en EHPAD d'accéder à un suivi bucco-dentaire. Une infirmière, grâce à un endoscope ORL, recueille les images vidéo de la cavité buccale du patient. Les vidéos sont ensuite transmises à un chirurgien-dentiste référent, ainsi que des informations sur l'état de santé du résident (antécédents médicaux, traitements...) et sur le déroulement de l'examen (douleur, niveau d'hygiène orale, capacité d'ouverture...).

Le chirurgien-dentiste analyse les images et les interprète à distance. Il transmet un rapport au médecin de l'établissement et propose un parcours de soins bucco-dentaires personnalisés (prise de rendez-vous par un chirurgien-dentiste libéral ou prise en charge hospitalière). Ces deux études ont montré que la téléodontologie peut être une réponse à l'isolement des personnes dépendantes en établissement spécialisé.

La téléodontologie bucco-dentaire a également montré un intérêt pour la prise en charge des patients en milieu carcéral. Une étude de 2021 (222) a évalué un protocole de téléodontologie pendant 1 an au centre pénitencier de Villeneuve-lès-Maguelone. L'objectif était de simplifier la consultation dentaire obligatoire lors de la visite d'entrée des nouveaux détenus, en leur proposant un bilan bucco-dentaire par téléodontologie. La méthode de cette étude se rapprochait de celle du projet e-Dent, avec l'utilisation d'une caméra vidéo classique et d'une caméra intra-orale à fluorescence. L'enregistrement buccal était réalisé par un personnel pénitentiaire soignant et transmis à distance par internet au chirurgien-dentiste, ainsi qu'un odontogramme complété par le soignant et un bref questionnaire. Le chirurgien-dentiste analysait ensuite les images, identifie les dents nécessitant un traitement, celles qui sont absentes et établit le score CAOD. Le rapport du praticien est là aussi intégré dans le dossier médical informatisé du patient pour faciliter sa consultation par le reste de l'équipe soignante. Les résultats de cette étude suggèrent que la téléodontologie peut être utilisée comme un outil de dépistage efficace de la santé bucco-dentaire des détenus, et notamment permettre une consultation bucco-dentaire pour tous les nouveaux détenus.

Malgré cette récente mise en lumière du potentiel de la téléodontologie bucco-dentaire, une étude récente de 2022 (223) mettait en évidence que 57% des dentistes ayant répondu au questionnaire n'avaient jamais entendu parler de téléodontologie. Pourtant, la téléconsultation bucco-dentaire représenterait un outil de lutte contre les déserts médicaux selon le président de la République.

La généralisation de la téléodontologie bucco-dentaire permettrait de maintenir le lien avec le cabinet dentaire, notamment pour les patients éloignés (en zone rurale ou en établissement), d'améliorer la qualité de la prise en charge en atténuant les disparités territoriales, et de réduire les coûts de traitements. Elle constitue une réponse au renoncement au soin. Elle permettrait également un meilleur suivi, notamment pour les patients à risques (risque carieux, pathologie lourde...), d'éviter des rendez-vous inutiles et de faciliter la communication entre les praticiens et avec leurs patients. Elle n'a pas pour but de remplacer les soins en fauteuil mais elle en est complémentaire.

Cependant, malgré des efforts de développement de la téléodontologie dans les territoires sous-dotés comme la Creuse, il persiste toujours une forte pénurie de l'offre de soins dans ces zones.

Même si la téléodontologie permet un suivi à distance et plus rapide qu'une consultation au cabinet, elle nécessite une disponibilité du praticien et représente une part de son temps qu'il ne passe pas au fauteuil à réaliser des soins.

Cela soulève donc l'intérêt de développer des technologies utilisant l'IA pour accompagner le chirurgien-dentiste dans ce domaine, afin de faciliter l'analyse des images tout en n'omettant aucune information importante. De plus, les études ont déjà montré la rapidité supérieure de l'IA pour effectuer ces analyses par rapport aux praticiens.

## IV.2. Aide au diagnostic/diagnostic à distance par IA

Plusieurs entreprises ont commencé à développer des logiciels d'IA pour l'aide au diagnostic des praticiens.

**Denti.AI** est une entreprise qui a commercialisé depuis 2017 un logiciel d'IA fournissant un diagnostic automatique après l'analyse des radiographies dentaires (2D ou 3D), ainsi qu'une cartographie automatisée. Il détecte et numérote les dents présentes ou absentes, détecte les implants, restaurations, couronnes, traitements endodontiques et obturations. Le but est d'aider le praticien dans l'interprétation des radiographies pour lui faire gagner du temps au fauteuil, mais aussi d'aider dans l'identification des pathologies (lésions carieuses ou LIPOE). Le praticien reçoit ensuite un rapport détaillé avec une proposition de traitement. (224)

Une étude de novembre 2022 (225) a évalué la précision du logiciel sur la base de 300 radiographies panoramiques, en termes de sensibilité, spécificité, valeur prédictive positive et négative. Les éléments à identifier étaient : restauration métallique, restauration à base de résine, traitement endodontique, couronne et implant. Auparavant, les 300 radiographies ont été évaluées visuellement par deux opérateurs calibrés ayant une expérience dans le radiodiagnostic.

Les résultats ont montré que le logiciel d'IA avait une très bonne performance pour l'identification des implants, des couronnes, des obturations métalliques et des traitements endodontiques. Cependant, il est moins précis pour l'identification des restaurations à base de résine avec une sensibilité de 41%, mais l'erreur de détection était associée à des cas où même les opérateurs avaient du mal à les identifier. De plus, l'algorithme fait parfois la confusion entre un pontique ou une couronne implanto-portée et une dent naturelle. Enfin, il a encore du mal à détecter les dents surnuméraires ou les dents incluses.

**Pearl** est une société qui s'est développée depuis 2019 dans le secteur de l'IA en dentaire et qui propose un logiciel appelé « Second Opinion ». Il détecte automatiquement plusieurs éléments anatomiques et pathologies dentaire sur les radiographies, avec pour objectif de donner un deuxième avis au praticien. L'algorithme peut repérer le tartre, les radio-clartés apicales même naissantes, les lésions carieuses, les défauts de marges des restaurations ou encore quantifier la perte osseuse. Il propose également pour chaque dent une segmentation des restaurations, de l'émail, de la dentine et de la pulpe. (226)

Ils ont réalisé une étude (227) dans laquelle ils ont comparé les performances de détection des lésions carieuses de 3 cliniciens humains ayant de 3 à 10 ans d'expérience avec le logiciel d'IA, sur un total de plus de 10 000 radiographies (péri-apicales et bitewing). Les résultats ont montré que la précision des praticiens augmentait lorsqu'ils analysaient les radiographies à deux, et que la précision du logiciel était supérieure au clinicien seul.

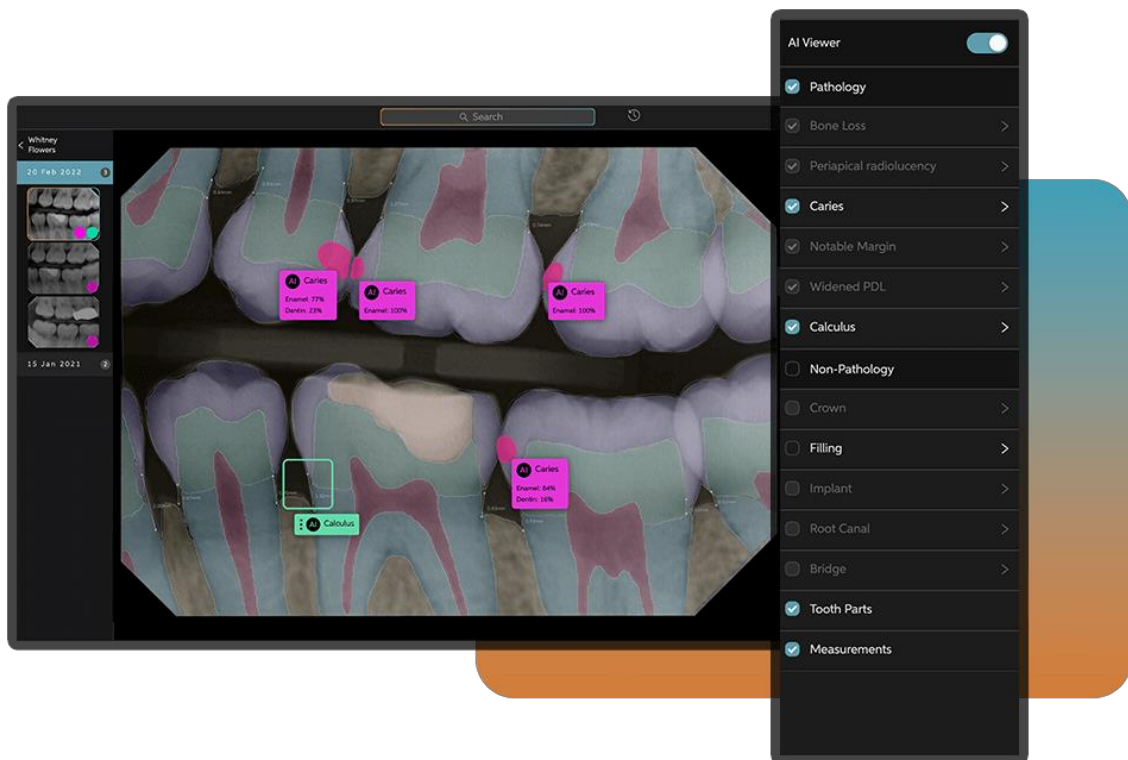


Figure 45. Capture d'écran du logiciel Second Opinion

**Diagnocat** est un logiciel d'IA dont le but est d'éviter les omissions et les erreurs lors de l'analyse des images dentaires. Il est présenté comme un assistant virtuel pour l'analyse des radiographies rétro-alvéolaire, panoramique et CBCT, et d'aide à la décision. Le logiciel met en moyenne 10 secondes pour analyser une radio 2D et 4 à 6 minutes pour un CBCT. *Diagnocat* produit ensuite un rapport qui explique les pathologies détectées et des recommandations de plan de traitement. L'algorithme analyse plus de 30 conditions pour les radiographies et plus de 60 conditions pour les CBCT, comme les lésions carieuses, les défauts de marge, les surplombs, les impactions, les défauts de traitements endodontiques, l'absence de contact interproximal, les pathologies rares, la perte osseuse, etc.

Dans le cas de l'analyse CBCT, le logiciel regroupe automatiquement les coupes transversales qui se rapportent à une même dent et génère automatiquement une vue panoramique reformatée, afin de faciliter la navigation dans le scanner.

Dans le cas de l'analyse de radio rétro-alvéolaires et panoramiques, le logiciel numérote automatiquement les dents et génère un rapport avec le résultat de diagnostic pour chaque dent, avec une mise en évidence de la localisation sur chaque dent.

Le logiciel propose des suggestions de traitements que le praticien peut accepter ou rejeter pour établir son plan de traitement, ajouter des commentaires et compléter le rapport avec des images supplémentaires. (228)

Enfin, le logiciel propose aussi une segmentation automatique des fichiers DICOM en fichier STL pour créer un modèle virtuel en 3D des structures anatomiques du patients (dents, mandibule, maxillaire, canal alvéolaire inférieur, canal incisif, conduit respiratoire).

Plusieurs articles évaluant les performances du logiciel *Diagnocat* ont été publiés, dont certains déjà cités dans ce travail. Une étude de 2021 (229) a évalué la précision de chirurgiens-dentistes assistés par le logiciel en matière de diagnostic par imagerie CBCT.

Lors de la phase de test, 30 scans CBCT ont été analysés par 2 groupes de chirurgiens-dentistes, l'un assisté par le logiciel *Diagnocat* et l'autre non. Les résultats ont montré une différence statistiquement significative entre les 2 groupes, la sensibilité globale du groupe de praticiens assistés par le logiciel étant supérieure à celui du groupe non assisté. Le temps moyen de diagnostic était également plus court d'une minute dans le groupe assisté par *Diagnocat* comparativement à l'autre groupe.

Même si ces logiciels utilisant l'IA n'atteignent pas une précision de 100%, la littérature a insisté sur leur utilité pour les praticiens, car la subjectivité et le doute ont un rôle important dans leur travail quotidien. Le but de l'utilisation de ce type de logiciel est de limiter les biais inhérents à chaque praticien afin d'obtenir un diagnostic le plus fiable possible. En outre, cela permet aussi de réduire le temps nécessaire au diagnostic et à l'analyse de l'imagerie, sans en diminuer l'efficacité.

Ce type de logiciel pourrait permettre de meilleurs soins dans les zones rurales mal desservies. Lorsqu'il est déployé dans des maisons de santé générale, un logiciel de soins dentaire piloté par IA pourrait scanner les radiographies, identifier les anomalies et indiquer aux patients s'ils doivent trouver un dentiste ou un spécialiste. Cela permettrait un gain de chance et un gain de temps pour le patient, et réduire les coût de traitement par la détection précoce de pathologies dentaires.

Au-delà des avancées technologiques que représente l'IA, c'est l'accessibilité des systèmes mis en place qui est intéressant. Les outils d'IA ne nécessitent pas un matériel coûteux pour les patients, seul un smartphone et une connexion internet sont suffisants. Grâce à un interface en ligne, les praticiens peuvent mettre en place une stratégie de soin pour faire gagner du temps au patient, choisir le meilleur protocole de traitement et rester en contact.

### ➤ **L'exemple Aiden**

**Aiden** est une société française qui développe actuellement une solution d'aide au diagnostic. En développant un système d'IA propriétaire, utilisant principalement la computer vision, elle propose d'optimiser le flux patient et ainsi libérer du temps non productif aux dentistes, améliorer la prise en charge et la pédagogie des patients.

**Aiden** part du constat suivant :

- Il existe un différentiel majeur de compétences entre chirurgiens-dentistes, entraînant du bruit dans le diagnostic, la prise de décision et la mise en œuvre des traitements.
- Le temps de consultation et contrôle des cabinets dentaires représente environ 25% du temps de cabinets, pour seulement 1 à 4% des revenus.
- La délivrance d'une pédagogie adaptée pour établir une prophylaxie sur mesure et obtenir l'adhésion du patient au traitement n'est que peu réalisée en cabinet d'omnipraticque.

Le flux proposé permet de mieux qualifier le patient en amont du rendez-vous, de délivrer un compte rendu automatique en fin de consultation suite aux examens complémentaires et de conseiller le patient pour un meilleur suivi.

**Aiden** s'est proposée de tester sa proposition de valeur dans le département des Hautes-Alpes (05).

Les Hautes Alpes connaissent actuellement une pénurie de chirurgiens-dentistes : c'est le département le moins doté de la région PACA.

Le temps d'attente moyen pour un nouveau rendez-vous est d'environ 3 mois et la majorité des praticiens ne reçoivent plus de nouveaux patients.

Sans compter les difficultés propres à ce territoire montagneux, souvent enneigé et qui rend donc les déplacements difficiles.

Le Conseil National de la refondation en santé a permis l'identification de propositions d'actions concrètes propres aux spécificités de chaque territoire. L'ARS PACA s'est engagée à accompagner le déploiement de ces projets sur l'ensemble de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *Aiden* fait partie des propositions retenues par l'ARS.

L'apport de cette solution numérique sur le territoire des Hautes-Alpes permettrait de :

- Bénéficier d'un diagnostic dentaire avant le déplacement des patients en cabinet
- Prendre en charge des patients qui vivent dans des zones difficiles d'accès aux soins
- Répondre aux demandes de soins non programmés

Nous proposons ici de voir un aperçu du flux de travail d'*Aiden* et de déterminer les moyens permettant d'évaluer sa capacité à répondre aux problématiques soulevées.

L'une des difficultés majeures identifiée par les cabinets de la région est la capacité de réponse du secrétariat. Certains cabinets reçoivent plus de 200 appels par jour, les lignes sont donc rapidement saturées, surtout si la secrétaire prend le temps de qualifier la demande du patient (urgence, demande spécifique, bilan...).

Avec *Aiden*, toute entrée patient sur la plateforme commence avec l'inscription du patient.

Celle-ci peut être gérée par le secrétariat, soit idéalement sur le site pour libérer le temps d'accueil téléphonique (le secrétariat transmet juste à l'oral le lien du site), soit directement par le patient si le cabinet dentaire affiche le lien d'inscription sur son site.

Choisir un patient

Sélection patient | Création nouveau patient

⚠ Veuillez être certain de l'adresse email, sans quoi le formulaire médical ne pourra pas être envoyé.  
Le patient reconfirmera son nom et prénom via ce formulaire.

Nom \*

Prénom \*

Email \*

Établissement rattaché \*

Selari Place General Dosse Sv (Embrun)

Selari Sebban et Vartanyan Co (Marseille)

Annuler | Créer le patient et le cas

Figure 46. Vue de l'inscription sur un tablette

En premier lieu, le patient est prié de remplir un questionnaire pour mieux appréhender sa demande et renseigner le dentiste sur son état de santé. Tout peut se faire sur smartphone, sur tablette ou ordinateur.

Le questionnaire s'adapte au fur et à mesure de la progression pour une meilleure expérience patient et un remplissage plus rapide et plus juste. Les questions sont reformulées en fonction de la demande, de l'âge, des pathologies déclarées...

Des champs libres, textes ou vocaux, sont également proposés afin d'améliorer la compréhension de la demande patient. Une reformulation par la plateforme permet de catégoriser la demande.

The screenshot shows a mobile application interface for a patient portal. At the top, the status bar displays the time 18:45, 5G signal strength, and battery level. The app header is dark blue with a hamburger menu icon, the text 'Aiden Portail Patient', and a 'TT' icon. Below the header, the text 'consultation décembre 2022 /' is visible. The main heading is 'Formulaire médical' in large, bold, black font. To the right of this heading, it says 'Etablissement dentaire Selarl Place General Dosse Sv'. Below the heading, there is a blue pill-shaped button that says 'En cours de complétion' followed by the text 'Vous êtes en train de compléter le formulaire.'. A horizontal line separates this section from the next. Below the line, there are three radio button options: 'Consultation' (which is selected), 'Santé générale', and 'Santé bucco-dentaire'. Another horizontal line follows. Below this, the heading 'Consultation' is underlined. Underneath, the heading 'Contexte' is also underlined. Below 'Contexte', the text 'Motif de votre consultation dentaire' is followed by a list of radio button options: 'Urgence', 'Bilan', 'Contrôle / Détartrage', 'Esthétique', 'Implant', 'Orthodontie', 'Suivi post-opératoire', and 'Autre'. At the bottom of the screen, a footer bar shows the URL 'staging.aiden.ovh' and the text '— Privée'.

Figure 47. Vue du questionnaire sur smartphone

Vient ensuite la prise de clichés photographiques. À l'aide de son smartphone, le patient peut prendre lui-même ses photos (face à un miroir ou en mode selfie), ou aider un proche à en prendre. Le protocole comprend 7 prises de vue. En fonction de la situation, l'application peut demander une photo particulière (par exemple une photo de la couronne en cas de descellement).

Le patient peut également charger des radiographies s'il en possède.



Formulaire médical En cours de complétion Email ouvert

Voir les réponses partielles 👁 Copier le lien du formulaire 📄

Informations patient Afficher ▾

Fichiers

Ajoutez les fichiers à analyser (cliquez ou déposez)  
 .jpg / .jpeg / .png / .bmp / .heic / .pdf / .docx / .stl  
 catégorisés automatiquement entre radio, photo, stl, ou document

**Radios**

Panoramique Rétro-alvéolaire

Patient 1 Aiden.jpg

**Photos**

0B96D83C-DB59-...  
 0A040BAF-1837-4...  
 BFC818A9-8418-4...  
 1.png  
 4.png  
 5.png  
 2.png  
 3.png

Figure 48. Vue générale côté dentiste

3.png

Manual Grouping Ordered by Time ↑

- 3 Débris radiculaire
- 3 Couronne céramo-métallique ou zirconie stratifiée
- 3 Couronne céramo-métallique ou zirconie stratifiée
- 3 Couronne céramo-métallique ou zirconie stratifiée
- 3 Couronne céramo-métallique ou zirconie stratifiée
- 3 Composite

Patient 1 Aiden.jpg

Analyse effectuée

Figure 49. Détails de l'analyse par l'IA

À partir de ces renseignements, l'application émet un rapport avec des suggestions au chirurgien-dentiste. Elle peut soumettre une demande d'examen complémentaire (radio panoramique, rétro-alvéolaire, test de sensibilité pulpaire ...) afin de mieux qualifier la demande.

Une fois validée par le praticien, le patient est informé du pré-diagnostic et peut être renseigné sur les prises en charges possibles pour mieux le préparer à son rendez-vous.

Côté praticien, celui-ci peut anticiper le premier rendez-vous patient en optimisant ce dernier (gestion du planning, temps estimé, plateau technique, rendez-vous préalable pour l'administratif...)

Si le dossier comprend une radiographie panoramique ou un bilan radiographique complet, l'application émettra un rapport comme suit :

1. Diagnostic

11	- Inlay core - Couronne solidarisées - Traitement endodontique correct - Lésion endodontique intermédiaire
12	- Dent absente
13	- Dent absente
14	- Dent absente
15	- Dent absente
16	- Dent absente
17	- Dent absente
18	- Dent absente
21	- Inlay core - Couronne solidarisées - Traitement endodontique correct
22	- Inlay core - Couronne solidarisées - Traitement endodontique incomplet - Lésion endodontique intermédiaire - Paro intermédiaire
23	- Inlay core - Couronne solidarisées - Traitement endodontique correct - Paro intermédiaire
24	- Inlay core - Couronne solidarisées - Traitement endodontique incomplet
25	- Carie intermédiaire
26	- Lésion endodontique débutante - Amalgame inadapté - Paro intermédiaire
27	- Dent absente
28	- Dent absente

### Examens complémentaires

26	❄️ Test au froid	Négatif	
26	🔍 Sondage	7	
25	❄️ Test au froid	Positif	

[Ajouter un examen +](#)

Figure 50. Rapport automatique à partir des photos et radiographies

En fonction de la situation, la plateforme peut faire des suggestions d'actes ou d'examen complémentaire à envisager dès le premier rendez-vous physique du patient au cabinet.

En regroupant certains actes lors de ce rendez-vous, en présence d'un patient déjà informé de sa pathologie et des procédures dont il va bénéficier, en préparant en amont la prise en charge administrative des soins envisagés, le gain de temps semble significatif.

Afin d'évaluer le gain de temps par praticien et l'augmentation de la capacité d'accueil patient, nous proposons de mesurer 10 paramètres facilement recueillables sur les logiciels métiers (Logos, Visident, etc.) :

- 1- Nombre de nouveaux patients reçu par praticien avec et sans plateforme
- 2- Nombre de patients pré-diagnostiqués total
- 3- Nombre de patients pré-diagnostiqués lors des jours de garde et orientés avec ou sans plateforme, et temps téléphone moyen du service d'accueil de l'ordre du 05.
- 4- Nombre de plans de traitements globaux acceptés avec et sans plateforme par praticien

- 5- Temps moyen par traitement avec ou sans plateforme (à mettre en rapport avec le nombre de dents traitées)
- 6- Nombre de rendez-vous patients moyen avec ou sans plateforme
- 7- Nombre de rendez-vous patients physiques uniquement consultation ou contrôle avec ou sans plateforme
- 8- Nombre d'appels reçus par le secrétariat avec ou sans plateforme + temps moyen de l'appel
- 9- Concordance entre pré-diagnostic et examen clinique
- 10- Taux de compliance des patients à cette nouvelle approche (en fonction de la distance géographique du cabinet, âge, mobilité, ...)

Ce travail débutera au 3<sup>ème</sup> trimestre 2023 et durera un an pour évaluer la pertinence de la solution.

En plus des mesures concrètes permettant de quantifier la valeur d'Aiden, elle permettra également de faire un point sur l'état de santé de la population des Hautes-Alpes et mieux cerner les besoins de cette population.

### **IV.3. Coordonner les installations et nouveaux modes d'exercice**

#### **IV.3.1. Mesures de prises en charge face aux nouveaux modes d'installation**

Pour améliorer l'accès au soin des patients dans les zones sous-dotés, il existerait plusieurs solutions : faciliter la mobilité des populations ou bien inciter les professionnels à s'installer dans ces territoires.

Face au contexte socio-économique actuel, il semble difficile de mettre en place des mesures pour inciter les populations à se déplacer pour aller jusqu'aux centres de soins médicaux, en particulier dans les zones qui sont délaissées par les services publics. De plus, face à la distance à parcourir ou le temps d'attente pour un rendez-vous, les patients délaissent le suivi bucco-dentaire et cherchent plus souvent à voir un chirurgien-dentiste dans des cas d'urgence.

C'est pourquoi des mesures incitatives ont pu être mises en place par le gouvernement afin de rendre les zones sous-dotées plus attractives pour les jeunes chirurgiens-dentistes. En effet, il a été démontré que les praticiens étaient peu enclins à changer leur lieu d'exercice une fois installés, d'autant plus que la durée de cette installation est élevée. Ainsi, l'objectif serait d'amener les jeunes praticiens sortant des facultés à s'installer plus favorablement dans des territoires peu denses. Hormis la création de nouvelles facultés dans ces régions, des aides à l'installation se sont développées. Par exemple, les collectivités territoriales ont pu développer des dispositifs de prise en charge des frais de fonctionnement ou d'investissement de l'activité de soins, la mise disposition de locaux pour développer une activité de soin, d'un logement de fonction ou une prime lors de l'installation. (162)

Cependant, l'impact réel de ces aides financières et logistique n'a pas encore pu être réellement évalué, et paraît plutôt faible.

De plus, comme nous l'avons évoqué, les praticiens ont maintenant tendance à se regrouper à plusieurs sur un même site plutôt que de se répartir dans la région. Ainsi, même si la densité augmente, l'accès au chirurgien-dentiste n'est pas forcément amélioré, certaines populations

restant toujours trop à distance des cabinets qui seraient inégalement répartis dans une vaste région faiblement dotée.

Un autre dispositif d'incitation est le Contrat d'Engagement de Service Public (CESP) mis en place depuis 2013 en odontologie. Ce contrat permet aux étudiants qui le demandent de recevoir une allocation mensuelle pendant une période de 2 ans minimum voire jusqu'à la fin de leurs études. En contrepartie, les étudiants s'engagent à s'installer au commencement de leur exercice dans une des zones sous-dotées proposées par l'ARS, pendant une durée équivalente à celle du versement de leur allocation. Cet outil ne montre pas non plus un fort impact en termes d'installation dans ces zones.

Une des dernières pistes pour améliorer la répartition des chirurgiens-dentistes serait de mettre en place une régulation dans les zones les plus denses pour y limiter l'installation.

Enfin, la profession fait face à une tendance des jeunes praticiens à la sur-spécialisation. Ainsi, certains chirurgiens-dentistes se tournent vers un exercice exclusif dans une spécialité assez rapidement après la fin de leurs études, en endodontie ou en parodontologie par exemple. Même si ces spécialités ont leur importance pour certains cas, les patients dans les zones sous-dotées nécessitent quand même une prise en charge globale de leur cavité buccale, et un praticien pour organiser leur parcours de soins. De plus, ces praticiens spécialistes réalisent souvent des dépassements d'honoraires ce qui les incite à s'installer plutôt dans les zones avec des patients à plus fort pouvoir d'achat, donc déjà denses en chirurgiens-dentistes.

Face à cette tendance à la spécialisation et à une répartition encore plus inégale des spécialistes, l'utilisation de l'IA pourrait avoir un double enjeu. Tout d'abord, pour l'omnipraticien avec peu d'expérience, elle pourrait lui permettre d'avoir un avis spécialisé à distance sur le cas de certains patients grâce aux systèmes experts, et la nécessité ou non de l'adresser à un spécialiste.

Pour la gestion de cas de patients compliqués, faisant intervenir plusieurs spécialités (orthodontie, endodontie, ...), l'IA permettrait de coordonner les rendez-vous et d'organiser le parcours du patient entre les différents praticiens, afin d'optimiser chaque séance de soin et la durée globale du traitement.

### **IV.3.2. Nouveau rôle des assistants dentaires**

Depuis le 19 janvier 2023, l'Assemblée Nationale a adopté la proposition de loi permettant la création de la profession d'assistant en médecine bucco-dentaire ou assistante dentaire de niveau 2. Le texte précise que l'assistant dentaire qualifié pourra dorénavant participer aux actes d'imagerie à visée diagnostique, aux actes prophylactiques, aux actes orthodontiques et à des soins post-chirurgicaux. (230)

Ainsi, leur fonction ne sera plus seulement d'assister le chirurgien-dentiste mais également d'accompagner le patient et de participer à certaines étapes de sa prise charge.

L'utilisation d'outils d'IA pourrait les accompagner dans l'analyse des actes d'imagerie, qui seront ensuite contrôlée par le chirurgien-dentiste.

Les assistants dentaires n'ayant pas l'expérience du chirurgien-dentiste, l'IA pourrait également les assister pour le suivi bucco-dentaire et la prévention, par la détection précoce de pathologies bucco-dentaire lors des actes de prophylaxie par exemple.

Enfin, dans les établissements recevant des patients handicapés ou dépendants, ils seraient plus à même d'assurer la prévention chez les patients et la prise correcte d'informations sur l'état bucco-dentaire afin de les transmettre à un logiciel d'analyse à distance.

#### **IV.4. Aspect éthique et garantie humaine de l'IA**

Quand on parle de l'IA, on a tendance à avoir la vision d'une machine autonome, qui fonctionne sans l'intervention ou le contrôle d'un être humain. Pourtant, que ce soit lors de l'apprentissage ou de la mise en fonction des logiciels d'IA, l'être humain est toujours derrière pour valider les résultats et prendre les décisions finales.

Comme nous l'avons vu, le principe d'apprentissage de l'IA se base sur une grande quantité de données, qui doivent être nombreuses, variées et correctement annotées pour développer un système efficace.

L'avènement des technologies numériques et de l'IA a donc posé la question de la gestion du flux de données, en particulier dans le secteur médical. La circulation des données de santé des patients doit être surveillée par la mise en place d'un cadre réglementaire adapté, afin de maintenir le secret médical sans pour autant freiner l'innovation. En effet, selon l'avis 129 du Comité Consultatif National d'Éthique (CCNE), il serait non éthique de faire barrage au développement des nouvelles technologies d'IA. (231) En effet, se fermer à l'IA pourrait entraîner des pertes de chance pour les patients, et la crise du Covid-19 a renforcé l'intérêt de ces outils numériques dans la santé, même conçus hors de nos frontières.

Face à l'essor des dispositifs médicaux utilisant l'IA, plusieurs mesures ont été mises en place en Europe afin d'assurer un contrôle du flux de données et définir les principales règles éthiques et juridiques pour l'utilisation de l'IA dans le domaine de la santé.

En 2016, le Parlement européen a mis en place le règlement général sur la protection des données (RGPD). Ce règlement a permis la mise en place d'un cadre juridique au niveau européen, pour renforcer le droit sur la protection des données à caractère personnel et pour responsabiliser les acteurs traitant ces données. Ce règlement concerne toutes les données numériques, que ce soient des données de notre vie professionnelle ou de notre santé, et il n'est pas spécifique à l'IA. (232)

En 2017, la Commission Nationale Informatique et Libertés (CNIL) a publié un rapport sur les enjeux éthiques des algorithmes. Ce rapport met en évidence des risques éthiques associés à l'IA : le risque de délégation de décision du professionnel de santé, le risque de délégation du consentement du patient et le risque de survalorisation de la prise en compte du collectif par rapport à la spécificité de l'individu.

Ainsi, selon une concertation citoyenne citée dans ce rapport, les citoyens seraient préoccupés par la « perte de compétence » éventuelle des médecins qui se reposeraient uniquement sur l'algorithme, mais aussi la « perte du sentiment d'humanité » et sur la difficulté de « gérer les exceptions » par la machine.

La CNIL rappelle que les résultats produits par les algorithmes ne doivent pas être considérés comme des vérités absolues et toujours être évalués par l'humain.

La prise de décision finale doit toujours rester aux mains de l'humain. La CNIL souhaite élaborer une gestion éthique française de l'IA. (233)

En 2018, après concertation avec des experts du milieu et une audition publique, Cédric Villani a publié un rapport proposant des pistes pour mettre la France en avant-garde de l'IA en Europe. Parmi les grandes lignes de ce rapport, il insistait sur la nécessité de concentrer les efforts de développement de l'IA dans 4 domaines en priorité, dont la santé. Il précisait aussi la nécessité d'intégrer des considérations éthiques à toutes les phases, de la conception à l'impact des logiciels d'IA dans la société. (18)

Depuis, une nouvelle loi relative à la bioéthique a été mise en place en août 2021. Dans l'article 17, cette loi introduit l'obligation d'information de la part du professionnel de santé utilisant une IA. Ainsi, « le professionnel de santé qui décide d'utiliser pour un acte de prévention, de diagnostic ou de soin, un dispositif médical comportant un traitement de données algorithmiques dont l'apprentissage a été réalisé à partir de données massives s'assure que la personne concernée en a été informée et qu'elle est, le cas échéant, avertie de l'interprétation qui en résulte ». Nous avons donc un devoir d'information particulier du patient, mais il n'existe pas encore de consentement spécifique à l'utilisation de l'IA. Cette loi précise également le droit du patient à accéder à ses données utilisées dans ce cas et aux résultats qui sont issus de leur traitement.

Enfin, elle insiste sur la supervision humaine opérationnelle et sur la nécessité pour les concepteurs des systèmes d'IA de s'assurer de l'explicabilité de leur fonctionnement pour les utilisateurs. (234)

L'explicabilité représente la caractéristique d'un système d'IA permettant à un utilisateur de reconstruire le cheminement logique de l'IA, en expliquant pourquoi et comment le système est parvenu à tel ou tel résultats en sortie. En effet, avec l'apprentissage profond et les milliers de couches de neurones, on peut retrouver un effet de « boîte noire » qui signifie qu'on ne sait pas exactement comment le système obtient cette prédiction. Ce manque d'explicabilité est notamment critiqué dans le domaine médical, qui nécessite un très haut niveau de preuve. (235)

Depuis 2017, David Gruson a développé en lien avec l'UFSBD un projet de régulation positive du développement de l'IA et de la robotisation en santé, et en particulier dans le domaine bucco-dentaire. Ce projet, baptisé Ethik-IA, a mis en avant le principe de primauté de l'humain et proposé un principe de label de « garantie humaine » de l'IA, qui a ensuite été repris par le CCNE et l'article 17 de la loi bioéthique.

Cette garantie humaine de l'IA est assise sur la conformité du RGPD et sur les règles de protection du secret médical. (236) Il est nécessaire de maintenir l'IA à son rôle d'instrument au service de la prise en charge des patients sous la responsabilité des professionnels. L'objectif n'est pas d'avoir une personne qui supervise constamment la machine mais un contrôle au niveau de points de supervision critiques selon les experts. (237)

C'est le projet de l'article 14 du futur règlement européen sur l'IA. Les solutions d'IA doivent être conçues et développées de façon à pouvoir être supervisée par des humains, afin de minimiser les risques pour la santé, la sécurité ou les droits fondamentaux pouvant émerger d'un système d'IA susceptible de présenter un niveau de risque élevé. La garantie humaine doit être identifiée et construite par le fournisseur avant la mise sur le marché ou identifiée par le fournisseur et pouvant être mise en œuvre par l'utilisateur. (238)

Rappelons d'ailleurs que selon le droit européen, les dispositifs médicaux utilisant une IA doivent obtenir un marquage CE. La garantie humaine ferait alors partie des critères facilitant

l'obtention du marquage CE, ce marquage devant être régulièrement actualisé dans le cas des systèmes utilisant l'apprentissage machine et profond.

Lors d'une conférence au congrès de l'Association Dentaire Française en novembre 2022, David Gruson mettait déjà en avant la nécessité d'étendre la recherche sur l'IA au sein de l'Union Européenne afin de développer des logiciels répondant aux normes européennes sur la protection des données, plutôt que devoir utiliser des logiciels étrangers n'ayant pas le même niveau d'exigence. Quand un chirurgien-dentiste utilisera un système d'IA à son cabinet, il pourra être exigible qu'il puisse se référer à des méthodologies de garantie humaine effective.

Par conséquent, l'AI Act, une proposition de loi européenne similaire au RGPD mais spécifique au domaine de l'IA, est en cours d'évaluation et devrait être adoptée d'ici quelques mois. L'objectif est de définir un cadre juridique pour la conception et l'utilisation de logiciels d'IA, avec les éventuelles sanctions en cas de non-respect. Cette loi fait une distinction entre les systèmes d'IA. Ceux qui présentent un risque inacceptable (comme les scores sociaux en Chine) seront interdits. Ceux qui présentent un haut risque seront soumis à des exigences légales spécifiques, ce qui sera sûrement le cas des logiciels utilisés dans le domaine médical en raison du traitement de données sensibles. Enfin, les systèmes qui ne sont pas interdits ni répertoriés comme étant à haut risque ne devraient pas être réglementés mais nécessiteront seulement un principe d'information de l'utilisateur. (238–240)

Ce cadre réglementaire permettrait notamment de diriger la responsabilité dans le cadre de la prise de décision. Cependant, il faudra éviter de sur-réglementer pour ne pas freiner l'innovation.

Enfin, une récente étude de 2021 mettait en avant l'importance pour les futurs chirurgiens-dentistes de recevoir une formation académique claire sur les impacts éthiques et sociaux des technologies de l'IA. Elle relevait aussi la nécessité pour les auteurs de revues scientifiques de partager leurs points de vue sur les défis éthiques qu'ils auraient rencontrés lors du développement d'un algorithme. (240)

## V. Conclusion

Dans les prochaines années, plusieurs applications concrètes en matière d'IA deviendront d'usage courant. En santé, les enjeux sont importants avec notamment la protection et la sécurité des données médicales sensibles qui nécessitent la mise en place d'un cadre juridique précis. De plus, certains régulateurs, gouvernants et citoyens, émettent des inquiétudes face au transfert de décision à des systèmes informatiques.

Pourtant, le recours à l'IA en santé a fait ses preuves : pour exemple l'analyse d'imagerie en médecine et particulièrement la détection précoce des cancers, avec un réel bénéfice pour les patients.

La médecine dentaire est un domaine où l'expression des potentialités de l'IA en est à ses balbutiements. L'usage en odontologie n'a que peu de recul, mais il se démocratise rapidement. Les praticiens ont constaté que la capacité d'apprentissage automatique des logiciels leur permet de rester constamment à jour. L'association IA/praticien améliore la qualité des diagnostics et limite les pertes de chances, fait gagner du temps et améliore la rentabilité des structures de soins dentaires. Enfin, elle permet la mise en place d'une médecine personnalisée dans la planification et le suivi du traitement.

Les projections de répartition démographique des chirurgiens-dentistes pour les années à venir ne laissent prévoir qu'une faible amélioration de la situation pour les zones sous-dotées. L'IA pourrait être un élément de réponse au déficit d'accès au soin des populations dans ces zones.

Notamment, avec l'augmentation du vieillissement de la population et la nécessité d'améliorer le suivi bucco-dentaire de cette catégorie de patients, elle représenterait un outil essentiel de prévention et de dépistage. La facilité d'utilisation et la portabilité de ces systèmes d'IA permettrait d'apporter un suivi bucco-dentaire au plus grand nombre, en particulier pour les populations vulnérables et isolées. Reste à mesurer l'efficacité de son usage à cette problématique spécifique, ce que certaines entreprises françaises entreprennent en 2023.

Il devient donc urgent pour les chirurgiens-dentistes d'être formés à l'utilisation de ces outils numériques d'assistance et de comprendre leurs limites. Nos gouvernants, que ce soit à l'échelle nationale, européenne ou mondiale, ont pour responsabilité de réglementer ce nouveau marché afin de n'autoriser sur le marché que les systèmes qui, dans la conception et la mise en œuvre, respectent l'éthique et la déontologie des professions de santé. Nous nous devons de conserver la priorisation des droits humains face à la course au progrès.



## VI. Annexes

### Table des figures

Figure 1.	Exemple de clustering utilisant l'algorithme des K-moyennes (29).....	9
Figure 2.	Illustration du phénomène de sous/surajustement sur un exemple de simple régression linéaire (24) .....	10
Figure 3.	Analogie entre un neurone biologique et un neurone artificiel (33).....	11
Figure 4.	Exemples de fonctions d'activation d'un neurone artificiel (32) .....	11
Figure 5.	A. RNA à une couche cachée B. Détail d'un nœud du réseau neuronal (33).....	12
Figure 6.	Schéma du processus de convolution. (37) Dans cet exemple, le filtre appliqué à la matrice de pixel permet d'obtenir la somme des produits scalaires suivant : $\Sigma = 1x1 + 2x0 + 3x1 + 4x0 + 5x1 + 1x6 + 7x1 + 8x0 + 9x1 = 31$ .....	14
Figure 7.	Organisation schématique d'un réseau de neurones convolutifs (36) .....	15
Figure 8.	Les tâches les plus courantes dans le domaine de la reconnaissance d'image (42,43) .....	16
Figure 9.	Exemple de détection de la plaque dentaire à l'aide du modèle d'IA. a. photo originale prise par caméra intra-orale b. résultat de la détection et du marquage de la plaque dentaire par le modèle (en jaune) c. photo originale prise par un appareil photo numérique d. annotation de la plaque par le pédodontiste .....	20
Figure 10.	Capture d'écran de l'application Oral-B après un brossage avec la brosse à dent iO9 .....	21
Figure 11.	Section de la densité minérale osseuse et sa cartographie d'identification. De gauche à droite, image CBCT originale, labellisation par l'expert, cartographie par le modèle d'IA (84) .....	26
Figure 12.	Photographie du robot Yomi® (87) .....	27
Figure 13.	Image per-opératoire de la chirurgie et de l'ostéotomie autonome.....	28
Figure 14.	Exemple de tracé céphalométrique automatique par le logiciel Ceph-X®(99).....	29
Figure 15.	Réalisation d'un balayage vidéo endobuccal à l'aide d'un smartphone et du dispositif ScanBox® fournit par le fabricant (107) .....	30
Figure 16.	Exemples de radiographies correctement annotées par le logiciel.....	31
Figure 17.	Exemple d'analyse d'une radiographie panoramique par le logiciel.....	32
Figure 18.	Capture d'écran du logiciel après analyse.....	32
Figure 19.	Exemple de détection du modèle de CNN (en orange) par rapport à la réponse attendue en (vert), avec la présence de faux négatifs sur d, e, f.....	34
Figure 20.	Capture d'écran du logiciel Overjet après analyse.....	35
Figure 21.	Exemple de segmentation lors de la phase de test : à gauche les prédictions du modèle et la référence montrent des divergences, à droite on retrouve une bonne concordance entre les prédictions du modèle et la segmentation de référence .....	36

Figure 22.	Exemples de détections des lésions carieuses par bounding box .....	37
Figure 23.	A. Radiographie panoramique originale B. Segmentation manuelle des lésions. C. Segmentation automatique des lésions générées par le réseau U-Net (on remarque une erreur de détection au niveau de la racine mésiale de 37) .....	37
Figure 24.	Résultats de la détection du niveau de l'os alvéolaire (rouge), du niveau de la jonction amélo-cémentaire JAC (jaune), des dents et implants (vert) .....	39
Figure 25.	Orientation des axes des dents et implants (a à d), point d'intersection de l'axe de la dent avec le niveau de l'os alvéolaire et de la JEC, et pourcentage de perte osseuse radiographique (f à g), stade de parodontite par dent et par implant (k à n). Les stades sont écrits en blanc si correctement classées et en orange si incorrectement classés.....	40
Figure 26.	Exemple de résultats obtenus avec l'utilisation de l'algorithme. ....	41
Figure 27.	Exemple de résultats de détection sur les données test : dépôt de plaque identifié par carte thermique, tarte et gingivite par boîte englobante (respectivement bleue et verte) .....	42
Figure 28.	Aperçu de la segmentation des M3 et du NAI. Vert : segmentation manuelle. Rouge : segmentation automatique. Jaune : superposition des 2 segmentations. ....	43
Figure 29.	Visualisation de la base de jugement pour la prédiction de la classification par le CNN à l'aide de Grad-CAM .....	43
Figure 30.	Exemples de détection et diagnostic correct de l'algorithme. A. Sinus maxillaires enflammés (bleu). B. Kératokyste odontogène correctement détecté et diagnostiqué comme kyste dans le sinus droit (vert) et sinus maxillaire gauche sain (rouge) .....	44
Figure 31.	A. Kératokyste correctement détecté et classé par YOLO alors qu'1/3 des cliniciens ne l'ont pas détecté B. Kyste dentigère correctement détecté et classé par YOLO alors que 2/3 des cliniciens de l'ont pas détecté.....	45
Figure 32.	Exemple de la caméra développée par l'équipe de chercheurs et adaptée sur smartphone Android .....	46
Figure 33.	Exemple d'images intra-orale et des prédictions approximatives du réseau Bayésien avec son pourcentage d'incertitude .....	47
Figure 34.	Exemple d'acquisition de donnée montrant bien la lésion au centre de la région d'intérêt.....	47
Figure 35.	Résultats de la détection de lésion par YOLOv51 sur l'ensemble de données test .....	48
Figure 36.	Etiquettes et probabilité de la prédiction sur les données test par le modèle EfficientNet-b4 .....	48
Figure 37.	Pyramide des âges en 2022 en France et projection pour 2052 (160) .....	49
Figure 38.	Répartition française de la part des personnes âgées de 60 ans et plus par département (164) .....	50
Figure 39.	Niveau de vie annuel médian par établissements publics de coopération intercommunale en 2017 .....	51

Figure 40. Répartition par département des chirurgiens-dentistes pour 100 00 habitants et localisation des 16 UFR (dont 2 à Paris) (200).....	61
Figure 41. Pyramides des âges des chirurgiens-dentistes de 2013 à 2021 (162) .....	62
Figure 42. Répartition par région de la part de chirurgiens-dentistes de 65 ans et + (200)..	62
Figure 43. Pondérations issues des consommations de soins relatives par tranche d'âge en 2018.....	66
Figure 44. Nombre moyen de patients uniques vus par chirurgien-dentiste libéral par département .....	67
Figure 45. Capture d'écran du logiciel Second Opinion .....	72
Figure 46. Vue de l'inscription sur un tablette.....	74
Figure 47. Vue du questionnaire sur smartphone .....	75
Figure 48. Vue générale côté dentiste .....	76
Figure 49. Détails de l'analyse par l'IA .....	76
Figure 50. Rapport automatique à partir des photos et radiographies.....	77

## VII. Bibliographie

1. L'IA, c'est quoi ? [Internet]. Intelligence artificielle. [cité 17 juill 2022]. Disponible sur: <https://www.coe.int/fr/web/artificial-intelligence/what-is-ai>
2. Intelligence artificielle : définition et utilisation | Actualité | Parlement européen [Internet]. 2020 [cité 17 juill 2022]. Disponible sur: <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20200827STO85804/intelligence-artificielle-definition-et-utilisation>
3. Bates M. Models of natural language understanding. Proc Natl Acad Sci U S A. 24 oct 1995;92(22):9977-82.
4. Yim W wai, Yetisgen M, Harris WP, Kwan SW. Natural Language Processing in Oncology: A Review. JAMA Oncology. 1 juin 2016;2(6):797-804.
5. ChatGPT: Optimizing Language Models for Dialogue [Internet]. OpenAI. 2022 [cité 1 févr 2023]. Disponible sur: <https://openai.com/blog/chatgpt/>
6. Deshpande G, Batliner A, Schuller BW. AI-Based human audio processing for COVID-19: A comprehensive overview. Pattern Recognition. 1 févr 2022;122:108289.
7. Leo Kumar S p. Knowledge-based expert system in manufacturing planning: state-of-the-art review. International Journal of Production Research. août 2019;57(15/16):4766-90.
8. What is Computer Vision? | IBM [Internet]. [cité 19 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.ibm.com/topics/computer-vision>
9. Turing AM. I.—Computing machinery and intelligence. Mind. 1 oct 1950; LIX(236):433-60.
10. McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics. 1 déc 1943;5(4):115-33.
11. McCarthy J, Minsky ML, Rochester N, Corporation IBM, Shannon CE. A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence. :13.
12. Rosenblatt F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review. nov 1958;65(6):386-408.
13. Minsky M, Papert S. Perceptrons: an introduction to computational geometry. Cambridge, Mass., Etats-Unis d'Amérique, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord; 1988. xv+292.
14. McCarthy J. Artificial intelligence: a paper symposium: Professor Sir James Lighthill, FRS. Artificial Intelligence: A General Survey. In: Science Research Council, 1973. Artificial Intelligence. 1 sept 1974;5(3):317-22.
15. Campbell M, Hoane AJ, Hsu F hsiung. Deep Blue. Artificial Intelligence. 1 janv 2002;134(1):57-83.
16. Ferrucci D, Levas A, Bagchi S, Gondek D, Mueller ET. Watson: Beyond Jeopardy! Artificial Intelligence. juin 2013;199-200:93-105.
17. Silver D, Huang A, Maddison CJ, Guez A, Sifre L, van den Driessche G, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature. janv 2016;529(7587):484-9.
18. 9782111457089\_Rapport\_Villani\_accessible.pdf [Internet]. [cité 23 nov 2022]. Disponible sur: [https://www.aiforhumanity.fr/pdfs/9782111457089\\_Rapport\\_Villani\\_accessible.pdf](https://www.aiforhumanity.fr/pdfs/9782111457089_Rapport_Villani_accessible.pdf)
19. Hurwitz J, Kirsch, D. Machine Learning For Dummies®, IBM Limited Edition. 2018;68.
20. About Linear Regression | IBM [Internet]. [cité 9 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ibm.com/topics/linear-regression>

21. Russell S, Norvig P, Popineau F, Miclet L, Cadet C. Intelligence artificielle: une approche moderne. 4e édition. Paris: Pearson; 2021.
22. Qu'est-ce qu'un arbre de décisions | IBM [Internet]. [cité 9 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/decision-trees>
23. Le Cun Y, Brizard C. Quand la machine apprend: la révolution des neurones artificiels et de l'apprentissage profond. Paris: Odile Jacob; 2019.
24. Badillo S, Banfai B, Birzele F, Davydov II, Hutchinson L, Kam-Thong T, et al. An Introduction to Machine Learning. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*. 2020;107(4):871-85.
25. Choi RY, Coyner AS, Kalpathy-Cramer J, Chiang MF, Campbell JP. Introduction to Machine Learning, Neural Networks, and Deep Learning. *Transl Vis Sci Technol*. 9(2):14.
26. Deo RC. Machine Learning in Medicine. *Circulation*. 17 nov 2015;132(20):1920-30.
27. MacEachern SJ, Forkert ND. Machine learning for precision medicine. *Genome*. avr 2021;64(4):416-25.
28. Camacho DM, Collins KM, Powers RK, Costello JC, Collins JJ. Next-Generation Machine Learning for Biological Networks. *Cell*. 14 juin 2018;173(7):1581-92.
29. Handelman GS, Kok HK, Chandra RV, Razavi AH, Lee MJ, Asadi H. eDoctor: machine learning and the future of medicine. *Journal of Internal Medicine*. 2018;284(6):603-19.
30. Mitchell TM. Machine Learning. New York: McGraw-Hill; 1997. 414 p. (McGraw-Hill series in computer science).
31. Touzet C. Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme.
32. Bechouche A. Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : application à une éolienne. 2013.
33. Zemouri R, Devalland C, Valmary-Degano S, Zerhouni N. Intelligence artificielle : quel avenir en anatomie pathologique ? *Annales de Pathologie*. 1 avr 2019;39(2):119-29.
34. LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature*. 28 mai 2015;521(7553):436-44.
35. Albawi S, Mohammed TA, Al-Zawi S. Understanding of a convolutional neural network. In: 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET). 2017. p. 1-6.
36. Understanding Deep Convolutional Neural Networks [Internet]. [cité 7 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.run.ai/guides/deep-learning-for-computer-vision/deep-convolutional-neural-networks>
37. Reynolds AH. Anh H. Reynolds [Internet]. Anh H. Reynolds. [cité 7 févr 2023]. Disponible sur: <https://anhreynolds.com/>
38. juillet 2019 MSP 11. Introduction to computer vision [Internet]. IBM Developer. 2019 [cité 21 déc 2022]. Disponible sur: [https://developer.ibm.com/articles/introduction-computer-vision/?mhsrc=ibmsearch\\_a&mhq=computer%20vision](https://developer.ibm.com/articles/introduction-computer-vision/?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=computer%20vision)
39. Deep learning and computer vision: Two promising pillars, powering the future in orthodontics. *Seminars in Orthodontics*. 1 juin 2021;27(2):62-8.
40. Lee H, Chen YPP. Image based computer aided diagnosis system for cancer detection. *Expert Systems with Applications*. 15 juill 2015;42(12):5356-65.
41. Yoo S, Gujrathi I, Haider MA, Khalvati F. Prostate Cancer Detection using Deep Convolutional Neural Networks. *Sci Rep*. 20 déc 2019;9:19518.
42. Putra RH, Doi C, Yoda N, Astuti ER, Sasaki K. Current applications and development of artificial intelligence for digital dental radiography. *Dentomaxillofac Radiol*. 1 janv 2022;51(1):20210197.
43. What Is Computer Vision? [Basic Tasks & Techniques] [Internet]. [cité 21 déc 2022]. Disponible sur: <https://www.v7labs.com/blog/what-is-computer-vision>, <https://www.v7labs.com/blog/what-is-computer-vision>

44. Guerin T. Systèmes experts et IA : des perspectives toujours plus vastes pour les entreprises avec le moteur d'inférence Drools.
45. Negrello L. Systèmes experts et intelligence artificielle.
46. Pesapane F, Codari M, Sardanelli F. Artificial intelligence in medical imaging: threat or opportunity? Radiologists again at the forefront of innovation in medicine. *Eur Radiol Exp.* 24 oct 2018;2:35.
47. Park WJ, Park JB. History and application of artificial neural networks in dentistry. *Eur J Dent.* 2018;12(4):594-601.
48. Conway R. RankBrain: What is it, and why should we care? *NZ Business + Management.* févr 2018;32(1):39-40.
49. Brill TM, Munoz L, Miller RJ. Siri, Alexa, and other digital assistants: a study of customer satisfaction with artificial intelligence applications. *Journal of Marketing Management.* nov 2019;35(15/16):1401-36.
50. O'Toole AJ, Castillo CD. Face Recognition by Humans and Machines: Three Fundamental Advances from Deep Learning. *Annu Rev Vis Sci.* 15 sept 2021;7:543-70.
51. Pichereau D. Le déploiement européen du véhicule autonome. :160.
52. Lotter W, Diab AR, Haslam B, Kim JG, Grisot G, Wu E, et al. Robust breast cancer detection in mammography and digital breast tomosynthesis using an annotation-efficient deep learning approach. *Nat Med.* févr 2021;27(2):244-9.
53. Wu W, Parmar C, Grossmann P, Quackenbush J, Lambin P, Bussink J, et al. Exploratory Study to Identify Radiomics Classifiers for Lung Cancer Histology. *Frontiers in Oncology* [Internet]. 2016 [cité 1 févr 2023];6. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fonc.2016.00071>
54. Coudray N, Ocampo PS, Sakellaropoulos T, Narula N, Snuderl M, Fenyö D, et al. Classification and mutation prediction from non-small cell lung cancer histopathology images using deep learning. *Nat Med.* oct 2018;24(10):1559-67.
55. Ting DSW, Pasquale LR, Peng L, Campbell JP, Lee AY, Raman R, et al. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *Br J Ophthalmol.* févr 2019;103(2):167-75.
56. Zaharchuk G, Gong E, Wintermark M, Rubin D, Langlotz CP. Deep Learning in Neuroradiology. *AJNR Am J Neuroradiol.* oct 2018;39(10):1776-84.
57. Somani S, Russak AJ, Richter F, Zhao S, Vaid A, Chaudhry F, et al. Deep learning and the electrocardiogram: review of the current state-of-the-art. *Europace.* 6 août 2021;23(8):1179-91.
58. You W, Hao A, Li S, Wang Y, Xia B. Deep learning-based dental plaque detection on primary teeth: a comparison with clinical assessments. *BMC Oral Health.* 13 mai 2020;20:141.
59. You WZ, Hao AM, Li S, Zhang ZY, Li RZ, Sun RQ, et al. [Deep learning-based dental plaque detection on permanent teeth and the influenced factors]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.* 9 juill 2021;56(7):665-71.
60. Adam R. Introducing the Oral-B iO electric toothbrush: next generation oscillating-rotating technology. *Int Dent J.* 16 oct 2020;70(Suppl 1):S1-6.
61. Kolibree. Kolibree Introduces Ara, the First Toothbrush With Artificial Intelligence. *Business Wire (English)* [Internet]. 1 mars 2017 [cité 3 janv 2023]; Disponible sur: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bwh&AN=bizwire.c72981432&lang=fr&site=ehost-live>
62. Chen CH, Wang CC, Chen YZ. Intelligent Brushing Monitoring Using a Smart Toothbrush with Recurrent Probabilistic Neural Network. *Sensors (Basel).* 10 févr 2021;21(4):1238.

63. Lee JW, Lee KH, Kim KS, Kim DJ, Kim K. Development of Smart Toothbrush Monitoring System for Ubiquitous Healthcare. In: 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2006. p. 6422-5.
64. Erbe C, Klees V, Ferrari-Peron P, Ccahuana-Vasquez RA, Timm H, Grender J, et al. A comparative assessment of plaque removal and toothbrushing compliance between a manual and an interactive power toothbrush among adolescents: a single-center, single-blind randomized controlled trial. *BMC Oral Health*. 3 août 2018;18:130.
65. Jeon B, Oh J, Son S. Effects of Tooth Brushing Training, Based on Augmented Reality Using a Smart Toothbrush, on Oral Hygiene Care among People with Intellectual Disability in Korea. *Healthcare (Basel)*. 18 mars 2021;9(3):348.
66. Chen Q, Wu J, Li S, Lyu P, Wang Y, Li M. An ontology-driven, case-based clinical decision support model for removable partial denture design. *Sci Rep*. 14 juin 2016;6:27855.
67. Bernauer SA, Zitzmann NU, Joda T. The Use and Performance of Artificial Intelligence in Prosthodontics: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 5 oct 2021;21(19):6628.
68. Singi SR, Sathe S, Reche AR, Sibal A, Mantri N. Extended Arm of Precision in Prosthodontics: Artificial Intelligence. *Cureus*. 14(11):e30962.
69. Le Scan Clarity Score de Pearl réduit le temps et l'argent consacrés à des scans de mauvaise qualité pendant le processus de restauration dentaire. [Internet]. [cité 7 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.hellopearl.com//press-release/pearls-scan-clarity-score-reduces-time-and-money-spent-on-poor-quality-scans-during-dental-restoration-process>
70. Sastre T, Alric S, Chapuis X, Claverie C, Duminil G, Elkaïm D, et al. La dentisterie numérique. Paris: ID, presse, édition, média; 2021. (Tout simplement).
71. Smilecloud [Internet]. [cité 1 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.smilecloud.com/#natural>
72. A propos [Internet]. [cité 1 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.udini.ai/fr>
73. Otani T, Raigrodski AJ, Mancl L, Kanuma I, Rosen J. In vitro evaluation of accuracy and precision of automated robotic tooth preparation system for porcelain laminate veneers. *J Prosthet Dent*. août 2015;114(2):229-35.
74. Benakatti VB, Nayakar RP, Anandhalli M. Machine learning for identification of dental implant systems based on shape – A descriptive study. *J Indian Prosthodont Soc*. 2021;21(4):405-11.
75. Sukegawa S, Yoshii K, Hara T, Matsuyama T, Yamashita K, Nakano K, et al. Multi-Task Deep Learning Model for Classification of Dental Implant Brand and Treatment Stage Using Dental Panoramic Radiograph Images. *Biomolecules*. 30 mai 2021;11(6):815.
76. Takahashi T, Nozaki K, Gonda T, Mameno T, Wada M, Ikebe K. Identification of dental implants using deep learning—pilot study. *Int J Implant Dent*. 22 sept 2020;6:53.
77. Sukegawa S, Yoshii K, Hara T, Tanaka F, Yamashita K, Kagaya T, et al. Is attention branch network effective in classifying dental implants from panoramic radiograph images by deep learning? *PLoS One*. 27 juill 2022;17(7):e0269016.
78. Lee JH, Jeong SN. Efficacy of deep convolutional neural network algorithm for the identification and classification of dental implant systems, using panoramic and periapical radiographs. *Medicine (Baltimore)*. 26 juin 2020;99(26):e20787.
79. Kohlakala A, Coetzer J, Bertels J, Vandermeulen D. Deep learning-based dental implant recognition using synthetic X-ray images. *Med Biol Eng Comput*. 2022;60(10):2951-68.
80. Lee JH, Kim YT, Lee JB, Jeong SN. Deep learning improves implant classification by dental professionals: a multi-center evaluation of accuracy and efficiency. *J Periodontal Implant Sci*. 27 déc 2021;52(3):220-9.
81. Service d'identification d'implant dentaire basé sur l'IA Spotimplant [Internet].

- Spotimplant. [cité 3 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.spotimplant.com/fr/identification-implant-dentaire/>
82. Bayrakdar SK, Orhan K, Bayrakdar IS, Bilgir E, Ezhov M, Gusarev M, et al. A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Med Imaging*. 19 mai 2021;21:86.
  83. Kwak GH, Kwak EJ, Song JM, Park HR, Jung YH, Cho BH, et al. Automatic mandibular canal detection using a deep convolutional neural network. *Sci Rep*. 31 mars 2020;10:5711.
  84. Xiao Y, Liang Q, Zhou L, He X, Lv L, Chen J, et al. Construction of a new automatic grading system for jaw bone mineral density level based on deep learning using cone beam computed tomography. *Sci Rep*. 27 juill 2022;12:12841.
  85. Wu Y, Wang F, Fan S, Chow JKF. Robotics in Dental Implantology. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*. août 2019;31(3):513-8.
  86. Neocis. Neocis' Yomi Robotic System Receives FDA 510(k) Clearance for Bone Reduction [Internet]. GlobeNewswire News Room. 2022 [cité 9 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/11/15/2556393/0/en/Neocis-Yomi-Robotic-System-Receives-FDA-510-k-Clearance-for-Bone-Reduction.html>
  87. Robot-Guided Dental Implant Surgery - See The Yomi Robot [Internet]. Yomi By Neocis. [cité 9 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.neocis.com/products-and-services/yomi-robot/>
  88. Bolding SL, Reebye UN. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches. *J Prosthet Dent*. oct 2022;128(4):639-47.
  89. Mozer PS. Accuracy and Deviation Analysis of Static and Robotic Guided Implant Surgery: A Case Study. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2020;35(5):e86-90.
  90. Yang S, Chen J, Li A, Li P, Xu S. Autonomous Robotic Surgery for Immediately Loaded Implant-Supported Maxillary Full-Arch Prosthesis: A Case Report. *J Clin Med*. 7 nov 2022;11(21):6594.
  91. Subramanian AK, Chen Y, Almalki A, Sivamurthy G, Kafle D. Cephalometric Analysis in Orthodontics Using Artificial Intelligence—A Comprehensive Review. *Biomed Res Int*. 16 juin 2022;2022:1880113.
  92. Khanagar SB, Al-Ehaideb A, Vishwanathaiah S, Maganur PC, Patil S, Naik S, et al. Scope and performance of artificial intelligence technology in orthodontic diagnosis, treatment planning, and clinical decision-making - A systematic review. *J Dent Sci*. janv 2021;16(1):482-92.
  93. Schwendicke F, Chaurasia A, Arsiwala L, Lee JH, Elhennawy K, Jost-Brinkmann PG, et al. Deep learning for cephalometric landmark detection: systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig*. 2021;25(7):4299-309.
  94. Jiang F, Guo Y, Yang C, Zhou Y, Lin Y, Cheng F, et al. Artificial intelligence system for automated landmark localization and analysis of cephalometry. *Dentomaxillofacial Radiology* [Internet]. 16 nov 2022 [cité 12 janv 2023]; Disponible sur: <https://www.birpublications.org/doi/10.1259/dmfr.20220081>
  95. Chang Q, Wang Z, Wang F, Dou J, Zhang Y, Bai Y. Automatic analysis of lateral cephalograms based on high-resolution net. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* [Internet]. 16 déc 2022 [cité 12 janv 2023];0(0). Disponible sur: [https://www.ajodo.org/article/S0889-5406\(22\)00744-2/fulltext](https://www.ajodo.org/article/S0889-5406(22)00744-2/fulltext)
  96. Yao J, Zeng W, He T, Zhou S, Zhang Y, Guo J, et al. Automatic localization of cephalometric landmarks based on convolutional neural network. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1 mars 2022;161(3):e250-9.
  97. Yoon HJ, Kim DR, Gwon E, Kim N, Baek SH, Ahn HW, et al. Fully automated



- identification of cephalometric landmarks for upper airway assessment using cascaded convolutional neural networks. *Eur J Orthod.* 25 janv 2022;44(1):66-77.
98. Kim IH, Kim YG, Kim S, Park JW, Kim N. Comparing intra-observer variation and external variations of a fully automated cephalometric analysis with a cascade convolutional neural net. *Sci Rep.* 12 avr 2021;11:7925.
  99. AI Services: Automatic Cephalometric Analysis | cephX [Internet]. [cité 20 janv 2023]. Disponible sur: <https://cephx.com/cephalometric-analysis/>
  100. Mosleh MAA, Baba MS, Malek S, Almaktari RA. Ceph-X: development and evaluation of 2D cephalometric system. *BMC Bioinformatics.* 22 déc 2016;17(Suppl 19):499.
  101. Align Technology [Internet]. [cité 13 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.aligntech.com/>
  102. Tai S, Dib M, Boyd RL. *Orthodontie invisible: guide clinique des traitements par aligneurs.* Berlin Paris [etc.]: Quintessence publishing; 2018.
  103. Tuncay OC. *The invisalign system.* London Berlin Tokyo: Quintessence Publishing Co, Ltd; 2006.
  104. CC Pro - Invisalign - Discover New Possibilities [Internet]. [cité 13 janv 2023]. Disponible sur: <http://www.invisalign-g6.com/fr-XB/clincheckpro.aspx>
  105. Caruso S, Caruso S, Pellegrino M, Skafi R, Nota A, Tecco S. A Knowledge-Based Algorithm for Automatic Monitoring of Orthodontic Treatment: The Dental Monitoring System. Two Cases. *Sensors (Basel).* 7 mars 2021;21(5):1856.
  106. Roisin LC, Brézulier D, Sorel O. Remotely-controlled orthodontics: fundamentals and description of the Dental Monitoring system. *J Dentofacial Anom Orthod.* 2016;19(4):408.
  107. Pour les patients [Internet]. DentalMonitoring. [cité 1 févr 2023]. Disponible sur: <https://dental-monitoring.com/pour-les-patients/?lang=fr>
  108. Hansa I, Semaan SJ, Vaid NR. Clinical outcomes and patient perspectives of Dental Monitoring® GoLive® with Invisalign®—a retrospective cohort study. *Prog Orthod.* 15 juin 2020;21:16.
  109. Chen H, Zhang K, Lyu P, Li H, Zhang L, Wu J, et al. A deep learning approach to automatic teeth detection and numbering based on object detection in dental periapical films. *Sci Rep.* 7 mars 2019;9:3840.
  110. Tuzoff DV, Tuzova LN, Bornstein MM, Krasnov AS, Kharchenko MA, Nikolenko SI, et al. Tooth detection and numbering in panoramic radiographs using convolutional neural networks. *Dentomaxillofac Radiol.* 2 mars 2019;48(4):20180051.
  111. De Angelis F, Pranno N, Franchina A, Di Carlo S, Brauner E, Ferri A, et al. Artificial Intelligence: A New Diagnostic Software in Dentistry: A Preliminary Performance Diagnostic Study. *Int J Environ Res Public Health.* 2 févr 2022;19(3):1728.
  112. Allisone - L'IA au service de la compréhension patient [Internet]. [cité 7 févr 2023]. Disponible sur: <https://allisone.ai/>
  113. Zaborowicz M, Zaborowicz K, Biedziak B, Garbowski T. Deep Learning Neural Modelling as a Precise Method in the Assessment of the Chronological Age of Children and Adolescents Using Tooth and Bone Parameters. *Sensors (Basel).* 14 janv 2022;22(2):637.
  114. Farhadian M, Salemi F, Saati S, Nafisi N. Dental age estimation using the pulp-to-tooth ratio in canines by neural networks. *Imaging Sci Dent.* mars 2019;49(1):19-26.
  115. Kim S, Lee YH, Noh YK, Park FC, Auh QS. Age-group determination of living individuals using first molar images based on artificial intelligence. *Sci Rep.* 13 janv 2021;11:1073.
  116. Okazaki S, Mine Y, Iwamoto Y, Urabe S, Mitsuhashi C, Nomura R, et al. Analysis of the feasibility of using deep learning for multiclass classification of dental anomalies on

- panoramic radiographs. *Dent Mater J.* 30 nov 2022;41(6):889-95.
117. Ragodos R, Wang T, Padilla C, Hecht JT, Poletta FA, Orioli IM, et al. Dental anomaly detection using intraoral photos via deep learning. *Sci Rep.* 8 juill 2022;12:11577.
  118. Zhu H, Cao Z, Lian L, Ye G, Gao H, Wu J. CariesNet: a deep learning approach for segmentation of multi-stage caries lesion from oral panoramic X-ray image. *Neural Comput Appl.* 7 janv 2022;1-9.
  119. Chen X, Guo J, Ye J, Zhang M, Liang Y. Detection of Proximal Caries Lesions on Bitewing Radiographs Using Deep Learning Method. *Caries Res.* 10 oct 2022;
  120. Cantu AG, Gehrung S, Krois J, Chaurasia A, Rossi JG, Gaudin R, et al. Detecting caries lesions of different radiographic extension on bitewings using deep learning. *J Dent.* sept 2020;100:103425.
  121. Bayraktar Y, Ayan E. Diagnosis of interproximal caries lesions with deep convolutional neural network in digital bitewing radiographs. *Clin Oral Investig.* janv 2022;26(1):623-32.
  122. Devlin H, Williams T, Graham J, Ashley M. The ADEPT study: a comparative study of dentists' ability to detect enamel-only proximal caries in bitewing radiographs with and without the use of AssistDent artificial intelligence software. *Br Dent J.* 2021;231(8):481-5.
  123. Lee S, Oh SI, Jo J, Kang S, Shin Y, Park JW. Deep learning for early dental caries detection in bitewing radiographs. *Sci Rep.* 19 août 2021;11(1):16807.
  124. Dental AI Platform for Dental Group Practices [Internet]. Overjet. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.overjet.ai/product/clinical-intelligence-platform/>
  125. Videa Health - Press - VideaHealth Dental AI Solution Receives FDA 510(k) Clearance, Establishing Industry-wide Benchmark for Clinical Accuracy [Internet]. [cité 8 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.videa.ai/news/videahealth-dental-ai-solution-receives-fda-510-k-clearance-establishing-industry-wide-benchmark-for-clinical-accuracy>
  126. GroupDentistryNow. A New Era of Preventative Care in Dentistry - AI Abstract [Internet]. Group Dentistry Now. 2022 [cité 8 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.groupdentistrynow.com/dso-group-blog/a-new-era-of-preventative-care-in-dentistry-ai-abstract/>
  127. Casalegno F, Newton T, Daher R, Abdelaziz M, Lodi-Rizzini A, Schürmann F, et al. Caries Detection with Near-Infrared Transillumination Using Deep Learning. *J Dent Res.* oct 2019;98(11):1227-33.
  128. Michou S, Lambach MS, Ntovas P, Benetti AR, Bakhshandeh A, Rahiotis C, et al. Automated caries detection in vivo using a 3D intraoral scanner. *Sci Rep.* 28 oct 2021;11(1):21276.
  129. Zhang X, Liang Y, Li W, Liu C, Gu D, Sun W, et al. Development and evaluation of deep learning for screening dental caries from oral photographs. *Oral Dis.* janv 2022;28(1):173-81.
  130. Ding B, Zhang Z, Liang Y, Wang W, Hao S, Meng Z, et al. Detection of dental caries in oral photographs taken by mobile phones based on the YOLOv3 algorithm. *Ann Transl Med.* nov 2021;9(21):1622.
  131. Song IS, Shin HK, Kang JH, Kim JE, Huh KH, Yi WJ, et al. Deep learning-based apical lesion segmentation from panoramic radiographs. *Imaging Sci Dent.* déc 2022;52(4):351-7.
  132. Endres MG, Hillen F, Salloumis M, Sedaghat AR, Niehues SM, Quatela O, et al. Development of a Deep Learning Algorithm for Periapical Disease Detection in Dental Radiographs. *Diagnostics (Basel).* 24 juin 2020;10(6):430.

133. Orhan K, Bayrakdar IS, Ezhov M, Kravtsov A, Özyürek T. Evaluation of artificial intelligence for detecting periapical pathosis on cone-beam computed tomography scans. *Int Endod J.* mai 2020;53(5):680-9.
134. Hiraiwa T, Ariji Y, Fukuda M, Kise Y, Nakata K, Katsumata A, et al. A deep-learning artificial intelligence system for assessment of root morphology of the mandibular first molar on panoramic radiography. *Dentomaxillofac Radiol.* 9 nov 2018;48(3):20180218.
135. Duan W, Chen Y, Zhang Q, Lin X, Yang X. Refined tooth and pulp segmentation using U-Net in CBCT image. *Dentomaxillofac Radiol.* 1 sept 2021;50(6):20200251.
136. Kim J, Lee HS, Song IS, Jung KH. DeNTNet: Deep Neural Transfer Network for the detection of periodontal bone loss using panoramic dental radiographs. *Sci Rep.* 26 nov 2019;9:17615.
137. Chang HJ, Lee SJ, Yong TH, Shin NY, Jang BG, Kim JE, et al. Deep Learning Hybrid Method to Automatically Diagnose Periodontal Bone Loss and Stage Periodontitis. *Sci Rep.* 5 mai 2020;10:7531.
138. Jiang L, Chen D, Cao Z, Wu F, Zhu H, Zhu F. A two-stage deep learning architecture for radiographic staging of periodontal bone loss. *BMC Oral Health* [Internet]. 2022 [cité 11 janv 2023];22. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8973652/>
139. Lee CT, Kabir T, Nelson J, Sheng S, Meng HW, Van Dyke TE, et al. Use of the deep learning approach to measure alveolar bone level. *J Clin Periodontol.* mars 2022;49(3):260-9.
140. Cha JY, Yoon HI, Yeo IS, Huh KH, Han JS. Peri-Implant Bone Loss Measurement Using a Region-Based Convolutional Neural Network on Dental Periapical Radiographs. *J Clin Med.* 2 mars 2021;10(5):1009.
141. Liu M, Wang S, Chen H, Liu Y. A pilot study of a deep learning approach to detect marginal bone loss around implants. *BMC Oral Health.* 16 janv 2022;22:11.
142. Li W, Liang Y, Zhang X, Liu C, He L, Miao L, et al. A deep learning approach to automatic gingivitis screening based on classification and localization in RGB photos. *Sci Rep.* 19 août 2021;11:16831.
143. Vinayahalingam S, Xi T, Bergé S, Maal T, de Jong G. Automated detection of third molars and mandibular nerve by deep learning. *Sci Rep.* 21 juin 2019;9:9007.
144. Choi E, Lee S, Jeong E, Shin S, Park H, Youm S, et al. Artificial intelligence in positioning between mandibular third molar and inferior alveolar nerve on panoramic radiography. *Sci Rep.* 14 févr 2022;12:2456.
145. Sukegawa S, Matsuyama T, Tanaka F, Hara T, Yoshii K, Yamashita K, et al. Evaluation of multi-task learning in deep learning-based positioning classification of mandibular third molars. *Sci Rep.* 13 janv 2022;12:684.
146. Yoo JH, Yeom HG, Shin W, Yun JP, Lee JH, Jeong SH, et al. Deep learning based prediction of extraction difficulty for mandibular third molars. *Sci Rep.* 21 janv 2021;11:1954.
147. Kim BS, Yeom HG, Lee JH, Shin WS, Yun JP, Jeong SH, et al. Deep Learning-Based Prediction of Paresthesia after Third Molar Extraction: A Preliminary Study. *Diagnostics (Basel).* 30 août 2021;11(9):1572.
148. Murata M, Ariji Y, Ohashi Y, Kawai T, Fukuda M, Funakoshi T, et al. Deep-learning classification using convolutional neural network for evaluation of maxillary sinusitis on panoramic radiography. *Oral Radiol.* sept 2019;35(3):301-7.
149. Kuwana R, Ariji Y, Fukuda M, Kise Y, Nozawa M, Kuwada C, et al. Performance of deep learning object detection technology in the detection and diagnosis of maxillary sinus lesions on panoramic radiographs. *Dentomaxillofac Radiol.* 1 janv 2021;50(1):20200171.

150. Yu D, Hu J, Feng Z, Song M, Zhu H. Deep learning based diagnosis for cysts and tumors of jaw with massive healthy samples. *Sci Rep.* 3 févr 2022;12:1855.
151. Arijji Y, Yanashita Y, Kutsuna S, Muramatsu C, Fukuda M, Kise Y, et al. Automatic detection and classification of radiolucent lesions in the mandible on panoramic radiographs using a deep learning object detection technique. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* oct 2019;128(4):424-30.
152. Lee JH, Kim DH, Jeong SN. Diagnosis of cystic lesions using panoramic and cone beam computed tomographic images based on deep learning neural network. *Oral Diseases.* 2020;26(1):152-8.
153. Yang H, Jo E, Kim HJ, Cha I ho, Jung YS, Nam W, et al. Deep Learning for Automated Detection of Cyst and Tumors of the Jaw in Panoramic Radiographs. *J Clin Med.* 12 juin 2020;9(6):1839.
154. Keser G, Bayrakdar İŞ, Pekiner FN, Çelik Ö, Orhan K. A deep learning algorithm for classification of oral lichen planus lesions from photographic images: A retrospective study. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery.* 11 août 2022;101264.
155. Song B, Sunny S, Uthoff RD, Patrick S, Suresh A, Kolar T, et al. Automatic classification of dual-modality, smartphone-based oral dysplasia and malignancy images using deep learning. *Biomed Opt Express.* 10 oct 2018;9(11):5318-29.
156. Song B, Sunny S, Li S, Gurushanth K, Mendonca P, Mukhia N, et al. Bayesian deep learning for reliable oral cancer image classification. *Biomed Opt Express.* 20 sept 2021;12(10):6422-30.
157. Lin H, Chen H, Weng L, Shao J, Lin J. Automatic detection of oral cancer in smartphone-based images using deep learning for early diagnosis. *J Biomed Opt.* août 2021;26(8):086007.
158. Tanriver G, Soluk Tekkesin M, Ergen O. Automated Detection and Classification of Oral Lesions Using Deep Learning to Detect Oral Potentially Malignant Disorders. *Cancers (Basel).* 2 juin 2021;13(11):2766.
159. Bilan démographique 2022 - Insee Première - 1935 [Internet]. [cité 30 janv 2023]. Disponible sur: [https://www.insee.fr/fr/statistiques/6687000#figure6\\_radio2](https://www.insee.fr/fr/statistiques/6687000#figure6_radio2)
160. Castaing E (DREES/DIRECTION). L'état de santé de la population en France. 2022;
161. M'T dents [Internet]. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/assure/sante/themes/carie-dentaire/mt-dents>
162. ondps\_nov\_2021\_rapport\_la\_demographie\_des\_chirurgiens-dentistes\_etat\_des\_lieux\_et\_perspectives\_web.pdf [Internet]. [cité 26 janv 2023]. Disponible sur: [https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/ondps\\_nov\\_2021\\_rapport\\_la\\_demographie\\_des\\_chirurgiens-dentistes\\_etat\\_des\\_lieux\\_et\\_perspectives\\_web.pdf](https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/ondps_nov_2021_rapport_la_demographie_des_chirurgiens-dentistes_etat_des_lieux_et_perspectives_web.pdf)
163. En France, des territoires inégaux face au vieillissement | L'Observatoire des Territoires [Internet]. [cité 30 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr/kiosque/2017-vieillissement-02-en-france-des-territoires-inegaux-face-au-vieillissement>
164. Estimations de population par sexe et âge au 1<sup>er</sup> janvier 2022 | Insee [Internet]. [cité 30 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2012692>
165. Un niveau de vie et des disparités de revenus plus élevés en Île-de-France et dans les communes denses - Insee Focus - 196 [Internet]. [cité 16 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.insee.fr/fr/statistiques/4508514#figure1\\_radio3](https://www.insee.fr/fr/statistiques/4508514#figure1_radio3)
166. les\_inegalites\_de\_revenus.pdf [Internet]. [cité 16 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr/sites/default/files/2019-11/les\\_inegalites\\_de\\_revenus.pdf](https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr/sites/default/files/2019-11/les_inegalites_de_revenus.pdf)
167. 20160920-rapport-securite-sociale-2016-soins-bucco-dentaires.pdf [Internet]. [cité 17 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/>

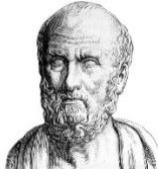
- 20160920-rapport-securite-sociale-2016-soins-bucco-dentaires.pdf
168. Célant N, Guillaume S, Rochereau T. L'Enquête santé européenne - Enquête santé et protection sociale (EHIS-ESPS) 2014. 2014;
  169. Bas AC, Dourgnon P, Azogui-Levy S, Wittwer J. Impact of fees on access to dental care: evidence from France. *European Journal of Public Health*. 11 déc 2020;30(6):1066-71.
  170. Azogui-Lévy S. Comportements de recours aux soins et santé bucco-dentaire. 2005;
  171. Calvet L, Moisy M, Chardon O. Santé bucco-dentaire des enfants : des inégalités dès le plus jeune âge.
  172. Rapport\_acces\_aux\_soins\_buccodentaires\_aout-2017.pdf [Internet]. [cité 13 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/wp-content/uploads/2020/01/Rapport\\_acces\\_aux\\_soins\\_buccodentairesS\\_AOUT-2017.pdf](https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/wp-content/uploads/2020/01/Rapport_acces_aux_soins_buccodentairesS_AOUT-2017.pdf)
  173. Article L114 - Code de l'action sociale et des familles - Légifrance [Internet]. [cité 13 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000006796446/](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006796446/)
  174. Rapport\_acces\_aux\_soins\_buccodentaires\_novembrE-2018.pdf [Internet]. [cité 13 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/wp-content/uploads/2020/01/Rapport\\_acces\\_aux\\_soins\\_buccodentaires\\_novembre-2018.pdf](https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/wp-content/uploads/2020/01/Rapport_acces_aux_soins_buccodentaires_novembre-2018.pdf)
  175. Hescot DP, Moutarde DA. Améliorer l'accès à la santé bucco-dentaire des personnes handicapées. 2010;
  176. ap\_acces\_aux\_soins\_handicap\_textes\_t1.pdf [Internet]. [cité 16 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2009-01/ap\\_acces\\_aux\\_soins\\_handicap\\_textes\\_t1.pdf](https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2009-01/ap_acces_aux_soins_handicap_textes_t1.pdf)
  177. Verzy S. L'accès aux soins bucco-dentaires [Internet]. Ordre National des Chirurgiens-Dentistes. [cité 13 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/decouvrir-lordre/presentation-3-2-2/>
  178. Article 12 - Arrêté du 20 août 2018 portant approbation de la convention nationale organisant les rapports entre les chirurgiens-dentistes libéraux et l'assurance maladie - Légifrance [Internet]. [cité 13 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.legifrance.gouv.fr/loda/article\\_lc/LEGIARTI000037342689](https://www.legifrance.gouv.fr/loda/article_lc/LEGIARTI000037342689)
  179. L'association – HandiDent PACA [Internet]. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://handidentpaca.fr/association/>
  180. Handifaction - Résultats de janvier 2023 [Internet]. Handifaction. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.handifaction.fr/derniers-resultats/>
  181. Thiébaud S, Lupi-Pégurier L, Paraponaris A, Ventelou B. Comparaison du recours à un chirurgien-dentiste entre les personnes âgées institutionnalisées et celles vivant à domicile, France, 2008-2009. *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire - BEH*. 2013;(7):4.
  182. Tallec DA, David S. Santé des personnes âgées de 65 ans et plus. 2017;
  183. Hoeksema AR, Spoorenberg S, Peters LL, Meijer H, Raghoobar GM, Vissink A, et al. Elderly with remaining teeth report less frailty and better quality of life than edentulous elderly: a cross-sectional study. *Oral Dis*. mai 2017;23(4):526-36.
  184. Bert E, Bodineau-Mobarak A. Importance de l'état bucco-dentaire dans l'alimentation des personnes âgées. *Gérontologie et société*. 2010;33 / 134(3):73-86.
  185. Séguier S, Bodineau A, Giacobbi A, Tavernier J, Folliguet M. Pathologies bucco-dentaires du sujet âgé : répercussions sur la nutrition et la qualité de vie.
  186. Prevention\_bucco-dentaire\_chez\_les\_personnes\_agees.pdf [Internet]. [cité 25 févr 2023]. Disponible sur: [https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Prevention\\_bucco-dentaire\\_chez\\_les\\_personnes\\_agees.pdf](https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Prevention_bucco-dentaire_chez_les_personnes_agees.pdf)
  187. SDJ\_2017-12\_praxis\_F.pdf [Internet]. [cité 25 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.swissdentaljournal.org/fileadmin/upload\\_sso/2\\_Zahnaerzte/2\\_SDJ/SDJ\\_20](https://www.swissdentaljournal.org/fileadmin/upload_sso/2_Zahnaerzte/2_SDJ/SDJ_20)

- 17/SDJ\_12\_2017/SDJ\_2017-12\_praxis\_F.pdf
188. Mendelsohn AH. The Effects of Reflux on the Elderly: The Problems with Medications and Interventions. *Otolaryngol Clin North Am.* août 2018;51(4):779-87.
  189. Nesse W, Linde A, Abbas F, Spijkervet FKL, Dijkstra PU, de Brabander EC, et al. Dose-response relationship between periodontal inflamed surface area and HbA1c in type 2 diabetics. *J Clin Periodontol.* avr 2009;36(4):295-300.
  190. Bodineau A, Boutelier C, Viala P, Laze D, Desmarest M, Jonneaux L, et al. Importance de l'hygiène buccodentaire en gériatrie. *NPG Neurologie - Psychiatrie - Gériatrie.* 1 août 2007;7(40):7-14.
  191. Rapport\_acces\_aux\_soins\_buccodentaires\_AOUT-2017.pdf [Internet]. [cité 21 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/wp-content/uploads/2020/01/Rapport\\_acces\\_aux\\_soins\\_buccodentaires\\_aout-2017.pdf](https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/wp-content/uploads/2020/01/Rapport_acces_aux_soins_buccodentaires_aout-2017.pdf)
  192. Dossier-UFSBD-La-Prévention-bucco-dentaire-en-France-un-tournant-à-p-.pdf [Internet]. [cité 10 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ufsbd.fr/wp-content/uploads/2014/06/Dossier-UFSBD-La-Pr%C3%A9vention-bucco-dentaire-en-France-un-tournant-%C3%A0-p-.pdf>
  193. er1085-2.pdf [Internet]. [cité 3 févr 2023]. Disponible sur: <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2020-08/er1085-2.pdf>
  194. Lydie. Application SODHEV pour accompagner les personnes avec autisme dans la prise en charge des soins dentaires. [Internet]. Ortho & Co. 2020 [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ortho-n-co.fr/2020/02/application-sodhev-sante-orale-autisme/>
  195. Althuzius M, Lefer G, Bourdon P, Lopez Cazaux S. Intégration de la tablette tactile dans les programmes de prévention bucco-dentaire destinés aux personnes en situation de handicap cognitif : étude exploratoire chez l'enfant. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique.* 1 mars 2018;66(2):107-16.
  196. Casques de réalité virtuelle et Santé bucco-dentaire – HandiDent PACA [Internet]. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://handidentpaca.fr/2022/10/27/actus-2/download.pdf> [Internet]. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.occitanie.ars.sante.fr/media/39677/download?inline>
  197. Oralien, une innovation en santé orale au profit des personnes vulnérables [Internet]. UFSBD. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ufsbd.fr/espace-public/formations-medico-social/oralien-innovation-sante-orale-profit-personnes-vulnerables/>
  198. Article L4131-1 - Code de la santé publique - Légifrance [Internet]. [cité 23 janv 2023]. Disponible sur: [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000033897070/](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000033897070/)
  199. Cartographie publique ONCD [Internet]. [cité 6 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/cartographie/>
  200. Anguis M, Bergeat M, Pisarik J, Vergier N, Chaput H, Monziols M, et al. Quelle démographie récente et à venir pour les professions médicales et pharmaceutique ? 2021; er1027.pdf [Internet]. [cité 30 janv 2023]. Disponible sur: <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/er1027.pdf>
  201. er1026.pdf [Internet]. [cité 23 janv 2023]. Disponible sur: <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/er1026.pdf>
  202. Le\_metier\_de\_chirurgien\_dentiste\_-\_caracteristiques\_actuelles\_et\_evolution.pdf [Internet]. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: [https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Le\\_metier\\_de\\_chirurgien\\_dentiste\\_-\\_caracteristiques\\_actuelles\\_et\\_evolution.pdf](https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Le_metier_de_chirurgien_dentiste_-_caracteristiques_actuelles_et_evolution.pdf)
  203. Collet S. La démographie des chirurgiens-dentistes à l'horizon 2030.
  204. CAB\_Solidarites, CAB\_Solidarites. Réforme des études de santé [Internet]. Ministère de la Santé et de la Prévention. 2023 [cité 6 févr 2023]. Disponible sur:

- <https://sante.gouv.fr/archives/archives-presse/archives-communiqués-de-presse/article/reforme-des-etudes-de-sante>
207. Titres et diplômes [Internet]. enseignementsup-recherche.gouv.fr. [cité 26 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/bo/22/Hebdo31/ESRS2220085A.htm>
  208. Odontologie : le point sur la création des huit facs annoncées pour la rentrée 2022 - L'Etudiant [Internet]. [cité 26 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.letudiant.fr/etudes/medecine-sante/odontologie-le-point-sur-la-creation-des-8-facs-annoncees-pour-la-rentree-2022.html>
  209. Mission\_Odontologie.pdf [Internet]. [cité 10 févr 2023]. Disponible sur: [http://aspbd.free.fr/IMG/pdf/Mission\\_Odontologie.pdf](http://aspbd.free.fr/IMG/pdf/Mission_Odontologie.pdf)
  210. r19-563-syn.pdf [Internet]. [cité 24 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/r19-563/r19-563-syn.pdf>
  211. 2012-\_etude\_dentaire-portrait\_statistique.pdf [Internet]. [cité 6 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.ompl.fr/images/Publications/EtudesBranches/sante/Dentaire/2012-\\_etude\\_dentaire-portrait\\_statistique.pdf](https://www.ompl.fr/images/Publications/EtudesBranches/sante/Dentaire/2012-_etude_dentaire-portrait_statistique.pdf)
  212. McKay JC, Quiñonez CR. La féminisation de la dentisterie : Répercussions sur la profession. *J Can Dent Assoc.* 2012;
  213. Brown TA, Raborn W. Is there an adequate supply of new dentists in Canada? *Journal (Canadian Dental Association).* 2001;67(7):373-4.
  214. Practice patterns in male versus female general dentists. *Dental Abstracts.* 1 janv 2006;51(1):8.
  215. DP-enquete-demo.pdf [Internet]. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.unecd.com/wp-content/uploads/2020/01/DP-enquete-demo.pdf>
  216. 2020\_fiche\_chirurgiens-dentistes-liberaux\_0.pdf [Internet]. [cité 30 janv 2023]. Disponible sur: [https://assurance-maladie.ameli.fr/sites/default/files/2020\\_fiche\\_chirurgiens-dentistes-liberaux\\_0.pdf](https://assurance-maladie.ameli.fr/sites/default/files/2020_fiche_chirurgiens-dentistes-liberaux_0.pdf)
  217. AFP S et A avec. Pour quel spécialiste faut-il attendre le plus longtemps avant un rendez-vous ? [Internet]. *Sciences et Avenir.* 2015 [cité 10 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.sciencesetavenir.fr/sante/pour-quel-specialiste-faut-il-attendre-le-plus-longtemps-avant-un-rendez-vous\\_29528](https://www.sciencesetavenir.fr/sante/pour-quel-specialiste-faut-il-attendre-le-plus-longtemps-avant-un-rendez-vous_29528)
  218. Article L6316-1 - Code de la santé publique - Légifrance [Internet]. [cité 14 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000038887059](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000038887059)
  219. Décret n° 2010-1229 du 19 octobre 2010 relatif à la télémédecine. 2010-1229 oct 19, 2010.
  220. Giraudeau N, Valcarcel J, Tassery H, Levallois B, Cuisinier F, Tramini P, et al. Projet e-DENT : téléconsultation bucco-dentaire en EHPAD. *European Research in Telemedicine / La Recherche Européenne en Télémédecine.* 1 juin 2014;3(2):51-6.
  221. Queyroux A, Saricassapian B, Herzog D, Müller K, Herafa I, Ducoux D, et al. Accuracy of Teledentistry for Diagnosing Dental Pathology Using Direct Examination as a Gold Standard: Results of the Tel-e-dent Study of Older Adults Living in Nursing Homes. *J Am Med Dir Assoc.* 1 juin 2017;18(6):528-32.
  222. Inquimbert C, Balacianu I, Huyghe N, Padeloup J, Tramini P, Meroueh F, et al. Applications of teledentistry in a French inmate population: A one-year observational study. *PLoS One.* 2021;16(4):e0247778.
  223. Giraudeau N, Bauer M, Tramini P, Inquimbert C, Toupenay S. A national teledentistry study on the knowledge, attitudes, training and practices of private dentists. *Digit Health.* 2022;8:20552076221085068.
  224. Denti.AI: AI for Dental X-Ray Imaging and Voice Charting [Internet]. [cité 7 févr 2023].

- Disponible sur: <https://www.denti.ai/>
225. Bonfanti-Gris M, Garcia-Cañas A, Alonso-Calvo R, Salido Rodriguez-Manzaneque MP, Pradies Ramiro G. Evaluation of an Artificial Intelligence web-based software to detect and classify dental structures and treatments in panoramic radiographs. *Journal of Dentistry*. 1 nov 2022;126:104301.
  226. Second Opinion - Aide à la détection des pathologies en temps réel pour les dentistes, par le leader mondial de l'IA en dentisterie [Internet]. [cité 7 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.hellopearl.com//products/second-opinion>
  227. Pearl-Second Opinion Study-Caries Whitepaper.pdf [Internet]. [cité 7 févr 2023]. Disponible sur: <https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/5664760/Pearl-Second%20Opinion%20Study-Caries%20Whitepaper.pdf>
  228. Radiology Report - Diagnocat AI [Internet]. [cité 8 févr 2023]. Disponible sur: <https://diagnocat.com/eu/services/radiology-report/>
  229. Ezhov M, Gusarev M, Golitsyna M, Yates JM, Kushnerev E, Tamimi D, et al. Clinically applicable artificial intelligence system for dental diagnosis with CBCT. *Sci Rep*. 22 juill 2021;11(1):15006.
  230. proposition de loi portant amélioration de l'accès aux soins par la confiance aux professionnels de santé [Internet]. [cité 22 févr 2023]. Disponible sur: <http://www.senat.fr/leg/pp122-329.html>
  231. avis\_129\_vf.pdf [Internet]. [cité 23 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2021-02/avis\\_129\\_vf.pdf](https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2021-02/avis_129_vf.pdf)
  232. Le règlement général sur la protection des données - RGPD | CNIL [Internet]. [cité 23 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/fr/reglement-europeen-protection-donnees>
  233. cnil\_rapport\_garder\_la\_main\_web.pdf [Internet]. [cité 23 févr 2023]. Disponible sur: [https://www.cnil.fr/sites/default/files/atoms/files/cnil\\_rapport\\_garder\\_la\\_main\\_web.pdf](https://www.cnil.fr/sites/default/files/atoms/files/cnil_rapport_garder_la_main_web.pdf)
  234. LOI n° 2021-1017 du 2 août 2021 relative à la bioéthique (1) - Légifrance [Internet]. [cité 23 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFSCATA000043884385>
  235. Amann J, Blasimme A, Vayena E, Frey D, Madai VI. Explainability for artificial intelligence in healthcare: a multidisciplinary perspective. *BMC Med Inform Decis Mak*. 30 nov 2020;20:310.
  236. Lancement du premier label de Garantie Humaine de l'Intelligence artificielle [Internet]. [esante.gouv.fr](http://esante.gouv.fr). [cité 23 févr 2023]. Disponible sur: <http://esante.gouv.fr/agenda/lancement-du-premier-label-de-garantie-humaine-de-lintelligence-artificielle>
  237. Grand-témoign-David-Gruson-PD-34-.pdf [Internet]. [cité 23 févr 2023]. Disponible sur: <http://www.ufsbd.fr/wp-content/uploads/2019/11/Grand-t%C3%A9moign-David-Gruson-PD-34-.pdf>
  238. The Act [Internet]. The Artificial Intelligence Act. 2021 [cité 23 févr 2023]. Disponible sur: <https://artificialintelligenceact.eu/the-act/>
  239. Floridi L, Holweg M, Taddeo M, Amaya Silva J, Mökander J, Wen Y. capAI - A Procedure for Conducting Conformity Assessment of AI Systems in Line with the EU Artificial Intelligence Act [Internet]. Rochester, NY; 2022 [cité 23 févr 2023]. Disponible sur: <https://papers.ssrn.com/abstract=4064091>
  240. Mörch CM, Atsu S, Cai W, Li X, Madathil SA, Liu X, et al. Artificial Intelligence and Ethics in Dentistry: A Scoping Review. *J Dent Res*. déc 2021;100(13):1452-60.





## SERMENT MEDICAL

En présence des Maîtres de cette Faculté, de mes chers condisciples, devant l'effigie d'HIPPOCRATE.

Je promets et je jure, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la Médecine Dentaire.

Je donnerai mes soins à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail, je ne participerai à aucun partage clandestin d'honoraires.

Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des considérations de religion, de nation, de race, de parti ou de classe sociale viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Même sous la menace, je n'admettrai pas de faire usage de mes connaissances médicales contre les lois de l'humanité.

J'informerai mes patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des connaissances pour forcer les consciences.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leur père.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois déshonoré et méprisé de mes confrères si j'y manque.



**AMICO Raphael** – Intelligence artificielle en médecine dentaire : quelles utilisations actuelles et perspectives d’avenir pour améliorer l’accès au soin ?

Th. : Chir. dent. : Marseille : Aix-Marseille Université : 2023

Rubrique de classement : Odontologie Prothétique

Résumé : L’usage de l’intelligence artificielle (IA) en médecine dentaire est au cœur des débats actuels. Pratiquement tous les praticiens ont déjà utilisé ou utilisent des nouvelles technologies exploitant une IA, peut être sans en avoir conscience.

L’éthique médicale impose d’être en mesure de comprendre les outils mis à notre disposition : il est donc nécessaire d’expliquer les concepts fondamentaux pour la démystifier et explorer son utilisation dans le domaine de l’odontologie. Nous présenterons dans un premier temps les différents volets où l’utilisation de l’IA semble pertinente dans notre discipline, tant pour faciliter notre quotidien de soignants que pour améliorer la qualité de nos diagnostics.

Dans une deuxième partie, nous évoquerons la répartition inégale des chirurgiens-dentistes sur le territoire et le manque d’accès au soin des populations dans les zones sous-dotées. Nous mettrons en évidence qu’elles comportent des catégories de populations avec de grands besoins de soins.

Enfin, même si la machine ne remplacera jamais l’humain, l’utilisation de ces nouveaux outils d’assistance peut être une alternative pour optimiser la prise en charge et le suivi bucco-dentaire des populations isolées. Nous discuterons des hypothèses et projection de l’utilisation de l’IA dans ce cadre.

Mots-clés : Intelligence artificielle ; médecine dentaire ; dentisterie numérique ; réseaux de neurones convolutifs ; vision par ordinateur ; aide au diagnostic ; apprentissage profond ; accès au soin.

**AMICO Raphael** – Artificial intelligence in dentistry: what current uses and future prospects for improving access to care ?

Abstract : The use of artificial intelligence (AI) in dentistry is at the heart of the current debate. Almost all practitioners have already used or are using new technologies exploiting AI, perhaps without being aware of it.

Medical ethics require to be able to understand the tools at our disposal: so, it is necessary to explain the fundamental concepts to demystify it and explore its use in the field of dentistry. We will first present the different aspects where the use of AI seems relevant in our discipline, both to facilitate our daily practice and to improve the quality of our diagnoses.

In second part, we will discuss the unequal distribution of dentists across the country and the lack of access to care for populations in under-supplied areas. We will highlight that these areas include categories of populations with great needs for care. Finally, even if the machine will never replace the human being, the use of these new assistance tools can be an alternative to optimize the oral care and monitoring of isolated populations. We will discuss the hypotheses and projections for the use of AI in this context.

Keywords : Artificial intelligence ; dental medicine ; e-dentistry ; convolutional neural network ; computer vision ; computer aided diagnosis ; deep learning ; access to care.