

MÉMOIRE

Du Certificat d'Etude et de Recherche Approfondies en Implantologie Orale

Année 2025

Présenté et soutenu par BAUER Mathieu

“Utilisation de l'Intelligence Artificielle en Implantologie : Bénéfices et limites”

JURY :

Docteur BEAL Stéphane

Docteur MY Marie Anne

Docteur DA SILVA MARQUES Benjamin

Docteur GARCIA Jérôme

Docteur JAFARLI Sona

Docteur GABAI Michaël

Docteur BATAILLE Romain

Docteur REMEUR Elisabeth

SOMMAIRE

1. L'Intelligence Artificielle : Définition, types et sous-branches.....	3
1.1 Les types d'IA selon les capacités.....	4
1.2. Les types d'IA selon les fonctionnalités.....	4
1.3. Les sous-branches de l'IA.....	5
2. Phase pré-opératoire : diagnostic et planification implantaire.....	6
3. Phase per-opératoire : chirurgie.....	10
3.1. La chirurgie guidée.....	11
3.2. La chirurgie naviguée.....	13
3.3. La chirurgie robotisée.....	14
3.3.1. La chirurgie robotique semi-autonome.....	14
3.3.2. La chirurgie robotique autonome.....	15
4. Phase post-opératoire.....	16
4.1. Prise d'empreinte et conception d'une prothèse implanto-portée.....	16
4.2. Mesure automatisée de la perte osseuse marginale.....	17
4.3. Suivi et pronostic.....	18
5. Défis actuels et perspectives futures.....	18
5.1. Les défis techniques actuels.....	19
5.1.1. Hétérogénéité des banques de données.....	19
5.1.2. Le surapprentissage.....	19
5.1.3. L'effet "boite noire".....	19
5.2. Les enjeux réglementaires et responsabilité médico-légale.....	20
5.2.1. La réglementation européenne.....	20
5.2.2. La responsabilité médico-légale.....	20
5.3. Perspectives.....	21
5.3.1. Foundation models.....	21
5.3.2. La multimodalité.....	21
5.3.3. Le jumeau numérique.....	21
5.3.4. La robotique.....	22
6. Conclusion.....	22

L'Intelligence Artificielle (IA) est à ce jour une révolution scientifique et technologique qui touche la majorité des domaines dont le domaine médical et en particulier l'implantologie dentaire. Sa capacité à traiter, analyser et apprendre de vastes volumes de données ouvre des perspectives considérables dans l'assistanat du praticien et la prise en charge des patients.

C'est dans les années 1950 que les premiers systèmes experts apparaissent, permettant de résoudre, grâce à des règles de logique, des problèmes bien définis. L'Intelligence Artificielle (IA) deviendra officiellement une discipline scientifique en 1956 grâce au scientifique John MacCarthy lors de la conférence de Dartmouth.

L'essor de l'IA va connaître des périodes de stagnations (les « hivers de l'IA ») par manque de puissance de calcul, entraînant une perte de l'engouement et des financements.

L'élan de l'apprentissage automatique (Machine Learning) dans les années 1980 et l'avènement d'Internet et du Big Data dans les années 2000 relancent la recherche autour de l'IA, donnant naissance à l'apprentissage profond (Deep Learning).

C'est dans les années 2010 que l'IA entre dans la vie quotidienne, notamment l'IA générative (production de texte et d'image) et les modèles multimodaux et ainsi dans le domaine médical.

L'implantologie dentaire n'échappe pas à cette avancée technologique et voit donc de nombreuses applications de l'IA dans son domaine. Ce mémoire a pour but d'étudier comment l'IA trouve sa place dans la phase pré-opératoire, per-opératoire et post-opératoire, en mettant en évidence ses bénéfices mais aussi ses limites.

1. L'Intelligence Artificielle : Définition, types et sous-branches

L'intelligence artificielle (IA) désigne l'ensemble des théories et techniques permettant à des systèmes informatiques de reproduire certaines fonctions cognitives humaines comme l'apprentissage, la perception, le raisonnement ou la prise de décision. En implantologie, son objectif est d'assister le clinicien dans l'analyse des données, la planification thérapeutique et le suivi post-opératoire.

1.1 Les types d'IA selon les capacités

IA étroite (faible, Artificial Narrow Intelligence (ANI)) : spécialisée dans une tâche précise (diagnostic assisté, reconnaissances d'images radiologiques)

IA générale (forte, Artificial General Intelligence (AGI)) : Concept théorique, elle peut utiliser des connaissances et compétences apprises précédemment pour accomplir une tâche dans un contexte différent sans requérir d'intervention humaine. Elle tend à se rapprocher de l'intelligence humaine

Super IA (Artificiel Super Intelligence (ASI)) : Strictement théorique, c'est un concept dans lequel l'IA posséderait des capacités cognitives qui surpasseraient les capacités humaines.

1.2. Les types d'IA selon les fonctionnalités

L'IA réactive : forme la plus élémentaire de l'IA, elle répond à des situations spécifiques en suivant des règles prédéfinies. Elle ne peut apprendre et évoluer grâce à ses interactions (ex. Les ChatBot d'un service technique répondant aux questions des clients).

L'IA à mémoire limitée : permet aux systèmes d'apprendre et d'évoluer grâce aux interactions et fournit des réponses plus adaptées. Cependant elle ne peut conserver toutes les données dans le temps, son action est donc valable sur une durée définie. (Ex. : Siri, Alexa, Voitures autonomes, ...).

L'IA à théorie de l'esprit : Concept théorique, elle comprendrait les pensées et les émotions d'autres entités et ainsi adapter sa réponse en fonction du besoin émotionnel et des intentions uniques de son interlocuteur.

L'IA consciente : Théorique elle aussi, si elle se concrétise, elle aurait ses propres besoins, émotions et croyances tout en ayant conscience de sa condition. On la retrouverait dans les applications faisant appel à la Super IA.

1.3. Les sous-branches de l'IA

Le « Machine Learning » permet aux systèmes de reproduire la manière dont les humains apprennent et ainsi analyser ses erreurs et faire évoluer ses réponses et effectuer des tâches de manière autonome.

Les réseaux de neurones artificiels fonctionnent de manière analogue au cerveau humain, en imitant la collaboration des neurones pour détecter des signaux, évaluer différentes possibilités et aboutir à une décision.

Le « Deep Learning » est une sous-branche des réseaux de neurones artificiels qui utilise des architectures complexes (dont les réseaux convolutionnels (CNN)) pour analyser de grandes quantités de données (très utilisé pour les images radiologiques 2D/3D).

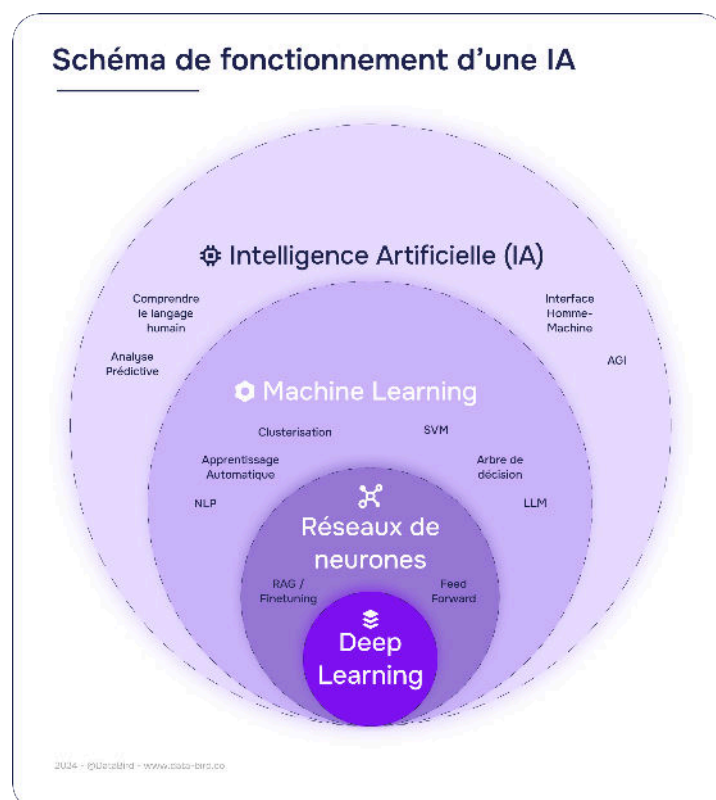


Image 1 : Fonctionnement de l'IA selon ses 3 sous-branches. Image issue du site DataBird, consulté le 10/09/2025. <https://www.data-bird.co/blog/types-ia>

2. Phase pré-opératoire : diagnostic et planification implantaire

La phase initiale dans la prise en charge implantaire d'un patient est la pose d'un diagnostic précis et réfléchi : l'analyse intra-orale du patient nous amène à vérifier certains éléments comme l'espace disponible au niveau de l'édentement, la position des dents adjacentes et antagonistes ou encore la qualité et la quantité de tissus mous disponibles tandis que l'analyse radiologique à travers l'imagerie 2D (panoramique et rétro-alvéolaire) et 3D (Cone Beam Computed Tomography) nous permet de mettre en évidence au niveau du ou des sites étudiés les volumes osseux mais aussi les rapports et pièges anatomiques.

Une fois le diagnostic posé et validé, il faut réaliser la planification implantaire qui va nous permettre de mettre en place un plan de traitement en fonction des différents éléments relevés dans la phase de diagnostic. En effet, cette étape nous permet de choisir le nombre d'implants, leur longueur, leur diamètre, leur position et leur orientation dans les 3 plans de l'espace en fonction du projet prothétique prévu (utilisation des Wax up numériques pour la projection des futures prothèses).

L'IA trouve son application dans cette première phase. On la retrouve dans la segmentation des images 3D du CBCT, dans l'estimation de la qualité osseuse, la volumétrie et ainsi l'aide au choix du site ainsi que du diamètre et de la longueur de l'implant et enfin dans l'aide à la décision, notamment dans la prédiction des échecs opératoires ou risques de péri-implantite et dans l'aide à l'identification de systèmes implantaires.

En implantologie dentaire, l'imagerie de référence est le Cone Beam Computed Tomography (CBCT). Elle permet la production d'images 3D, notamment des volumes osseux disponibles mais aussi des éléments anatomiques entourant le ou les sites opératoires envisagés (dents adjacentes, nerf alvéolaire inférieur, sinus maxillaires), qui permettent une planification fiable des implants.

Lors de la planification implantaire, le chirurgien dentiste va devoir dans un premier temps segmenter les images obtenues afin de localiser certains éléments anatomiques puis va devoir analyser le volume osseux disponible afin de déterminer la longueur et le diamètre de l'implant mais aussi sa position et son axe tout en

tenant compte du contexte biomécanique (répartition des forces occlusales, nécessité d'un ancrage plus important comme un ancrage cortical) et du projet prothétique.

La segmentation des images 3D a pour but de délimiter automatiquement des structures d'intérêts afin de pouvoir étudier de la manière la plus précise le positionnement des implants sans risque.

Parmi les éléments anatomiques visibles sur les images du CBCT, les plus importants lors d'une étude implantaire sont :

- Le nerf alvéolaire inférieur : bien qu'invisible directement sur les images radiologiques car radioclaire, on peut repérer la position du canal mandibulaire et ainsi en déduire la position de ce nerf. Sa position doit être connue lors de la pose d'implants en région mandibulaire pour éviter toute lésion de celui-ci.
- Le sinus maxillaire : la paroi inférieure du sinus maxillaire est facilement identifiable sur les images radiologiques 3D, sa position permettant de décider de la position des implants en zone postérieure maxillaire et de la nécessité ou non d'une élévation du volume osseux et la technique à utiliser.
- Le volume osseux dans son ensemble : élément indispensable au choix du site implantaire mais aussi du diamètre, de la longueur, de l'orientation de ou des implants choisis. Cela permet d'apprécier le type osseux et d'adapter la technique de forage.
- Les dents adjacentes : la position des racines et leur angulation doivent être étudiées pour éviter toute lésion de celles-ci lors du forage.

Cette étude globale est jusqu'alors réalisée de manière manuelle et s'avère être chronophage mais aussi soumise à une variabilité inter-opérateur. Ainsi, l'intégration de l'IA (notamment en Deep Learning¹) dans cette étape permet de proposer une automatisation de la segmentation afin de la fiabiliser.

L'utilisation des Réseaux de Neurones Convolutionnels (CNN) avec des architectures de type U-Net 2D/3D (système permettant d'analyser des détails très précis tout en les associant à des informations contextuelles, il a été initialement créé pour l'analyse radiologique médicale et notamment l'isolation de structures anatomiques²) permet une segmentation volumique et une détection précise ses structures complexes tout en diminuant les erreurs humaines de segmentation.

Lin X. , Xin W, Huang J. et al. publient en 2023 dans la revue scientifique BMC Oral Health une étude qui compare la segmentation du canal mandibulaire de 220 CBCT faite d'une part par deux dentistes expérimentés (appelés "senior dentist" dans leur article) et d'autre part par un automate de segmentation utilisant une double architecture U-Net 3D³ : on retrouve un Dice Similarity Coefficient moyen de 0,875 +/- 0,045 et un Distance de Hausdorff⁴ de 0,442+/- 0,379.

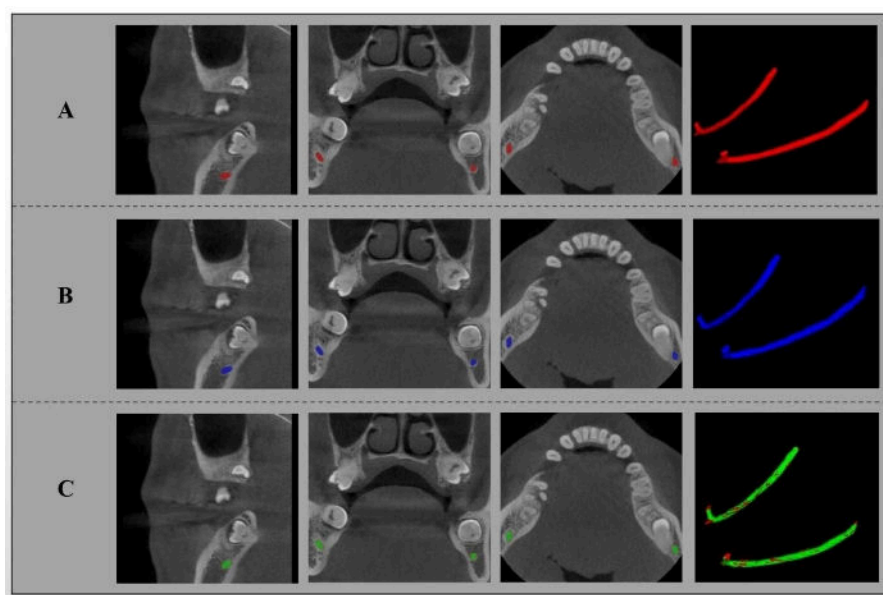


Image 2 : (A) résultat de segmentation avec l'IA (rouge) ; (B) résultat de segmentation manuelle (bleu) ; (C) régions superposées (vertes) et non superposées (rouge) de A et B. Sagittal (première colonne), coronal (deuxième colonne), axial (troisième colonne), modèles 3D du canal mandibulaire (quatrième colonne) - Lin, X., Xin, W., Huang, J. et al. *Accurate mandibular canal segmentation of dental CBCT using a two-stage 3D-UNet based segmentation framework. BMC Oral Health* 23, 551 (2023)

Ainsi l'intégration de l'IA dans cette étape de la thérapeutique implantaire permet premièrement une standardisation de la segmentation et de ce fait permet de diminuer les variations inter-opérateurs.

D'autre part, elle entraîne un gain de temps considérable. Cui et al. publient dans le journal Nature Communications⁵ une étude évaluant un système d'IA visant à segmenter 4938 CBCT issues d'une banque de données de 15 centres en comparant sa précision et sa rapidité d'exécution à des radiologues expérimentés. Ils ont démontré une rapidité d'exécution 500 fois plus rapide pour l'IA.

Un des éléments décisionnaire quant à la faisabilité d'un traitement implantaire est le site osseux tant par son volume que sa densité. En effet, la hauteur, l'épaisseur et la densité osseuse vont conditionner le choix du type d'implant que l'on va utiliser (selon son diamètre et sa longueur) et le site d'implantation. On va pouvoir aussi déterminer si l'on a besoin de réaliser une technique de régénération osseuse. Le praticien effectue plusieurs mesures afin de quantifier l'os disponible sur le site choisi. Bayrakdar S. et al⁶ ont mené une étude publiée dans BMC Medical Imaging qui évalue le taux de succès de l'IA dans la planification implantaire : il n'a pas été relevé de différence significative entre les mesures de hauteur d'os faites par l'IA et par des mesures manuelles. Cependant, il y a une différence significative sur les mesures de l'épaisseur osseuse.

La densité osseuse, qui est un facteur déterminant dans la stabilité primaire d'un implant (et par extension du succès à long terme), n'est pas directement mesurable sur des images du CBCT contrairement aux images issues d'un scanner (grâce à l'échelle de Hounsfield). L'IA pourrait estimer une densité relative à partir des images fournies et d'une banque de données en Deep Learning. A ce jour, aucun système n'a encore été mis au point.

L'IA peut alors se révéler être une aide aux différents choix lors de la planification : lors du choix du site implantaire en proposant des sites optimaux en prenant en compte les éléments anatomiques et lors du choix de la longueur et du diamètre de l'implant en fonction du volume osseux disponible.

Plusieurs applications de planification implantaire utilisant l'IA ont vu le jour. Un des logiciels le plus utilisé à ce jour est **BlueSkyPlan** qui fonctionne sur le système de Deep Learning : il se "nourrit" de toutes les données qui lui sont soumises afin d'augmenter sa précision.

Il permet la détection automatique du nerf alvéolaire inférieur et des sinus maxillaires mais aussi la simulation de la pose de l'implant associée à la projection de la future couronne tout en vérifiant que l'on respecte les distances requises (par exemple au moins 1,5mm entre une dent et un implant) et que l'on interfère pas avec un élément anatomique. Il peut aussi matcher l'empreinte optique avec les images du CBCT et ainsi potentialiser la visualisation du futur projet implanto-prothétique.

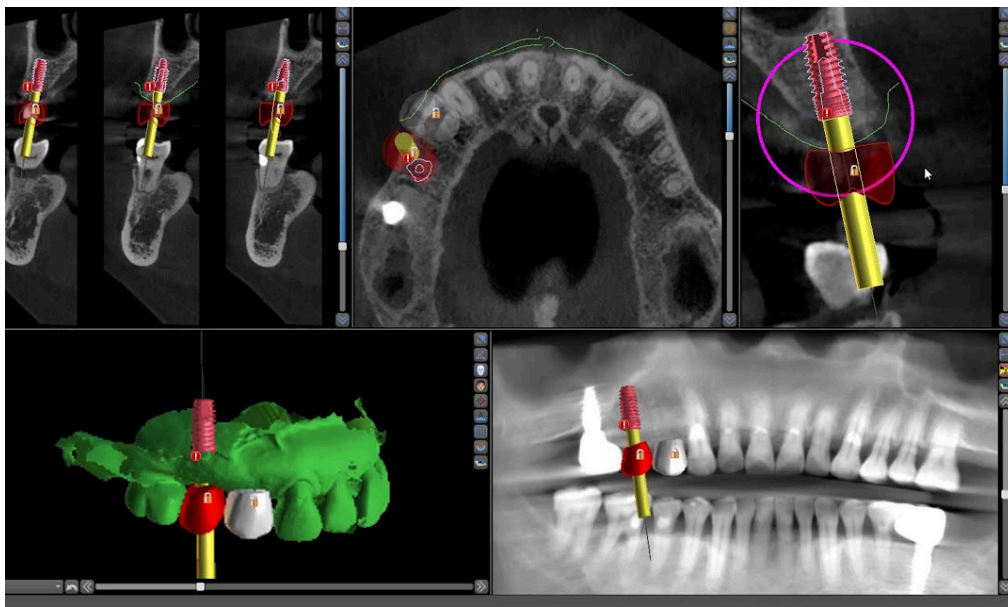


Image 3 : Exemple d'une planification implantaire sur le logiciel BlueSkyPlan

L'association de l'IA et de la réalité augmentée permet aux chirurgiens dentistes de pouvoir simuler la chirurgie planifiée et ainsi acquérir de l'expérience et de la dextérité afin d'offrir à leur patient des interventions complexes de plus en plus sécurisées.

3. Phase per-opératoire : chirurgie

Une fois la segmentation des images du CBCT et la planification implantaire faite, la phase chirurgicale peut être mise en place. Le praticien, à l'aide des éléments relevés dans la phase pré-opératoire, peut poser le ou les implants choisis au niveau des sites osseux. Majoritairement, les implants sont posés à main levée : le chirurgien dentiste met en place l'implant selon la position et l'axe déterminés lors

de la planification. Cependant cette technique de pose est soumise à une variabilité qui peut s'avérer importante entre l'axe optimal déterminé et celui donné à l'implant lors de la pose.

En 2019 Tang.T, Huang.Z et al. publient une étude rétrospective intitulée "Facteurs qui influencent la déviation d'axe dans la pose d'implant à main levée"⁷ : ils étudient l'influence de plusieurs facteurs (présence ou absence d'une dent adjacente, nombre de dents absentes, localisation du site d'implantation) dans la pose de 112 implants répartis entre 75 patients par le même chirurgien dentiste. Les résultats sont un écart de position coronaire de 1,22 +/- 0,63mm, un écart de position apicale de 1,91 +/- 1,17mm et un écart d'axe de 7,93 +/- 5,56°.

Ces résultats ont amené au développement d'outils permettant de limiter au maximum cette variabilité, en y intégrant notamment l'IA : la chirurgie guidée (avec un guide chirurgical), la chirurgie naviguée (assistée par ordinateur) et la chirurgie robotisée (autonome avec le système Remebot ou semi-active avec le système Yomi).

3.1. La chirurgie guidée

La chirurgie guidée, aussi appelée chirurgie par guidage statique, permet la pose d'implants à l'aide d'un guide chirurgical réalisé en amont après la planification implantaire.

Grâce à l'intégration de l'IA dans les logiciels de planification, il est possible de faire coïncider les empreintes optiques du patient avec ses images du CBCT afin de voir la projection du projet implantaire. Ainsi le praticien peut commander un guide basé sur la position et l'axe du ou des implants prévus. Le guide, qui peut être à appui dentaire, muqueux ou osseux selon le choix du chirurgien dentiste, est composé de manchons métalliques qui guident les forêts (qui sont plus longs que des forêts classiques pour compenser l'épaisseur du guide).

Cette méthode permet de limiter au maximum la variabilité entre l'axe et la position optimaux décidés lors de la planification et leur valeur réelle. Une étude menée par Chandran K.R.S et al. en 2023⁸ sur 80 implants posés sur 61 patients différents et répartis en deux groupes (chirurgie à main levée et chirurgie guidée).

Paramètre mesuré	Freehand (contrôle)	Chirurgie guidée statique (test)	p-value
Déviat ion corona ire mésio-distale	1,13 ± 0,89 mm	0,34 ± 0,26 mm	< 0,001
Déviat ion corona ire vestibulo-linguale	1,00 ± 0,76 mm	0,37 ± 0,24 mm	0,03
Déviat ion apicale mésio-distale	4,04 ± 1,90 mm	0,97 ± 0,55 mm	0,04
Déviat ion apicale vestibulo-linguale	3,46 ± 1,82 mm	0,94 ± 0,67 mm	0,02
Déviat ion angulaire	6,09° ± 3,23	0,83° ± 0,53	0,02
Écart de profondeur	2,24 ± 1,58 mm	0,66 ± 0,43 mm	0,09

Tableau 1 :Tableau récapitulatif fait pour le mémoire à partir des résultats de l'étude de Chandran K.R.S et al. en 2023 "Accuracy of freehand versus guided immediate implant placement: A randomized controlled trial"

Mis à part l'écart de profondeur d'enfouissement de l'implant qui n'est pas significatif (p-value de 0,9), les autres paramètres montrent que la pose avec un guide permet un positionnement au plus près de la position idéale prévue par la planification implantaire.

Cependant cette technique présente aussi certaines limites et inconvénients.

Premièrement, elle allonge le temps pré-opératoire pour la conception du guide.

Deuxièmement, le praticien se retrouve dépendant de la qualité du guide et de sa bonne adaptation en bouche : le moindre défaut du guide peut entraîner une erreur dans la pose de l'implant conduisant à un décalage par rapport à la planification.

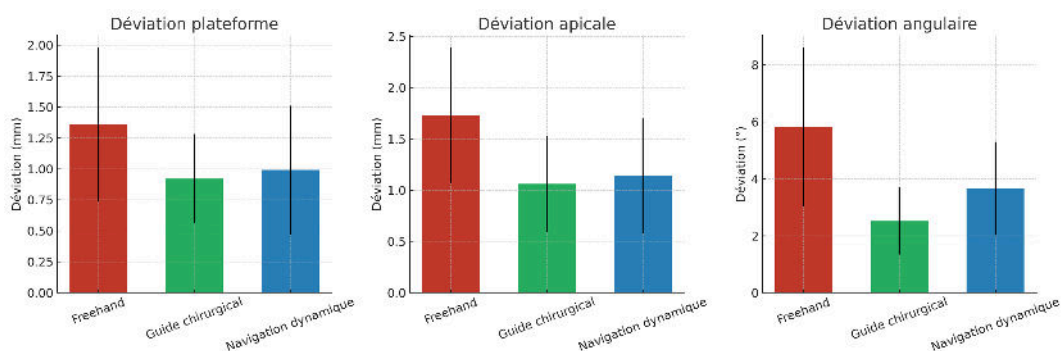
Troisièmement, l'utilisation d'un guide chirurgical entraîne peu de flexibilité per-opératoire : il n'est souvent pas possible d'ajuster le guide in vivo si jamais il y avait une différence entre le scanner et/ou l'empreinte optique et l'anatomie réelle.

Bien qu'il existe un risque d'erreur cumulative entre un mauvais positionnement du guide et un mauvais usinage, la chirurgie guidée se révèle être une option fiable.

3.2. La chirurgie naviguée

La chirurgie naviguée, ou chirurgie guidée assistée par ordinateur, est une technique utilisant des capteurs optiques et un système de télémétrie, permettant de projeter en temps réel sur les images radiologiques 3D la progression du forage et la pose de l'implant. Elle repose sur technologie de localisation spatiale ("motion tracking") : les mouvements sont détectés par des capteurs ou des caméras

Une étude chinoise⁹ a comparé l'écart entre la position coronaire de l'implant, sa position apicale et son axe établis lors de la planification implantaire et lors de la pose selon une pose à main levée (Freehand), une pose avec un guide chirurgical et une pose avec une chirurgie naviguée. La chirurgie guidée et la chirurgie naviguée apparaissent comme plus précise comparées à la chirurgie à main levée (différence significative). Cependant, la chirurgie guidée est plus sûre pour l'angulation de l'implant par rapport à la chirurgie naviguée (différence significative).



Graphique 1 : Graphique élaboré pour le mémoire à partir de l'étude de Younis, H., Lv, C., Xu, B. et al. "Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guides and the freehand approach in implant placement: a prospective clinical study".

La chirurgie naviguée présente aussi certaines limites.

Tout d'abord la courbe d'apprentissage est assez lente, ce qui rend la phase opératoire plus longue dans un premier temps (mais qui devient un avantage une fois maîtrisé avec un gain de temps opératoire).

Ensuite il y a un risque d'erreur dans la calibration ou un risque de perte de suivi des capteurs, ce qui peut entraîner une déviation dans la pose.

Enfin le coût est assez élevé entre l'achat initial et l'entretien (mises à jour).

Parmi les systèmes mis au point, on peut citer le système X-Guide (société Nobel Biocare).

3.3. La chirurgie robotisée

Cette technique allie l'IA et la robotique afin de mettre au point des systèmes totalement autonomes ou alors semi-autonomes.

3.3.1. La chirurgie robotique semi-autonome

Le seul système au point à ce jour et ayant obtenu l'autorisation de la Federal Drug Administration (FDA) pour la pose d'implant dentaire en 2016 et pour la pose d'implants dentaires sur une arcade complète en 2020 est le robot Yomi de la société Neocis.

Dans cette technologie semi-autonome, après avoir fait la planification implantaire de manière conventionnelle, un bras non motorisé du robot est relié à une plaque fixée sur l'os du patient afin que le robot localise la bouche et détecte les mouvements du patient. Une fois le calibrage fait, le praticien utilise un contre-angle relié à un bras articulé qui va guider son mouvement (en émettant une résistance si on sort du trajet et de la position établis lors de la planification) tout en permettant au praticien de garder le contrôle.

Plusieurs études^{10 11} montrent que cette technique permet une précision et une sécurité qui surpassent celles des techniques conventionnelles.

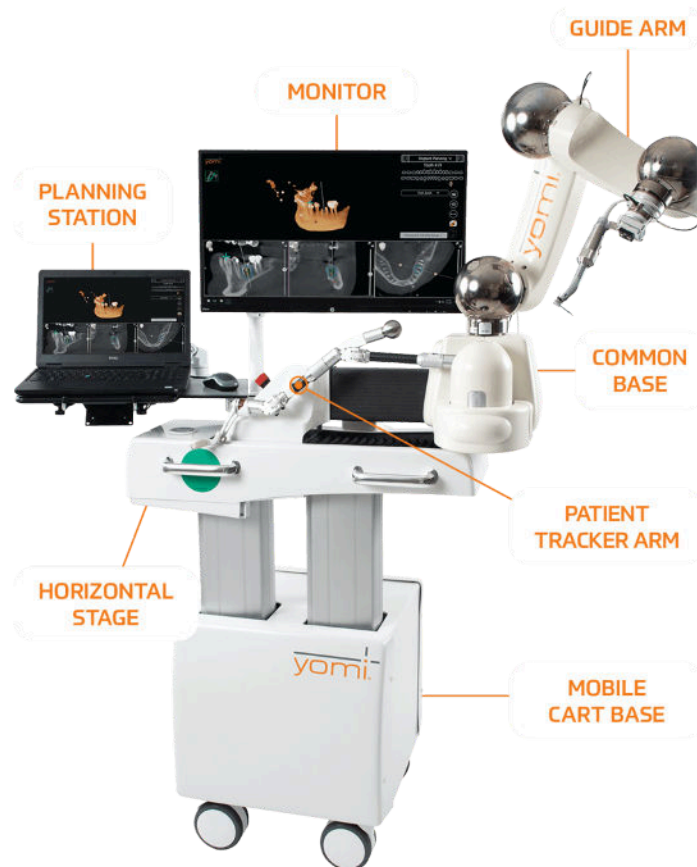


Image 4 : Robot YOMI de la start-up Neocis

3.3.2. La chirurgie robotique autonome

L'évolution rapide de la technologie au service du médical avec l'intégration récurrente de l'IA et l'association à la robotique motive le développement d'une robotique qui serait totalement autonome dans la pose d'implant.

En 2022 des chercheurs chinois réalisent un cas clinique¹² d'un patient ayant eu la mise en charge immédiate de ses implants posés par un robot de manière autonome et les résultats sont prometteurs.

Cependant cette technologie est encore au stade de recherche car elle nécessite la prise en considération de nombreux paramètres qu'ils soient biologiques, éthiques ou déontologiques tout en préservant la sécurité des patients.

4. Phase post-opératoire

La phase post-opératoire est composée de deux étapes : la phase prothétique et la phase de suivi/maintenance.

Avec les avancées technologiques dans les laboratoires de prothèse, la prise d'empreinte et la conception de prothèses implanto-portées font de plus en plus appel aux nouvelles technologies dont l'IA.

Le suivi à court, moyen et long terme associé à une maintenance récurrente et rigoureuse est une étape-clé dans le pronostic des implants posés afin de maximiser la durée de vie d'un implant.

Différents paramètres doivent être contrôlés : la perte osseuse marginale (impactant la stabilité à long terme) et la mesure de la stabilité primaire/secondaire.

Il est aussi important de pouvoir identifier un système implantaire déjà présent, posé par un autre praticien afin d'avoir une réponse thérapeutique adéquate (et notamment pouvoir utiliser l'outillage adapté).

4.1. Prise d'empreinte et conception d'une prothèse implanto-portée

La mise en place d'une prothèse implanto-portée, qu'elle soit faite directement après la pose (mise en charge immédiate) ou différée, nécessite la prise d'empreintes. L'arrivée de la caméra optique dans le matériel accessible pour le chirurgien dentiste a entraîné petit à petit un changement de paradigme et imposé l'empreinte numérique comme technique fiable, reproductible et rapide.

Pour permettre la transmission de tous les paramètres liés à l'implant, on utilise des Scanbodies compatibles avec le système implantaire utilisé qui sont vissés dans l'implant avant la prise d'empreinte puis scannés. L'IA intégrée au logiciel de prise d'empreinte permet de nettoyer l'empreinte en supprimant les artéfacts et les structures inutiles permettant ainsi d'avoir une reproduction la plus précise et la plus fidèle pour la confection de la prothèse.

Au-delà de l'empreinte qui s'est numérisée, la conception et la confection des prothèses se sont aussi améliorées, amenant à l'utilisation de plus en plus importante

de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de la Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO). Ainsi le nombre d'étapes de la chaîne prothétique a diminué tout en améliorant la précisions des prothèses.

Lerner H. et al. ont publié en 2020 une étude rétrospective¹³ visant à étudier des couronnes implanto-portées en zircone monolithique réalisées via un logiciel CAO intégrant l'IA: le taux de succès et de survie se sont révélés très positifs.

4.2. Mesure automatisée de la perte osseuse marginale

La perte osseuse marginale autour de l'implant remet en question le pronostic à long terme de l'implant en impactant sa stabilité. Elle est souvent d'origine biologique (mucosite, péri-implantite)

Cette perte se mesure manuellement sur des examens radiologiques 2D (rétro-alvéolaires) ou 3D (CBCT).



Image 5 : Rétro-alvéolaire d'un implant en place de 12 avec une lyse osseuse importante - Image issue du site de Victory Implants, consulté le 22/09/2025 -

<https://victoryimplants.fr/articles-scientifiques/peri-implantites-etat-de-surface-lisse-comme-premier-rempart/>

Cependant ces mesures manuelles sont soumises à une variabilité inter-individuelle et intra-opérateur mais aussi reste une technique chronophage.

L'utilisation de l'IA permet, via des Réseaux Neuronaux Convolutionnels (CNN) qui ont été entraînés via une banque de données de radiographies rétro-alvéolaires, de détecter et mesurer automatiquement la perte osseuse. Une étude de 2022¹⁴ met

en valeur que les mesures réalisées par un système basé sur l'IA sont égales à celle mesurée par un dentiste expérimenté tout en permettant d'obtenir des mesures bien plus rapidement.

4.3. Suivi et pronostic

La maintenance implantaire est obligatoire : elle permet un suivi régulier des implants posés et du contrôle de différents paramètres (hauteur d'os, absence de lésion ou de suintement, absence de douleurs, absence de mobilité, ...). Cela permet de pouvoir anticiper certaines complications. Certains logiciels intégrant l'IA permettent une analyse longitudinale des radiographies du patient afin de fournir une courbe de progression en cas de lyse osseuse et ainsi permettre une prise en charge précoce et éviter une perte de stabilité de l'implant.

La stabilité primaire ou secondaire d'un implant peut être mesurée de manière objective et quantitative grâce à l'Implant Stability Quotient (ISQ) en utilisant la fréquence de résonance : plus la valeur de l'ISQ est élevée (elle va de 0 à 99), plus l'implant est stable.

La recherche dans ce domaine vise à créer des outils permettant l'intégration multimodale¹⁵ : associer des données systémiques (des problèmes de santé par exemple), des données cliniques (profondeur de sondage, indice de plaque, ISQ) et des données radiologiques (2D, 3D) afin de prédire un pronostic à court, moyen et long terme et de fournir une maintenance individualisée.

5. Défis actuels et perspectives futures

L'intégration de l'IA en implantologie fait face à plusieurs limites techniques (hétérogénéité des banques de données, surapprentissage, effet "boîte noire") et à des enjeux réglementaires et de responsabilité mais elle ouvre aussi de nouvelles perspectives intéressantes (Foundation model 3D, multimodalité, jumeau numérique, robotique).

5.1. Les défis techniques actuels

5.1.1. Hétérogénéité des banques de données

La majorité des modèles d'IA utilisés fonctionne en Deep Learning : les réseaux neuronaux artificiels sont conçus pour fonctionner comme le cerveau humain en apprenant à partir de grandes quantités de données.

Les banques de données ne sont pas équilibrées sur plusieurs points :

- Une grande variation dans la qualité des images radiologiques 2D/3D en fonction des appareils, des protocoles ou à cause d'artéfacts.
- Une sous-représentation de certains cas
- Un biais démographique : la majorité des données proviennent d'Europe et d'Amérique du Nord et d'Asie de l'Est)

5.1.2. Le surapprentissage

Un des risques du Deep Learning est le surapprentissage du modèle d'IA : celui ci apprend trop fidèlement les caractéristiques des banques de données qui lui sont fournies (y compris les défauts comme les bruits dus aux artéfacts) et n'arrive pas à généraliser : il perd alors en précision en situation réelle et entraîne une perte de robustesse de ses résultats. C'est en partie lié à l'hétérogénéité des banques de données sus-citée qui ne prépare pas assez les modèles d'IA à toutes les possibilités.

5.1.3. L'effet "boîte noire"

Il y a une certaine opacité décisionnelle des modèles d'IA (surtout ceux utilisant les réseaux neuronaux profonds), il y a très peu d'explications claires sur les mécanismes internes : on parle d'effet "boîte noire".

Cela entraîne un frein dans l'acceptabilité clinique et une perte de confiance des praticiens mais cela pose problème en cas de litige (absence de traçabilité du raisonnement ayant conduit à une décision clinique).

Il existe des techniques d'explicabilité (Explainable Artificial Intelligence (XAI)), qui ont pour but de rendre accessibles les données d'entrée qui ont le plus influencé la prédiction comme la méthode Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM)¹⁶, les cartes d'attention ou les méthodes SHAP (SHapley Additive exPlanations) : elles fournissent au praticien des outils visuels ou statistiques pour comprendre le résultat fourni.

5.2. Les enjeux réglementaires et responsabilité médico-légale

5.2.1. La réglementation européenne

Dans l'Union Européenne, les dispositifs médicaux sont régis par le Règlement UE 2017/745¹⁷, garantissant le bon fonctionnement du marché intérieur des dispositifs médicaux tout en préservant à un niveau élevé la protection de la santé des patients. Cette réglementation reconnaît les logiciels d'IA utilisés à but médical comme des dispositifs médicaux : cela implique donc que tout logiciel médical intégrant l'IA doit obtenir le marquage CE (conformité en termes de fiabilité, performance et sécurité).

De plus, toutes les données médicales d'un patient sont soumises au secret médical et ne peuvent être utilisées sans un consentement éclairé.

Les logiciels d'IA doivent donc respecter le Règlement Général de Protection des Données qui impose une anonymisation/pseudonymisation des données, un droit à l'explication et à une traçabilité des traitements de données.

5.2.2. La responsabilité médico-légale

En cas de litige suite à une erreur (de diagnostic, thérapeutique, ...), la responsabilité peut être partagée entre plusieurs acteurs : le praticien, acteur principal car seul décisionnaire, le fabricant du logiciel pour un défaut de conception/de mise à jour et l'établissement de santé pour un défaut de formation adéquate.

A ce jour la justice reconnaît l'IA comme un outil d'aide¹⁸ et non comme une alternative à la décision du praticien mais ne précise pas comment est partagée la responsabilité.

5.3. Perspectives

Les avancées rapides en matière de technologie et notamment dans le domaine médical laissent penser que l'on va assister à des évolutions majeures en termes d'intégration de l'IA. Certaines innovations se démarquent.

5.3.1. Foundation models

Les foundation models sont des modèles de grands réseaux neuronaux de Deep Learning formés sur des jeux de données massifs qui servent de base pour créer d'autres modèles (contrairement aux modèles d'IA standards qui sont créés à partir de zéro).

En radiologie¹⁹, ils permettraient d'obtenir une segmentation instantanée et universelle des structures anatomiques et réduire ainsi la dépendance aux bases de données locales qui sont limitées.

5.3.2. La multimodalité

C'est l'une des options les plus étudiées car la plus prometteuse : elle aura pour capacité de pouvoir combiner plusieurs sources de données différentes. En implantologie, elle pourrait croiser les images 3D, les photos intra/extra-orales et les empreintes optiques aux autres données cliniques ou systémiques.

5.3.3. Le jumeau numérique

L'idée est de produire un modèle numérique dynamique du patient²⁰ en y intégrant ses données cliniques, biologiques (fumeur, diabète non équilibré) et anatomiques (empreintes optiques, radiographies). Ce modèle se mettrait à jour à chaque nouvelle donnée entrée et pourrait permettre de simuler une évolution future

(risque de péri-implantite, usure ...) et ainsi individualiser les protocoles chirurgicaux et la maintenance.

5.3.4. La robotique

Comme évoqué plus haut avec le robot Yomi ou encore l'étude avec une pose autonome d'un implant par un robot, la robotique est devenue un axe de développement intéressant.

L'entraînement régulier de ce type de robot devrait le mener vers un robot auto-apprenant qui saura améliorer ses capacités et sa sécurité.

6. Conclusion

L'intelligence artificielle a transformé la prise en charge médicale des patients. Dans le domaine de l'implantologie, elle intervient sur toutes les étapes du parcours de soin (pré, per et post-opératoire) : segmentation automatisée des images 3D, évaluation du volume osseux et de la qualité, aide opératoire dans la chirurgie naviguée

Elle apporte de nombreux bénéfices comme la standardisation des procédures, la réduction du temps pré et peropératoire, la réduction des erreurs humaines et l'amélioration de la précision diagnostique et chirurgicale.

Cependant l'IA se heurte encore à des limites techniques (hétérogénéité des banques de données, l'effet "boîte noire", le risque de surapprentissage) mais aussi réglementaires (RGPD, normes européennes, répartition de la responsabilité).

Mais l'IA ouvre aussi de nouvelles perspectives intéressantes : l'utilisation des foundation model pour d'adapter à tout type d'image radiologique, la fusion multimodale et la création du jumeau numérique du patient afin d'obtenir un pronostic personnalisé et enfin la robotique semi ou totalement autonome.

Finalement, l'IA en implantologie doit être considérée comme un outil d'aide à la décision et non comme un substitut. Son intégration doit être raisonnée en alliant

l'expertise du praticien et la puissance de calcul mais laissant le clinicien maître de la décision thérapeutique.

Comme toute innovation médicale, le but reste le même : offrir aux patients une prise en charge thérapeutique plus sûre, plus prédictible et plus individualisée.

Mais au delà de l'implantologie, l'évolution rapide de l'IA bouleverse la pratique dentaire dans son ensemble : elle va impacter la formation initiale et continue des chirurgiens dentistes en proposant des modèles pédagogiques toujours plus représentatifs des différentes situations cliniques mais elle va aussi impacter la thérapeutique odontologique dans son ensemble en mettant à disposition des dispositifs médicaux de plus en plus précis et adaptatifs.

Elle pourrait aussi à plus long terme permettre de développer une dentisterie plus prédictive et personnalisée qui tiendrait compte de l'analyse globale du patient pour fournir une prise en charge plus anticipatrice et centrée sur le patient

1. J. Ker, L. Wang, J. Rao and T. Lim, "Deep Learning Applications in Medical Image Analysis," in IEEE Access, vol. 6, pp. 9375-9389, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2788044.
2. Andrii Chorny, Nov.2024, "What is U-Net Architecture", sur le site Codifinity, consulté le 15 Septembre 2025, <https://codefinity.com/blog/2D-and-3D-U-Net-Architectures>
3. Lin, X., Xin, W., Huang, J. *et al.* Accurate mandibular canal segmentation of dental CBCT using a two-stage 3D-UNet based segmentation framework. *BMC Oral Health* 23, 551 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03279-2>
4. Dubuisson, M. and Jain, A.K. (1994) A Modified Hausdorff Distance for Object Matching. Proceedings of the 12th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Jerusalem, 9-13 October 1994, 566-568. <https://doi.org/10.1109/ICPR.1994.576361>
5. Cui, Z., Fang, Y., Mei, L. *et al.* A fully automatic AI system for tooth and alveolar bone segmentation from cone-beam CT images. *Nat Commun* 13, 2096 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29637-2>
6. Kurt Bayrakdar S, Orhan K, Bayrakdar IS, Bilgir E, Ezhov M, Gusarev M, Shumilov E. A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Med Imaging*. 2021 May 19;21(1):86. doi: 10.1186/s12880-021-00618-z. PMID: 34011314; PMCID: PMC8132372.
7. Tang T, Huang Z, Liao L, Gu X, Zhang J, Zhang X. Factors that Influence Direction Deviation in Freehand Implant Placement. *J Prosthodont*. 2019 Jun;28(5):511-518. doi: 10.1111/jopr.13065. Epub 2019 May 8. PMID: 30994948.
8. Chandran K R S, Goyal M, Mittal N, George JS. Accuracy of freehand versus guided immediate implant placement: A randomized controlled trial. *J Dent*. 2023

Sep;136:104620. doi: 10.1016/j.jdent.2023.104620. Epub 2023 Jul 15. PMID: 37454788.

9. Younis, H., Lv, C., Xu, B. *et al.* Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guides and the freehand approach in implant placement: a prospective clinical study. *Head Face Med* 20, 30 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13005-024-00433-1>

10. Bolding SL, Reebye UN. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches. *J Prosthet Dent*. 2022;128(4):639-647.

11. Neugarten J. Accuracy and precision of haptic robotic-guided implant surgery in a large consecutive series. *J Oral Maxillofac Surg*. 2024;82(4):415–423. doi:10.1016/j.joms.2023.12.012.

12. 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*. 2022 Nov 7;11(21):6594. doi: 10.3390/jcm11216594. PMID: 36362819; PMCID: PMC9654167.

13. Lerner H, Mouhyi J, Admakin O, Mangano F. Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics: a retrospective study of 106 implant-supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior jaws of 90 patients. *BMC Oral Health*. 2020 Mar 19;20(1):80. doi: 10.1186/s12903-020-1062-4. PMID: 32188431; PMCID: PMC7081700.

14. 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*. 2022 Jan 16;22(1):11. doi: 10.1186/s12903-021-02035-8. PMID: 35034611; PMCID: PMC8762847.

15. Huang, Y., Liu, W., Yao, C. *et al.* A multimodal dental dataset facilitating machine learning research and clinic services. *Sci Data* 11, 1291 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04130-1>

16. Sukegawa S, Yoshii K, Hara T, Tanaka F, Yamashita K, Kagaya T, Nakano K, Takabatake K, Kawai H, Nagatsuka H, Furuki Y. Is attention branch network effective in classifying dental implants from panoramic radiograph images by deep learning? PLoS One. 2022 Jul 27;17(7):e0269016. doi: 10.1371/journal.pone.0269016. PMID: 35895591; PMCID: PMC9328496.

17. Règlement (UE) 2017/745 du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2017 relatif aux dispositifs médicaux, modifiant la directive 2001/83/CE, le règlement (CE) n° 178/2002 et le règlement (CE) n° 1223/2009 et abrogeant les directives du Conseil 90/385/CEE et 93/42/CEE (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE.). JO L 117 du 5.5.2017, p. 1-175 (BG, ES, CS, DA, DE, ET, EL, EN, FR, GA, HR, IT, LV, LT, HU, MT, NL, PL, PT, RO, SK, SL, FI, SV)

18. Cestonaro C, Delicati A, Marcante B, Caenazzo L, Tozzo P. Defining medical liability when artificial intelligence is applied on diagnostic algorithms: a systematic review. Front Med (Lausanne). 2023 Nov 27;10:1305756. doi: 10.3389/fmed.2023.1305756. PMID: 38089864; PMCID: PMC10711067.

19. Magdalini Paschali, Zhihong Chen, Louis Blankemeier, Maya Varma, Alaa Youssef, Christian Bluethgen, Curtis Langlotz, Sergios Gatidis, and Akshay Chaudhari. Foundation Models in Radiology: What, How, Why, and Why Not. Radiology 2025 314:2

20. Ahn, S.; Kim, J.; Baek, S.; Kim, C.; Jang, H.; Lee, S. Toward Digital Twin Development for Implant Placement Planning Using a Parametric Reduced-Order Model. *Bioengineering* 2024, 11, 84.

BAUER Mathieu - "Utilisation de l'Intelligence Artificielle en Implantologie : Bénéfices et Limites"

L'intelligence artificielle (IA) regroupe des techniques permettant à des systèmes d'imiter des fonctions cognitives humaines afin d'assister le clinicien en implantologie pour l'analyse, la planification et le suivi. On distingue l'IA étroite (ANI), opérationnelle aujourd'hui, des formes théoriques d'IA générale (AGI) et de super IA (ASI). Par fonctionnalités, on oppose IA réactive, à mémoire limitée, et concepts encore hypothétiques (théorie de l'esprit, IA consciente). Ses sous-branches clés sont le machine learning, les réseaux de neurones et le deep learning (notamment CNN pour imagerie 2D/3D). En phase pré-opératoire, l'IA segmente le CBCT, estime volumes et qualité osseux et aide au choix du site, de la longueur et du diamètre implantaires. En per-opératoire, elle soutient chirurgie guidée, navigation et robotique, réduisant les déviations par rapport à la pose main levée. En post-opératoire, elle mesure automatiquement la perte osseuse marginale, intègre l'ISQ et favorise un pronostic longitudinal. Mais elle présente certaines limites : hétérogénéité des données, surapprentissage, « boîte noire », enjeux RGPD/Règlementation. Ses perspectives : foundation models 3D, multimodalité, jumeaux numériques, robotique.

Mots clés : Intelligence artificielle ; Implantologie dentaire ; Planification chirurgicale ; Chirurgie guidée et robot-assistée ; Suivi post-opératoire ; Deep learning ; Analyse radiologique

Keywords : Artificial Intelligence; Dental Implantology; Surgical Planning; Guided and Robot-Assisted Surgery; Postoperative Follow-up; Deep Learning; Radiological Analysis

Auteur : BAUER Mathieu - 3 rue Jean Aicard, 34500 BEZIERS