

Filière chirurgie du futur

Par Dr Marc-Olivier GAUCI

Chirurgien orthopédiste, CHU de Nice, responsable de l'Unité ICARE (Intelligence artificielle, Chirurgie computationnelle et Augmentée, Réutilisation des données, Évaluation multiparamétrique), Inserm U1091, Université Côte d'Azur

Le jumeau numérique (JN) est devenu la valeur centrale de l'innovation en chirurgie. Issu de la « chirurgie computationnelle » (allant de la donnée au JN) et support de la « chirurgie augmentée » (applications peropératoires et jusqu'au suivi du patient) il est le vecteur de l'approche intégrative du soin chirurgical : le parcours patient. En conséquence, de nouvelles organisations incluant coordination des métiers, formations et évaluation doivent être mises en place associées à une mise à niveau stratégique des infrastructures du numérique dans les établissements chirurgicaux et leurs écosystèmes d'innovation.

Des plateformes technologiques (entrepôts de données de santé, plateformes de partage hébergeurs de donnée, *clusters* de calcul) et de test en situation expérimentale doivent côtoyer les blocs chirurgicaux, avec une vision de l'innovation centrée sur l'usage et d'évaluation *via* des indicateurs dédiés et des registres de suivi. Le soin, l'enseignement et la recherche se trouvent donc plus que jamais liés et conjugués au travers d'outils et d'enjeux communs.

Introduction

Dès son début, le XX^e siècle a été marqué par l'arrivée de l'asepsie, de la radiographie et de l'anesthésie. Ces révolutions amorcèrent la notion embryonnaire du « parcours du patient » : le médecin traitant adresse le patient au chirurgien, qui demande un bilan d'imagerie, pose un diagnostic et une indication chirurgicale, déclenchant une consultation anesthésique. Au-delà des améliorations techniques que connurent ces innovations par la suite, elles nécessiterent la mise en place d'infrastructures hospitalières autour de plateaux techniques lourds répondant aux exigences de sécurité, de logistique et de fonctionnement. Touchant à sa fin, le XX^e siècle avait donc répondu aux défis posés par ces révolutions qui l'avaient vu naître.

Un nouveau cycle s'est amorcé à l'entrée dans notre XXI^e siècle. Cette fois, le numérique occupe toute la place. Polymorphe, cette révolution transforme, comme les précédentes, le diagnostic, les indications, les techniques chirurgicales... et s'accompagne de son cortège d'innovations. Mais il fait naître des dimensions nouvelles et vertigineuses, qui imposent désormais le « parcours patient » comme unité de réflexion, qui rendent obsolètes nos infrastructures et nos modèles de valorisation organisés autour d'actes silotés, et qui recentrent le patient – et son jumeau numérique – au cœur d'un maillage d'acteurs du soin. Cela se traduit au niveau chirurgical par des enjeux critiques : collaboration interdisciplinaire, exploitation éthique des données, adaptation des infrastructures non plus uniquement hospitalières mais territoriales.

Sera-t-on en mesure, cette fois-ci, de répondre en France et en Europe à de tels défis ?

Une approche chirurgicale circulaire et intégrative

Si la technique et les implants ont été les figures de proue des innovations de la seconde moitié du XX^e siècle, elles ont cédé la place au modèle numérique plus communément appelé jumeau numérique (JN), qui est désormais la valeur d'innovation centrale. Le JN est une représentation simplifiée de la réalité, dédiée à un cas d'usage. Son utilisateur doit être conscient de son périmètre d'application ainsi que de ses limites pour le maîtriser.

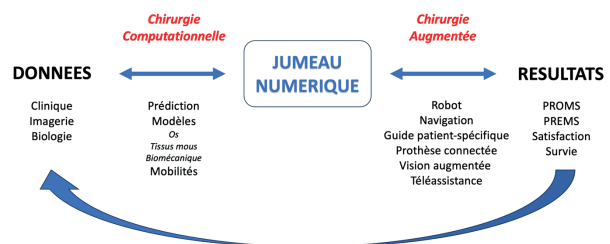


Figure 1 : Le numérique et ses outils ouvre une approche circulaire de l'innovation chirurgicale dans l'exemple de l'orthopédie (Source : Auteur).

Chirurgie computationnelle

Comme tout moteur, le JN a son pétrole : les données de santé.

Le traitement de ces données jusqu'au JN est la « chirurgie computationnelle ». Elle identifie son cas d'usage, le service attendu dans la pratique en termes de représentation, de prédiction, et déduit les données nécessaires à sa génération et les approches méthodologiques. Cette étape nécessite de reprendre le processus de réflexion chirurgical : par exemple réduire et fixer une fracture osseuse nécessite de générer l'os fracturé en 3D (problématique de segmentation), de retrouver son état antérieur prémorbide (modèle statistique de

forme), d'évaluer la plaque d'ostéosynthèse la plus adaptée (modèle géométrique) et résistante (modèle biomécanique). Enfin, il faut développer l'algorithme, le flux de travail et l'interface.

Les cas d'usage chirurgicaux sont à la fois fortement appliqués à l'imagerie et rejoignent en cela les usages des radiologues (diagnostic, classifications lésionnelles), mais s'étendent plus loin, jusqu'au bloc opératoire. En chirurgie, ces modèles sont utilisés pour le diagnostic, la prise de décision, et le traitement et l'utilisation de l'IA s'y retrouvent à plusieurs niveaux.

Le diagnostic

- La segmentation : extraire la région d'intérêt à partir de l'imagerie (scanner le plus souvent et de plus en plus IRM). L'utilisation de méthode de filtrage (basé sur les unités Hounsfield) et de propagation a progressivement laissé place à des algorithmes nnU-Net utilisant du *machine learning* qui permet l'automatisation de cette étape, et donc ouvre des perspectives d'automatisation du chirurgien et de réduction des effectifs d'ingénieurs dédiés à cette tâche chronophage.
- La classification : la réalisation de mesures morphométriques et le développement de nouveaux outils en chirurgie osseuse ou la modélisation de zones fonctionnelles (vasculaires, biliaires, bronchiques...) ont pour objectif de mieux classer, voire d'améliorer ces classifications parfois très anciennes, qui sont à la base de la décision chirurgicale et de la communication scientifique. L'approche pauci-paramétrique des classifications classiques étant elle-même devenue insuffisante à guider le chirurgien du diagnostic à sa décision.
- La prédiction de l'anatomie prémorbide, c'est-à-dire avant la survenue de la pathologie, permet de fixer des objectifs de restauration anatomique *ad integrum* (réduction de fractures osseuses) ou de calibrer l'intervention en fonction des morphométries prémorbides (pose d'implant prothétiques ou équilibrage des parties molles) en vue de meilleurs résultats en termes de survie ou de mobilités.

La prise de décision

Il s'agit de porter l'expertise au chevet du patient quel que soit le niveau du chirurgien. Le modèle numérique présente tous les éléments décisionnels et fait une proposition thérapeutique. L'IA intervient une nouvelle fois, cette fois-ci *via* des algorithmes de prédiction entraînés auprès d'experts, qui génèrent une prédiction de probabilité sur l'option la plus consensuelle.

Simulation du geste technique

Cette étape permet de tester les options techniques et leurs conséquences (mobilités articulaires, impact fonctionnel topographique...).

Initialement accusé d'éloigner les chirurgiens des connaissances fondamentales, le JN contribue largement à améliorer l'anatomie descriptive, en ouvrant le champ tridimensionnel, et l'anatomie chirurgicale en permettant d'intégrer des aspects fonctionnels. Il devient un formidable outil pédagogique pour transmettre des notions mieux exprimées et plus explicites en plus de s'appuyer sur un support visuel. Le JN est donc aussi appelé à être

le principal vecteur entre le soin et la formation, entre le cas clinique réel et le scénario pédagogique.

Défis

Les défis à venir sont :

- de concevoir un processus intégré global allant de la collecte des données aux applications numériques et aux retours patients (PROM), en assurant un enrichissement et un raffinement permanent des modèles. En corollaire se pose la problématique des certifications dynamiques [1, 2] de ces dispositifs médicaux ;
- de « plateformiser » l'accès aux applications numériques dont le nombre croît exponentiellement avec les cas d'usage ;
- de procéder au déploiement : il faut ici préciser que ces outils de chirurgie computationnelle et augmentée répondent désormais à une obligation de moyens et doivent être utilisés par les professionnels, et que la responsabilité incombe toujours à l'« opérateur frontal » tel que désigné dans les textes européens [3]. Si les chirurgiens ont une obligation d'information, ils auront une obligation de planification.

Chirurgie augmentée

Afin d'avoir accès aux informations prétraitées et d'appliquer de façon plus ou moins figée cette planification au bloc opératoire, le JN doit ensuite s'incarner dans un outil applicatif au bloc opératoire. Nous ne détaillerons pas les aspects techniques de ces solutions, mais indiquerons les enjeux autour de chacune des technologies.

L'impression 3D : cette technologie propose trois livrables chirurgicaux :

- des modèles pour préparer la chirurgie (repérage d'une tumeur, sélection / préparation d'un implant), informer le patient ou à des fins pédagogiques ;
- des instruments sur mesure, « patient-spécifiques » (guide de coupe osseuse, visée pour broches ou injection [4]) ;
- des implants (prothèse, stents...).

Si ces derniers restent à la main des industriels (DM classe III), nous voyons se déployer des plateformes d'impression 3D POC ("*at the Point Of Care*") pour les modèles et les guides (DM IIa), qui intègrent des « usines » dans les établissements de santé (ES) [5, 6].

Navigation & Robotique

Ces technologies sont des piliers de la chirurgie mini-invasive, et améliorent reproductibilité et précision. Les enjeux qui les accompagnent sont la financiarisation et le risque de « marché captif » résidant dans la dépendance des établissements et chirurgiens à un fabricant unique, *via* des coûts élevés, des contrats exclusifs, et des mises à jour propriétaires [7]. À terme, cela représente un risque pour la diversité des implants (liés au robot), l'innovation indépendante, et réduit la flexibilité des équipes chirurgicales face aux évolutions technologiques et aux besoins cliniques.

Vision augmentée

Dernière-née, elle emmène le JN au bloc opératoire *via* la réalité augmentée ou mixte – la réalité virtuelle

étant consacrée à la formation ou l'information patient. Véritable « ancillaire cognitif » (en miroir des « ancillaires techniques » qui assistent directement au geste), ces dispositifs augmentent la conscience de la situation du chirurgien (voir la Figure 2). Les évolutions se font vers l'intégration en temps réel de données, l'évaluation anatomique, le guidage des gestes. Enfin, il deviendra un outil collaboratif permettant d'échanger en temps réel avec des experts ou des étudiants (voir la Figure 3). Les défis se situent dans l'optimisation de flux d'information, l'évaluation de la distraction [8] et de la charge mentale, mais les indicateurs spécifiques sont quasi inexistantes.

D'autres technologies sont encore à la marge, mais à fort potentiel

Par exemple : exosquelettes, prothèses connectées [9]...

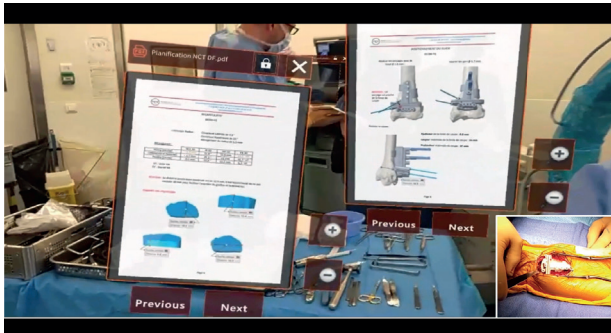


Figure 2 : Exemple d'une plateforme de réalité mixte permettant l'affichage d'une planification d'ostéotomie de réaxation du radius distal avec instrumentation patient-spécifique (encart inférieur droit) permettant de guider la coupe (Source : courtoisie CHU de Nice).

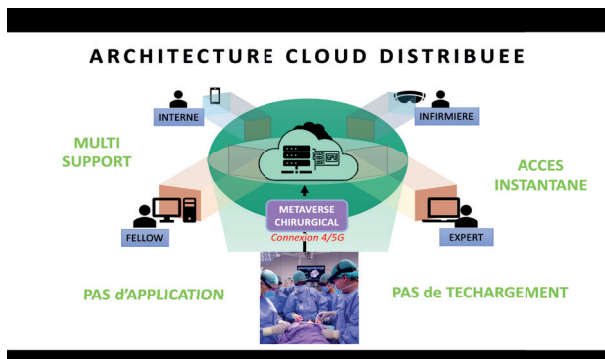


Figure 3 : Exemple d'architecture *cloud* distribuée permettant un partage collaboratif *via* un métaverse chirurgical à partir d'un dispositif de vision augmentée (Source : Auteur).

Défis :

- la restructuration logistique : les étapes de la production de l'imagerie jusqu'au bloc opératoire ont chacune leur temporalité propre et nécessitent un suivi dédié inexistant avant la chirurgie patient-spécifique et une réadaptation des pratiques ;
- une coordination globale et opérationnelle (réglementation, financiarisation), car l'hétérogénéité des initiatives régionales et des méthodologies de structuration risque à terme d'entraîner de fortes inégalités d'accès à la chirurgie personnalisée ;
- la restructuration de la formation médicale et paramédicale autour de ces technologies qui deviennent

en quelques années centrales et doivent être intégrées – et acceptées – dans les blocs opératoires ;

- la mise en place d'indicateurs de performance de ces technologies, de méthodologies intégratives et des structures d'évaluation multiparamétrique.

En une décennie, le JN s'est imposé au cœur d'une dynamique cyclique intégrative, collaborative, technique et cognitive alimentée par la donnée. Ce cycle est intimement associé au parcours-patient. Ces innovations technologiques sont poussées *via* de forts investissements industriels, et leur déploiement ne fait désormais plus de doute [10]. Cependant, il reste une inadéquation critique entre l'évidence technologique et les stratégies de valorisation actuelles. Enfin, les infrastructures permettant d'en maîtriser et d'en exploiter les phases sont encore à déployer largement.

La recherche, le développement et l'innovation en chirurgie face aux enjeux infrastructurels

Face à cet élan hégémonique numérique, la mise à niveau des infrastructures des établissements de santé et de leurs écosystèmes territoriaux est fondamentale et stratégique. Cette ambition n'est réalisable qu'au travers de politiques technologiques structurantes portées à un niveau territorial régional, national ou européen.

Plateformes technologiques transversales

Autour de la donnée, plusieurs défis infrastructurels impliquent les différents acteurs à l'origine des JN en chirurgie.

Collecte des données – alignement des formats – mise en qualité à des fins de partage

Les données de santé sont présentes dans les dossiers de patients informatisés et les logiciels métiers (*i.e.* des logiciels spécifiques à chaque spécialité). Leur collecte nécessite un alignement à partir des différents formats dans lesquels elles sont générées : c'est l'interopérabilité. L'accès à un grand volume de données est nécessaire pour construire un JN tout en respectant un cadre réglementaire strict. Plusieurs sources de données sont sollicitées, en particulier celles hébergées dans les ES. Il s'agit donc de structurer des outils de collecte, de mise en qualité et de partage à un niveau « industriel » des données de santé. C'est l'enjeu des entrepôts de données de santé, qui se structurent depuis quelques années sur le territoire.

Hébergement et partage des données

La mise en partage nécessite un environnement adapté afin de pouvoir héberger, suivre les données traitées et leur partage entre les différents acteurs (établissements de santé, instituts de recherche et industriels). Cette approche interdisciplinaire répond à un cadre réglementaire et éthique, et intègre des données issues de différentes sources (génomique, transcriptomique, imagerie, clinique). La mise en place de plateformes hébergeuses de données de santé (HDS) et de plateformes multi-omiques permet de structurer ces réseaux

institutionnels et d'accélérer les échanges au travers de ces espaces *cloud* partagés.

Analyse et traitement des données – clusters de calcul

Il s'agit d'un ensemble de machines (nœuds) travaillant ensemble pour exécuter des calculs intensifs ou parallélisés. Ces *clusters* permettent de répondre aux besoins de ressources intensives comme le calcul GPU, essentiel dans des domaines tels que l'apprentissage profond en IA. Les enjeux de puissance et de conformité (notamment 27001) sont aujourd'hui clés dans l'innovation en santé.

C'est au prix de la création et de la maturation de ces plateformes technologiques mutualisées indispensables que la chirurgie computationnelle restera compétitive. Ces approches transversales en plateformes révèlent des enjeux forts de gouvernance (portage juridique, processus décisionnels), de choix techniques (solution partenaire, systèmes de gestion, éditeurs), de fonctionnement (comité scientifique et éthique, gestion de projet) et de valorisation (autonomie et pérennité).

Écosystèmes chirurgicaux innovants

Il est donc nécessaire de se doter d'établissements chirurgicaux hybrides intégrés au sein d'écosystèmes dotés technologiquement. Ces établissements doivent intégrer :

- La prise en charge de patients chirurgicaux avec des dispositifs armés automatisés et *via* des politiques assumées pour un recueil des données patients en continue et en vie réelle. Ce recueil s'établit dès la première consultation et jusqu'au bloc opératoire, et lors de la prise en charge des patients en ville et à domicile. Plus que dans d'autres disciplines, la proximité des patients et des équipes chirurgicales actives constitue une condition incontournable à tout environnement innovant en chirurgie. C'est à tous les niveaux de l'action chirurgicale (consultation, bloc opératoire, centre de réhabilitation, suivi de ville) que doivent être rendus opérationnels des capteurs de données.
- Des plateformes technologiques au sein des ES et dans l'écosystème d'innovation : EDS, plateformes multi-omiques, espaces *cloud* hébergeurs de données de santé, *clusters* de calcul qui accompagnent la donnée de façon certifiée de sa génération, sa mise en qualité et son partage vers des centres de recherche translationnelle mixte (clinique et universitaire) amorçant des développements à un niveau précoce de TRL (*Technology Readiness Level*) jusqu'à la réalisation des preuves de concepts (POC).
- Des plateformes de test identifiées, voire labellisées comme des tiers de confiance permettant la réalisation d'essais autour des POC :
 - en milieu expérimental : les laboratoires d'anatomie et les centres de simulation qui peuvent ainsi favoriser le développement de nouvelles activités d'évaluation (crash / stress-tests) de solutions numériques. Ces activités présentent un potentiel de valorisation parallèle à leur fonction pédagogique habituelle, et peuvent catalyser les processus de certifications.

- en environnement réel : bloc opératoire augmenté doté d'équipements de capture de signaux hétérogènes (vidéos, capteurs physiologiques équipe / patient, questionnaires à visée cognitive).

- Une acculturation et un renfort opérationnel des équipes support de recherche clinique et d'innovation, dont les méthodologies étaient héritées de la recherche pharmacologique et qui doivent continuer à développer des compétences et une agilité spécifique et indispensable à la recherche et l'innovation numérique en santé.
- Des compétences en transfert technologique et en accès au marché (*go-to-market & market access*) assurant un "*spin-offage*" de ces solutions au moment opportun avec une capacité de déploiement assurée pour accompagner l'innovation vers l'usage. En effet, au-delà de la pertinence clinique et de la performance technologique des dispositifs développés, l'intégration doit être pensée dès conception avec une approche multiparamétrique pour optimiser son succès à la valorisation et au déploiement.
- La mise en place de registres de patients permettant un suivi des patients à échelle au moins nationale, voire européenne, et une évaluation de l'efficacité des dispositifs médicaux pour valoriser le service médical rendu. Cette approche permet aussi une réponse critique à la problématique de certification des DM commercialisés, notamment dans le contexte MDR européen. En cela, les sociétés savantes ont toute légitimité et indépendance pour assurer ce rôle [11].

Défis

Il s'agit de mettre en place des pôles opérationnels mettant en œuvre les principes d'évaluation édictés notamment par la HAS sur les DM, DM-IA et DMI.

Cette dynamique permet aussi d'évaluer les indicateurs de performance spécifiques, voire d'en développer de nouveaux par rapport à des technologies nouvelles comme la vision augmentée, dont l'utilisation n'est aujourd'hui pas encadrée (apports cognitifs, optimisation des informations, acceptabilité, risques relatifs à la distraction...), et ce, malgré un déploiement commercial rapide.

Les ES chirurgicaux sont donc destinés à être de véritables carrefours d'échange et de contact entre les protagonistes de ces écosystèmes chirurgicaux innovants. Les défis sont portés par les acteurs de la filière de l'innovation chirurgicale.

Les infrastructures hospitalières

Les ressources liées au numérique des ES doivent être renforcées. Les ES ont pour principale mission la sécurité des soins portés au patient et le respect de l'éthique, notamment vis-à-vis de ses données. Si cela explique la prudence dans l'évolution des processus d'adoption des technologies numériques (avec une inertie plus forte que dans d'autres domaines comme l'aérospatial, l'énergie...), il n'en reste pas moins que les moyens alloués aux départements de systèmes d'information restent de l'ordre de 1% des budgets annuels dans les ES, et ce depuis de nombreuses années alors que

la place du numérique n'a cessé de croître et qu'il est devenu ubiquitaire dans tout le parcours de soin.

Les groupements de recherche (GDR) (Inserm, INRIA, CNRS...) et les universités

- la structuration de centres identifiés de recherche en santé numérique territoriaux organisés autour d'une gouvernance locale incluant tous les acteurs (établissements de santé, universités, GDR) pour porter des projets d'équipement d'envergure. Les possibilités de portage juridique sont nombreuses (groupement de coopération sanitaire par exemple, fondation, ...);
- la mise en place d'outils opérationnels mutualisés à une échelle nationale type *cloud* partagé, *clusters* certifiés, plateformes multi-omiques. Il s'agit de problématiques ubiquitaires.

Les écoles d'ingénieurs

Les écoles d'ingénieurs doivent renforcer leurs liens avec les écosystèmes de santé numérique. Les ressources humaines et les leviers d'attractivité des profils et des nouveaux métiers sont un facteur très limitant dans les mises en œuvre de projets.

Conclusion

Le JN est le porteur de la vague du numérique et de l'IA. Renforçant le chirurgien qui prévoit par expérience des complications, ces outils permettent de prédire (la survenue d'une complication) et de prévenir (s'armer pour une complication éventuelle) pour être finalement préparé (la complication va survenir et l'équipe est armée) et maîtriser les risques d'une intervention chirurgicale.

Progressivement se développe un inter-enrichissement des environnements élaborés, initialement de façon verticale, pour le soin, la recherche et la pédagogie. Ainsi, le cas clinique vient nourrir les scénarios pédagogiques et crée les cas d'usage des projets de recherche. À l'inverse de la tendance actuelle consistant à vouloir séparer, face aux charges croissantes pesant sur les acteurs hospitalo-universitaires, ces trois composantes ont vocation à se coordonner autour d'outils et de solutions communes qu'ils utilisent, à commencer par la donnée et le modèle numérique. En chirurgie plus qu'ailleurs, l'approche collaborative d'équipes autour de plateaux techniques est stratégique pour se donner les moyens et cibler les innovations. Les expériences récentes montrent que l'efficacité et les succès des solutions numériques (dont l'IA) sont toujours liés à la gestion des risques et / ou à la satisfaction patient. Ce sont les seules clefs de la valorisation (diminution des durées de séjour, des complications...), et les écosystèmes chirurgicaux sont seuls à même de pouvoir garantir les bons cas d'usage. Par essence, la temporalité dans l'innovation numérique rend très courte la boucle allant du besoin clinique à la recherche, à l'innovation et à son utilisation au service du patient.

Faut-il donc continuer à parler de « recherche » tant les acteurs du numérique et les outils technologiques ont vocation à être mutualisés, en particulier en chirurgie, et tant les livrables du numérique trouvent des applications aussi bien dans le soin, le parcours-patient ou

la formation ? Les infrastructures identifiées dans les ES et autour du JN sont désormais essentielles à court terme pour mener de l'innovation à l'usage, maintenir l'Europe, ses pôles d'innovation et ses ES dans l'excellence du soin chirurgical.

Références

1. ABRAMOFF M. D., WHITESTONE N., PATNAIK J. L., RICH E., AHMED M., HUSAIN L., HASSAN M. Y., TANJIL M. S. H., WEITZMAN D., DAI T., WAGNER B. D., CHERWEK D.H., CONGDON N. & ISLAM K. (2023), "Autonomous artificial intelligence increases real-world specialist clinic productivity in a cluster-randomized trial", *Npj Digit Med.*, 6(1), pp.1-8.
2. Commissioner O of the. FDA permits marketing of artificial intelligence-based device to detect certain diabetes-related eye problems. FDA [Internet]. 2020 Mar 24 [cited 2024 Dec 2]; Available from: <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-permits-marketing-artificial-intelligence-based-device-detect-certain-diabetes-related-eye>
3. Parlement européen. Résolution sur un cadre européen pour l'intelligence artificielle, les robots et les technologies numériques (2020/2012(INI)). 2020 [cited 2024 Dec 2]; Available from: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2020-0276_FR.html
4. CASATUTO T., GOSSELIN M., LERHE B., VANDERSTEEN C., EHRMANN E. & SAVOLDELLI C. (2021), "In-house tooth-supported guide for the injection of botulinum toxin into the lateral pterygoid muscle using Blue Sky Plan software: A technical note", *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.*, 122(4), pp. 77-80.
5. BASTAWROUS S., WU L., LIACOURAS P. C., LEVIN D. B., AHMED M. T., STRZELECKI B., AMENDOLA M. F., LEE J.T., COBURN J. & RIPLEY B. (2022), "Establishing 3D printing at the point of care: Basic principles and tools for success", *RadioGraphics*, 42(2), pp. 451-468.
6. CALVO-HARO J., PASCAU J., MEDIAVILLA-SANTOS L., SANZ-RUIZ P., SÁNCHEZ-PÉREZ C., VAQUERO-MARTÍN J. & PÉREZ-MAÑANES R. (2021), "Conceptual evolution of 3D printing in orthopedic surgery and traumatology: From "do it yourself" to "point of care manufacturing."", *BMC Musculoskelet Disord* [Internet] [cited 2024 Dec 2];22. Available from: <https://consensus.app/papers/evolution-printing-surgery-traumatology-point-care-calvoharo/89905855609d57579294e71da27b234a/>
7. LEE Y.M., STRETTON B., TAN S., GUPTA A., KOVOOR J., BACCHI S., LIM W. & CHAN W. O. (2024), "Captive markets and medical artificial intelligence", *J Med Imaging Radiat Oncol.*, 68(3), pp. 278-281.
8. HEALEY A. N., SEVDALIS N. & VINCENT C. A. (2006), "Measuring intra-operative interference from distraction and interruption observed in the operating theatre", *Ergonomics*, 49(5-6), pp. 589-604.
9. CAUBERE A., RUTIGLIANO S., BOURDON S., ERICKSON J., MORELLI M., PARSONS M., NEYTON L. & GAUCI M. O. (2024), "The effect of humeral tray thickness on glenohumeral loads in a reverse shoulder "smart" implant", *Int Orthop*. September 2.
10. GLOBAL MARKETS FOR DIGITAL SURGERY SOLUTIONS 2022 [Internet], Life Science Intelligence; 2022 [cited 2024 Dec 2]. Available from: <https://www.lifesciencemarketresearch.com/market-reports/the-global-digital-surgery-technologies-market>
11. DELAUNAY C., BRAND C., POICHOTTE A., POIGNARD A. & BOISGARD S. (2024), "What does the SOFCOT-RENACOT 2024 hip prosthesis register tell us?", *Orthop Traumatol Surg Res OTSR.*, 103996.