

Chirurgie orthopédique et traumatologique : quels progrès technologiques à l'ère du numérique ?

Orthopedics and traumatology surgery: what technological advances in the digital age?

Fanny Arnaud¹, Marc-Olivier Gauci², Edith Galy³

¹ LAPCOS, Université Côte d'Azur, fanny.arnaud@univ-cotedazur.fr

² Equipe Icare, IBV, Inserm, Université Côte d'Azur, gauci.mo@chu-nice.fr

³ Université Côte d'Azur, edith.galy@univ-cotedazur.fr

RÉSUMÉ. L'innovation dans le domaine médical et chirurgical vise l'optimisation de la qualité des pratiques de soins délivrés aux patients. Cette étude dresse un panorama des nouvelles technologies qui supportent cette innovation dans le domaine de l'orthopédie et de la traumatologie et illustre leur appropriation dans le cas tangible du CHU de Nice. Elle s'appuie sur une revue de la littérature confrontée à un entretien mené auprès d'un directeur de recherche hospitalo-universitaire visant l'amélioration de la prise en charge des patients en traumatologie ostéo-articulaire. Les résultats de cet état de lieux présentent les avantages et limites de technologies variées : modélisation, simulation et impression en trois dimensions (3D), visualisation étendue, systèmes robotique et de navigation, applications internet et smartphone. Leur intégration dans les établissements et dans l'écosystème de santé est discuté au regard du concept de jumeau numérique et de critères de faisabilité humaine, organisationnelle et sociétale. Cette étude contribue à alimenter la réflexion des chirurgiens et leurs équipes pour conduire une démarche de développement de leurs dispositifs numériques.

ABSTRACT. Innovation in the medical and surgical fields seeks to optimize the quality of care delivered to patients. This study provides an overview of the new technologies that support this innovation in the field of orthopedics and traumatology and illustrates their application in the specific case of Nice University Hospital. It is based on a review of the literature and an interview with a university hospital research director focused on improving the care of patients with osteoarticular trauma. The results of this state-of-the-art review present the advantages and limitations of various technologies: modeling, simulation and three-dimensional (3D) printing, extended visualization, robotic and navigation systems, and internet and smartphone applications. Their integration into healthcare facilities and the healthcare ecosystem is discussed in relation to the concept of digital twins and criteria for human, organizational, and societal feasibility. This study contributes to the thinking of surgeons and their teams in developing their digital devices.

MOTS-CLÉS. Chirurgie, orthopédie, traumatologie, 3D, robot, navigation, jumeau numérique, littérature, impacts, recherche hospitalo-universitaire (rhu)

KEYWORDS. Surgery, orthopedics, traumatology, 3D, robotic, navigation, digital twin, literature, impact, university hospital research

1. Introduction : définition et enjeux des évolutions technologiques en chirurgie orthopédique et traumatologique

La chirurgie orthopédique et traumatologique (COT) est une spécialité médicale qui concerne les articulations (os, cartilages, muscles, tendons et nerfs). Ce système d'organes constitue *l'appareil locomoteur* (ou musculo-squelettique) et garantit le libre mouvement du corps humain au service de nos activités. La prise en charge des patients a alors pour objectif la préservation de cette fonction locomotrice et/ou la limitation de la douleur du patient en cas d'affection de ce système [KHO 18]. Avec le vieillissement de la population, on estime que d'ici 2060, 24 millions de personnes âgées de 60 ans et plus seront prises en charge par les chirurgiens orthopédistes et traumatologues (Ministère des Solidarités et de la Santé cité par [KHO 18]). Toutefois, tous les âges sont concernés puisque les malformations congénitales (eg. la scoliose de l'enfant) ou les pathologies acquises au cours de la vie comme l'arthrose, les tendinopathies, les inflammations et tumeurs relèvent de la chirurgie orthopédique *programmée*. Dans le cas de chutes ou d'accidents graves, responsables d'entorses, de luxations, de fractures ou de ruptures des tendons relevant spécifiquement de l'urgence, la chirurgie est dite *traumatologique*. Il faut savoir

que les lésions traumatiques représentent l'une des premières causes de prise en charge de venue aux urgences, soit 36% des patients en 2014 (DREES, 2014 citée par [KHO 18]).

Dans les deux cas (chirurgie programmée ou traumatologique), l'activité du chirurgien suit un processus réflexif, de l'évaluation diagnostique à l'indication chirurgicale, en passant par la programmation des étapes opératoires (*planification préopératoire*) et des choix d'accompagnement post-opératoires. L'aboutissement de cette réflexion doit permettre au chirurgien de formuler la meilleure solution pour son patient : celle avec le moindre risque « *primum non nocere* » et le meilleur bénéfice. Dans de nombreux cas, ce peut être de ne pas opérer (pose de plâtre, attelle, corset, prescriptions médicamenteuses ou infiltration) et lorsque l'opération est absolument nécessaire, l'enjeu est de corriger « les axes ou la forme d'un os ou d'une articulation sans les remplacer (chirurgie conservatrice : ostéotomie, greffe) ou alors remplacer l'articulation malade (chirurgie prothétique : implantation de prothèses) » [KHO18] (p.12).

Depuis le début du XX^{ème} siècle, avec la découverte des rayons X par Röntgen en 1895 [SAM, 09], la prise de décision chirurgicale s'effectue en grande partie en appui sur l'imagerie médicale préopératoire (visualisation interne du système locomoteur avant l'opération). Par la suite, l'arrivée de la tomodensitométrie (TDM ou scanner ou CT) au milieu des années 1980 marque un second tournant dans l'aide diagnostique médicale et chirurgicale. Alors que jusqu'ici, la visualisation préopératoire de l'articulation lésée était réduite à une image radiographique statique et en deux dimensions (2D), avec la TDM, elle est visualisable en trois dimensions (3D) selon les plans horizontaux (axial), de profil (sagittal) et de face (coronal). De plus, l'imagerie TDM est numérique¹ ce qui la rend affichable sur ordinateur et pouvant faire l'objet de traitements informatiques [MER 18].

En 2000, le recours à l'ordinateur par et pour la chirurgie orthopédique est soutenu par la création de la société savante *Computer Aided Orthopaedic Surgery* (CAOS) et marque l'ère de la *chirurgie computationnelle*. Au fur et à mesure, le développement de différents algorithmes de traitement d'image TDM, de techniques de capture de mouvements ou d'apprentissages en intelligence artificielle (IA) rendra possible la modélisation dynamique et en 3D de l'imagerie médicale préalablement scannée [SOL 23]. Ces progrès de la chirurgie computationnelle s'accompagneront par la mise sur le marché d'un ensemble de systèmes embarqués novateurs dédiés au bloc opératoire : systèmes de navigation et de robotique [SCI 15], plateformes d'impression 3D de modèles anatomiques et d'outils chirurgicaux spécifiques au patient [GAU 21] ou vision étendue qui regroupe réalité augmentée, virtuelle et mixte [SOL 23][MER 17]. L'essor des technologies embarquées au bloc opératoire offre la possibilité d'assister en temps réel et sur mesure, la prise de décision et le geste chirurgical (inciser, percer, fraiser, visser, etc.) en vue d'une amélioration de l'activité chirurgicale dans son ensemble (pour le chirurgien et pour le patient).

De tels changements technologiques posent la question de leur mise en œuvre (faisabilité technique, humaine, organisationnelle) ainsi que de leurs conséquences sur les chirurgiens, leurs équipes, leurs patients et plus généralement sur l'écosystème de santé au niveau économique et sociétal. Ces éléments doivent être documentés afin d'éclairer l'ensemble des acteurs qui engageraient une démarche d'innovation technologique en COT. Nous proposons alors de faire l'état du développement socio-technique des nouvelles technologies de la COT en conduisant une revue de la littérature récente sur ce sujet ainsi qu'un entretien conduit auprès du Directeur scientifique d'un projet de recherche hospitalo-universitaire qui accompagne leur implémentation au CHU de Nice.

¹ Format DICOM: Digital Imaging and Communication in Medicine

2. Revue de la littérature des nouvelles technologies de la COT et de leurs impacts socio-techniques

2.1. Procédure

La revue de la littérature a été menée depuis la plateforme numérique ScienceDirect (éditeur Elsevier). Au départ, la sélection des documents s’est effectuée à partir de l’équation initiale *"chirurgie" AND "nouvelles technologies"*². Nous avons ensuite restreint cette équation de recherche à des journaux spécialisés dans le domaine de la COT ou pouvant y être relié (nous excluons par exemple le Bulletin du Cancer, le Journal Français d’Ophtalmologie, etc.), puis aux 10 dernières années de parution (tableau 1). In fine, nous obtenons 27 documents publiés entre 2014 et 2024 qui contiennent simultanément nos deux termes.

Sur cette base (N = 27), nous avons conservé pour analyse les documents dont le contenu répondait à l’un ET/OU l’autre des critères suivants : le document décrit :

- des *chirurgies orthopédiques et traumatologiques assistées par les nouvelles technologies*
- de *nouvelles technologies en orthopédie et traumatologie*
- leurs *conséquences sur la prise en charge des patients (impacts cliniques)*
- leurs *conséquences sur les pratiques professionnelles (impacts humains)*
- les éléments relatifs au *cadre de la chirurgie orthopédique et traumatologique assistée par les nouvelles technologies (impacts économique et social, réglementaire et éthique)*

Au total, 13 documents sur 27 ont été exclus, la majorité faisaient référence à de nouvelles *techniques* chirurgicales plutôt que de nouvelles *technologies*, c’est-à-dire, à des évolutions de la procédure chirurgicale plutôt qu’à celle des dispositifs/outils d’assistance à la procédure.

Équation de recherche	N	URL	Filtres
"chirurgie" AND "nouvelles technologies"	999	https://www.sciencedirect.com/search?qs=%22chirurgie%22%22nouvelles%20technologies%22&lastSelectedFacet=publicationTitles	Aucun
"chirurgie" AND "nouvelles technologies" AND (PUB("Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique") OR PUB("Annales Françaises d’Anesthésie et de Réanimation") OR PUB("Journal de Radiologie") OR PUB("Annales de chirurgie"))	96	https://www.sciencedirect.com/search?qs=%22chirurgie%22%22nouvelles%20technologies%22&publicationTitles=276876%2C277881%2C272235%2C276847%2C272150&lastSelectedFacet=publicationTitles	Journaux spécialisés

² Dans le contexte des moteurs de recherche académiques comme ScienceDirect, l'utilisation des guillemets signifie que ces expressions doivent apparaître l’une ET l’autre, exactement telles quelles dans le même document. Dans notre cas, cela signifie que les 999 documents extraits de la première équation de recherche contiennent tous le terme « chirurgie » ainsi que le terme « nouvelles technologies » dans l’une des rubriques suivantes : titre, résumé, mot-clés, corps du texte ou bibliographie.

"chirurgie" AND "nouvelles technologies" AND (PUB("Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique") OR PUB("Annales Françaises d'Anesthésie et de Réanimation") OR PUB("Journal de Radiologie") OR PUB("Annales de chirurgie")) AND (YEAR(2024) OR YEAR(2023) OR YEAR(2022) OR YEAR(2021) OR YEAR(2020) OR YEAR(2019) OR YEAR(2018) OR YEAR(2017) OR YEAR(2016) OR YEAR(2015) OR YEAR(2014))	27	https://www.sciencedirect.com/search?qs=%22chirurgie%22%22nouvelles+technologies%22&publicationTitles=276876%2C277881%2C272150%2C272235&years=2024%2C2023%2C2022%2C2021%2C2020%2C2019%2C2017%2C2016%2C2014&lastSelectedFacet=years	Dix dernières années
--	----	---	----------------------

Tableau 1. Procédure de sélection des documents de la revue de la littérature

La lecture de chaque document respectant les critères d'inclusion (N= 14) a été guidée par la recherche d'informations préétablies :

Description générale du document : titre, année de publication, discipline, type de document (bibliométrique vs. études cliniques vs. études qualitatives), résumé (objectifs, méthode, principaux résultats)

Description de la technologie : dénomination, domaine d'application (orthopédie vs. traumatologie vs. autres), définition ou description technique, niveau de développement (expérimental, preuve de concept, clinique)

Application de la technologie : phase (pré vs. per vs. post opératoire), zone anatomique concernée, cas d'usage

Impacts cliniques de la technologie : reproductibilité, erreurs, exactitude (du geste chirurgical), irradiations, implants (survie, adaptation), récupération fonctionnelle, durée de la chirurgie, facteurs humains (perception, cognition), sécurité, douleur, saignements, autres

Impacts humains de la technologie : qualité de vie et santé au travail, modification de l'organisation et des procédures, formation, budget, autres

Impacts sociétaux de la technologie : économiques, écologiques, réglementaires, éthiques

2.2. Résultats

Les documents retenus pour lecture ont été publiés entre 2014 et 2024, dont la moitié à partir de 2020 (tableau 2). Ces documents sont majoritairement bibliographiques (éditorial, état de l'art, revue, essai) ainsi que des études cliniques (observationnelles prospectives et rétrospectives et expérimentales) et des études quantitatives exploratoires. La majorité des études s'intéressent aux articulations du membre supérieur (genou, hanche, pied) plutôt que supérieur (épaule) ou rachis. Leur publication a été effectuée au sein de journaux scientifiques spécialisés en orthopédie et traumatologie à l'exception d'une étude publiée dans un journal d'anesthésie et réanimation.

En termes de contenu, la majorité des documents abordent les technologies de la modélisation et de l'impression 3D. Deux articles abordent l'IA. Un article fait état d'un système robotisé et un article, d'un système navigué. Aucun de nos documents ne traite de vision étendue. Un document à l'interface de l'ensemble de ces technologies se concentre sur le scanner. D'autres technologies non envisagées en introduction (ou alors très peu) ont émergé avec la revue : la méthode des éléments finis (MEF), la consultation vidéo (ou téléconsultation), les fiches internet d'information aux patients de la SFCR (Société Française du rachis) et les applications smartphone professionnelles de chirurgie orthopédique.

Année de publication	N	Nature de l'étude	N	Articulation	N
2014	1	Bibliographique. Etude clinique. Etude quantitative exploratoire . .	7 5 2	Epaule.	1
2016	2			Rachis.	1
2017	3			Hanche/Bassin.	2
2019	1			Genou.	4
2022	1			Pied.	1
2023	4				
2024	2				

Tableau 2. Sélection des documents de la revue de la littérature

2.2.1. Modélisation, planification et impression 3D : un accueil enthousiaste unanime

Il semble exister une unanimité sur l'apport des logiciels de modélisation, de planification et d'impression 3D au service des phases préopératoire et peropératoire, notamment en chirurgie du membre inférieur. Dans le cas de prothèse totale de hanche (PTH), d'ostéotomies ou de fractures complexes du bassin et acétabulaire, un éditorial rapporte une série d'études décrivant l'utilisation de ces outils numériques en vue d'améliorer le diagnostic (analyse de l'anatomie), la planification (pré et peropératoire) et la précision du geste chirurgical [FLE 17]. Pour les ostéotomies supra-malléolaires (correction des déformations de la partie distale des deux os de la jambe), et en cas d'arthrose, on reporte une amélioration de la précision, de la reproductibilité et de la sécurité liée à l'usage de la planification 3D et de l'impression 3D de guides de coupes sur mesure (taille et positionnement des vis, longueur du méchage) [MAT 24]. La planification 3D et les guides de coupe sur mesure sont aussi reconnus et recommandés pour améliorer la précision chirurgicale dans la correction des *genu valgum* (ostéotomie fémorale, articulation du genou) [DEM 24]. Comme seul bémol, nous pouvons reporter un potentiel risque infectieux et des difficultés de cicatrisation dans le cas de l'impression 3D d'implants prothétiques par ajout de poudre de titane sur des patients présentant une infection périprothétique ou un descellement de prothèses acétabulaires (hanche/bassin) [GIO 16].

Une revue sur l'usage du scanner en chirurgie prothétique de l'épaule (articulation scapulo-humérale) rappelle que la tomodensitométrie reste la technologie support à la modélisation, la planification et l'impression 3D (ainsi qu'à des applications encore expérimentales en navigation et en réalité augmentée) [FLU 19]. De plus, l'usage du scanner s'étend désormais au-delà du diagnostic, de la planification et de la chirurgie puisqu'il permet d'effectuer le contrôle postopératoire, dans le cas de prothèses d'épaules par exemple. Le chirurgien peut vérifier le positionnement des implants et comprendre les causes douloureuses précoces ou tardives qui suivent leur pose (Subhas et al., 2016, cités par [FLU 19]). Moins répandue que la tomodensitométrie mais produisant des résultats encourageants, le système EOS biplanair supporte également la planification 3D pour l'arthroplastie avec une plus faible irradiation (Mainard et al., 2017 cités par [FLU 19]). On peut imaginer qu'au long court, ce dispositif complèteront (ou remplaceront) le scanner comme support des autres technologies de la chirurgie computationnelle et augmentée.

2.2.2. Navigation, robots et méthode des éléments finis (MEF) pour les prothèses totales de genou (PTG)

Les études cliniques de la revue qui évaluent les systèmes de navigation et robotique portent sur la pose de prothèse totale de genou (PTG). Que ce soit pour le système de navigation ou robotique, les résultats obtenus vont dans le sens d'une amélioration du geste chirurgical par rapport à des techniques plus traditionnelles. Le système de navigation de la revue est évalué sur 40 patients, « c' un système portatif basé sur un accéléromètre et un gyromètre reliés par Bluetooth à une console d'affichage à usage unique » [FER 17] (p. 29). Il est plus rapide à installer, moins encombrant et moins coûteux que les autres systèmes de navigation qui nécessitent l'acquisition d'images ou de repères préopératoires. D'après les résultats, il permet d'obtenir une précision et une exactitude de la coupe tibiale excellente dans 95% des cas (écart inférieur ou égal à 2°) et montre une précision comparable aux systèmes de navigation

classiques (Mason, 2007 cité par [FER 17]). Concernant l'étude sur le robot, sur 29 patients opérés à l'aide de l'association d'un capteur de force et d'un bras robotisé, 23 ont obtenu un équilibre ligamentaire correct attendu par la PTG [BAR 22]. Les dispositifs techniques ou la manière dont ils sont utilisés ici représentent des alternatives aux systèmes courants de la robotique (habituellement non associé à des capteurs de force) ou de navigation (habituellement non portatifs). Toutefois, ils accompagnent de manière adéquate la logique plus large de la PTG qui requiert « une compréhension biomécanique du genou physiologique, du genou prothétique et de la survenue de complication telles que l'usure ou le descellement » [DAG 23] (p. 121).

Le recours à la méthode des éléments finis (MEF)³ est également proposé pour assister la PTG et anticiper les problématiques de déformation des prothèses. Dans ce cas, la MEF est « une technique de modélisation et de simulation numérique permettant de résoudre une équation complexe biomécanique par la segmentation d'un solide en petits éléments, permettant sa résolution par le biais d'équations linéaires » [DAG 23] (p. 123), le solide en question ici étant l'articulation du genou (femoro-tibiale ou femoro-patellaire). Le recours à la MEF repose sur la maîtrise de compétences en biomécanique et en modélisation informatique qui requiert nécessairement l'intervention d'ingénieurs dont le travail est soumis au regard critique du chirurgien. L'analyse MEF tient compte d'un maximum de paramètres d'entrée d'un seul patient (données d'imagerie, données industrielles de l'implant, données biomécaniques et cinématiques de la littérature) qui permettent de calculer et simuler l'implantation de prothèse et connaître son comportement de sortie spécifique (cinématique, remodelage osseux, fixation prothétique, usure de l'insert tibial). Actuellement, cette technologie de simulation reste au stade pré-clinique, le temps de calcul et les ressources en ingénierie pour répondre à un scénario d'opération patient-spécifique est encore très important. Les auteurs suggèrent qu'on lui préférera sûrement la « création d'un jumeau numérique du genou du patient » et « l'utilisation d'algorithmes issus du big data [...] à des fins de planification personnalisée, par l'intermédiaire de logiciels numériques mis à disposition par les industriels », [DAG 23] (p.130). Ceci revient finalement à confirmer l'engouement général pour les logiciels de planification 3D (cf. *supra*).

2.2.3. L'Intelligence Artificielle (IA) dans la publication scientifique

En dehors de leur activité médicale et chirurgicale, certains chirurgiens mènent des activités de recherche (et d'enseignement). Ils participent ainsi à la mise à jour des connaissances théoriques et techniques de leur spécialité et contribuent en ce sens à une amélioration continue de la prise en charge des patients. La durée d'une recherche scientifique peut s'étendre sur des mois ou des années et la rédaction d'articles qui en découle prend également beaucoup de temps. Une aide à cette activité réside en chatGPT, qui depuis sa mise à disposition au grand public en février 2022, a rendu possible la génération de documents rédigés totalement par cette technologie sur la base d'un prompt humain. Une étude menée au moment de sa sortie montre que sur 425 publications de la revue *Orthopaedics & Traumatology : Surgery & Research (OSTR)* analysées par zeroGPT (logiciel de détection d'usage d'IA), 10,1% présentaient un usage de l'IA pour la rédaction du résumé, 1,9% pour le corps du texte et 5,6% pour les deux [BIS, 23]. Cet usage a significativement augmenté après la sortie de chatGPT (entre février 2022 à septembre 2023) et il existe pour certains articles un « taux de similarité anormal » suggérant un possible plagiat.

De tels résultats invitent les institutions à réglementer l'usage de l'IA dans le domaine de la publication scientifique. Certains éditeurs comme Elsevier qui déjà « influencés par ces risques [...] ont autorisé l'usage de ces logiciels mais dans des conditions bien spécifiques, uniquement dans le soutien rédactionnel avec des réglementations de prévention » [BIS 23] (p. 1101). Il s'agit par exemple, de toujours avoir recours à un contrôle humain pour vérifier que l'IA n'a pas été utilisée comme rédactrice

mais comme soutien rédactionnel (correction des fautes, reformulations, traduction, etc.) et de ne jamais la citer en tant que co-auteur (propriété intellectuelle).

Si l'IA (et plus précisément le deep learning sur lequel est basé chatGPT) tend à révolutionner le secteur médical, notamment par sa capacité à traiter les images et aider à la prise de décision, elle se heurte actuellement à des limites non dépassées : « caractère fragmenté et multifactoriel des bases de données [...], difficultés à extrapoler en cas de changement de population cible, [...] sans compter les questions de coût de développement puis d'utilisation » [JAC 23] (p.1082). De manière générale, les recommandations sont à la transparence, au recours systématique de l'expertise humaine (*human in the loop*) pour contrôler le travail rapide et efficace que sait produire l'IA (approche hybride ou centaure), ainsi qu'à la formation sur ces nouvelles pratiques.

3.2.4. Télé-consultation, fiches d'information internet et applications smartphone

Concernant la télé-consultation en COT, une étude observationnelle monocentrique menée sur 783 patients montre que les patients ayant accepté de consulter en distanciel lors de l'épidémie COVID ont estimé pour 69,7% d'entre eux cette modalité comme identique à la consultation physique et jugé fortement satisfaisante ($m = 4,3$ sur 5) [PER 23]. Toutefois, 52,1% de l'échantillon ont également refusé de passer sur le mode distanciel (408 patients sur 783), préférant attendre la fin de l'épidémie pour consulter, ce qui traduit une faible acceptabilité de cette technologie. Les origines du refus résidaient principalement dans l'attachement au lien physique avec son chirurgien ainsi qu'à des limites techniques (matériel informatique et accès internet insuffisants). De plus, 85,7% des patients qui avaient été d'accord pour passer sur le mode télé-consultation sont revenus au mode présentiel à l'issue du COVID. Ces résultats laissent penser que cette alternative numérique à la consultation traditionnelle restera une technologie palliative aux aléas davantage qu'une pratique de routine en COT.

Une autre étude a cherché à comparer la compréhension des informations délivrées aux patients concernés par une chirurgie rachidienne programmée (arthrodèse, sténose lombaire, hernie discale, spondylolisthésis), selon qu'elle s'effectue oralement par le chirurgien ou avec la lecture de fiches éditables sur internet, reposant sur un modèle conçu par la Société Française de chirurgie du rachis (SFCR) [MAD 16]. La méthodologie employée ne permet pas d'affirmer que c'est la lecture des fiches internet qui améliore la compréhension de l'information délivrée au patient en voie de se faire opérer : l'association des informations délivrées oralement et par la fiche peut aussi expliquer les résultats. De plus, l'étude révèle que 44% des patients déclarent s'être parallèlement renseigné sur leur opération au moyen d'internet dont seulement 17% d'entre eux à partir du site officiel de la SFCR. Autrement dit, un peu comme pour l'IA, la communication au patient à l'ère d'internet gagne à reposer sur une approche hybride associant numérique et expertise humaine.

Enfin, une étude menée auprès de 560 chirurgiens orthopédistes a mis en évidence, pour 70% d'entre eux, une utilisation quotidienne ou hebdomadaire d'applications smartphone destinées à la profession pour la chirurgie programmée comme traumatologique [LEP 17]. Les chirurgiens interrogés dans le cadre de cette étude étaient spécialisés en chirurgie du membre inférieur et plus de la moitié avait au moins 15 ans d'expérience professionnelle. Les applications auxquelles ils avaient recours étaient pour la plupart non validées par une société savante (66,7%) et présentaient des fonctionnalités et contenus variés parmi lesquels la consultation de techniques chirurgicales était la plus utilisée. Cet usage est amené à se perpétuer et s'étendre puisque plusieurs sociétés mettent en place des contrôles et des recherches pour encadrer la cybersécurité absolument nécessaire au développement et à l'utilisation préalable de ce type d'applications : Haute Autorité de Santé (HAS), Agence nationale de la sécurité des systèmes d'informations (ANSSI), Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL). Pour l'heure, le recours à ces applications doit conduire le chirurgien à se renseigner sur leur fiabilité au moyen de sites dédiés déjà existants (ime-dicalapps.com ou Dmd-santé.com) et la communauté médicale et chirurgicale sollicite l'intervention des sociétés savantes pour contribuer à leur certification et à leur reconnaissance.

2.2.5. Coûts et bénéfices des nouvelles technologies en COT

La majorité des documents de la revue évoquent la question des coûts liés à l'implantation de nouvelles technologies chirurgicales au regard de bénéfices cliniques souvent attendus, parfois observés, plus rarement mesurés. Si la balance coûts/bénéfices est envisagée comme positive par la plupart des documents de la revue, elle est rarement le résultat d'un véritable calcul sur le long terme. Par exemple, pour les technologies comme la navigation et le robot, les chercheurs et praticiens en attendent une diminution des frais liés aux reprises chirurgicales. Or, pour l'instant, elles ont surtout démontré un gain de précision chirurgical qui a requis un investissement financier non négligeable lors de leur installation. De la même manière, la révision des procédures et des organisations professionnelles ainsi que la formation à l'utilisation de ces technologies et/ou celles issues du 3D (logiciels de planification, impression 3D) font l'objet de discussions. Elles peuvent, en effet, optimiser les temps de travail et les compétences sur le long terme mais générer des phases de changement difficiles à accompagner ou à surmonter au départ.

De par la multiplicité des professionnels et la complexité organisationnelle qui le caractérise, le milieu du soin et plus précisément le secteur hospitalier, est propice aux conflits professionnels ce qui peut nuire « à la qualité des soins et au maintien d'un bien-être durable des équipes [...] source d'erreurs médicales » (Baldwin & Daugherty, 2008 ; Marshall & Robson, 2005 cités par [BAZ 14]) (p.336). Lors de sa prise en main par les équipes, l'introduction de technologies, autrement dit de nouveaux dispositifs de travail modifiant les dynamiques déjà existantes, peut représenter un facteur supplémentaire de complexité. Un essai éthique basé sur une analyse réflexive pluridisciplinaire de l'expérience professionnelle vécue dans le contexte de l'anesthésie décrit la multiplicité des facteurs qui contribuent aux relations conflictuelles de travail peropératoire [BAZ, 14]. Si dans cette étude les technologies ne sont pas directement citées comme motifs de conflits, nombreux facteurs évoqués peuvent concerner leur implémentation ou s'ajouter à celle-ci tels que la nécessité d'une formation, le manque de compétences (compétence technique insuffisante), la spécialisation excessive (pratique exclusive dans une spécialité, dans une chirurgie), ne pas envisager les risques, l'intérêt, l'état de l'art ou l'indication compassionnelle déraisonnable (« ce qu'ils font n'est pas validé, n'a pas de sens »), la non prise en compte des contraintes logistiques ou structurelles (programmation intenable ou pas de matériel ce jour-là), la lutte pour des ressources partagées ou insuffisantes (disparité numérique entre les acteurs), les conflits d'intérêt (indication non justifiée), le lien avec l'industrie (indication opératoire liée à la recherche, avantages personnels), l'attitude individualiste.

3. Entretien avec le directeur scientifique du projet « RHU-ReBone »

3.1. « Rebone », un projet de Recherche Hospitalo-Universitaire au CHU de Nice

Les projets RHU (Recherche Hospitalo-Universitaire) participent à accélérer le transfert des recherches scientifiques vers la pratique clinique de manière à améliorer les soins médicaux ou chirurgicaux. Ils sont soumis à appel de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), laquelle leur accorde le plus haut niveau de financement en cas de validation (plusieurs millions d'euros). De tels projets s'effectuent dans une logique de « paillasse au patient » ce qui exige des partenariats entre industriels – fabricants d'innovations technologiques médicales ou chirurgicales –, chercheurs – qui évaluent l'efficacité de ces innovations et/ou contribuent à leur développement –, et cliniciens – qui utiliseront ces innovations auprès de leurs patients, dans le cadre de leur activité professionnelle.

Le projet « ReBone », actuellement conduit au CHU de Nice, est lauréat de l'appel à projet RHU 2023 lancé dans le cadre du plan d'investissement France 2030⁴. L'objectif du RHU-ReBone est de développer en interne, à l'hôpital, les dispositifs de la chirurgie computationnelle et augmentée utiles à l'amélioration de la prise en charge de certains traumatismes osseux complexes : fractures du poignet (radius distal),

⁴ <https://www.economie.gouv.fr/france-2030>

du genou (plateau tibial) et du bassin (acetabulum). Autrement dit « des outils de planification préopératoire personnalisés, automatisés, collaboratifs et valides pour simuler, préparer puis réaliser des interventions en chirurgie ostéoarticulaire, dont la traumatologie, de façon sécurisée et patient-spécifique » [GAU 24] (pp. 15 -16). Ce projet est notamment motivé par les chiffres préoccupants relatifs à la traumatologie qui représente en France, un budget de cinq milliards d'euros pour la sécurité sociale, 400 000 hospitalisations par an, sans compter les problématiques humaines de handicap et de dépendance qui en découlent. « La traumatologie est en effet un véritable problème de santé publique et représente le troisième fléau mondial reconnu par l'OMS après le cancer et les maladies cardiovasculaires » [GAU 24] (p.16).

En pratique, ReBone doit d'abord développer les logiciels de planification 3D en capacité de modéliser et simuler en temps réel la réparation d'une fracture sur la base d'une imagerie médicale type scanner, de mettre en place une plateforme d'impression 3D interne au CHU couplée à ces logiciels de manière à fabriquer en contexte d'urgence les outils de guidages et implants spécifiques aux patients opérés. Il est également envisagé d'équiper les blocs opératoires de systèmes de vision augmentée qui permettront d'afficher à la demande et sur le champ opératoire, les informations chirurgicales pertinentes pour le chirurgien (données patient, étapes de la planification, simulation du geste) tout en les optimisant pour l'adapter à la charge mentale de ce dernier, limiter sa distraction et rendre cette solution acceptable. Il s'agit aussi de former les professionnels qui utiliseront ces nouvelles technologies ainsi que de familiariser les patients aux avantages et inconvénients qui pourraient y être associés. Enfin, les retombées cliniques (diminution des complications chirurgicales, allongement de la survie des implants, récupération fonctionnelle, etc.), économiques et sociales (efficacité de la prise en charge et du parcours patient, diminution des ré-hospitalisations), ainsi qu'écologiques (usage de l'IA) attendues par ce projet RHU seront évaluées.

3.2. Méthodologie de l'entretien

L'entretien mené auprès de Marc-Olivier Gauci, directeur scientifique du projet ReBone et chirurgien PU-PH⁵, a été conduit en suivant un guide d'entretien semi-directif organisé autour des thématiques suivantes :

- *Connaissances générales* : sur les technologies chirurgicales en orthopédie et traumatologie.
- *Usage/pratique spécifique au CHU* : des technologies chirurgicales en orthopédie et traumatologie.
- *Avantages et limites* : vécus ou reportés par un tiers faisant usage de technologies chirurgicales en orthopédie et traumatologie.

Afin que le chirurgien puisse appuyer ses réponses sur la base d'une représentation partagée avec l'interviewer, nous lui avons soumis un document sur lequel apparaissait une classification des nouvelles technologies de la COT (matériel d'aide d'élaboration au discours). Ce document présentait sept catégories de technologies : modélisation 3D et jumeau numérique, logiciels de planification chirurgicale, impression 3D, intelligence artificielle et Big data, réalité augmentée (RA) et réalité virtuelle (RV), navigation chirurgicale et robotique, simulation haptique et formation assistée par IA. Chacune des technologies était illustrée par une *image* et était renseignée sur le plan de ses *fonctionnalités*, de la (ou des) *phase(s)* de l'activité chirurgicale durant laquelle (ou lesquelles) elle est utilisée ainsi que sur le *hardware, software* qu'elle mobilise techniquement.

L'intégralité de l'entretien a été retranscrit textuellement. Son contenu a ensuite fait l'objet de plusieurs lectures visant à repérer et résumer les éléments contribuant à renseigner les objectifs descriptif et réflexif de cette étude (cf. *supra*). Nous avons ainsi relevé au sein de l'entretien retranscrit les éléments abordés par Marc-Olivier Gauci relatifs à la *description de nouvelles technologies* en COT, leur(s)

⁵ Professeur des Universités et Praticien Hospitalier

application(s), leurs impacts cliniques, humains et sociétaux. En somme, nous avons menés une analyse thématique a priori dont les thèmes (et sous-thèmes) sont identiques aux critères d'inclusion de la revue de la littérature de manière à pouvoir comparer les résultats de la revue avec ceux de l'entretien.

3.3. Résultats

3.2.1. A chaque pot son couvercle

Pour Marc-Olivier Gauci, le fait d'avoir recours aux nouvelles technologies en COT quelles qu'elles soient doit se réfléchir en regard de l'intérêt qu'elles ont démontré pour tel ou tel cas d'usage. Par exemple, l'utilisation des logiciels de planification 3D et l'impression 3D de guides patient-spécifiques (GPS) est reportée comme très utile pour « les ostéotomies de manière générale », c'est à dire pour la coupe d'os et la rectification des axes osseux dans le cas d'arthrose ou de séquelle de fracture. Pour les PTG et les visées pédiculaires (rachis), le chirurgien affirme un moindre intérêt clinique car moins de reproductibilité a été démontrée voire des risques d'erreur. Ces deux derniers cas d'usage trouveraient une meilleure assistance via la robotique, pour le genou et la navigation, pour le rachis. Si la navigation semble également faire de plus en plus ses preuves pour l'épaule, au CHU de Nice, c'est l'impression 3D de GPS qui reste la technologie mobilisée par ce chirurgien dans la pose de prothèses d'épaule.

Le recours à l'une ou l'autre des technologies embarquées au bloc opératoire n'exclut pas des interactions possibles si le cas d'usage s'y prête. Par exemple, en chirurgie du rachis, le robot peut embarquer un système de navigation et la navigation peut être affichée sur des lunettes 3D (réalité virtuelle, augmentée ou mixte) alors même que chaque dispositif est spécifique à une fonctionnalité : « le robot exécute [...] il va faire le trait de coupe, il va mettre la broche [...], la navigation, c'est un système de guidage qui permet de visualiser ce que tu es en train de faire mais n'exécute pas de geste [...] et quelques fois, [la navigation] s'affiche sur des lunettes [...] ça permet d'éviter d'avoir un écran en plus au bloc et tu vois effectivement les choses plutôt bien ».

3.2.2. Planification, impression et visualisation 3D : l'équation holistique

Pour le PU-PH, dans tous les cas, les technologies de planification et d'impression 3D présentent un triple intérêt : simuler l'intervention en amont (choisir les implants avant l'opération et réfléchir à leur position plutôt que dans l'effervescence du bloc), faire une intervention sur mesure et enfin, de manière transversale, former/éduquer les jeunes chirurgiens et les patients à partir de modèles très visuels et manipulables (eg. montrer facilement où se trouve une tumeur). C'est pourquoi, dans le contexte particulier du projet ReBone appliqué à la prise en charge traumatologique, l'objectif de développement est dirigé vers ces technologies en plus de celle de la réalité mixte.

Pour l'illustrer, il cite parmi d'autres nombreux travaux de recherches liés à Rebone, ceux de Théo Aguilar Vidal⁶, ingénieur d'études en informatique et IA, et de Marie Arminio⁷, doctorante en psychologie. L'ingénieur collecte et anonymise des imageries scanner du radius et de l'ulna (avant-bras) et les utilise pour entraîner ou créer des modèles d'IA spécialisées dans la segmentation automatique, c'est à dire, dans la détection des structures médicales d'intérêt pour le chirurgien [AGU 25]. Cette étape indispensable permettra par la suite de prédire et générer une nouvelle image : celle de la représentation 3D de l'os réparé et, par extension, de développer les logiciels de planification et d'impression 3D de guides et d'implants pour la prise en charge des fractures de l'avant-bras. Par la suite, cette planification pourra être embarquée par le chirurgien au bloc opératoire grâce à la réalité mixte (affichage holographique dans un casque). Si cette dernière étape est reportée comme étant encore exploratoire. De son côté, Marie Arminio étudie actuellement les effets du port de casque de réalité augmentée sur la charge mentale et la distraction des équipes au bloc opératoire [ARM 25].

⁶ Equipe ICARE, Inserm U1091, iBV, Université Côte d'Azur : <https://univ-cotedazur.fr/laboratoires/institut-de-biologie-valrose-ibv>

⁷ LAPCOS, Université Côte d'Azur : <https://lapcos.univ-cotedazur.fr/>

Finalement, le parti pris qui consiste à restreindre le périmètre du projet ReBone à ces trois dispositifs l'inscrit au sein d'une logique « holistique » de l'usage de nouvelles technologies pour le domaine de la traumatologie ostéo-articulaire (figure 1). Ces dernières ne sont pas des ressources que l'on mobiliserait isolément : « ces ressources après, il faut qu'elles trouvent chacune leur place dans le schéma global qui est celui de la chirurgie computationnelle et augmentée qui couvre finalement la globalité de nos travaux ».

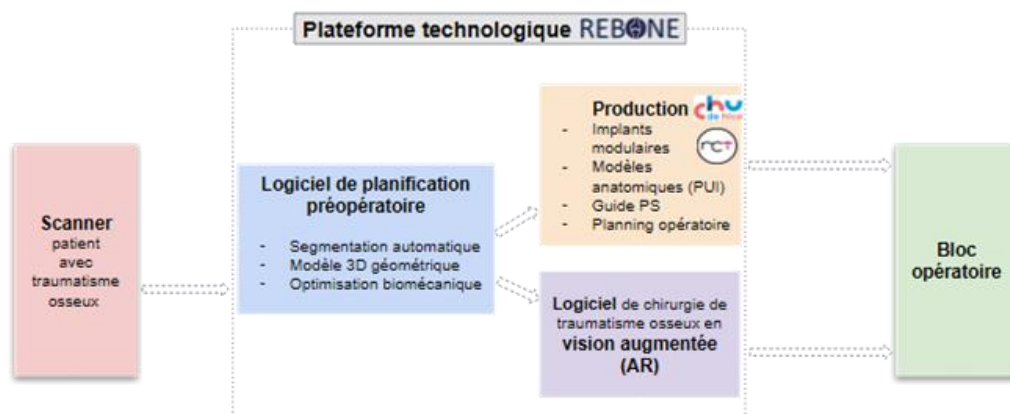


Figure 1. Logique holistique d'implémentation des nouvelles technologies en COT par le projet ReBone

3.2.3. Place au jumeau numérique

Pour Marc-Olivier Gauci, c'est la notion de jumeau numérique qui se trouve au cœur de l'innovation en COT (figure 2) et qui permet de soutenir la logique holistique dont nous parlons ci-dessus.

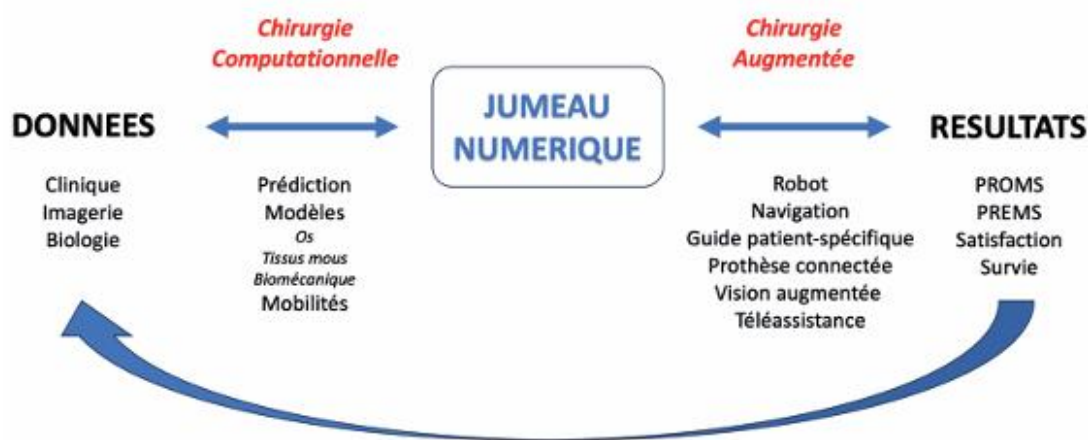


Figure 2. Le jumeau numérique au cœur de la logique d'innovation technologique en COT, figure extraite de [GAU, 25]

Au départ, les données de l'imagerie médicale permettent via différents traitements par ordinateur (segmentation) d'obtenir un jumeau numérique, c'est à dire une modélisation 3D d'une zone anatomique d'intérêt pour le chirurgien. Ensuite, ces données compilées au sein de ce jumeau numérique sont utilisées par différents dispositifs qui servent différentes applications. Les logiciels sont utiles à planification en préopératoire, les robots, les guides sur mesures imprimés en 3D, la navigation et/ou la réalité augmentée sont utilisés pour accompagner le geste au bloc opératoire. Enfin, les données générées par l'usage de ces différents outils peuvent être traitées pour alimenter et mettre à jour le jumeau numérique du patient («c'est le « vrai » jumeau numérique»). Pour illustrer son propos, Marc-Olivier

Gauci se réfère à des travaux très récents [CAU 24] menés sur les prothèses d'épaule connectées désormais susceptibles de « mesurer la pression qu'il y a dans l'articulation, et de déterminer où elle s'applique : où se trouve le barycentre, c'est-à-dire le point principal de l'application des forces, [et en réponse] de s'épandre, de se réduire, pour plus ou moins tendre les tissus qu'il y a autour [de l'implant], [et] optimiser le recrutement musculaire, et donc la mobilité et la force des patients ».

En résumé, le jumeau numérique permet de saisir à la fois la composante technique/informatique qui rend possible le développement des outils technologiques (recueil des données, traitement informatique, activité d'ingénierie) et la composante pratique/humaine liée à leur usage (utilisation des logiciels pour la planification et dispositifs embarqués lors de la chirurgie). L'innovation en chirurgie se conçoit alors de manière globale, à travers la « chirurgie computationnelle », celle qui utilise les données du patient pour modéliser et planifier, et la « chirurgie augmentée », celle qui « embarque » les données modélisées et la planification au bloc opératoire, le tout au sein d'une boucle de traitement et d'analyse de données numériques qui enrichit la prise en charge du patient.

3.2.4. Et place à l'IA

Aujourd'hui, Marc-Olivier Gauci indique que l'IA automatise certains de ces traitements/ analyses. Elle « catalyse » le développement et le fonctionnement des différentes technologies de la chirurgie à tous les niveaux. Il donne l'exemple du logiciel de planification Blueprint qui utilise le deep learning pour générer de manière automatique la modélisation 3D de l'épaule à partir de l'imagerie scanner, ainsi que des propositions de choix et de positions des implants pour la prothèse d'épaule (figure 3).

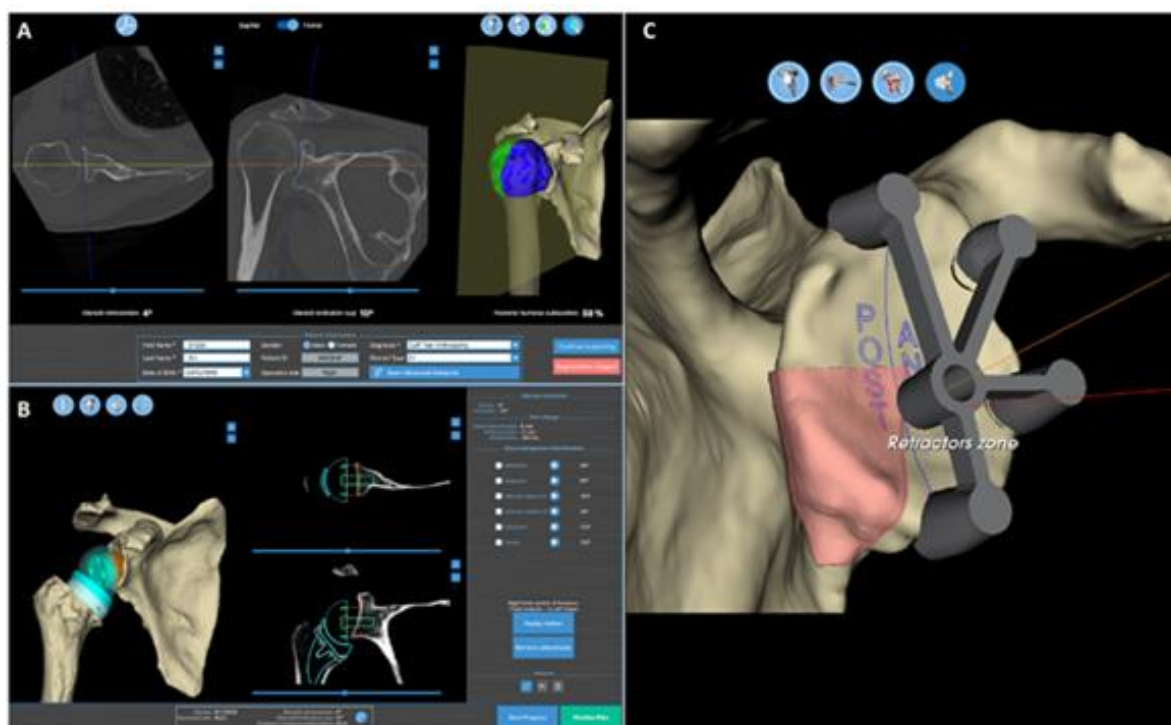


Figure 3. Planification 3D d'une prothèse totale d'épaule, figure extraite de [GAU 21]

L'IA offrirait aussi la possibilité de libérer des temps de travail anciennement dédiés à des tâches répétitives ou lassantes pour en consacrer davantage à la réflexion et aux patients. S'intéresser à l'IA c'est potentiellement ajouter sa pierre à l'édifice du développement de toutes les applications en chirurgie ainsi que contribuer au soulagement de certaines pratiques professionnelles. L'IA est ainsi mobilisée au sein du projet ReBone en tant que révolution socio-technique, support à la chirurgie computationnelle et augmentée dans son ensemble, et non comme une technologie de la COT à part entière. Malgré ses espoirs placés en l'IA, ceci n'empêche pas le chirurgien de rester lucide. Pour ce dernier, l'IA et les datacenters contribuent pour une part non négligeable au réchauffement climatique et cela peut poser « des problématiques d'éthiques de données, de manière générale ».

Qu'elles soient traitées par des systèmes informatiques traditionnels ou par l'IA, les données médicales sont donc à l'origine du jumeau numérique et, par extension, du projet ReBone. Par conséquent, leur exploitation pour le développement et les applications technologiques qui en découlent doit suivre la réglementation actuelle (règlement général sur la protection des données - RGPD, loi informatique et libertés - LIL, cybersécurité, etc.) et s'intégrer de manière fiable à un système socio-économique et écologique plus large. Pour ces raisons, Marc-Olivier Gauci a structuré l'Entrepôt de Données de Santé Méditerranéen⁸, lauréat de l'appel à projet « Entrepôt de Données de Santé » (EDS) qui constitue une dynamique régionale pour les établissements de santé publique de la région PACA.

3.2.5. Perspectives technologiques d'un futur proche

A ce jour, le jumeau numérique est donc issu des données modélisées à partir du traitement de l'imagerie médicale, majoritairement de type scanner (traitement des voxels). Dans le futur, le projet ReBone vise également une récupération de données cliniques et biologiques de manière à étoffer celles de l'imagerie pour la modélisation du jumeau numérique. En sortie, l'IA aurait encore son rôle à jouer dans la récupération des données post-opératoires. Celles-ci serviront à enrichir l'entraînement à l'origine de la génération des modélisations 3D et des dispositifs de planification, d'impression 3D et d'affichage 3D qui peuvent en découler.

Bien que la technologie robotique ne soit pas envisagée par le projet, Marc-Olivier Gauci prédit aussi que le recours à l'IA saura optimiser le dialogue homme-machine pour cette application, autrement dit, la prise de décision humaine sur la base d'informations rapidement traitées et renvoyées par le robot connecté au patient. A noter qu'actuellement, le service orthopédique et traumatologique du CHU de Nice vient tout juste de s'équiper d'un robot pour le cas d'usage de la PTG. Toutefois les robots représentent un coût important (plus d'un million d'euros) ce qui justifie une stratégie d'acquisition spécifique et un équipement progressif des blocs opératoires.

Parmi les applications ReBone, c'est le dispositif de réalité mixte, c'est à dire de manipulation de l'information virtuelle au bloc opératoire affichée dans un casque 3D (image holographique) qui attire plus particulièrement l'attention du directeur du projet. En effet, cette technologie laisse supposer la possibilité de pouvoir faire un jour « du recalage entre une image virtuelle planifiée préopératoire et la réalité en face ». En d'autres termes, entre l'affichage virtuel et manipulable de la modélisation 3D issue de l'imagerie préopératoire visualisée dans le casque, et l'anatomie réelle du patient allongé sur la table d'opération. En effet, actuellement, le recalage est possible mais chronophage. Il nécessite d'embarquer au bloc opératoire un système de navigation ainsi que de piquer une cinquantaine de capteurs autour de la zone anatomique d'intérêt sur le corps endormi du patient. Le port de casque 3D au bloc opératoire diminuerait ces contraintes d'installation matérielle pour effectuer le recalage (temps, encombrement) et la réalité mixte devrait potentialiser l'aide cognitive du chirurgien (visualisation, simulation, prise de décision) bien au-delà de celle déjà rendue possible par l'augmentation d'affichage de la réalité virtuelle (eg. Microsoft Hololens, Surgiverse, Abys Medical).

Les ambitions prometteuses du projet ReBone tiennent compte « des questions, évidemment, de systèmes propriétaires, de flux contrôlés, industriels et de données » : comment se rendre indépendant vis-à-vis d'un matériel technologique (hardware) initialement pensé par des industriels en dehors de l'écosystème de la santé (celui du jeu vidéo pour le développement des casques de VR par exemple) ? Marc-Olivier Gauci relie ce questionnement à la problématique de l'innovation pour la formation en médecine et chirurgie déjà rencontrée au CHU de Nice. A la suite de l'obtention du diplôme, rien n'oblige le praticien à perfectionner sa pratique par la mise à jour de ses connaissances ou par l'entraînement. De plus, au niveau financier, l'activité de formation ne produit pas de retour sur investissement. En conséquence, recourir à des solutions technologiques à plusieurs centaines de milliers d'euros comme les simulateurs en vue d'assurer la préservation des aptitudes chirurgicales avait finalement obligé le

⁸ https://connaissance-territoire.maregionsud.fr/fileadmin/user_upload/06092024_Filiere_sante_VF.pdf

CHU a abandonné l'acquisition de ce type de dispositifs. Les aspects pédagogiques, puisqu'ils ne contribuent pas à un bénéfice économique direct, doivent pour l'instant être pensés plus humblement, avec « des systèmes moins onéreux, qui existent, beaucoup plus classiques » jusqu'à ce que les plus coûteux aient fait leurs preuves véritables en matière d'amélioration des performances : « encore une fois, ça viendra ».

3.2.5. Administrer la preuve

Marc-Olivier Gauci semble déjà convaincu par les technologies de la COT qu'il utilise couramment dans sa pratique : logiciels de planification 3D, impression de GPS et réalité mixte en exploratoire. D'abord, parce qu'il peut observer des effets immédiats sur l'équipe chirurgicale. Il explique la possibilité d'anticiper la préparation du matériel sur la base du rapport de planification édité par le logiciel 3D. Plutôt qu'avoir à apporter tous les implants en salle et tester sur le moment de l'opération celui qui convient le mieux, l'équipe apporte uniquement ceux décidés par la planification (réduction du port de charge et de la charge mentale). Ensuite, parce que ce même rapport de planification « a une valeur médico-juridique, médico-légale [...] et prouve que l'on a bien préparé l'intervention en cas de litige avec le patient », et ce même si ce temps de planification n'est pas encore rémunéré. Enfin, parce que dans sa pratique de chirurgien, il est aujourd'hui capable de « faire du sur mesure », en s'appuyant sur des « propositions de solutions idéales » qui l'accompagnent sur le plan cognitif et décisionnel.

Toutefois, la casquette de chercheur du chirurgien le conduit à conclure l'entretien en se posant la question suivante « est-ce que tout cela sert à quelque chose, est-ce qu'on n'était pas mieux en opérant avant [...] ? ». Il fait ici référence à la nécessité de la preuve clinique, c'est-à-dire, celle qui mettra en évidence une amélioration concrète sur le parcours du patient « du moment où il toque à la porte » jusqu'à ce qu'il soit « consolidé(e) ». Cela implique des améliorations du geste chirurgical, certes, mais aussi de récupération du patient et de bien-être des équipes professionnelles.

4. Mise en regard de la littérature avec le terrain du CHU de Nice

4.1. Le guide chirurgical imprimé en 3D a fait ses preuves

Pour la littérature générale, le scanner est considéré comme le prérequis à l'augmentation d'informations préopératoires et l'impression 3D des objets modélisés autorise ensuite la manipulation de la structure d'intérêt et amplifie la planification sur mesure car les matériaux et techniques d'impression permettent de produire des structures uniques, spécifiques au patient [BER 22].

A Nice, c'est principalement en chirurgie de l'épaule, pour les ostéotomies et la pose d'implants, que l'impression 3D de guides chirurgicaux est utilisée et a déjà fait ses preuves [GAU 16]. Pour démontrer l'apport du guide imprimé en 3D, on peut mettre en évidence une égalité entre les mesures de la planification préopératoire et celles obtenues en post-opératoire, c'est la notion d'*exactitude*. Actuellement, le gain d'exactitude des GPS, ses bénéfices dans la réduction de l'irradiation opératoire de l'équipe chirurgicale et dans la réduction du temps de préparation du matériel et opératoire est documenté pour quasiment toutes les articulations et plusieurs cas d'usages (ostéotomies majoritairement) [GAU 21]. Au sein de notre revue, les améliorations liées à cette technologie sont principalement reportées sur les membres inférieurs (hanche/bassin, genou, pied) mais concluent à des résultats similaires notamment sur le plan de l'exactitude.

4.2. La navigation et les robots n'ont pas encore totalement convaincu

Nous notons aussi une certaine similarité entre les données mises en avant par la revue et celles reportées par le discours de Marc-Olivier Gauci concernant un moindre usage de la navigation et de la robotique en COT. Les preuves d'améliorations cliniques de ces deux systèmes ne semblent pas encore assez documentées et leurs contraintes d'encombrement, de temps d'installation et de coût élevé limitent sûrement leur usage.

D'après les travaux qui synthétisent les connaissances sur les systèmes de navigation, ces derniers seraient principalement utilisés en chirurgie du rachis [MER, 2015]. Les systèmes les plus récents, appelés scanner de bloc ou fluoroscope tridimensionnel 3D ou amplificateur de brillance tridimensionnel, permettent d'obtenir des images 3D en contexte peropératoire et servent principalement pour le contrôle de la position des implants. Ceci limiterait le risque de ré-intervention dû à un implant mal-placé. Leur utilisation s'étend aujourd'hui à la radiologie interventionnelle qui commençait, il y a dix ans, à se normaliser dans les hôpitaux de grande taille au sein de salles dédiées. En effet, ce sont des systèmes très volumineux qui nécessitent un certain temps d'installation.

Les systèmes de navigation peuvent être couplés ou pas au robot, dispositif qui a largement contribué depuis une vingtaine d'années à réaliser des chirurgies mini-invasives. Toutefois, les robots développés en orthopédie sont pour l'instant restreints aux arthroplasties et aux poses de prothèses du genou et de hanche (partielle ou totale) [SCI 2020]. Ce sont des robots d'assistance et de guidage manuel, de guidage semi-automatique ou des assistants de guidage automatisé pour lesquels le robot réalise une partie de l'intervention sous le contrôle du chirurgien. Leur coût est conséquent, il s'élève à plusieurs millions d'euros.

4.3. La question de la faisabilité

Du côté de la COT niçoise, le progrès de l'innovation technologique est à envisager de manière « holistique ». Au niveau conceptuel, cela fait référence au jumeau numérique, un concept ancien en aéronautique et défini par l'*American Institute of Aeronautics and Astronautics* (AAIA) comme un « ensemble de constructions d'informations virtuelles qui reproduisent la structure, le contexte et le comportement d'un actif physique individuel ou unique, qui est mis à jour dynamiquement avec des données issues de son jumeau physique, tout au long de son cycle de vie et qui crée de la valeur en aidant à la prise de décisions » [DUM 23]. En santé, il n'existe pas de définition consensuelle du jumeau numérique mais s'y référer c'est tenir compte de toute l'activité chirurgicale s'articulant autour de l'ensemble du parcours du patient dans le processus de prise de décision, et ce au sein d'une boucle rétroactive qui l'enrichira des résultats préopératoires et de suivi [GAU 25].

Cette vision holistique de l'innovation est séduisante, toutefois sa mise en œuvre concrète et la démonstration de son apport global apparaît complexe. D'abord, parce que la quantité de ressources à déployer liée à la gestion, la réglementation et l'éthique des données patient, au traitement et au développement des solutions technologiques de modélisation et de simulation 3D qui en découlent ainsi qu'à leur appropriation et intégration au sein des pratiques hospitalières est conséquente. On compte au sein du projet ReBone plus d'une dizaine de partenaires industriels, scientifiques et cliniciens impliqués dans cette mission dont il faut aussi suivre et coordonner le travail [GAU 24]. De plus, les bénéfices attendus sur le quotidien des patients, des chirurgiens et des équipes chirurgicales restent encore à démontrer par la recherche et devront être mis en regard des risques écologiques qu'ils pourraient générer sur l'ensemble de la population par ailleurs. Ceci est surtout valable pour le recours à l'IA qui, bien que devenue incontournable pour diagnostiquer, planifier, surveiller et former, présente des limites et des risques [ABA 23].

Pour pouvoir conclure à une amélioration globale de l'activité chirurgicale en orthopédie et traumatologie due à la mise en place de la plateforme technologique ReBone il est nécessaire de considérer un rapport coûts/bénéfices enchevêtré. C'est une évaluation qui va bien au-delà de celle envisagée lorsque les chirurgiens se questionnent sur le recours ponctuel à l'impression 3D d'un guide chirurgical, par exemple. Elle doit se conduire sur un ensemble de composantes techniques, humaines, économiques et sociales, au niveau de l'écosystème de santé. Ainsi, l'ampleur d'un projet pour l'innovation comme ReBone n'est sans doute possible à réaliser que dans le cadre offert par le financement RHU (ou équivalent). Ce pré-requis interroge les plus petites structures de santé qui ne disposeraient pas des ressources suffisantes pour répondre à des appels à projet et organiser la recherche et le développement pour l'innovation.

Notre revue a mis en évidence des technologies alternatives, plus humbles et accessibles à tous, pour accompagner la pratique en COT avec les applications smartphone. Certaines offrent des fonctionnalités d'interaction avec des pairs et s'appuient sur des référentiels scientifiques communs. C'est le cas de l'application CJOrtho, développée par le collège des jeunes orthopédistes en France [REI 18]. Créée au départ pour l'aide à la formation des internes, elle se décompose aujourd'hui en quatre applications : la visualisation de 65 classifications anatomiques sous forme de schémas, le calcul de 20 scores d'évaluation de l'épaule, du coude de la hanche, du genou et du pied, le goniomètre pour la mesure angulaire à partir d'une photo par le smartphone, et la database qui stocke et sécurise les données recueillies pouvant être exportées pour des études cliniques.

4.4. Un grand pas pour la traumatologie

Finalement, la principale différence entre la description des technologies de notre revue et celle relative au projet ReBone se trouve dans leur périmètre d'application. Pour la revue, c'est le champ de la chirurgie orthopédique programmée pour lequel est décrit un ensemble de technologies, qu'elles soient issues du 3D, embarquées au bloc opératoire, ou qu'elles relèvent d'internet. A l'inverse, bien que l'entretien ne le mette pas tant en évidence, le projet ReBone est tout entier consacré au développement d'une plateforme technologique appliquée à la traumatologie.

Au-delà de constituer la spécificité de ReBone, l'innovation technologique en traumatologie semble représenter une certaine originalité de la recherche et du développement dans ce champ. Au sein de la revue, nous ne trouvons par exemple qu'une seule référence qui aborde explicitement des « outils numériques » pour une application en traumatologie de fracture du bassin [FLE 17]. Cette référence renvoie au travaux de Upex et collaborateurs en 2017 et décrit le recours à l'impression 3D pour fabriquer un héli-bassin sain en acide polyactique (PLA) et des plaques d'ostéosynthèses patient-spécifiques moulées à partir de ce dernier pour opérer un patient âgé de 39 ans [UPE 17].

A l'international, la littérature semble décrire une utilisation satisfaisante des technologies 3D pour le traitement de fractures de l'acetabulum. On daterait à 2002 la première fabrication 3D de guides de vissage pour huit patients présentant ce type de fracture [BRO 02]. Depuis, plusieurs équipes y ont eu recours à Londres [DUN 15] [YU 15] et à Kobe au Japon [NII 14]. La chirurgie de la fracture de l'acetabulum est recommandée entre le 5^e et 10^e jour [UPE 17], par conséquent le temps d'impression et de stérilisation de 48 heures pour utiliser les modèles, les guides et les implants 3D ne représente pas une limite. Ceci n'est pas le cas pour les autres articulations qui sont soumises à des contraintes temporelles de prise en charge plus restreintes. Il est pourtant reporté, de manière isolée, le recours à l'impression 3D dans le cas de fracture de la phalange [FUL 14] et en chirurgie militaire pour la fabrication d'ancillaires variés [RAN 14]. Ceci suggère une généralisation possible de l'usage des technologies 3D dans le traitement d'autres fractures, comme l'envisage ReBone, au niveau du radius distal (poignet) et du plateau tibial (genou), en plus de l'acetabulum.

Conclusion

L'objectif de cette recherche était de dresser le panorama des technologies récentes de la COT reportées par la littérature et dans le contexte appliqué d'un projet RHU du CHU de Nice. Nous mettons en évidence une utilisation majeure des technologies 3D, tout particulièrement, celle de l'impression 3D sur mesure qui est reconnue pour soutenir la planification chirurgicale, améliorer la précision, et réduire les temps opératoires dans le cas de nombreuses ostéotomies et poses d'implants (épaule, hanche, genou). Alors que le recours aux dispositifs technologiques implantés au bloc opératoire tels que les robots et les systèmes de navigation semble un peu moins étendu. Ces derniers présentent des contraintes d'encombrement, de temps d'installation, de coût financier et sont pour l'instant limités à quelques chirurgies du rachis et du genou. Des technologies peu coûteuses et simples d'utilisation telles que les applications professionnelles sur smartphone représentent une alternative intéressante pour les structures et personnels qui n'auraient pas les ressources suffisantes pour s'équiper ou s'inscrire dans une démarche d'innovation technologique en santé.

L'essor de l'IA depuis 2022 a déjà des répercussions dans la publication scientifique en COT et fait l'objet de nouvelles règles éditoriales pour favoriser des pratiques déontologiques et limiter le plagiat. Au-delà d'une aide à la reformulation, les chercheurs ne devraient pas mobiliser l'IA dans la rédaction de leurs papiers. Dans le cas du projet ReBone, l'IA est envisagée comme une technologie support et transversale à la démarche d'innovation dans son ensemble et non comme une technologie isolée. Son potentiel est celui de catalyser le développement de l'ensemble des nouvelles technologies qui fonctionnent grâce au traitement de la donnée numérique en santé, à l'heure où le jumeau numérique du patient fait le pont entre une chirurgie computationnelle et augmentée. Dans le futur, l'usage de l'IA pourrait devenir incontournable pour soutenir le chirurgien à diagnostiquer, planifier, opérer et suivre la récupération de ses patients mais ne devrait pas remplacer l'expertise humaine des orthopédistes et traumatologues (approche centaure). De plus, le recours à l'IA soulève des questions de ressources écologiques qui doivent encore trouver des réponses. Les coûts énergétiques qu'elle implique doivent être mis en regard des bénéfices humains qu'elle pourrait aussi générer. Dans un contexte où les professionnels du secteur du soin travaillent à flux tendu, l'IA pourrait libérer du temps actuellement dédiés à certaines tâches purement techniques pour en laisser davantage à la relation avec le patient.

Pour l'instant, l'utilisation des nouvelles technologies de la COT est majoritairement appliquée au contexte de la chirurgie programmée plutôt que traumatologique et c'est tout l'enjeu du projet ReBone que de les développer dans ce domaine. En somme, nos résultats mettent en évidence des pratiques qui se renouvellent en COT pour lesquelles il est encore nécessaire d'apporter la preuve de l'amélioration clinique qu'elles procurent, ensuite, d'évaluer l'apport de cette amélioration au regard d'une balance bénéfices/risques complexe qui concerne les impacts sur le reste de l'écosystème de santé (chirurgien et équipe chirurgicale, organisation hospitalière, économie publique). Les résultats de notre revue et de notre entretien évoquent ces impacts mais leur mesure sur le long terme reste encore à conduire. Les connaissances issues de cette étude doivent pouvoir éclairer la réflexion liée à l'équipement et à l'usage des nouvelles technologies de la COT.

- [ABA 23] ABADIE, P., PIRLOT, P., & VIRIEUX, B. (2023). Place de l'intelligence artificielle dans la chirurgie de l'épaule en 2023. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 109(6), S148-S155. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2023.07.008>
- [AGU 25] AGUILAR VIDAL T., MASSON JB., CREMESE R., WINTER R., COSTANTINI I., POUJADE T., GAUCI MO. (mars, 2025). *Segmentation automatique des os de l'avant-bras à l'aide d'approches d'apprentissage profond*. [Affiche]. Colloque français d'intelligence artificielle en imagerie biomédicale (IBAM), Nice, France. <https://iabm2025.sciencesconf.org/resource/page/id/13>
- [AGU 25] AGUILAR VIDAL T., CREMESE R., COSTANTINI I., POUJADE T., MASSON JB., GAUCI MO. (juin, 2025). *Automatic Segmentation of Forearm Bones Using Deep Learning Approaches*. [Affiche]. Annual Meeting of the International Society for Computer Assisted Orthopaedic Surgery, Davos, Suisse. https://caos-international.org/wp-content/uploads/2025/08/Summit_2025_Program_Booklet.pdf
- [ARM 25] ARMINIO, M., GALY, E., GAUCI, M-O. (2025, NOVEMBRE). *Nouveaux risques cognitifs liés à l'innovation en chirurgie : impact de la réalité mixte sur la charge mentale et la distraction* [Conférence]. 99e congrès de la SOFCOT, Paris, France. https://www.sofcot-congres.fr/fr/programme-sofcot/en-detail/mercrediid_programme_session=arminio&id_intervenant=&id_programme_type_session=&programme_session-submit=Chercher
- [ARM 26] ARMINIO, M., GALY, E., GAUCI, M-O (SOUJIS, 2026). Cognition and Innovations in Trauma Surgery: Mixed Reality, Mental Workload and Distractions in the Operating. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research (OTSR)*.
- [BAR 22] BARDOU-JACQUET, J., MURGIER, J., LAUDET, F., & FABRE, T. (2022). Combinaison de deux technologies innovantes (bras robotisé et capteur de force peropératoire) dans l'équilibrage ligamentaire lors de la pose de prothèse totale de genou. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 108(5), 635-641. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2021.03.013>
- [BAZ 14] BAZIN, J. E., ATTIAS, A., BAGHDADI, H., BAUMANN, A., BIZOUARN, P., CLAUDOT, F., ... & BEYDON, L. (2014, May). Conflits en période périopératoire: un enjeu collectif, éthique et professionnel. In *Annales françaises d'anesthésie et de réanimation* (Vol. 33, No. 5, pp. 335-343). Elsevier Masson. <https://doi.org/10.1016/j.annfar.2014.04.006>

- [BER 22] BERHOUET, J. (2022). Planification préopératoire et analyse du mouvement. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 108(6), S156-S164. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2022.06.030>
- [BIE S.D.] BIERRY, G., & RUST, E. (s.d.). Imagerie ostéoarticulaire. Dans E. Blondiaux, E. Durand, & M. Montaudon (dirs.), *Les fondamentaux de l'imagerie médicale – Radioanatomie, biophysique, techniques et séméiologie en radiologie et en médecine nucléaire* (2^e éd.) [E-book]. Collèges des Enseignants de Radiologie (CERF), de médecine nucléaire (CNEBMN) et d'anatomie (CMFPA). <https://www.cnp-mn.fr/les-fondamentaux-chapitre-22-imagerie-osteoarticulaire/>
- [BIS 23] BISI, T., RISSER, A., CLAVERT, P., MIGAUD, H., & DARTUS, J. (2023). Quel est le taux de texte généré par de l'intelligence artificielle sur une année de publication dans Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research? Analyse de 425 articles avant versus après la mise en ligne de ChatGPT en novembre 2022. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 109(8), 1096-1102. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2023.09.014>
- [BRO 02] BROWN, G. A., MILNER, B., & FIROOZBAKHS, K. (2002). Application of computer-generated stereolithography and interpositioning template in acetabular fractures: a report of eight cases. *Journal of orthopaedic trauma*, 16(5), 347-352. *Journal of Orthopaedic Trauma*
- [CAU 24] CAUBÈRE, A., RUTIGLIANO, S., BOURDON, S., ERICKSON, J., MORELLI, M., PARSONS, M., ... & GAUCI, M. O. (2024). The effect of humeral tray thickness on glenohumeral loads in a reverse shoulder 'smart'implant. *International Orthopaedics*, 48(11), 2881-2889. <https://doi.org/10.1007/s00264-024-06282-6>
- [DAG 23] Dagneaux, L., Canovas, F., & Jourdan, F. (2023). Optimisation des prothèses totales de genou postéro-stabilisées par la méthode des éléments finis. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 109(6), S121-S131. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2023.06.022>
- [DEM 24] DEMEY, G. (2024). Ostéotomie fémorale distale pour pathologie dégénérative du genou. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 110(6), 914-924. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2024.07.004>
- [DUM 23] DUMAS, M., FAY, A. F., CHARPENTIER, E., & MATRICON, J. (2023). Le jumeau numérique en santé-État des lieux et perspectives d'application à l'hôpital. *médecine/sciences*, 39(12), 953-957. <https://doi.org/10.1051/medsci/2023178>
- [DUN 15] DUNCAN, J. M., NAHAS, S., AKHTAR, K., & DAURKA, J. (2015). The use of a 3D printer in pre-operative planning for a patient requiring acetabular reconstructive surgery. *Journal of orthopaedic case reports*, 5(1), 23. doi: [10.13107/jocr.2250-0685.247](https://doi.org/10.13107/jocr.2250-0685.247)
- [FER 17] FERREIRA, A. (2017). Exactitude et précision d'un système de navigation chirurgicale portatif pour prothèse totale de genou. Une étude de 40 cas. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 103(7), S29. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2017.09.020>
- [FLE 17] FLECHER, X., & MIGAUD, H. (2017). De la radiographie à l'imprimante 3D: quel est l'apport des nouvelles technologies de planification opératoire en chirurgie de la hanche?. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 103(3), 219-220. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2017.03.017>
- [FLU 19] FLURIN, P. H., & SIRVEAUX, F. (2019). Faut-il considérer le scanner comme un outil indispensable dans la chirurgie prothétique de l'épaule en 2019?. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 105(2), 119-121. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2019.02.003>
- [FUL 14] FULLER, S. M., BUTZ, D. R., VEVANG, C. B., & MAKHLOUF, M. V. (2014). Application of 3-dimensional printing in hand surgery for production of a novel bone reduction clamp. *The Journal of hand surgery*, 39(9), 1840-1845. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2014.06.009>
- [GAU 25] GAUCI, M. O. (2025). Filière chirurgie du futur. In *Annales des Mines-Réalités industrielles* (Vol. 2025, No. 1, pp. 15-19). Institut Mines-Télécom. <https://stm.cairn.info/revue-realites-industrielles-2025-1-page-15?lang=fr>
- [GAU 24] GAUCI, M.O. (Nov., 2024). Projet de recherche hospitalo-universitaire ReBone. *Bulletin des Orthopédistes Francophones*. 16-31. SOFCOT. <https://institut-universitaire-locomoteur.chu-nice.fr/wp-content/uploads/2024/11/BOF-96-V2.pdf>
- [GAU 21] GAUCI, M. O. (2021). Guides patient-spécifique en chirurgie orthopédique. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 107(6), S1-S10. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2021.06.015>
- [GAU 16] GAUCI, M. O., BOILEAU, P., BABA, M., CHAOU, J., & WALCH, G. (2016). Patient-specific glenoid guides provide accuracy and reproducibility in total shoulder arthroplasty. *The bone & joint journal*, 98(8), 1080-1085. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.98B8.37257>
- [GIO 16] GIORDANO, G. (2016). La technologie des poudres de titane appliquée aux grandes pertes de substance acétabulaires. Utilisation d'un implant acétabulaire massif custom-made: 13 patients avec trois ans de suivi. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 102(7), S143-S144. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2016.08.163>

- [JAC 23] JACQUES, T., SLEIMAN, R., DIAZ, M. I., & DARTUS, J. (2023). Intelligence artificielle: émergence et possible utilisation frauduleuse dans l'édition médicale. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 109(8), 1081-1084. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2023.10.010>
- [KHO 18] KOHLER, R., LECERF, G., & MASSON, A. (2018). *Livre blanc de la chirurgie orthopédique et traumatologique* [E-book]. Conseil National Professionnel de la Société Française de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique (SOFOT). <https://www.sofcot.fr/sites/www.sofcot.fr/files/medias/documents/livreblancCOT.pdf>
- [LEP 17] LE PAPE, S., BERTIAUX, S., & COURAGE, O. (2017). Les chirurgiens orthopédistes sont-ils des Geeks?. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 103(5), 564-568. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2017.05.006>
- [MAD 16] MADKOURI, R., GRELAT, M., VIDON-BUTHION, A., LLEU, M., BEAURAIN, J., & MOURIER, K. L. (2016). Évaluation de l'impact des fiches d'information SFCR avant une chirurgie rachidienne programmée. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 102(4), 344-348. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2016.02.027>
- [MAT 24] MATHIEU, J., GATTI, M., & DAGNEAUX, L. (2024). Ostéotomies supra-malléolaires: techniques chirurgicales. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 110(6), 925-939. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2024.06.021>
- [MER 17] MERLOZ, P. (2017). *La réalité augmentée en chirurgie orthopédique* [Article]. E-Mem Académie Nationale de Chirurgie, 16(3), 015. <https://www.academie-chirurgie.fr/publications/les-e-memoires/> <https://doi.org/10.2699/5m43-fg47/emem.2017.3.015>
- [MER 18] MERLOZ, P., TROCCAZ, J., CINQUIN, P., & LAVALLEE, S. (2018). La chirurgie orthopédique et traumatologique guidée par l'image. *De la naissance à l'âge adulte, Un siècle d'innovations françaises en chirurgie orthopédique et traumatologique-1918-2018*, 47-55. <https://www.sofcot.fr/sites/www.sofcot.fr/medias/medias/documents/5%20chirurgie%20guidée%20....pdf>
- [MER 15] MERLOZ, P., TONETTI, J., & RUATTI, S. (2015). Innovations en chirurgie du Rachis. Chirurgie guidée par l'image. *e-mémoires de l'Académie Nationale de Chirurgie*, 14(1), 058-062. https://e-memoire.academie-chirurgie.fr/ememoires/005_2015_14_1_058x062.pdf
- [NII 14] NIIKURA, T., SUGIMOTO, M., LEE, S. Y., SAKAI, Y., NISHIDA, K., KURODA, R., & KUROSAKA, M. (2014). Tactile surgical navigation system for complex acetabular fracture surgery. *Orthopedics*, 37(4), 237-242. <https://doi.org/10.3928/01477447-20140401-05>
- [PER 23] PERRIN, A., MAINARD, N., LIMOUSIN, M., MEYER, E., REMY, F., STROUK, G., ... & RIDON, P. E. (2023). Satisfaction et faisabilité de la VidéoTéléConsultation (VTC) en chirurgie orthopédique et traumatologique dans le contexte d'épidémie de la COVID-19: étude prospective de 783 patients. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 109(1), 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2022.06.004>
- [RAN 14] RANKIN, T. M., GIOVINCO, N. A., CUCHER, D. J., WATTS, G., HURWITZ, B., & ARMSTRONG, D. G. (2014). Three-dimensional printing surgical instruments: are we there yet?. *Journal of Surgical Research*, 189(2), 193-197. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.02.020>
- [REI 18] REINA, N., COGNAULT, J., OLLIVIER, M., DAGNEAUX, L., GAUCI, M. O., & PAILHE, R. (2018). L'orthopédie mobile, outil d'évaluation et d'éducation: l'application CJOrtho®. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 104(4), 370-374. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2018.04.009>
- [SAM 09] SAMUELI, J. J. (2009). La découverte des rayons X par Röntgen. *Bibnum. Textes fondateurs de la science*. <https://doi.org/10.4000/bibnum.714>
- [SCI 20] SCINTU, P. F., & NORD, B. (2020). État de l'art de la chirurgie robotique. *IRBM News*, 41(6), 100278. <https://doi.org/10.1016/j.irbmnw.2020.100278>
- [SOL 23] SOLER, L. (2023). Anatomie virtuelle et augmentée pour la chirurgie. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 207(1), 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2022.07.030>
- [UPE 17] UPEX, P., JOUFFROY, P., & RIOUALLON, G. (2017). Application of 3D printing for treating fractures of both columns of the acetabulum: benefit of pre-contouring plates on the mirrored healthy pelvis. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 103(3), 331-334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.otsr.2016.11.021>
- [YU 15] YU, A. W., DUNCAN, J. M., DAURKA, J. S., LEWIS, A., & COBB, J. (2015). A feasibility study into the use of three-dimensional printer modelling in acetabular fracture surgery. *Advances in Orthopedics*, 2015(1), 617046. <https://doi.org/10.1155/2015/617046>