

# Développements de l'intelligence artificielle en implantologie orale

## État de la littérature scientifique

LOUIS LE HÉRON

**RÉSUMÉ** Les développements récents de l'intelligence artificielle ont été intégrés dans de nombreux domaines d'activité, dont celui de la santé. En implantologie orale, l'analyse de la littérature récente permet de souligner les principaux axes du développement actuel de cette technologie en matière d'ingénierie, de diagnostic et de pronostic, d'aide à la décision ainsi que d'assistance opératoire.

### Development of artificial intelligence in oral implantology: state of the scientific literature

**ABSTRACT** Recent developments in artificial intelligence have been integrated into many fields of activity including that of health. In oral implantology, the analysis of recent literature highlights the main axes of the current development of this technology in terms of engineering, diagnosis and prognosis, decision support as well as operating assistance.

**MOTS CLÉS:** Intelligence artificielle • algorithme • implantologie orale.

**KEYWORDS:** Artificial intelligence • algorithm • oral implantology.

### Introduction

L'intelligence artificielle (IA) est un concept ancien qui prend forme dès la fin de la Seconde Guerre mondiale avec la recherche du fonctionnement de l'intelligence humaine<sup>[1]</sup>.

Par définition<sup>[2]</sup>, l'IA représente un ensemble des théories et techniques développées en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine. Elle fait appel à des domaines tels que les sciences cognitives, la neurobiologie computationnelle, l'informatique et les mathématiques. Son objectif est la résolution de problèmes à forte complexité logique, pouvant imiter ou remplacer l'homme dans certaines mises en œuvre de ses fonctions cognitives. Historiquement, ce processus a débuté par la compréhension des mécanismes de la pensée<sup>[3-6]</sup> ainsi que par les progrès en mathématiques, dans le domaine de la logique, reposants sur une structure algébrique et sémantique grâce aux algèbres binaire et booléenne<sup>[7]</sup>.

### Référencement bibliographique

Le Héron L. Développements de l'intelligence artificielle en implantologie orale: état de la littérature scientifique. *Implant* 2020;26:2-7.

### Liens d'intérêts

L'auteur déclare n'avoir aucun lien d'intérêts concernant cet article.

Très succinctement, le principe de fonctionnement de ces machines logiques repose sur une modélisation mathématique. Le perceptron, qui représente l'unité de base de ce modèle, a été conçu comme un neurone artificiel ou formel. Les neurones sont agencés en couches constituant un réseau neuronal artificiel. Schématiquement, au niveau de l'unité de base, les signaux d'entrée sont intégrés dans un calcul mathématique qui génère un résultat ou signal de sortie. Ce signal peut progresser dans les couches du réseau neuronal artificiel complexe ou modifier le fonctionnement des perceptrons adjacents dans et en dehors de sa propre couche. L'association de plusieurs couches, avec des rétroactions inhibitrices ou amplificantes conduit à produire un résultat ou signal de sortie modifiable par le paramétrage plus ou moins autonome de l'algorithme. Ainsi, un usage répété de l'algorithme, que l'on peut qualifier d'apprentissage machine, permet de faciliter le cheminement et le traitement de l'information, et donc un phénomène de mémorisation.

Par la suite, l'évolution très rapide de l'informatique dans le domaine de l'exploration des données (*data mining*) et leur traitement dans le cadre de données massives (*big data*) ont renforcé l'intérêt pour un système capable de dépasser l'intuition et les capacités humaines d'analyse, surpassant même celles des outils informatiques classiques. Puis, plus récemment, à partir des années 1980, les développements autour de l'IA ont abouti à proposer des machines logiques qui utilisent un apprentissage automatique supervisé (*machine learning*) puis plus autonome (*deep learning*)<sup>[8, 9]</sup>, et enfin complètement autonome dans la progression du traitement logique d'une masse de données à des fins de stratégies complexes, qu'elles soient ludiques ou plus pratiques.

Ainsi, l'ordinateur *Deep Blue*, en battant à plusieurs reprises Garry Kasparov, alors champion du monde d'échecs, est une des premières applications révélant au grand public la portée de ce nouvel algorithme basé sur l'IA<sup>[10]</sup>. Puis d'autres algorithmes ludiques, capables d'enrichir leurs stratégies sans interventions humaines, tels qu'*AlphaGO*<sup>[11]</sup> dans le jeu de GO ou *DeepStack*<sup>[12]</sup> pour le poker, ont été proposés.

Par ailleurs et très rapidement, la médecine s'est révélée une voie de recherche privilégiée pour utiliser l'IA. Une quantité progressivement croissante d'informations médicales disponibles concernant les examens cliniques, biologiques ou techniques est devenue exploitable avec ce type de logiciel d'analyses. Ainsi, le traitement informatisé systématique du génome des tumeurs a permis une meilleure compréhension de la physiopathologie des cancers<sup>[13]</sup>.

De même, dès 2017, l'université de Stanford a développé un algorithme baptisé "*Show and Tell*", qui per-

met une reconnaissance des lésions cutanées par l'analyse d'une image<sup>[14]</sup>.

La médecine bucco-dentaire commence également à bénéficier de ce développement technologique<sup>[15]</sup>. Ainsi, des applications utilisant l'IA commencent à être proposées pour faciliter ou orienter la décision thérapeutique.

À la lumière de la littérature médicale récente concernant l'IA, le but de cet article est de faire un état des lieux quant aux développements et aux perspectives ouvertes dans le domaine de l'implantologie orale.

## Littérature et IA en implantologie orale

### ► Stratégie de recherche bibliographique

Une recherche bibliographique a été effectuée sur les bases de données suivantes, Pubmed, Scopus, Cochrane, en utilisant les mots clef « *Artificial Intelligence* », « *Deep Learning* » en association avec « *Dental Implant\** » sous la forme de l'équation de recherche utilisant les opérateurs booléens AND et OR, sous la forme [(*Artificial Intelligence OR Deep Learning*) AND *Dental Implant\**].

La recherche s'est limitée aux publications accessibles en langue anglaise dans ces bases de données depuis 1999 jusqu'en 2019. Aucun filtre n'a été utilisé.

La stratégie de recherche a permis d'obtenir 72 résultats, se répartissant de la façon suivante :

Concernant la base de données Scopus, 15 résultats sont retrouvés en complément de 45 publications signalées dans PubMed. En revanche, la Cochrane library ne signale aucune contribution.

Douze articles ont été ajoutés après recherche manuelle complémentaire.

Après lecture des titres et résumés, les articles accessibles ont ensuite été retenus si le sujet traité s'est révélé



© LEROUX Frédéric

## REVUE DE LITTÉRATURE

pertinent avec le thème de cette recherche bibliographique consacré spécifiquement à l'implantologie orale. Les préfaces d'ouvrages scientifiques, les tribunes ou éditoriaux de revues ont été exclus.

À la fin du processus de sélection, seules 32 publications ont été retenues dans cette synthèse de la littérature (TABLEAU 1) :

- 13 provenant de Pubmed<sup>[17, 20, 23, 24, 30, 31, 34, 37, 38, 40, 45, 47, 48]</sup> ;
- 7 provenant de Scopus<sup>[18, 19, 21, 27, 32, 36, 46]</sup> ;
- 1 commune aux deux bases de données<sup>[25]</sup> ;
- 11 provenant d'une recherche manuelle<sup>[16, 22, 26, 28, 33, 35, 39, 41-44]</sup>.

Les publications retenues sur la période 2009-2019 peuvent être catégorisées selon 5 axes principaux concernant l'utilisation, les développements de l'IA ainsi que les perspectives ouvertes dans le domaine de l'implantologie orale.

Ainsi, 6 publications concernent le domaine de l'ingénierie et du développement industriel implantaire, 7 sont en rapport avec l'analyse d'images radiographiques, 7 proposent des outils d'analyse contextuelle visant à mettre en évidence des corrélations prospectives, 9 concernent la chirurgie guidée dynamique, et 3 la robotisation en chirurgie implantaire.

### ► Analyse et synthèse des résultats obtenus

#### ■ Ingénierie et implants dentaires

La conception industrielle et l'évolution de l'architecture des implants dentaires ainsi que celle des pièces prothétiques reposent en partie sur des simulations biomécaniques basées sur des modélisations mathématiques. La création de ces modèles (bio)mécaniques complexes nécessite l'intégration de nombreuses données liées aux matériaux des pièces, à leur assemblage, leur géométrie, à leur état de surface ainsi qu'à celles de l'environnement dans lequel elles sont soumises à diverses contraintes. Les modèles mathématiques linéaires utilisés fréquemment, comme la modélisation par éléments finis, ne peuvent exploiter qu'une partie limitée des données propres aux systèmes mécaniques étudiés.

Le *deep learning* propre à ces algorithmes développés grâce à l'IA a permis d'augmenter le « réalisme » des modèles mathématiques<sup>[16]</sup>. Les réseaux convolutifs permettent de prendre en compte un très grand nombre de données spécifiques à la situation étudiée et d'adapter au plus près les caractéristiques implantaire à une situation clinique particulière, permettant ainsi de diminuer la contrainte résultante au niveau de l'interface os/implant dans ce contexte précis<sup>[17]</sup>.

Ainsi, en 2018, Roy *et al.* rapportent avoir déterminé les caractéristiques optimales d'un implant, en termes de dimensions et d'état de surface, par modélisation mathématique en fonction des examens d'imagerie analysés par l'algorithme<sup>[18]</sup>.

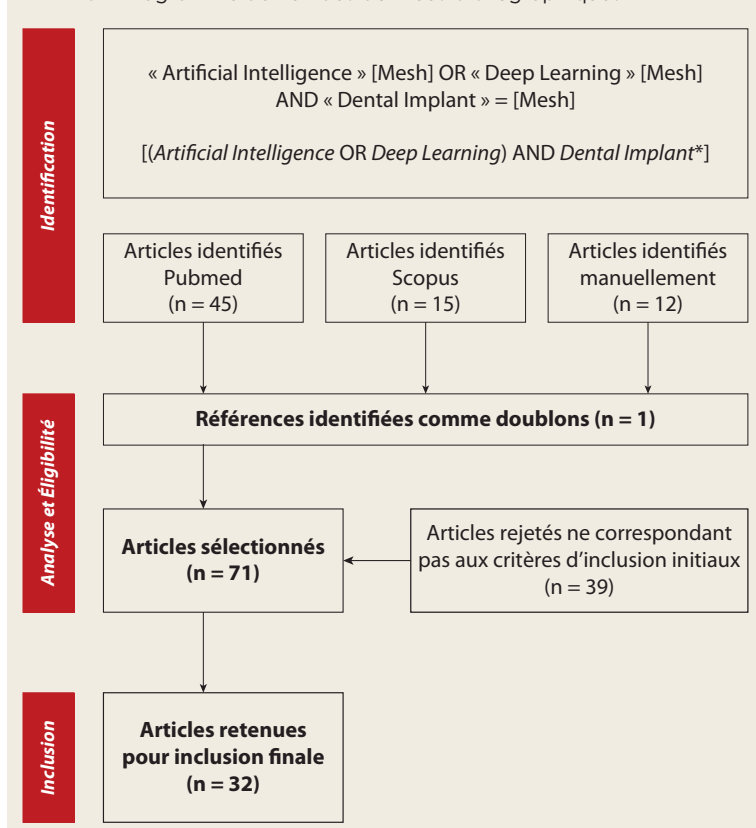
De même, grâce à l'amélioration de la modélisation mathématique, les résultats des travaux de Wang *et al.* ont montré l'incidence de la conicité des piliers prothétiques sur la résistance à la fracture des implants dentaires. D'après les auteurs, l'augmentation de la conicité du pilier pourrait augmenter de manière significative la résistance à la fracture de l'implant<sup>[19]</sup>.

La mesure puis la modélisation des contraintes imposées par un robot aux différentes interfaces implantaire (entre composants prothétiques et au niveau os/implant) ont montré qu'il était possible d'analyser ces contraintes<sup>[20]</sup>.

Une autre étude a également permis de mieux comprendre les effets complexes des différents types de corrosion sous contraintes mécaniques qui s'exercent au niveau des interfaces<sup>[21]</sup>.

Les 6 articles regroupés dans ce premier chapitre décrivent l'intérêt de l'optimisation de la conception industrielle que peut apporter l'utilisation de l'IA, notamment par le biais du *deep learning*, sur la modélisation mathématique afin de s'approcher de manière la plus pertinente possible des conditions d'utilisation clinique sans avoir recours, à ce stade, aux essais cliniques.

TABLEAU 1. Diagramme de flux des données bibliographiques.



## ■ Diagnostic implantaire

### ► Analyse du site d'implantation et planification

Différentes publications<sup>[22-24]</sup> rapportent l'utilisation d'une procédure où l'algorithme développé analyse les structures osseuses à partir des acquisitions tomographiques. Dans leurs travaux, les images tomographiques numérisées sont analysées de façon entièrement automatisées, permettant un diagnostic et une planification implantaire plus rapides que lors d'une procédure classique.

Dans la même logique, les travaux de Rueda *et al.* montrent la possibilité d'une caractérisation fine de la corticale, de l'os trabéculaire et de la position des structures nerveuses par une analyse automatisée associant une procédure de seuillage et l'utilisation des filtres. Cette procédure permet d'optimiser le choix de l'implant en termes de dimensions et d'état de surface, avec une marge d'erreur satisfaisante sur le plan clinique<sup>[25]</sup>.

De même, Sehee *et al.* utilisent un algorithme d'apprentissage profond associé à un arbre décisionnel pour déterminer le type de pilier optimal en fonction des données anatomiques du patient. Ce choix est réalisé à partir d'une carte cognitive reposant sur les connaissances d'un expert, renforcées par un raisonnement fondé sur l'apprentissage de cas<sup>[26]</sup>.

### ► Reconnaissance implantaire

L'utilisation de logiciels accessibles par internet et utilisant une simple arborescence logique (« IRIDium » ou « What implant is that »)<sup>[27]</sup> afin d'identifier la marque d'un implant inconnu par l'intermédiaire de quelques caractéristiques architecturales visibles cliniquement et radiologiquement se révèle souvent une procédure décevante. En effet, la croissance exponentielle du nombre d'implants sur le marché mondial ainsi que les difficultés de reconnaissance radiographique des particularités architecturales implantaires compliquent d'autant la procédure d'identification.

Dès 2015, Morais *et al.* ont proposé un outil de reconnaissance implantaire utilisant l'IA, reposant sur un apprentissage supervisé effectué sur une base de 601 implants. D'après les auteurs, l'algorithme de reconnaissance automatique permettrait d'obtenir un taux de reconnaissance de 91% des cas présentés<sup>[28]</sup>.

Sur un principe similaire, on peut citer le site Spotimplant pour une version francophone<sup>[29]</sup>.

Ces 7 publications décrivent l'utilisation de l'analyse d'image, qui est l'une des applications les plus évoluées actuellement dans le domaine de l'IA appliquée à la médecine<sup>[16]</sup>. Néanmoins, tout comme pour les logiciels antérieurs d'arborescence logique, la performance de ces nouveaux algorithmes est directement dépendante de la quantité de données sur laquelle repose l'apprentissage du programme informatique<sup>[11]</sup>.

## ■ Pronostic dentaire et décision d'implantation

En parodontologie, l'IA a été utilisée également dans l'analyse de clichés rétro-alvéolaires. L'apprentissage supervisé avec un réseau convolutif permet une aide au pronostic des dents compromises par la pathologie parodontale. Le niveau d'attache est analysé radiologiquement et corrélé au potentiel de survie de la dent. Ainsi, d'après Lee *et al.*, l'utilisation en routine de la prédiction par leur algorithme est possible pour déterminer les dents compromises sur le plan parodontal. Ils précisent que les performances du système s'améliorent progressivement avec son apprentissage<sup>[30]</sup>.

En matière d'évaluation prospective d'une thérapeutique implantaire, dès 1999, Almog et Heisler ont étudié les critères qu'un ordinateur peut évaluer<sup>[31]</sup>.

Plus récemment, Correia *et al.* proposent d'anticiper la difficulté de la réhabilitation implanto-portée à partir d'un algorithme utilisant l'IA et permettant d'analyser simultanément un nombre important de paramètres cliniques<sup>[32]</sup>.

En 2018, Liu *et al.* rapportent les résultats obtenus à l'aide d'un algorithme permettant une prédictibilité de l'échec implantaire en termes de risque calculé à partir des données contextuelles<sup>[33]</sup>:

- démographiques (âge/genre);
- conditions physiques (maladie générale/cause endettement);
- style de vie (tabagisme/consommation alcoolique/consommation de noix de bétel);
- caractéristiques du chirurgien (spécialité/expérience);
- conditions anatomiques (localisation implantaire/densité osseuse);
- données chirurgicales (protocole/augmentation alvéolaire/augmentation sinusienne);
- données implantaires (système/longueur/largeur);
- données prothétiques (type/angulation pilier/moyen de fixation au pilier).

L'apprentissage de cet algorithme a été effectué sur 1034 implants, dont 13 ont été retirés suite à un échec implantaire, soit un pourcentage de survie de 98,75%. Pour les auteurs, le diamètre de l'implant ainsi que le système implantaire seraient les deux variables les plus corrélées avec l'échec implantaire.

De manière similaire, les résultats de l'étude rétrospective de Papantonopoulos *et al.* montrent l'intérêt de l'analyse des interactions entre différentes variables cliniques dans la perte osseuse péri-implantaire en rapport avec la péri-implantite<sup>[34]</sup>.

Pour ces auteurs, il apparaît que les implants les plus à risque de péri-implantite sont regroupés autour de variables liées à la localisation anatomique, au faible nombre de dents restantes, au score élevé de plaque

## REVUE DE LITTÉRATURE

dentaire, à la gravité de la parodontite initiale, à l'âge et à la présence d'un diabète.

Dans une étude visant à analyser les critères prospectifs de réussite lors d'une prise en charge implantaire, Chiang *et al.* utilisent un arbre décisionnel associé à un algorithme de pondération et de mise en relation des données<sup>[35]</sup>. Les résultats obtenus montrent une amélioration de la spécificité des critères à utiliser. L'IA permettrait ici d'optimiser l'analyse en appréhendant un plus grand nombre de données et de corrélations entre elles.

Dans le cadre du traitement d'un édentement encastré, le choix entre une restauration dento- ou implanto-portée peut être orienté par un processus analytique similaire basé sur l'IA. Ainsi, d'après Mahesh *et al.*, en reprenant les données de nombreuses études cliniques et de méta-analyses de la littérature concernant les deux modalités thérapeutiques en termes de perception du patient, de pérennité du traitement, de complications et de coûts, un algorithme a été utilisé afin de déterminer les variables cliniques prédictives essentielles en fonction de la situation clinique étudiée<sup>[36]</sup>. Pour ces auteurs, la prédisposition à la carie ou à la parodontite, le tabagisme, le diabète, le traitement par biphosphonates de l'ostéoporose et la mauvaise hygiène buccale seraient des facteurs essentiels dans l'orientation du choix entre ces deux options thérapeutiques.

Ces 7 publications, même si leurs conclusions souffrent probablement d'un faible nombre de données analysées, soulignent l'intérêt de l'IA dans une nouvelle approche scientifique de la décision thérapeutique. Il ne s'agit plus seulement d'envisager une démarche hypothético-déductive mais de considérer un ensemble très large de données et d'établir des corrélations significatives entre elles. En ce sens, l'aspect multifactoriel de l'étiologie de la péri-implantite est probablement une problématique d'intérêt essentiel pour ce type d'analyse à visée prospective.

### ■ Réalité augmentée et chirurgie guidée dynamique

L'assistance per-opératoire, utilisant des structures préalablement repérées, permet l'augmentation de la précision des procédures chirurgicales<sup>[37, 38]</sup>.

En 2010, les premiers systèmes de détection automatisée de l'activité chirurgicale reposant sur l'IA ont été développés et décrits dans quelques publications<sup>[39, 40]</sup>. C'est ensuite, avec l'association avec les algorithmes de *deep learning*, que la réalité augmentée a bénéficié d'un nouvel apport. À partir d'un système de localisation, la navigation chirurgicale en temps réel a pu être développée en chirurgie implantaire<sup>[41]</sup>.

Ainsi, en 2015, Chen *et al.* ont décrit un dispositif de visiocasque permettant de guider la chirurgie virtuelle-

ment en utilisant un système de projection en 3D du site opératoire<sup>[42]</sup>.

Plus récemment, ces évolutions concernant la réalité augmentée ont été utilisées dans les systèmes de chirurgie guidée dynamique utilisés en implantologie, tels que les systèmes IGI Dental System® et X-Guide Navigated Dental Implant Surgery® (Nobel Biocare). Ces systèmes d'assistance opératoire développés grâce à l'IA ont pour avantage de dématérialiser les guides chirurgicaux, et de diminuer les difficultés opératoires en rapport avec la mise en place d'un guide physique ou lors d'une faible ouverture buccale. Par ailleurs, ils se révèlent très utiles dans l'apprentissage opératoire des étudiants en formation<sup>[43]</sup>.

Concernant la précision de l'insertion implantaire par rapport à la planification virtuelle, il apparaît que les déviations angulaires sont limitées à 2 ou 3°, et de l'ordre de 0,5 mm au point d'entrée ainsi qu'à l'apex implantaire<sup>[44]</sup>. Néanmoins, une publication étudiant les différences entre chirurgie guidée dynamique et guidage statique par l'intermédiaire d'un guide physique préconise tout de même l'utilisation des techniques classiques pour la majorité des cas, par rapport à leur simplicité d'utilisation et leur coût moindre<sup>[45]</sup>.

### ■ Robotisation

Dans le cadre de l'amélioration de la précision du geste chirurgical par rapport à la planification virtuelle, l'IA a été utilisée également pour proposer une procédure complète de planification et de simulation chirurgicale préopératoire, dont l'acte est réalisé secondairement par un robot. L'IA est nécessaire pour intégrer l'ensemble des données tant chirurgicales que prothétiques nécessaires à la planification complète du cas<sup>[46]</sup>. Ce type d'intervention a été rapporté dans la littérature et, d'après les auteurs, a montré des résultats satisfaisants quant à la précision d'une implantation guidée par un robot à partir d'une planification 3D<sup>[47, 48]</sup>.

Qu'il s'agisse de chirurgie guidée dynamique ou entièrement robotisée, les 12 publications de ces deux derniers chapitres illustrent l'apport de l'IA dans la recherche de l'amélioration de la sécurité et de la qualité de l'acte opératoire. Par l'intégration et l'analyse d'une quantité très importante de données, la planification et la réalisation de l'acte opératoire sont ainsi effectuées en limitant l'imprécision liée à la pratique conventionnelle, tout en éliminant l'erreur humaine décrite sous le nom de « choix absurde ».

## CONCLUSION

Les résultats de cette revue de la littérature consacrée à l'intelligence artificielle appliquée à l'implantologie orale montrent une réelle diversité des applications malgré un nombre limité de publications.



Ainsi, les développements essentiels de l'IA concernent une analyse améliorée de l'imagerie afin de faciliter le diagnostic clinique, le pronostic ainsi que la planification implanta-prothétique, couvrant ainsi tous les champs de l'implantologie.

Les évolutions les plus récentes sont en rapport avec l'assistance opératoire et la possibilité de robotisation des interventions chirurgicales.

Concernant les algorithmes actuels basés sur l'IA, il est essentiel de retenir que, bien plus que les conclusions actuelles des études scientifiques reposant sur un nombre limité de données cliniques collectées, l'amplifica-

tion de l'apprentissage machine en rapport avec l'implémentation progressive des situations étudiées améliore l'analyse simultanée des interrelations entre les variables, renforçant d'autant la qualité ainsi que la pertinence des résultats obtenus.

## Auteur

**Louis Le Héron**

- ▶ DUCICP université Paris 7
- ▶ Hôpital Rothschild (AP-HP)

## BIBLIOGRAPHIE

1. Turing AM. Computing machinery and intelligence. *Mind* 1950;59:433-460.
2. McCarthy J, Minsky ML, Rochester N, Shannon CE. A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence. *AI Magazine* 1955;27:1-13.
3. Aristote. *Organon*. 385-322 av. J.-C.
4. Smith R. Aristotle's logic. *Stanford encyclopedia of philosophy*. Cambridge MA: Stanford Ed., 2000 (nouvelle éd., 2017).
5. Kant E. Critique de la raison pure. 1781.
6. Cordeschi R. Steps toward the synthetic method: symbolic information processing and self-organizing systems in early Artificial Intelligence. In: Husbands P, Holland O, Wheeler M. *The mechanical mind in history*. Cambridge MA: MIT Press, 2008:219-258.
7. Simari GR, Rahwan I. *Argumentation in Artificial Intelligence*. New York: Springer US, 2009.
8. Park WJ, Park JB. History and application of artificial neural networks in dentistry. *Eur J Dent* 2018;12:594-601.
9. Le Cun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature* 2015;521:436-445.
10. Campbell M. Deep blue. *Artificial Intelligence* 2002;134:57-83.
11. Silver D, Schrittwieser J, Simonyan K, Antonoglou I, Huang A, Guez A, Hubert T, et al. Mastering the game of Go without human knowledge. *Nature* 2017;550:354-359.
12. Moravčík M, Schmid M, Burch N, Lisy V, Morrill D, Bard N, Davis T, et al. DeepStack: Expert-level artificial intelligence in heads-up no-limit poker. *Science* 2017;356:508-515.
13. Stratton MR, Campbell PJ, Futreal PA. The cancer genome. *Nature* 2009;458:719-724.
14. Esteve A, Kuprel B, Roberto A, Novoa RA, Ko J, Swetter SM, Blau HM, Thrun S. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature* 2017;542:115-118.
15. Maghsoudi R, Bagheri A, Maghsoudi MT. Diagnosis prediction of lichen planus, leukoplakia and oral squamous cell carcinoma by using an intelligent system based on artificial neural networks. *J Dentomaxillofac Radiol Pathol Surg* 2013;2:2-8.
16. Pirnia P, Duhaime F, Manashti MJ. Machine learning algorithms for applications in geotechnical engineering. In *Geo Edmonton: the 71<sup>st</sup> Canadian Geotechnical Conference and the 13<sup>th</sup> Joint Groundwater Conference*; Edmonton, Canada, 2018.
17. Li H, Shi M, Liu X, Shi Y. Uncertainty optimization of dental implant based on finite element method, global sensitivity analysis and support vector regression. *Proc Inst Mech Eng H* 2019;233:232-243.
18. Roy S, Dey S, Khutia N, Chowdhury AR, Datta S. Design of patient specific dental implant using FE analysis and computational intelligence techniques. *Applied Soft Computing J* 2018;65:272-279.
19. Wang K, Geng J, Jones D, Xu W. Comparison of the fracture resistance of dental implants with different abutment taper angles. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 2016;63:164-171.
20. Wang L, Sadler JP, Breeding LC, Dixon DL. An in vitro study of implant-tooth-supported connections using a robot test system. *J Biomech Eng* 1999;121:290-297.
21. Zielinski A, Sobieszczyk S. Corrosion and fracture of Ti bioalloys. *Proceeding of 17th European Conference on Fracture 2008. Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures*. Brno: The European Structural Integrity Society, 2008:1225-1232.
22. Zhang S, Xie J, Shi H. Jaw Segmentation from CBCT Images. *IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing*, Shanghai, China, 2019.
23. Wang L, Chen KC, Shi F, Liao S, Li G, Gao Y, Shen SGF, et al. Automated segmentation of CBCT image using spiral CT atlases and convex optimization. *Med Image Comput Comput Assist Interv* 2013;16:251-258.
24. Edinger DH. Instrumental functional diagnostics with the ROSY simulator. *Int J Comput Dent* 2003;6:37-49.
25. Rueda S, Gil JA, Pichery R, Alcañiz M. Automatic segmentation of jaw tissues in CT using active appearance models and semi-automatic landmarking. *Med Image Comput Comput Assist Interv* 2006;9:167-174.
26. Sehee L, Sang-Uk C, Yang J. Development of a fuzzy rule-based decision-making system for evaluating the lifetime of a rubber fender. *Qual Reliab Engineering Intern* 2015;31:811-828.
27. Itic A. Iridium: une aide informatisée à l'identification radiographique des implants dentaires.
28. Morais P, Queiró S, Moreira A, Ferreira A, Ferreira E, et al. Computer-aided recognition of dental implants in X-ray images. *Medical Imaging 2015: Computer-Aided Diagnosis* 2015;9414. *Implant* 2016;22:107-113.
29. Spot implant. Le moteur de recherche d'implants dentaires. [en ligne <https://www.spotimplant.com/fr/>].
30. Lee JH, Kim DH, Jeong SN, Choi SH. Diagnosis and prediction of periodontally compromised teeth using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *J Periodontol Implant Sci* 2018;48:114-123.
31. Almog DM, Heisler EM. Computer intuition: guiding scientific research in imaging and oral implantology. *J Dent Res* 1997;76:1684-1689.
32. Correia V, Correia A, Rocha J. Use of a clinical decision-support system in implant-supported rehabilitations *Biodental Engineering II 2012: proceedings of the 2nd International Conference on Biodental Engineering*, 2012.
33. Liu CH, Lin CJ, Hu YH, You ZH. Predicting the failure of dental implants using supervised learning techniques. *Appl Sci* 2018;8:698.
34. Papantonopoulos G, Gogos C, Housos E, Bountis T, Loos BG. Prediction of individual implant bone levels and the existence of implant "phenotypes". *Clin Oral Implants Res* 2017;28:823-832.
35. Chiang HJ, Tseng CC, Torng CC. A retrospective analysis of prognostic indicators in dental implant therapy using the C50 decision tree algorithm. *J Dent Sci* 2013;8:248-255.
36. Mahesh V, Gurinder W, Nanda A. Evidence based decision making in dentistry using artificial intelligence and axiomatic design principles: fixed denture prosthesis for single crown supported on implant: deciding the best treatment option for single missing tooth. In: Francesco Chiappell ed. *Comparative effectiveness research: new methods, challenges and health implications*. New York: Nova Science, 2016:437-489.
37. Miller RJ, Bier J. Surgical navigation in oral implantology. *Implant Dent* 2006;15:41-47.
38. Fortin T, Champléoux G, Bianchi S, Buatois H, Coudert JL. Precision of transfer of preoperative planning for oral implants based on cone-beam CT-scan images through a robotic drilling machine. *Clin Oral Implants Res* 2002;13:651-656.
39. Katic D, Sudra G, Speidel S, Castrillon-Oberndorfer G, Eggers G, Dillmann R. Knowledge-based situation interpretation for context-aware augmented reality in dental implant surgery. In: *Medical imaging and augmented reality in lectures notes in computer sciences*. Berlin: Springer, 2010:531-540.
40. Schermeier O, Lueth T, Glagau J, Szymanski D, Tita R, Hildebrand D, Klein M, Nelson K, Bier J. Automatic patient registration in computer assisted maxillofacial surgery. *Stud Health Technol Inform* 2002;85:461-467.
41. Nanand N, Nguyen GN. Augmenting dental care: a current perspective. In: *Emerging technologies for health and medicine: virtual reality, augmented reality, artificial intelligence, internet of things, robotics, industry 4.0*. Beverly MA: Wiley-Scrivener, 2018:51-67.
42. Chen X, Xu L, Wang Y, Wang H, Wang F, Zeng X, Wang Q, Egger J. Development of a surgical navigation system based on augmented reality using an optical see-through head-mounted display. *J Biomed Inform* 2015;55:124-131.
43. Durham M, Engel B, Ferrill T, Halford J, Singh TP, Gladwell M. Digitally augmented learning in implant dentistry. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am* 2019;31:387-398.
44. Pellegrino G, Mangano C, Mangano R, Ferri A, Taraschi V, Marchetti C. Augmented reality for dental implantology: a pilot clinical report of two cases. *BMC Oral Health* 2019;19:158.
45. Mischkowski RA, Zinser MJ, Neugebauer J, Kübler AC, Zöller JE. Comparison of static and dynamic computer-assisted guidance methods in implantology. *Int J Comput Dent* 2006;9:23-35.
46. Yang L, Zhou C, Zhou T. Design and implementation of software planning system for dental robot. *IOP Conference Series proceedings Materials Science and Engineering* 2016;435:2-13.
47. Zheng G, Gu L, Wu Z, Huang Y, Kang L. The implementation of an integrated computer-aided system for dental implantology. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2008;58-61.
48. Sun X, McKenzie FD, Bawab S, Li J, Yoon Y, Huang JK. Automated dental implantation using image-guided robotics: registration results. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2011;6:627-634.