

UNIVERSITE DE TOULOUSE

FACULTE DE SANTE – DEPARTEMENT D'ODONTOLOGIE

ANNEE 2025

2025 – TOU - N° 3057

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE
DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

FILLIOL Paul

Le 12 Septembre 2025

**APPLICATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LA DETECTION
ET LE DIAGNOSTIC DES LESIONS CARIEUSES : UNE REVUE
SYSTEMATIQUE DE LA LITTERATURE**

Directeur de thèse : Dr. CANCEILL Thibault

JURY

Présidente :	Professeur MONSARRAT Paul
1er assesseur :	Docteur CANCEILL Thibault
2 ^{ème} assesseur :	Docteur DUBUC Antoine
3 ^{ème} assesseur :	Docteur JONIOT Sabine



➔ DIRECTION

Doyen de la Faculté de Santé

M. Philippe POMAR

Vice Doyenne de la Faculté de Santé
Directrice du Département d'Odontologie

Mme Sara DALICIEUX-LAURENCIN

Directeurs Adjoints

Mme Sarah COUSTY
M. Florent DESTRUHAUT

Directrice Administrative

Mme Muriel VERDAGUER

Présidente du Comité Scientifique

Mme Cathy NABET

➔ HONORARIAT

Doyens honoraires

M. Jean LAGARRIGUE +
M. Jean-Philippe LODTER +
M. Gérard PALOUDIER
M. Michel SIXOU
M. Henri SOULET

Chargés de mission

M. Karim NASR (*Innovation Pédagogique*)
M. Olivier HAMEL (*Maillage Territorial*)
M. Franck DIEMER (*Formation Continue*)
M. Philippe KEMOUN (*Stratégie Immobilière*)
M. Paul MONSARRAT (*Intelligence Artificielle*)

➔ PERSONNEL ENSEIGNANT

Section CNU 56 : Développement, Croissance et Prévention

56.01 ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE et ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE (Mme Isabelle BAILLEUL-FORESTIER)

ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE

Professeurs d'Université : Mme Isabelle BAILLEUL-FORESTIER, M. Frédéric VAYSSE, Mme Marie - Cécile VALERA
Maître de Conférence : M. Mathieu MARTY
Assistants : M. Robin BENETAH

ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

Maîtres de Conférences : M. Pascal BARON, M. Maxime ROTENBERG
Assistants : Mme Carole VARGAS JOULIA, Mme Chahrazed BELAILI, Mme Véronique POINSOTTE
Adjoints d'Enseignement : Mme. Isabelle ARAGON, M. Vincent VIDAL-ROSSET, Mme Hasnaa KHALED

56.02 PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ, ODONTOLOGIE LÉGALE (Mme Géromine FOURNIER)

Professeurs d'Université : M. Michel SIXOU, Mme Catherine NABET, M. Olivier HAMEL, M. Jean-Noël VERGNES
Maîtres de Conférences : Mme Géromine FOURNIER
Assistant : M. Nicolas DRITSCH
Adjoints d'Enseignement : M. Alain DURAND, Mlle. Sacha BARON, M. Romain LAGARD, M. Jean-Philippe GATIGNOL
Mme Carole KANJ, Mme Mylène VINCENT-BERTHOUMIEUX, M. Christophe BEDOS

Section CNU 57 : Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

57.01 CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE (M. Philippe KEMOUN)

PARODONTOLOGIE

Professeur d'Université : Mme Sara LAURENCIN- DALICIEUX,
Maîtres de Conférences : Mme Alexia VINEL, Mme. Charlotte THOMAS
Assistants : M. Antoine AL HALABI, M. Pierre JEHLE
Adjoints d'Enseignement : M. Loïc CALVO, M. Antoine SANCIER, M. Ronan BARRE, Mme Myriam KADDECH,
M. Mathieu RIMBERT, M. Joffrey DURAN

CHIRURGIE ORALE

Professeur d'Université : Mme Sarah COUSTY
Maîtres de Conférences : M. Philippe CAMPAN, M. Bruno COURTOIS, M. Antoine DUBUC.
Assistant : Mme Jessica CHALOU
Adjoints d'Enseignement : M. Gabriel FAUXPOINT, M. Jérôme SALEFRANQUE, M. Clément CAMBRONNE
Mme Anissa ZITOUNI

BIOLOGIE ORALE

Professeurs d'Université : M. Philippe KEMOUN, M. Vincent BLASCO-BAQUE
Maîtres de Conférences : M. Pierre-Pascal POULET, M. Matthieu MINTY
Assistants : M. Maxime LUIS, Mme Valentine BAYLET GALY-CASSIT, Mme Sylvie LE
Assistante Associée : Mme Chiara CECCHIN-ALBERTONI
Adjoints d'Enseignement : M. Mathieu FRANC, M. Hugo BARRAGUE, Mme Inessa TIMOFEEVA-JOSSINET,

Section CNU 58 : Réhabilitation Orale

58.01 DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX (M Paul MONSARRAT)

DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE

Professeurs d'Université : M. Franck DIEMER, Mme Delphine MARET-COMTESSE
Maîtres de Conférences : M. Philippe GUIGNES, Mme Marie GURGEL-GEORGELIN,
Assistants : M. Vincent SUAREZ, M. Lorris BOIVIN, M. Thibault DECAMPS,
Mme Emma STURARO, Mme Anouk FESQUET, Mme Théophile PAPAGHEORGHIOU,
Mme Lucie RAPP
Assistante Associée :
Adjoints d'Enseignement : M. Eric BALGUERIE, M. Jean- Philippe MALLET, M. Rami HAMDAN, M. Romain DUCASSE,
Mme Marion CASTAING-FOURIER

PROTHÈSES

Professeurs d'Université : M. Philippe POMAR, M. Florent DESTRUHAUT,
Maîtres de Conférences : M. Antoine GALIBOURG, M. Julien DELRIEU
Assistants : Mme Mathilde HOURSET, Mme Constance CUNY, M. Paul POULET, Mme Aurélie BERNEDE,
Mme Cécile CAZAJUS
Adjoints d'Enseignement : M. Christophe GHRENASSIA, Mme Marie-Hélène LACOSTE-FERRE, M. Olivier LE GAC, M. Luc RAYNALDY, M. Jean-Claude COMBADAZOU, M. Bertrand ARCAUTE, M. Fabien LEMAGNER, M. Eric SOLYOM, M. Michel KNAFO, M. Victor EMONET-DENAND, M. Thierry DENIS, M. Thibault YAGUE, M. Antonin HENNEQUIN, M. Bertrand CHAMPION, M. Julien ROZENZWEIG

FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX

Professeur d'Université : Mr. Paul MONSARRAT
Maîtres de Conférences : Mme Sabine JONJOT, M. Karim NASR, M. Thibault CANCEILL,
Assistants : M. Olivier DENY, Mme Laura PASCALIN, Mme Alison PROSPER, Mme Luna DESNOT
Adjoints d'Enseignement : Mme Sylvie MAGNE, M. Thierry VERGÉ, M. Damien OSTROWSKI

Remerciements

A mes parents : Merci d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir permis de réaliser tous mes objectifs, je sais que la tâche n'a pas été de tout repos pour vous alors merci, merci d'être des parents géniaux, je vous aime.

A ma sœur : Malgré l'acharnement que tu as eu sur ton pauvre petit frère naïf, tu as su me préparer à la dure réalité de la vie dès le plus jeune âge alors que je ne savais ni marcher ni parler.

A Nouguy : 25 ans qu'on ne se lâche pas d'un pouce, je ne trouve pas de mots pour décrire à quel point tu comptes pour moi. Je sais que tous les moments passés ensemble sont et resteront des sources de fous rires interminables.

A ma famille : Merci de me soutenir au quotidien depuis si longtemps, j'ai tellement de chance de vous avoir à mes côtés. Merci pour tous ces instants passés ensemble en Corse ou à Hossegor.

A Leilou : Tu es la plus belle rencontre que j'ai pu faire ces dernières années. Je ne pensais pas pouvoir rencontrer une personne avec qui chaque moment passé ensemble est incroyable. Merci d'être à mes côtés, je t'aime.

A mes frères et sœurs de cœur : Merci pour tous ces souvenirs inoubliables en votre compagnie. Votre présence et votre humour ont sauvé bien des journées.

A Alexis : Pour cette amitié, qui à ce jour est une des plus solides que j'ai eue la chance d'avoir. Tu as toujours été là malgré la distance qui nous sépare, ne change rien et surtout pas tes « mais c'était sûr » et « je te l'avais dit »

A Mathilde : Tu es la personne qui me permet d'écrire cette thèse, merci de m'avoir poussé pendant 2 ans malgré la difficulté des épreuves, merci de m'avoir permis de valider le concours, merci car sans toi je ne serais pas ici et je n'aurais pas vécu les 6 plus belles années de ma vie.

A tous mes amis : Vous m'avez permis de passer des moments tous plus fous les uns que les autres, que ce soit à travers nos soirées ou nos events, merci d'apporter de la joie et de la bonne humeur chaque jour.

A notre président du jury,

Monsieur le professeur MONSARRAT Paul,

- Professeur des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Docteur de l'Université Paul Sabatier - Spécialité Physiopathologie,
- Diplôme Universitaire d'Imagerie 3D maxillo-faciale,
- Diplôme universitaire de Recherche Clinique en Odontologie,
- Habilitation à Diriger les Recherches
- Lauréat de la faculté de Médecine Rangueil et de Chirurgie Dentaire de l'Université Paul Sabatier,

Nous vous remercions d'avoir accepté de présider notre jury, c'est un véritable honneur pour nous. Nous vous remercions également pour la qualité de vos enseignements, vos connaissances théoriques et cliniques, vos conseils avisés prodigués tout au long de notre scolarité et externat et auxquels nous espérons faire honneur dans notre pratique future.

Veillez trouver ici le témoignage sincère de nos remerciements les plus distingués et de notre plus grand respect.

A notre jury de thèse,

Monsieur le Docteur CANCEILL Thibault

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur en sciences des matériaux
- Secrétaire du Collège National des Enseignants en Fonctions-Dysfonctions, Imagerie, Biomatériaux
- Membre de l'équipe de recherche InCOMM à l'institut des Maladies Métaboliques et Cardiovasculaires (Inserm UMR 1297)

Nous vous remercions d'avoir accepté de diriger cette thèse et pour la confiance que vous nous avez accordée dans sa réalisation. Nous espérons qu'elle soit à la hauteur de vos attentes. Nous tenions également à vous remercier pour les précieux conseils prodigués pour l'écriture de celle-ci et votre disponibilité. Enfin, nous vous sommes très reconnaissants pour l'expérience que vous nous avez apporté durant ces années d'externats

Veuillez trouver ici le témoignage de nos sincères remerciements et de notre plus grand respect.

A notre jury de thèse,

Monsieur le Docteur DUBUC Antoine

- Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Spécialiste qualifié en Chirurgie Orale,
- Docteur de l'université Toulouse III - Paul Sabatier,
- Master 2 : Sciences chirurgicales et nouvelles technologies
- Master 1 : Biologie de la santé
- Lauréat de l'université Toulouse III - Paul Sabatier

Nous vous exprimons toute notre gratitude pour l'honneur que vous nous faites en participant à notre jury de thèse. Votre engagement dans l'enseignement et votre exigence intellectuelle ont constitué pour nous un exemple à suivre. Nous vous remercions également pour votre bienveillance, vos encouragements et le partage de votre expérience, qui ont marqué de manière significative notre formation.

Veillez recevoir ici l'expression de nos remerciements les plus sincères et de notre profond respect.

A notre jury de thèse,

Madame le Docteur JONIOT Sabine

- Maître de Conférences des Universités, Praticien hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur d'Etat en Odontologie,
- Habilitation à Diriger des Recherches (HDR),
- Lauréate de l'Université Paul Sabatier.

Nous vous remercions vivement d'avoir accepté de faire partie de notre jury et d'apporter votre expertise à l'évaluation de ce travail. Votre rigueur scientifique, la richesse de vos connaissances et la qualité de votre enseignement ont toujours été pour nous une source d'inspiration. Nous avons eu le privilège de bénéficier de vos conseils éclairés et de votre disponibilité, qui ont contribué à enrichir notre parcours.

Veillez trouver ici le témoignage sincère de notre profonde reconnaissance et de notre plus grand respect.

Avant-propos :

L'intelligence artificielle (IA) est désormais bien ancrée dans notre quotidien, que ce soit dans la vie personnelle ou professionnelle. Le secteur de la santé n'échappe pas à cette évolution, l'IA y apportant un potentiel considérable : analyse de grandes quantités de données, amélioration des diagnostics, personnalisation des traitements (Topol, E. J. 2019). Toutefois, la complexité de ces technologies impose aux professionnels de santé d'en maîtriser les bases pour en faire un usage éclairé, en tenant compte de leurs limites et des enjeux éthiques associés.

Mais qu'entend-on exactement par IA ? Il s'agit de systèmes capables de simuler certains mécanismes cognitifs humains tels que l'apprentissage, le raisonnement ou la prise de décision. Contrairement aux logiciels classiques reposant sur des règles fixes, l'IA s'appuie sur des modèles adaptatifs qui apprennent à partir de données.

Trois grands types d'apprentissage sont à distinguer :

1. **Apprentissage supervisé** : le plus répandu en médecine. L'algorithme est entraîné à partir de données annotées (par exemple, des radiographies indiquant la présence ou l'absence de caries) pour identifier des motifs récurrents et réaliser ensuite des prédictions sur de nouveaux cas.
2. **Apprentissage non supervisé** : l'IA classe ou regroupe les données selon leurs similarités, sans indication préalable, ce qui peut permettre de révéler des structures ou des profils cachés.
3. **Apprentissage par renforcement** : l'algorithme apprend par essais et erreurs, en recevant des récompenses ou pénalités selon ses décisions.

En odontologie, et en particulier pour le diagnostic des lésions carieuses, l'apprentissage supervisé domine largement (Lee, J. et al. 2018). Les réseaux de neurones convolutifs (CNN), capables de traiter efficacement les images, sont couramment utilisés (Mohammad-Rahimi, H., et al. 2022). En exploitant des bases de données annotées, ces modèles peuvent détecter des signes de carie précoces et subtils, souvent invisibles à l'œil nu. Cette capacité ouvre une nouvelle voie pour la prise en charge des patients...

Application de l'intelligence artificielle dans la détection et le diagnostic des lésions carieuses : une revue systématique de la littérature.

Table des matières

INTRODUCTION	12
I. MATERIELS ET METHODES	13
1. STRATEGIE DE RECHERCHE	13
2. CRITERES DE SELECTION, D'INCLUSION, ET D'EXCLUSION	14
3. EXTRACTION DE DONNEES	15
4. EVALUATION DU RISQUE DE BIAIS.....	16
II. RESULTATS	17
1. RECHERCHE ET SELECTION	17
2. ANALYSE DESCRIPTIVE	19
3. RISQUE DE BIAIS.....	24
III. DISCUSSION	26
CONCLUSION	29
BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXE	36

INTRODUCTION

Les lésions carieuses sont des maladies infectieuses chroniques qui entraînent la destruction localisée des tissus dentaires durs par déminéralisation, ces dernières sont l'une des affections bucco-dentaires les plus répandues dans le monde et constituent un enjeu majeur de santé publique (World Health Organization, 2025).

Malgré les avancées technologiques et l'amélioration de l'accès aux soins, la détection précoce et le diagnostic des lésions carieuses restent souvent complexes, en raison notamment de la variabilité des présentations cliniques et de la subjectivité inhérente à l'examen visuel et radiographique (Ekstrand et al., 2019). Dans ce contexte, l'intelligence artificielle (IA) et, plus spécifiquement, les approches d'apprentissage automatique (machine learning) et d'apprentissage profond (deep learning), suscitent un intérêt croissant auprès des professionnels et des chercheurs.

L'Intelligence artificielle offre en effet la possibilité d'analyser de vastes ensembles de données radiographiques et cliniques pour identifier les premiers signes de lésions carieuses (Lee et al., 2018; Hung et al., 2020). La capacité de ces algorithmes à extraire des caractéristiques pertinentes, parfois imperceptibles à l'œil nu, permet d'améliorer la sensibilité et la spécificité du diagnostic, tout en réduisant le risque d'erreurs humaines (Chen et al., 2021).

Parallèlement, l'adoption d'outils d'IA dans le parcours de soins s'accompagne de défis technologiques et éthiques majeurs, tels que la qualité des données, la protection de la vie privée ou encore l'acceptation par les professionnels de santé (Topol, 2019).

L'implantation réussie de ces solutions nécessite donc une approche multidisciplinaire, alliant le savoir-faire clinique et la recherche en intelligence artificielle. À travers cette revue systématique de la littérature, nous explorerons les différents types de modèles d'IA employés dans la détection et le diagnostic des lésions carieuses, en évaluant leur performance, leurs limites et les perspectives qu'ils offrent pour l'avenir de la dentisterie.

Définitions :

Machine learning (ou apprentissage automatique)

Terme générique désignant l'ensemble des méthodes permettant à un système d'apprendre automatiquement à partir de données ; englobe l'apprentissage supervisé, non supervisé, et par renforcement.

Deep learning :

Branche du machine learning utilisant des réseaux de neurones profonds (avec de nombreuses couches) capables de traiter des données complexes comme les images ou le son.

I. MATERIELS ET METHODES

Cette revue systématique a été menée conformément aux recommandations PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses) (*Page et al., 2021*).

La question suivante a été formulée pour définir la stratégie de recherche : Chez les patients atteints de lésions carieuses, l'intelligence artificielle permet-elle une détection et un diagnostic plus précis et efficaces que les méthodes conventionnelles (examen clinique visuel et à la sonde, examens radiologiques interprété à l'œil nu) ?

1. STRATEGIE DE RECHERCHE

Les recherches ont été effectuées à partir de la base de données électronique PubMed, afin d'identifier les études susceptibles d'être incluses dans cette revue.

La stratégie de recherche adoptée a consisté à lancer une recherche informatique dans la base de données de PubMed à l'aide des termes et des mots-clés spécifiques mentionnés dans le tableau 1 ci-dessous.

Aucune limite d'années n'a été fixée pour les publications de cette étude. Les recherches ont débuté le 30 septembre 2024.

#1: (((((machine learning[Title/Abstract]) OR (artificial intelligence[Title/Abstract])) OR (chatgpt[Title/Abstract])) OR (deep learning[Title/Abstract])) OR (neural network[Title/Abstract])) OR (chatbot[Title/Abstract]))	287 827
#2 : (((((decay[Title/Abstract]) OR (dental fracture[Title/Abstract])) OR (carie[Title/Abstract])) OR (cavity[Title/Abstract])) OR (tooth fracture[Title/Abstract])) OR (root fracture[Title/Abstract]))	293 938
#3: (((dentistry[Title/Abstract]) OR (oral[Title/Abstract])) OR (dental[Title/Abstract])) OR (dent*[Title/Abstract])	1 143 916
#4: (((((((Chinese[Language]) OR Polish[Language]) OR Japanese[Language]) OR German[Language]) OR Portuguese[Language]) OR Russian[Language]) OR Review[Publication Type]) OR (malignant[Title/Abstract]) OR (cancer[Title/Abstract]))	8 194 669
#5: #1 AND #2 AND #3	235
#6: #5 NOT #4	96

Tableau 1 : Procédure de recherche sur la base de données PubMed

2. CRITERES DE SELECTION, D'INCLUSION, ET D'EXCLUSION

Tout d'abord, les titres et les résumés de toutes les études identifiées dans la base de données PubMed ont été examinés pour faire une première sélection.

Seules les études qui répondaient aux critères suivants, basés sur une adaptation de la stratégie PICO, ont été sélectionnées :

- **Patient / population :**

Patients présentant des lésions carieuses, incluant les stades initiaux et avancés.

- **Intervention :**

Détection et diagnostic des lésions carieuses à l'aide d'outils basés sur l'intelligence artificielle.

- **Comparaison :**

Détection et diagnostic réalisés par des méthodes conventionnelles, telles que l'examen visuel, la radiographie ou les sondes dentaires.

- **Outcomes/Résultats :**

Amélioration de la précision diagnostique (sensibilité, spécificité), rapidité de détection, réduction des erreurs diagnostiques.

Ensuite, les textes intégraux des articles éligibles restants ont été examinés, les études qui n'évaluaient pas la détection de lésions carieuses avec une IA ont été écartées.

3. EXTRACTION DE DONNEES

L'extraction des données a été effectuée au moyen d'un tableur standardisé sur Microsoft Office Excel. Un protocole d'extraction des données a été défini en fonction des principaux résultats d'intérêt.

Pour chaque article les données suivantes ont systématiquement été extraites :

- Le nom des auteurs
- L'année et le pays de publication
- Les outils utilisés
- Le type d'IA utilisé
- Les résultats obtenus

4. EVALUATION DU RISQUE DE BIAIS

Le risque de biais de chaque article inclus a été évalué en attribuant un score basé sur la liste de vérification critique du Joanna Briggs Institute (JBI)

Etant donné la diversité des articles, plusieurs grilles JBI ont été utilisées.

Une réponse jugée « incertaine » est interprétée comme ne fournissant pas une réponse claire à la question posée.

Chaque article a été évalué à l'aide d'un score exprimé en pourcentage.

En s'appuyant sur d'autres études (Broutin et al., 2024), un niveau de risque de biais a ensuite été attribué à chaque score.

Un score supérieur à 75 % indique un faible risque de biais

Un score situé entre 50-75% indique un risque de biais modéré

Un score inférieur à 50% indique un risque de biais important

II. RESULTATS

1. RECHERCHE ET SELECTION

La figure 1 présente un organigramme décrivant le processus de sélection des études, conformément aux recommandations PRISMA (Moher et al., 2021).

Au total, 96 références ont été recensées dans la base de données PubMed grâce à l'utilisation des mots-clés spécifiques, décrits dans le tableau 1.

Après examen des titres et des résumés des articles, 80 articles ont été écartés car ils ne répondaient pas aux critères de sélection établis.

Parmi les 16 articles retenus à l'issue de ce premier tri, 8 ont ensuite été exclus pour les raisons suivantes :

- Deux articles n'ont pas pu être consultés dans leur intégralité.
- Trois études ne portaient pas directement sur la détection de lésions carieuses à l'aide d'une IA.
- Trois étaient des revues systématiques

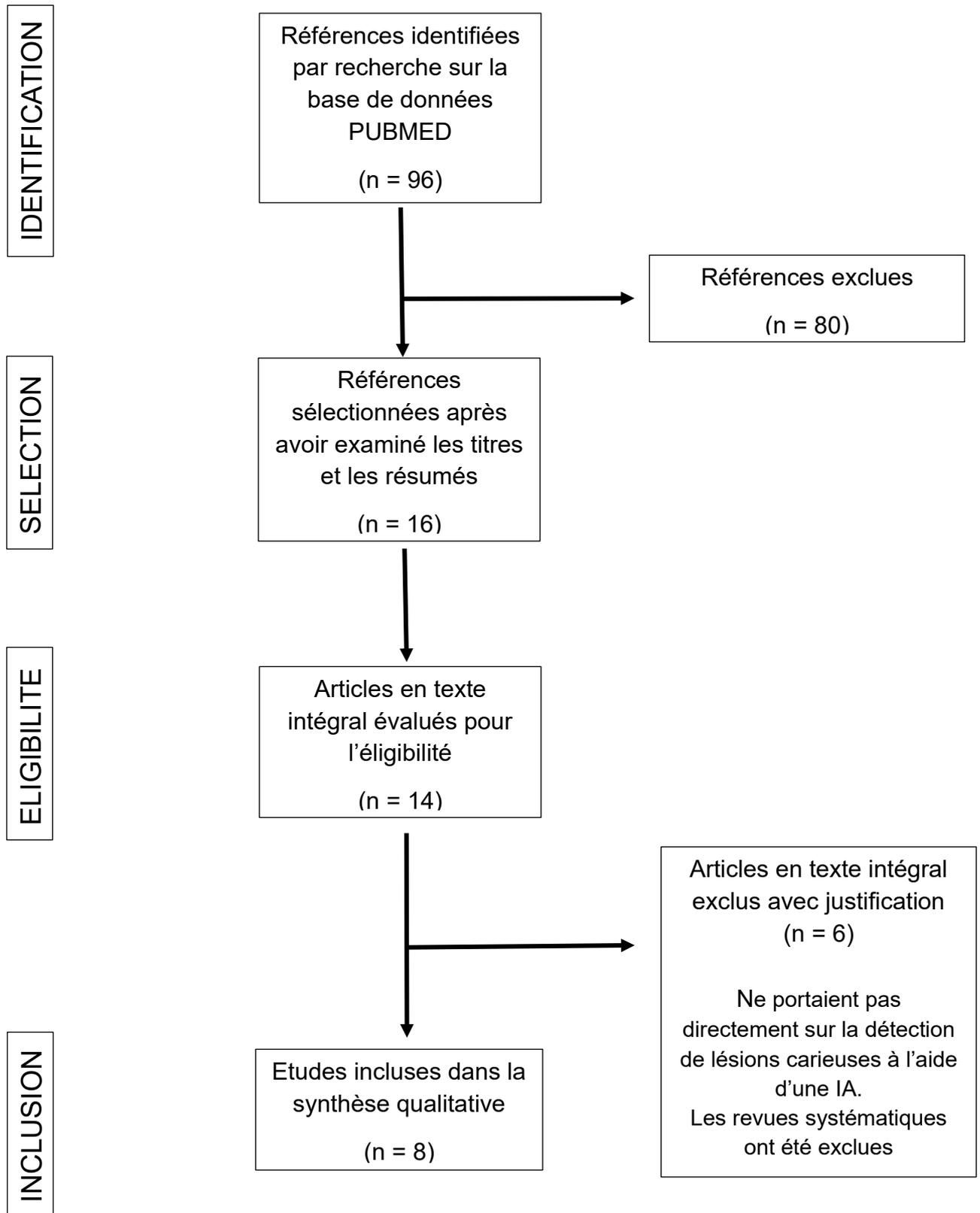


Figure 1 : Diagramme du flux PRISMA des résultats de recherche de la base de données PubMed

2. ANALYSE DESCRIPTIVE

Les données descriptives détaillées des 8 articles inclus sont résumés dans le tableau 2. Tous les articles ont été publiés entre 2020 et 2024 : trois aux États-Unis, deux en Allemagne, un en Suisse, un au Royaume-Uni et un en Australie.

- **Outils utilisés :**

En ce qui concerne les outils utilisés par l'IA et l'humain (qui sert de gold standard), la majorité des études (5/8, soit 62,5%) ont privilégié la radiographie 2D comme modalité principale.

Une étude (Esmailyfard et al.), a exclusivement exploité la tomographie volumique à faisceau conique (CBCT), permettant une analyse plus approfondie grâce à l'imagerie tridimensionnelle.

Une étude (Bhattacharjee et al.) a également intégré la photographie classique dans sa méthodologie.

Enfin, l'approche de *Alsubai* et al. s'est distinguée en employant uniquement un questionnaire basé sur des variables sociodémographiques et cliniques, se détachant ainsi des approches fondées sur l'imagerie.

Les tailles d'échantillons présentent une très grande diversité, allant de 105 à 10 375 participants. La majorité des échantillons est toutefois inférieure à 1 000 participants.

Seule l'étude *d'Alsubai et al.* s'écarte significativement, utilisant un très large échantillon (10 375), ce qui permet une meilleure robustesse statistique pour être étudiée avec un outil de machine learning.

- **Type d'IA utilisé :**

Concernant les méthodes d'intelligence artificielle (IA), les réseaux de neurones convolutifs (CNN) dominant largement (6/8 études, 75%). Parmi les architectures spécifiques de CNN identifiées, on retrouve notamment :

- ResNet-18 et ResNet-27 chez *Bhattacharjee et al.*,
- VGG16, VGG19, AlexNet et ResNet-50 chez *ForouzehFar et al.*,
- Faster R-CNN chez *Chen et al.*,
- NASNet chez *Ragab et al.*,
- YOLOv3 chez *Bayraktar et al.*

Deux études se distinguent des CNN classiques :

- *Geetha et al.* ont utilisé un réseau neuronal à rétro-propagation (BPNN), combiné à un prétraitement spécifique par un filtre Laplacien,
- *Alsubai* a exploité un modèle d'ensemble innovant regroupant plusieurs algorithmes : XGBoost, Random Forest (RF) et Extra Trees Classifier (ETC). Cette étude est également la seule à avoir utilisé une approche non basée sur des données d'imagerie mais sur des variables issues d'un questionnaire.

Définitions :

CNN : Architecture de réseaux de neurones spécialement conçue pour traiter les images ; elle détecte automatiquement les caractéristiques visuelles importantes pour la classification.

ResNet (Residual Network) :

Architecture de CNN conçue pour résoudre les problèmes de dégradation du signal dans les réseaux profonds grâce à des connexions résiduelles

VGG16 / VGG19 :

Architectures de CNN profondes, faciles à implémenter, connues pour leur structure simple (empilement de couches convolutionnelles) et leurs bonnes performances en vision par ordinateur.

AlexNet :

Réseau de neurones convolutif (CNN) pionnier du deep learning, il a marqué un tournant en démontrant l'efficacité des CNN pour la reconnaissance d'images.

Faster R-CNN :

Modèle de détection d'objets combinant la détection et la classification dans un seul réseau profond ; rapide et performant pour localiser précisément des régions d'intérêt dans les images.

NASNet (Neural Architecture Search Network) :

Type de réseau de neurones conçu automatiquement par une IA pour trouver l'architecture optimale ; performant en classification d'images.

YOLOv3 (You Only Look Once v3) :

Modèle de détection d'objets en temps réel, rapide et précis, qui traite toute l'image en un seul passage, permettant la détection instantanée de multiples objets.

Réseau neuronal à rétro-propagation ou Back Propagation Neural Network (BPNN) :

Est un type de réseau neuronal artificiel qui apprend en corrigeant ses erreurs. Lorsqu'il fait une prédiction, il compare sa réponse à la bonne réponse attendue. L'erreur constatée est ensuite renvoyée à travers le réseau (d'où le terme "back propagation") afin d'ajuster ses connexions et ainsi améliorer ses futures prédictions, le BPNN apprend de ses erreurs pour devenir progressivement plus précis.

Filtre Laplacien :

Outil de traitement d'image qui met en évidence les contours ou les changements rapides d'intensité, utile pour améliorer la détection de détails dans les radiographies.

Modèle d'ensemble :

Approche combinant plusieurs algorithmes (comme Random Forest, Extra Trees Classifier ou XGBoost) pour améliorer la précision et la stabilité des prédictions.

Les techniques spécifiques utilisées pour améliorer la performance ou la compréhension des modèles incluent notamment LIME (pour l'interprétabilité), Pytorch (plateforme d'apprentissage profond), un prétraitement par filtre Laplacien (traitement d'image), ainsi que des méthodes statistiques avancées comme l'analyse en composantes principales (PCA) et le Chi-square pour la sélection optimale des variables.

Définitions :

LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations)

Technique d'explicabilité qui aide à comprendre pourquoi un modèle IA a pris une décision en montrant quelles caractéristiques ont le plus influencé le résultat.

PyTorch :

Bibliothèque de programmation open source utilisée pour développer et entraîner des modèles de deep learning ; appréciée pour sa flexibilité et sa simplicité.

PCA (Analyse en Composantes Principales) :

Méthode de réduction de dimension utilisée pour simplifier les données tout en conservant leur variance essentielle, facilitant l'apprentissage par les modèles.

Chi-square :

Méthode statistique utilisée pour évaluer l'association entre deux variables qualitatives ; en IA, elle peut servir à sélectionner les variables les plus pertinentes.

• **Résultats :**

Les résultats obtenus par les différents modèles d'IA présentent globalement des performances élevées en termes d'exactitude (accuracy), variant de 75 % à 97,4 %.

- Plus précisément :
 - *Bhattacharjee et al.* obtiennent une accuracy de **75 %**, une sensibilité de **69 %** et une spécificité de **84 %**.
 - *Esmailyfard et al.* montrent des résultats particulièrement élevés avec **95 %** d'accuracy, **92,1 %** de sensibilité et **96,3 %** de spécificité, confirmant l'efficacité du CNN en 3D (CBCT).
 - *ForouzesFar et al.* atteignent une accuracy de **93 %** (VGG19) avec leur modèle CNN.
 - *Geetha et al.* rapportent une accuracy élevée de **96,2 %** (et jusqu'à 97,1 % après optimisation) avec une excellente spécificité **97,2 %**.
 - *Chen et al.* indiquent des résultats intermédiaires où la précision des détections varie entre 50 % et 60 %, soulignant toutefois une meilleure performance sur les lésions sévères que débutantes.
 - *Ragab et al.* affichent une performance notable avec une accuracy de **96,5 %** via NASNet.

- *Bayraktar et al.* obtiennent une accuracy de **94,59 %**, une sensibilité modérée de **72,26 %** mais une spécificité très élevée de **98,19 %** en utilisant YOLOv3.
- Enfin, l'étude d'*Alsubai* obtient l'accuracy la plus élevée (**97,4 %**) couplée à une très bonne sensibilité (**96,84 %**), démontrant que l'approche basée sur les variables sociodémographiques peut être particulièrement efficace.

Ces résultats montrent globalement l'intérêt des différentes approches d'IA pour le diagnostic automatisé des lésions carieuses. Les CNN classiques et les modèles d'ensemble apparaissent comme les plus performants en termes de classification et de diagnostic.

Auteurs	N. Bhattacharjee	R. Esmaeilyfard et al.	P. ForouzesFar et al.	V. Geetha et al.	H. Chen et al.	M. Ragab	Y. Bayraktar et al.	Shtwai Alsubai
Pays	Etas unis	Suisse	Royaumes unis	Australie	Allemagne	Etats unis	Allemagne	Etats unis
Année	2022	2024	2024	2020	2021	2022	2022	2023
Outils utilisés								
Photographie	x							
Radio 2D			x	x	x	x	x	
CBCT		x						
Questionnaire								x
Taille de l'échantillon	506	785	713	105	2900	245	1000	10 375
Type d'IA utilisé								
Type d'IA	CNN	CNN	CNN	BPNN	CNN	CNN	CNN	Modèle d'ensemble
Modèle spécifique	Resnet-18 Resnet-27		VGG16, VGG19, AlexNet, ResNet-50.		Faster R-CNN	NASNet	YOLOv3	XGB, RF, ETC
Technique spécifique	LIME	Pytorch		Traitement Laplacian				PCA Chi-square
Résultats								
	Accuracy : 75% Sensibilité : 69% Spécificité : 84%	Accuracy : 95% Sensibilité : 92,1% Spécificité : 96,3%	Accuracy : VGG19 : 93% Resnet-50 : 91% VGG16 : 90% Alexnet : 90%	Accuracy : 96,2% Spécificité : 97,2%	Les auteurs indiquent que la précision oscille entre 0,5 et 0,6 pour chaque type de lésion	Accuracy : 96,5%	Accuracy : 94,59 Sensibilité : 72,26% Spécificité : 98,19%	Accuracy : 97,4% Sensibilité : 96,84%
Conclusion								
	Dépistage à moindre coût, via smartphones ou caméras intra-orales.	Application clinique potentielle pour un diagnostic plus précis de l'extension lésionnelle.	Outil complémentaire au clinicien pour réduire le risque d'erreurs.	Aide au diagnostic possible, mais nécessite plus de données	Les réseaux détectent bien mieux les lésions sévères que les lésions débutantes.	Prouve l'intérêt d'une architecture "apprise" automatiquement.	Outil potentiel de diagnostic assisté, pouvant accélérer la détection des lésions.	Intérêt d'un jeu de données <i>non</i> basé sur l'imagerie, mais sur des variables sociodémographiques...

Tableau 2 : Données descriptives des articles inclus

3. RISQUE DE BIAIS

Dans le cadre de l'évaluation du risque de biais, nous avons utilisé deux grilles d'évaluation critique proposées par la Joanna Briggs Institute (JBI).

- Pour la majorité des articles, qui correspondent à des études primaires de précision diagnostique, nous avons appliqué la **JBI Critical Appraisal Checklist for Diagnostic Test Accuracy Studies**. L'analyse a révélé que la plupart des études respectaient les critères de qualité fondamentaux. Toutefois, certaines faiblesses ont été relevées, notamment l'absence d'informations sur l'échantillonnage et l'absence de seuil prédéfini dans les modèles d'IA, ce qui peut affecter la reproductibilité et l'interprétation des résultats.

- Pour un article (Alsubai et al.), qui ne portait pas sur un test diagnostique mais sur une étude transversale prédictive fondée sur des questionnaires, nous avons utilisé **la JBI Critical Appraisal Checklist for Analytical Cross Sectional Studies**.

Deux limites méthodologiques importantes ont été identifiées : la mesure de l'état de santé (présence de caries) reposait uniquement sur les déclarations des participants, sans validation clinique, ce qui n'a pas permis d'appliquer des critères objectifs et standardisés. La validité ainsi que la fiabilité des résultats étaient donc insuffisantes, puisqu'aucun contrôle externe ne garantissait l'exactitude des réponses.

Question JBI / Articles	Un échantillon consécutif ou aléatoire de patients a-t-il été inclus ?	Un plan d'étude de type cas-témoins a-t-il été évité ?	L'étude a-t-elle évité des exclusions inappropriées ?	Les résultats du test index ont-ils été interprétés sans connaissance des résultats du test de référence ?	Si un seuil a été utilisé, était-il préalablement défini ?	Le test de référence est-il susceptible de classer correctement l'état cible ?	Les résultats du test de référence ont-ils été interprétés sans connaissance des résultats du test index ?	L'intervalle entre le test index et le test de référence était-il approprié ?	Tous les patients ont-ils reçu le même test de référence ?	Tous les patients ont-ils été inclus dans l'analyse ?	Score JBI du risque de biais
Automated Dental Cavity Detection System Using Deep Learning and Explainable AI	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	80%
Dental Caries Detection and Classification in CBCT Images Using Deep Learning	Incertain	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	80%
Dental Caries diagnosis from bitewing images using convolutional neural networks	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	80%
Dental caries diagnosis in digital radiographs using back-propagation neural network	Incertain	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	90%
Dental disease detection on periapical radiographs based on deep convolutional neural networks	Incertain	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	80%
Detection of Dental Diseases through X-Ray Images Using Neural Search Architecture Network	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	80%
Diagnosis of interproximal caries lesions with deep convolutional neural network in digital bitewing radiographs	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	100%
	Les critères d'inclusion dans l'échantillon ont-ils été clairement définis ?	Les sujets de l'étude et le contexte ont-ils été décrits en détails ?	L'exposition a-t-elle été mesurée de manière valide et fiable ?	Des critères objectifs et standardisés ont-ils été utilisés pour mesurer l'état de santé étudié ?	Les facteurs de confusion ont-ils été identifiés ?	Des stratégies pour gérer les facteurs de confusion ont-elles été décrites ?	Les résultats ont-ils été mesurés de manière valide et fiable ?	Une analyse statistique appropriée a-t-elle été utilisée ?			
Enhancing prediction of tooth caries using significant features and multi-model classifier	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Oui			75%

Tableau 3 : Analyse du risque de biais des articles inclus avec deux questionnaires JBI

III. DISCUSSION

Cette revue systématique avait pour objectif d'évaluer l'efficacité des outils d'intelligence artificielle (IA), notamment des modèles basés sur l'apprentissage profond (CNN) et les modèles d'ensemble, dans le diagnostic des lésions carieuses dentaires à partir d'images radiographiques. Les huit articles analysés ont été publiés il y'a moins de 5 ans et confirment clairement l'intérêt croissant porté à ces technologies innovantes, soulignant leur potentiel à pouvoir améliorer les pratiques diagnostiques actuelles en odontologie. Les résultats obtenus démontrent la supériorité marquée des architectures telles que ResNet, VGG, AlexNet, NASNet et YOLOv3 ainsi que des modèles d'ensemble comme XGB, RF et ETC, avec des précisions diagnostiques élevées variant entre 75 % et 97,4 %, des sensibilités atteignant 96,84 % et des spécificités maximales allant jusqu'à 98,19 %.

Ces observations rejoignent les conclusions d'autres revues systématiques récentes. En effet, Ammar et Kühnisch (2024) confirment l'efficacité des CNN sur les radiographies bitewing, avec une accuracy moyenne avoisinant 90 %, mettant particulièrement en avant les modèles VGG, ResNet et YOLO, déjà identifiés comme performants dans notre revue. Par ailleurs, la revue de Mohammad-Rahimi et al. (2022), focalisée spécifiquement sur le deep learning, rapporte des performances élevées (jusqu'à 95 % sur bitewing, 96 % sur panoramiques), et conclut que ces modèles sont "prometteurs comme assistant diagnostique". Cependant, elle souligne également l'hétérogénéité méthodologique significative de la littérature, ce qui confirme notre propre constat sur la nécessité d'une standardisation et d'une amélioration de la qualité des études.

D'autres différences apparaissent également lorsqu'on considère l'étude de Carvalho et al. (2024). Leur travail insiste particulièrement sur l'impact critique de la qualité des images radiographiques (résolution, bruit, technique de prise de vue) sur la performance diagnostique des modèles d'IA. Cet aspect mériterait d'être davantage approfondi dans les futures recherches, car il est actuellement peu détaillé dans notre propre analyse. Cette variabilité liée aux données d'entrée constitue une limite importante, susceptible d'affecter significativement la généralisation clinique des résultats observés.

En effet, la généralisation réelle des performances observées dans cette revue reste limitée en raison de plusieurs facteurs méthodologiques :

- Les tailles d'échantillons variables et parfois réduites
- Les différences significatives dans les protocoles de sélection des lésions
- Les méthodes de validation

Ces facteurs posent des limites importantes à la robustesse des conclusions tirées. Ainsi, il devient impératif pour les études futures d'intégrer une validation externe systématique sur des populations indépendantes, idéalement dans des contextes multicentriques, afin de renforcer la fiabilité et la transférabilité des résultats en milieu clinique. À cet égard, une taille minimale d'échantillon recommandée d'au moins 1 000 cas validés cliniquement (Saito et al. 2022) pourrait être envisagée afin d'assurer une puissance statistique et une représentativité suffisante.

Nous retrouvons dans la littérature souvent des articles qui sont incomparables entre eux du a des protocoles différents c'est pourquoi une standardisation méthodologique des études apparaît cruciale. Cela comprend non seulement une définition claire des protocoles expérimentaux et des critères de sélection des cas mais aussi une documentation systématique des caractéristiques qualitatives et techniques des images utilisées (résolution, contraste, homogénéité des acquisitions). Une meilleure standardisation permettrait de réduire la variabilité des résultats et d'améliorer la comparaison entre études.

L'interprétabilité et l'explicabilité des modèles constituent également un enjeu clé pour faciliter leur intégration clinique. En effet, dans le domaine médical, il ne suffit pas que les outils d'IA soient performants : il est indispensable que leurs décisions puissent être comprises, justifiées et expliquées de manière transparente aux cliniciens. Cela est essentiel pour renforcer la confiance des professionnels de santé et respecter les exigences réglementaires croissantes. Plusieurs auteurs soulignent que l'absence d'interprétabilité constitue l'un des principaux freins à l'adoption de ces technologies dans la pratique quotidienne (Bayraktar & Ayan, 2021). Pour répondre à ce besoin, des méthodes dites d'explicabilité ont été développées, dont LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations). LIME a notamment démontré son utilité dans les systèmes de diagnostic

assisté, en offrant une visualisation claire des zones d'intérêt ou des caractéristiques déterminantes (Chen et al., 2021). Bien que prometteur, son emploi reste encore marginal dans les systèmes cliniques réels, et une généralisation plus large de son utilisation constitue une piste d'amélioration pour les futurs développements.

Enfin, au-delà des performances techniques, l'intégration réussie des outils d'IA dans la pratique clinique dépend étroitement de leur acceptabilité par les professionnels de santé et de leur capacité à maîtriser ces nouvelles technologies (ForouzesFar, et al. 2024). Les recherches futures devraient donc inclure explicitement l'évaluation de cette acceptabilité et mettre en place des formations spécifiques pour faciliter une adoption harmonieuse par les praticiens.

Par ailleurs, les enjeux éthiques liés à l'utilisation des données personnelles des patients (notamment en termes de confidentialité et de consentement éclairé) ne doivent pas être oubliés dans le cadre des protocoles impliquant l'IA (Farhud et al., 2021) et doivent être pris en compte dès la phase de conception des projets de recherche.

Il devient également nécessaire d'évaluer précisément les avantages cliniques concrets apportés par ces outils en termes de réduction du temps de diagnostic, diminution des coûts globaux et amélioration effective de la prise en charge thérapeutique. De telles études économiques et cliniques approfondies seront indispensables pour quantifier précisément le bénéfice réel apporté par ces technologies innovantes et pour convaincre les acteurs du domaine dentaire de leur pertinence pratique.

CONCLUSION

L'intelligence artificielle représente un véritable tournant technologique dans le domaine du diagnostic des lésions carieuses dentaires, démontrant des performances remarquables et un potentiel clinique significatif pour améliorer la précision diagnostique, accélérer les processus de prise en charge, et réduire les erreurs humaines associées à l'interprétation radiographique. Les travaux analysés révèlent des performances très prometteuses des modèles basés sur les réseaux de neurones convolutifs, notamment en termes de sensibilité et spécificité, indiquant clairement leur intérêt potentiel pour une intégration dans le processus clinique quotidien.

Cependant, de nombreux défis restent à relever pour permettre une utilisation à grande échelle et une adoption généralisée par les professionnels de santé. Parmi ces défis, l'interprétabilité et l'explicabilité des modèles restent un point crucial à résoudre pour renforcer la confiance clinique. L'hétérogénéité des méthodologies, la taille variable des jeux de données et l'insuffisance des validations externes limitent encore fortement la généralisation réelle des résultats obtenus. Il est également primordial d'approfondir les considérations éthiques et réglementaires relatives à l'utilisation des données patients pour garantir une utilisation responsable et sécurisée des outils basés sur l'IA. Un exemple que l'on peut citer est celui de la responsabilité en cas de diagnostic erroné réalisé par l'intelligence artificielle.

Ainsi, si l'IA apparaît incontestablement comme un outil prometteur pour révolutionner le diagnostic dentaire, sa véritable plus-value clinique dépendra d'un cadre rigoureux de validation, d'une standardisation méthodologique accrue et d'une collaboration étroite entre chercheurs, développeurs, praticiens et organismes régulateurs. La formation des professionnels de santé et la sensibilisation des patients joueront également un rôle déterminant dans le succès de ces technologies.

En définitive, il semble indispensable de poursuivre activement les recherches dans ce domaine, en mettant un accent particulier sur des études cliniques robustes à grande échelle, sur l'optimisation des modèles existants, et sur la définition d'un cadre éthique et réglementaire clair et adapté à ces nouvelles pratiques technologiques.

Vu le président du Jury

Vu le directeur de Thèse

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping horizontal strokes that form a stylized, elongated shape.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdullah S. Al-Malaise Al-Ghamdi, Mahmoud Ragab, Saad Abdulla AlGhamdi, Amer H. Asseri, Romany F. Mansour, et Deepika Koundal. « Detection of Dental Diseases through X-Ray Images Using Neural Search Architecture Network ». *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022 (2022): 3500552. <https://doi.org/10.1155/2022/3500552>.
- Al-Khalifa, Khalifa S., Walaa Magdy Ahmed, Amr Ahmed Azhari, Masoumah Qaw, Rasha Alsheikh, Fatema Alqudaihi, et Amal Alfaraj. « The Use of Artificial Intelligence in Caries Detection: A Review ». *Bioengineering* 11, n° 9 (18 septembre 2024): 936. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11090936>.
- Ammar, N., & Kühnisch, J. (2024). *Diagnostic performance of artificial intelligence-aided caries detection on bitewing radiographs: a systematic review and meta-analysis*. *Japanese Dental Science Review*, 60, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2024.02.001>
- Ángel García-Cañas, Mónica Bonfanti-Gris, Sergio Paraíso-Medina, Francisco Martínez-Rus, et Guillermo Pradíes. « Diagnosis of Interproximal Caries Lesions in Bitewing Radiographs Using a Deep Convolutional Neural Network-Based Software ». *Caries Research* 56, n° 5-6 (2022): 503-11. <https://doi.org/10.1159/000527491>.
- Broutin, A., J. Delrieu, C. Blanc, R. Esclassan, K. Nasr, M. Marty, T. Canceill, et E. Noirrit. « Description and Durability of the Various Indirect Restoration Techniques in Molar-Incisor Hypomineralisation: A Systematic Review ». *The European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry* 32, n° 1 (29 février 2024): 91-101. https://doi.org/10.1922/EJPRD_2557Broutin11.
- Bruna Katherine Guimarães Carvalho, Elias-Leon Nolden, Alexander Schulze Wenning, Szilvia Kiss-Dala, Gergely Agócs, Ivett Róth, Beáta Kerémi, Zoltán Géczi, Péter Hegyi, et Márton Kivovics. « Diagnostic accuracy of artificial intelligence for approximal caries on bitewing radiographs: A systematic review and meta-analysis ». *Journal of Dentistry* 151 (1 décembre 2024): 105388. <https://doi.org/10.1016/j.ident.2024.105388>.
- Campbell JM, Klugar M, Ding S, Carmody DP, Hakonsen SJ, Jadotte YT, White S, Munn Z. Chapter 9: Diagnostic test accuracy systematic reviews. In: Aromataris E, Munn Z (Editors). *JBIManual for Evidence Synthesis*. JBI, 2020
- <https://jbi.global/critical-appraisal-tools>

- Farhud, D. D., & Zokaei, S. (2021). Ethical issues of artificial intelligence in medicine and healthcare. *Iranian Journal of Public Health*, 50(Suppl 1), i–v.
<https://ijph.tums.ac.ir/index.php/ijph/article/view/26591>
- Hu Chen, Hong Li, Yijiao Zhao, Jianjiang Zhao, et Yong Wang. « Dental Disease Detection on Periapical Radiographs Based on Deep Convolutional Neural Networks ». *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 16, n° 4 (avril 2021): 649-61. <https://doi.org/10.1007/s11548-021-02319-y>.
- Hung, Man, Maren W. Voss, Megan N. Rosales, Wei Li, Weicong Su, Julie Xu, Jerry Bounsanga, Bianca Ruiz-Negrón, Evelyn Lauren, et Frank W. Licari. « Application of Machine Learning for Diagnostic Prediction of Root Caries ». *Gerodontology* 36, n° 4 (décembre 2019): 395-404. <https://doi.org/10.1111/ger.12432>.
- Johari, Masume, Farzad Esmaeili, Alireza Andalib, Shabnam Garjani, et Hamidreza Saberhari. « Detection of Vertical Root Fractures in Intact and Endodontically Treated Premolar Teeth by Designing a Probabilistic Neural Network: An Ex Vivo Study ». *Dento Maxillo Facial Radiology* 46, n° 2 (février 2017): 20160107.
<https://doi.org/10.1259/dmfr.20160107>.
- Karakuş, Rabia, Muhammet Üsame Öziç, et Melek Tassoker. « AI-Assisted Detection of Interproximal, Occlusal, and Secondary Caries on Bite-Wing Radiographs: A Single-Shot Deep Learning Approach ». *Journal of Imaging Informatics in Medicine*, 14 mai 2024.
<https://doi.org/10.1007/s10278-024-01113-x>.
- Lee, Jae-Hong, Do-Hyung Kim, Seong-Nyum Jeong, et Seong-Ho Choi. « Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm ». *Journal of Dentistry* 77 (1 octobre 2018): 106-11.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2018.07.015>.
- Mário A. Moreira, Virgínia R. Silveira, Frederico B. Sousa, et Bruno C. Sousa. « Prior Restorative Procedures to Endodontic Treatment ». *Cureus* 15, n° 4 (avril 2023): e37106.
<https://doi.org/10.7759/cureus.37106>.
- Mohammad Moharrami, Julie Farmer, Sonica Singhal, Erin Watson, Michael Glogauer, Alistair E W Johnson, Falk Schwendicke, et Carlos Quinonez. « Detecting Dental Caries on Oral Photographs Using Artificial Intelligence: A Systematic Review ». *Oral Diseases* 30, n° 4 (2024): 1765-83. <https://doi.org/10.1111/odi.14659>.
- Mohammad-Rahimi, Hossein, Saeed Reza Motamedian, Mohammad Hossein Rohban, Joachim Krois, Sergio E. Uribe, Erfan Mahmoudinia, Rata Rokhshad, Mohadeseh Nadimi,

- et Falk Schwendicke. « Deep Learning for Caries Detection: A Systematic Review ». *Journal of Dentistry* 122 (juillet 2022): 104115.
<https://doi.org/10.1016/j.ident.2022.104115>.
- Moola S, Munn Z, Tufanaru C, Aromataris E, Sears K, Sfetcu R, et al. *Chapter 5: Systematic reviews of analytical cross sectional studies*. In: Aromataris E, Munn Z, editors. *JBIM Manual for Evidence Synthesis*. Joanna Briggs Institute; 2020.
<https://jbi.global/critical-appraisal-tools>
 - « Multi-modal deep learning for automated assembly of periapical radiographs - PubMed ». Consulté le 1 octobre 2024. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37348642/>.
 - Niharika Bhattacharjee. « Automated Dental Cavity Detection System Using Deep Learning and Explainable AI ». *AMIA Joint Summits on Translational Science Proceedings. AMIA Joint Summits on Translational Science 2022 (2022)*: 140-48.
 - Nour Ammar et Jan Kühnisch. « Diagnostic performance of artificial intelligence-aided caries detection on bitewing radiographs: a systematic review and meta-analysis ». *Japanese Dental Science Review* 60 (1 décembre 2024): 128-36.
<https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2024.02.001>.
 - « Oral Health Data Portal ». <https://www.who.int/data/gho/data/themes/oral-health-data-portal>.
 - Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). *The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews*. *BMJ*, 372,n71. <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>
 - Parsa ForouzeshFar, Ali Asghar Safaei, Foad Ghaderi, et Sedighe Sadat Hashemikamangar. « Dental Caries Diagnosis from Bitewing Images Using Convolutional Neural Networks ». *BMC Oral Health* 24, n° 1 (10 février 2024): 211. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-03973-9>.
 - PRISMA statement. « PRISMA 2020 Flow Diagram ». <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram>.
 - Rahman, Husna Abdul, Sulaiman Wadi Harun, Hamzah Arof, Ninik Irawati, Ismail Musirin, Fatimah Ibrahim, et Harith Ahmad. « Classification of Reflected Signals from Cavitated Tooth Surfaces Using an Artificial Intelligence Technique Incorporating a Fiber Optic Displacement Sensor ». *Journal of Biomedical Optics* 19, n° 5 (mai 2014): 057009.
<https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.5.057009>.

- Rasool Esmaeilyfard, Haniyeh Bonyadifard, et Maryam Paknahad. « Dental Caries Detection and Classification in CBCT Images Using Deep Learning ». *International Dental Journal* 74, n° 2 (avril 2024): 328-34. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2023.10.003>.
- Saito T, Reitsma JB, Rutjes AWS, Smidt N, Moons KGM, Korevaar DA. *An elaboration on sample size planning for performing a diagnostic accuracy study*. *Diagn Progn Res*. 2022;6(1):12. <https://doi:10.1186/s41512-022-00121-2>
- Schwendicke, Falk, Markus Tzschoppe, et Sebastian Paris. « Radiographic Caries Detection: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Journal of Dentistry* 43, n° 8 (août 2015): 924-33. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2015.02.009>.
- Shtwai Alsubai. « Enhancing Prediction of Tooth Caries Using Significant Features and Multi-Model Classifier ». *PeerJ. Computer Science* 9 (2023): e1631. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1631>.
- Tong Tong Wu, Jin Xiao, Michael B. Sohn, Kevin A. Fiscella, Christie Gilbert, Alex Grier, Ann L. Gill, et Steve R. Gill. « Machine Learning Approach Identified Multi-Platform Factors for Caries Prediction in Child-Mother Dyads ». *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* 11 (2021): 727630. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.727630>.
- Topol, Eric J. « High-Performance Medicine: The Convergence of Human and Artificial Intelligence ». *Nature Medicine* 25, n° 1 (janvier 2019): 44-56. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>.
- Urquhart, O., M.P. Tampi, L. Pilcher, R.L. Slayton, M.W.B. Araujo, M. Fontana, S. Guzmán-Armstrong, et al. « Nonrestorative Treatments for Caries: Systematic Review and Network Meta-analysis ». *Journal of Dental Research* 98, n° 1 (janvier 2019): 14-26. <https://doi.org/10.1177/0022034518800014>.
- V. Geetha, K. S. Aprameya, et Dharam M. Hinduja. « Dental Caries Diagnosis in Digital Radiographs Using Back-Propagation Neural Network ». *Health Information Science and Systems* 8, n° 1 (décembre 2020): 8. <https://doi.org/10.1007/s13755-019-0096-y>.
- Yusuf Bayraktar et Enes Ayan. « Diagnosis of Interproximal Caries Lesions with Deep Convolutional Neural Network in Digital Bitewing Radiographs ». *Clinical Oral Investigations* 26, n° 1 (janvier 2022): 623-32. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04040-1>.

- World Health Organization (WHO). (2025, March 17). Oral Health. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health>

ANNEXE

Grille JBI d'évaluation critique pour les études de précision diagnostique

Évaluateur : _____

Date : _____

Auteur : _____

Année : _____

Numéro d'enregistrement : _____

<u>N° Énoncé</u>	<u>Oui</u>	<u>Non</u>	<u>Inconnu</u>	<u>Non applicable</u>
<u>1 Un échantillon consécutif ou aléatoire de patients a-t-il été inclus ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>2 Un plan d'étude de type cas-témoins a-t-il été évité ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>3 L'étude a-t-elle évité des exclusions inappropriées ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>4 Les résultats du test index ont-ils été interprétés sans connaissance des résultats du test de référence ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>5 Si un seuil a été utilisé, était-il préalablement défini ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>6 Le test de référence est-il susceptible de classifier correctement l'état cible ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>7 Les résultats du test de référence ont-ils été interprétés sans connaissance des résultats du test index ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>8 L'intervalle entre le test index et le test de référence était-il approprié ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>9 Tous les patients ont-ils reçu le même test de référence ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>10 Tous les patients ont-ils été inclus dans l'analyse ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Appréciation globale :

Inclure Exclure Demander des informations complémentaires

Commentaires (y compris la raison d'exclusion) :

Grille JBI d'évaluation critique pour les études transversales analytiques

Évaluateur : _____

Date : _____

Auteur : _____

Année : _____

Numéro d'enregistrement : _____

<u>N° Critère</u>	<u>Oui</u>	<u>Non</u>	<u>Inconnu</u>	<u>Non applicable</u>
<u>1 Les critères d'inclusion dans l'échantillon ont-ils été clairement définis ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>2 Les sujets de l'étude et le contexte ont-ils été décrits en détail ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>3 L'exposition a-t-elle été mesurée de manière valide et fiable ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>4 Des critères objectifs et standardisés ont-ils été utilisés pour mesurer l'état de santé étudié ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>5 Les facteurs de confusion ont-ils été identifiés ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>6 Des stratégies pour gérer les facteurs de confusion ont-elles été décrites ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>7 Les résultats ont-ils été mesurés de manière valide et fiable ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<u>8 Une analyse statistique appropriée a-t-elle été utilisée ?</u>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Appréciation globale :

Inclure Exclure Demander des informations complémentaires

Commentaires (y compris la raison d'exclusion) :

**APPLICATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LA DETECTION ET LE DIAGNOSTIC DES
LÉSIONS CARIEUSES : UNE REVUE SYSTEMATIQUE DE LA LITTERATURE.**

RESUME EN FRANÇAIS :

Tout en soulignant les défis techniques, méthodologiques et éthiques, ce travail ouvre la voie à une intégration raisonnée de l'IA dans la pratique clinique quotidienne. Cette thèse explore le potentiel de l'intelligence artificielle dans la détection et le diagnostic des lésions carieuses, à travers une revue systématique des travaux récents. Elle met en lumière l'évolution rapide des technologies numériques en odontologie et interroge leur place dans le parcours de soins.

**ENGLISH TITLE : APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DETECTION AND
DIAGNOSIS OF CARIOUS LESIONS: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE LITERATURE.**

ENGLISH ABSTRACT :

While highlighting the technical, methodological, and ethical challenges, this work paves the way for a reasoned integration of AI into daily clinical practice. This thesis explores the potential of artificial intelligence in the detection and diagnosis of carious lesions through a systematic review of recent studies. It sheds light on the rapid evolution of digital technologies in dentistry and questions their role within the patient care pathway.

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie dentaire

MOTS-CLES : Intelligence artificielle (IA), apprentissage automatique (Machine Learning), apprentissage profond (Deep Learning), réseaux de neurones convolutifs (CNN), diagnostic assisté par ordinateur, lésions carieuses, prévention bucco-dentaire, odontologie numérique

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE :

Université de Toulouse
Faculté de Santé – Département Odontologie : 3 chemin des Maraîchers, 31062 Toulouse
Cedex

Directeur de thèse : Dr CANCEILL Thibault