

ÉVOLUTION DE LA CHIRURGIE ORTHOPÉDIQUE (2.0, 3.0, 4.0, ...) :

L'IMAGERIE AU CŒUR DES TRANSFORMATIONS

Manon Bachy, Elie Saghbiny, Pierre Mary, Raphaël Vialle

Au cours des dernières décennies, l'évolution de la chirurgie orthopédique a été marquée par des avancées technologiques significatives. A l'instar des progrès du web, les termes « 2.0, 3.0 et 4.0 » sont souvent utilisés pour décrire différentes phases ou évolutions successives dans un domaine particulier, en mettant l'accent sur ces avancées technologiques (Le Deuff, 2007). Ainsi les **termes de "chirurgie 2.0", "chirurgie 3.0" et "chirurgie 4.0" qui ne sont pas des termes standardisés ou largement acceptés dans le domaine médical, permettent de décrire l'évolution de la chirurgie au fil du temps, en fonction des avancées technologiques et des pratiques cliniques. Appliqués à la chirurgie orthopédique pédiatrique, ils suggèrent que l'imagerie médicale se trouve au cœur de ces transformations jouant un rôle clé dans chaque étape de cette évolution.**

La version 1.0 de la chirurgie orthopédique peut ainsi, *a posteriori*, être associée à une pratique classique et historique avec l'utilisation seule de radiographies standard pour l'évaluation pré et post opératoire. Si cette analyse en 2 dimensions peut paraître obsolète depuis le développement des imageries en coupe, la radiographie standard reste toujours un examen indispensable à la fois en traumatologie et en chirurgie orthopédique programmée, pouvant être ainsi être toujours considérée comme irremplaçable.

La notion 2.0 suggère la notion de changement fondamental avec introduction de nouveaux concepts tels que le partage collaboratif de contenu et l'utilisation de plateformes interactives. Ainsi la version 2.0 de la chirurgie orthopédique peut faire référence à l'introduction de technologies numériques et informatiques dans la pratique chirurgicale. Les exemples les plus démonstratifs sont l'utilisation de logiciels de planification chirurgicale assistée par ordinateur et de systèmes de navigation chirurgicale assistée par ordinateur.

En orthopédie pédiatrique, la planification assistée par ordinateur dans les programmes chirurgicaux de corrections de déformations sévères des membres par fixateur externe a permis d'optimiser les prises en charges par une amélioration de la précision de la correction dans les 3 plans et une meilleure anticipation de la stratégie de correction (Figure 1A : Fixateur externe circulaire, 1B : programme de correction). Il est important de savoir que malgré les avancées de la planification numérique, celle-ci reste actuellement toujours basée sur une radiographie standard (Figure 1C : radiographie avec repère).

Les avancées en imagerie et notamment la diffusion du TDM avec reconstruction 3D sécurisent l'utilisation de nouvelles technologies comme celle du clou magnétique centromédullaire pour l'allongement des membres. Elles ne permettent cependant pas de diminuer toutes les complications inhérentes à la technique, et notamment le risque de luxation des articulations adjacentes surveillées par évaluation radiographique hebdomadaire en phase d'allongement (Figure 2 : clou magnétique centromédullaire pour allongement fémoral).

Si les systèmes de navigation chirurgicale assistée par ordinateur sont très répandus en chirurgie orthopédique adulte pour l'implantation de prothèses, ils ne sont pas d'utilisation courante en orthopédie pédiatrique.

La chirurgie 3.0 va au-delà de la chirurgie 2.0 en introduisant l'intelligence artificielle (IA) et l'automatisation avec des champs d'application très larges allant d'algorithmes d'IA pour analyser les données radiologiques et aider à la prise de décision, à la robotique chirurgicale ou à la personnalisation des traitements par une analyse avancée des données.

Ainsi les techniques d'imagerie avec reconstruction 3D sont de plus en plus utilisées en pratique clinique avec l'élaboration en temps réel d'images détaillées des structures osseuses et des parties molles, améliorant la compréhension des déformations et permettant le développement de nouvelles stratégies thérapeutiques comme la réalisation d'implants sur mesure pour le traitement de thorax en entonnoir (Figure 3) avec une chirurgie moins lourde et des résultats cosmétiques prometteurs.

La planification pré-opératoire associée à l'utilisation de guides de coupe sur mesure, adaptée à l'anatomie spécifique du patient permet de simplifier l'acte chirurgical, d'augmenter la précision du geste et de fiabiliser la coupe osseuse et l'ostéosynthèse. Leur utilité semble très importante en chirurgie pédiatrique, en raison du très grand nombre de déformations osseuses nécessitant des ostéotomies, du large panel d'indications et de la variabilité de la taille des os. Seule une acquisition scanner est actuellement validée pour la planification, impliquant une irradiation des jeunes patients. Une revue récente de la littérature sur l'utilisation des guides de coupe en pédiatrie (Raza et al., 2021), retrouvait 22 articles publiés entre 2011 et 2020 (dont 87% publiés entre 2017 et 2020), représentant un total de 212 patients, d'âge moyen 11. 2 ans (3 à 21 ans). Les conclusions suggéraient que l'utilisation des guides de coupe permet une amélioration de la correction angulaire et des mobilités sans complications majeures rapportées. Une étude rétrospective réalisée sur 24 enfants et 50 ostéotomies d'avant-bras, 20 réalisées avec guide de coupe et 30 sans guide de coupe (Benayoun et al., 2022), retrouvait un gain de temps opératoire de 42 minutes par rapport à une chirurgie sans guide de coupe, faisant passer en moyenne la durée d'intervention de 171 ± 48.6 à 129 ± 35.6 minutes ($p=0.02$) et une amélioration de la qualité de vie.

Les guides de coupe étant imprimés selon l'anatomie spécifique du patient, leur positionnement permet de définir le niveau d'ostéotomie et de faciliter l'ostéosynthèse ; deux paramètres majeurs permettant de diminuer de façon significative l'exposition des patients aux radiations. L'étude comparative menée sur les avant-bras retrouvait que l'irradiation per-opératoire diminuait de 126 ± 107 μ Gy en moyenne par intervention sans utilisation de guide de coupe, à 38 ± 27 μ Gy en moyenne par intervention avec guide de coupe ($p=0.08$) (Benayoun et al., 2022). Le temps de fluoroscopie semblait diminuer également de 13.3 ± 12.9 secondes dans le groupe sans guide de coupe à 2.4 ± 3.1 secondes dans le groupe guide de coupe ($p=0.05$).

L'utilisation de guide de coupe nécessitant une acquisition par TDM de l'anatomie osseuse avec reconstruction 3D pour l'acquisition d'images permettant la modélisation 3D de l'os et la planification des guides de coupe, cela implique une dose totale de rayonnement plus élevée, avec dans l'étude sur les avant-bras, 7663 ± 3638 μ Gy dans le groupe guide de coupe que dans le groupe sans guide de coupe 126 ± 107 μ Gy ($p<0.001$) (Campe et al., 2006).

Si de nouvelles séquences IRM, « Zero Echo Time » (Breighner et al., 2019) se développent et se rapprochent des images obtenues par TDM, elles ne sont pas toujours pas actuellement utilisées en routine.

Si les techniques actuelles de « mirroring » permettent par superposition d'obtenir les corrections nécessaires pour rétablir une anatomie normale, la planification ne se fait pas par IA et l'intervention du chirurgien dans la planification, en plus des ingénieurs, est toujours actuellement nécessaire.

A la différence de la chirurgie pédiatrique viscérale ou urologique, l'assistance robotique commence seulement à s'installer dans les blocs opératoires de chirurgie orthopédique pédiatrique pour les vissages ilio-sacrés. ou les ligamentoplasties du LCA. Les robots chirurgicaux sont connus pour assister les chirurgiens dans la réalisation d'incisions et de gestes extrêmement précis, la chirurgie devenant ainsi plus sûre et moins agressive même pour des indications complexes, avec moins de douleurs post-opératoires et des récupérations plus rapides.

Si les contraintes financières et d'encombrement sont les principales limites actuelles de cette technologie, la miniaturisation et le nombre croissant d'industriels peuvent aider à les dépasser à l'avenir. L'attitude actuelle semble être dans le développement de la « cobotique » ou robotique collaborative où le robot assiste le chirurgien dans son expertise et son savoir-faire, sans avoir pour objectif de le remplacer.

La chirurgie 4.0 représente l'étape actuelle de l'évolution de la chirurgie, caractérisée par une convergence et une interconnectivité de ces technologies disruptives. Le traitement des données est omniprésent et en temps réel grâce à une intégration plus profonde de l'IA et de l'automatisation. Les lunettes de réalité augmentée ont ainsi fait récemment leur entrée dans les blocs opératoires d'orthopédie pédiatrique (Figure 4). En chirurgie adulte, la possibilité de superposer du contenu numérique au monde réel permet de contrôler la position des implants en chirurgie prothétique. Actuellement encore à l'étape de test en clinique dans notre discipline, elle permet grâce au jumeau numérique du patient en 3D d'améliorer la compréhension des déformations en faisant en temps réel pivoter les hologrammes obtenus pouvant aider la réalisation de certains gestes comme les visées pédiculaires. Les perspectives d'utilisation en pédagogie sont ainsi très vastes et utilisables à toute étape du cursus médical : de la simple vision des déformations à la pratique et au perfectionnement de procédures, permettant grâce à cet environnement ludique à la pointe de la technologie, une adhésion forte des étudiants.

La digitalisation de l'ensemble des étapes de la prise en charge du patient génère les fameuses « big data », dont le clinicien ne pourra tirer profit qu'avec l'aide de l'IA. Les problématiques de protection des données ou des questions éthiques posées par ce développement d'une santé de plus en plus « connectée » et de l'utilisation du métavers restent des challenges majeurs s'ajoutant aux problématiques de la disponibilité des équipements et des ressources de chaque établissement ainsi que de la nécessité de réaliser des TDM chez des enfants.

Conclusion

De nouvelles évolutions technologiques continuent d'émerger, et les concepts associés à la "x.0" peuvent évoluer au fil du temps. Cette terminologie, souvent utilisée de manière informelle pour décrire des étapes évolutives dans divers domaines, met l'accent sur les progrès technologiques et conceptuels. Dans l'ensemble, au fil des années, la chirurgie orthopédique a connu des avancées significatives, essentiellement liées aux nouvelles technologies issues du numériques et basées sur l'imagerie médicale, pilier fondamental permettant aux chirurgiens d'obtenir des

informations cruciales et de rendre les procédures chirurgicales plus efficaces, plus sûres et plus adaptées aux besoins individuels des patients. La collaboration reste indispensable pour optimiser le développement synergique de ces nouvelles technologies.

Références.

Benayoun, M., Langlais, T., Laurent, R., Le Hanneur, M., Vialle, R., Bachy, M., Fitoussi, F., 2022. 3D planning and patient-specific surgical guides in forearm osteotomy in children: Radiographic accuracy and clinical morbidity. *Orthop Traumatol Surg Res* 108, 102925. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2021.102925>

Breighner, R.E., Bogner, E.A., Lee, S.C., Koff, M.F., Potter, H.G., 2019. Evaluation of Osseous Morphology of the Hip Using Zero Echo Time Magnetic Resonance Imaging. *Am J Sports Med* 47, 3460–3468. <https://doi.org/10.1177/0363546519878170>

Campe, A. von, Nagy, L., Arbab, D., Dumont, C.E., 2006. Corrective Osteotomies in Malunions of the Distal Radius: Do We Get What We Planned? *Clinical Orthopaedics and Related Research* 450, 179–185. <https://doi.org/10.1097/01.blo.0000223994.79894.17>

Le Deuff O. Le succès du web 2.0 : histoire, techniques et controverse.. 2007. sic_00133571

Raza, M., Murphy, D., Gelfer, Y., 2021. The effect of three-dimensional (3D) printing on quantitative and qualitative outcomes in paediatric orthopaedic osteotomies: a systematic review. *EFORT Open Reviews* 6, 130–138. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.6.200092>

Figures.

Figure 1. A : Fixateur externe circulaire ; 1B : programme de correction ; 1C : radiographie avec repère.

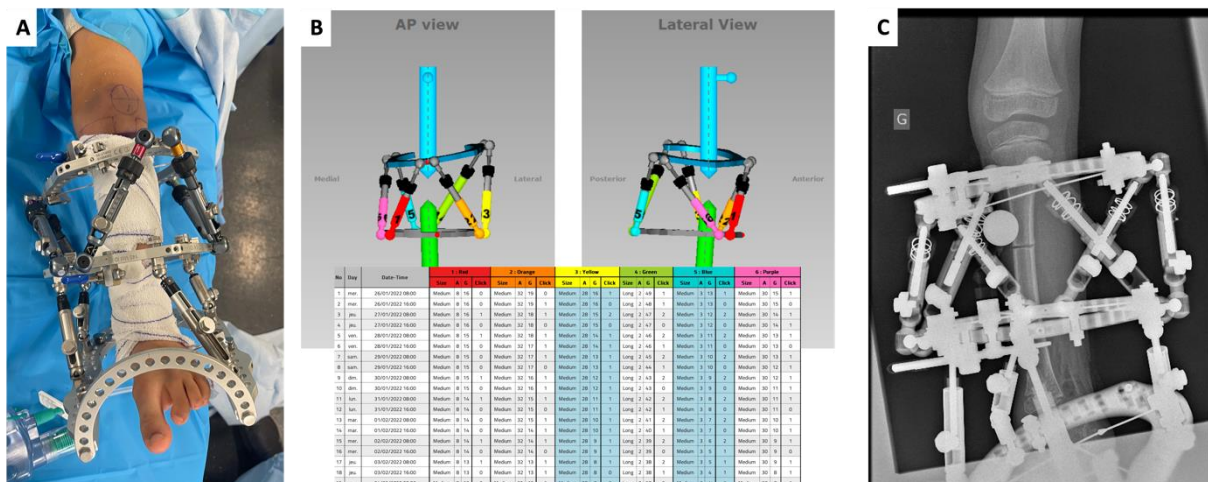


Figure 2 : clou magnétique centromédullaire pour allongement fémoral.



Figure 3. Modélisation du pectus excavatum et de l'implant sur mesure 3D proposé pour le traitement avec l'aimable autorisation de la société Anatomik Modeling (contact@anatomikmodeling.com)

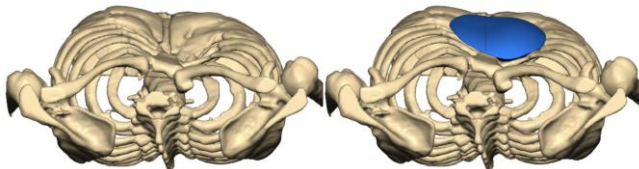


Figure 4.A : Lunettes de réalité augmentée ; B : superposition de l'hologramme. Avec l'aimable autorisation de Abys Medical.

