



HAL
open science

Étude de l'utilisation des guides de coupe chirurgicaux sur mesure chez les enfants atteints de déformations osseuses de l'avant-bras

Marie Benayoun

► **To cite this version:**

Marie Benayoun. Étude de l'utilisation des guides de coupe chirurgicaux sur mesure chez les enfants atteints de déformations osseuses de l'avant-bras. Médecine humaine et pathologie. 2020. dumas-03376492

HAL Id: dumas-03376492

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03376492>

Submitted on 13 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AVERTISSEMENT

Cette thèse d'exercice est le fruit d'un travail approuvé par le jury de soutenance et réalisé dans le but d'obtenir le diplôme d'Etat de docteur en médecine. Ce document est mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt toute poursuite pénale.

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 122.4

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 335.2 - L 335.1

UNIVERSITÉ DE PARIS

Faculté de Santé

UFR de Médecine

Année 2020

N°70

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement le : 25/09/2020

Par

Marie BENAYOUN

**Étude de l'utilisation des guides de coupe chirurgicaux sur mesure
chez les enfants atteints de déformations osseuses de l'avant-bras**

Dirigée par M. le Docteur Tristan Langlais

JURY

M. le Professeur Franck-Noël Fitoussi, PU-PH	Président
M. le Docteur Tristan Langlais, CCU-AH	Directeur
M. le Professeur Marc-Antoine Rousseau, PU-PH	Membre du jury
Mme la Docteure Manon Bachy, MCU-PH	Membre du jury
Mme la Docteure Adeline Cambon-Binder, MCU-PH	Membre du jury
M. le Docteur Romain Laurent, PH	Membre du jury

Table des matières

REMERCIEMENTS	4
INTRODUCTION : HISTORIQUE DES GUIDES DE COUPE CHIRURGICAUX D'AVANT-BRAS CHEZ LES ENFANTS.....	6
PREMIÈRE PARTIE : PROBLÉMATIQUE	18
I. ÉTIOLOGIES DES DEFORMATIONS DE L'AVANT-BRAS CHEZ L'ENFANT.....	18
II. PROBLEMATIQUE DES CALS VICIEUX D'AVANT-BRAS.....	19
III. PROBLEMATIQUE DE LA MALADIE DE MADELUNG	21
IV. PLANIFICATION RADIOLOGIQUE PRE OPERATOIRE : RADIOGRAPHIE 2D OU SCANNER 3D ?	24
V. OBJECTIFS DE NOTRE ETUDE	26
PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	27
CHAPITRE I : POPULATION ET EVALUATION PREOPERATOIRE.....	27
CHAPITRE II : STRATEGIE CHIRURGICALE	30
2.1 PLANIFICATION PRE OPERATOIRE.....	30
2.2 FABRICATION DES GUIDES DE COUPE SUR MESURE DANS LE GROUPE G+	34
2.3 TECHNIQUE CHIRURGICALE DANS LE GROUPE G+	37
2.4 TECHNIQUE CHIRURGICALE DANS LE GROUPE G-	43
2.5 SUITES OPERATOIRES	44
CHAPITRE 3 : COLLECTION DES DONNEES.....	47
3.1. OBJECTIF PRINCIPAL : ANALYSE RADIOGRAPHIQUE DE LA PRECISION DES OSTEOTOMIES DANS LE GROUPE G+ .	47
3.2. OBJECTIFS SECONDAIRES	51
CHAPITRE 4 : ANALYSE STATISTIQUE	57
PARTIE 3 : RÉSULTATS.....	58
CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES DE LA COHORTE	58
CHAPITRE II : OBJECTIF PRINCIPAL : ANALYSE RADIOGRAPHIQUE DE LA PRECISION DES OSTEOTOMIES DANS LE GROUPE G+	58
CHAPITRE III : CRITERES DE JUGEMENT SECONDAIRES	60
3.1 DUREE INTERVENTIONNELLE.....	60
3.2 TAUX D'IRRADIATION ET DUREE FLUOROSCOPIQUE PER OPERATOIRE	60
3.3. COMPLICATIONS	60
3.4 ÉVALUATION CLINIQUE ET CRITERES SUBJECTIFS (TABLEAU 5).....	63
PARTIE 4 : DISCUSSION	65
1. INTRODUCTION ET RAPPELS.....	65
2. AVANTAGES DES GUIDES	65
2.1 PRECISION	65
2.2 DUREES OPERATOIRES.....	66

2.3	COMPLICATIONS	67
2.4	AMELIORATION CLINIQUE	68
3.	POSSIBILITES D'AMELIORATIONS FUTURES DE L'ETUDE	70
3.1	RADIOPROTECTION.....	70
3.2	MALADIE DE MADELUNG VS. CAL VICIEUX	72
3.3	MATERIEL ET PRECISION	74
3.4	PRISE EN COMPTE DES PARTIES MOLLES.....	75
4.	LIMITES DE L'ETUDE.....	76
4.1	ÉTUDE RETROSPECTIVE.....	76
4.2	RECU.....	76
4.3	MESURE DE LA PRECISION : SCANNER 3D OU RADIOGRAPHIES 2D ?	76
4.4	DELAI DE PRISE EN CHARGE CHIRURGICALE APRES TRAUMATISME	77
5.	AUTRES AVANTAGES DE L'ETUDE	77
5.1	NOMBRE DE SUJETS ETUDIES.....	77
5.2	COUTS ET OBJECTIFS FINANCIERS.....	78
CONCLUSION.....		79
BIBLIOGRAPHIE		80
ANNEXES.....		88
SCORE PRWE ADAPTE AUX ENFANTS.....		88
ABSTRACT (ENGLISH)		89
RÉSUMÉ DE L'ARTICLE (FRANÇAIS)		90

Remerciements

Je remercie avant tout et en premier lieu le Docteur Tristan Langlais, non seulement pour avoir été mon directeur de thèse, qui a entièrement rempli son rôle et chapeauté ce travail, mais qui a en plus été un coach sur qui compter lors de ce marathon de longue haleine.

Merci au président de ce jury de thèse, le Professeur Franck-Noël Fitoussi, pour avoir initié ce projet, pour m'avoir suivie pas à pas dans l'avancée de mon travail et pour m'avoir encouragée à donner le meilleur de moi-même.

Merci à tout mon jury.

Merci au Professeur Marc-Antoine Rousseau pour la confiance qu'il m'accorde et pour m'avoir fait intégrer cette grande équipe d'orthopédie de Bichat-Beaujon.

Merci au Docteur Adeline Cambon qui m'a fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury de thèse.

Merci au Docteur Manon Bachy, dont les conseils précieux ont aidé à l'aboutissement de ce travail, et qui de plus, a opéré une grande partie des patients qui ont fait l'objet de cette thèse.

Merci au Docteur Romain Laurent pour la partie analytique et pour les nombreux « brainstormings » qui ont aidé à façonner le cœur de ce travail.

Merci au Docteur Malo Lehanneur qui a été un des plus gros opérateurs de cette série. Merci surtout pour la relecture musclée de l'article de thèse et pour les conseils avisés.

Merci au Professeur Raphaël Vialle et à tout le service de Chirurgie Orthopédique et Réparatrice de l'Enfant de Trousseau pour cette belle ambiance, si particulière en pédiatrie, qui m'a donné envie de réaliser un vrai travail de recherche en toute sérénité.

Je voudrais également remercier ceux qui ont su me donner la force et le courage d'avancer et d'aller au bout de cet internat. Merci à tous mes cointernes et chefs du Sud Francilien, de Trousseau et de Bichat-Beaujon. Merci plus particulièrement à Samuel, Céline et Fanny. Merci au Professeur Chaouat pour son écoute et sa disponibilité. Merci au service de chirurgie ORL et Maxillo-Faciale de Pontoise. Merci à Maxime et Stéphanie pour leur amitié et leur aide précieuse. Merci à mes meilleurs amis de médecine pour leur bonne humeur et leur enthousiasme. Merci à Ivanne et Clément pour leur présence et leur soutien.

Merci à ma famille : mes parents, mon frère, ma tante, ma grand-mère. Ce noyau qui a su me porter depuis le début de ces études et sur qui j'ai pu compter à tout instant. Mes deux grands-pères ont également été des acteurs majeurs de ce parcours et je ne les oublie pas.

Un grand merci à la famille Habib, à la famille Benayoun, à la famille Jouglà, à la famille Chaumeil, à la famille Marcaux. Merci aussi à Anita.

A Cyril, qui a été le compagnon le plus prévenant et le plus aimant durant ces longues années d'internat. Merci de m'avoir encouragée et de ne m'avoir jamais lâchée, y compris dans les moments les plus difficiles. Cette thèse et moi lui devons beaucoup.

INTRODUCTION : HISTORIQUE DES GUIDES DE COUPE CHIRURGICAUX D'AVANT-BRAS CHEZ LES ENFANTS

Les ostéotomies de correction de déformations osseuses existent depuis plusieurs décennies. Certains articles publiés à ce sujet datent du 19^{ème} siècle [1]. Les premières ostéotomies historiques ont été développées initialement aux dépens des membres inférieurs, notamment pour l'exérèse de tumeurs osseuses [2] (Fig. 1), le traitement de la gonarthrose chez l'adulte (ostéotomie tibiale de valgisation entre autres) [3], ou dans la correction chirurgicale de la dysplasie cotyloïdienne de l'enfant (Salter, Chiari, Pemberton, etc.) [4].



Figure 1. Métastase tibiale distale d'un ostéosarcome fémoral : planification 3D et guides de coupe sur mesure. Bellanova L, Paul L, Docquier PL. *Surgical guides (patient-specific instruments) for pediatric tibial bone sarcoma resection and allograft reconstruction. Sarcoma. 2013;2013:787653.*

Chez les enfants, les guides de coupe chirurgicaux sur mesure ont été récemment introduits ainsi que la planification pré opératoire en 3D pour les pathologies du membre inférieur [5,6] (Fig. 2).

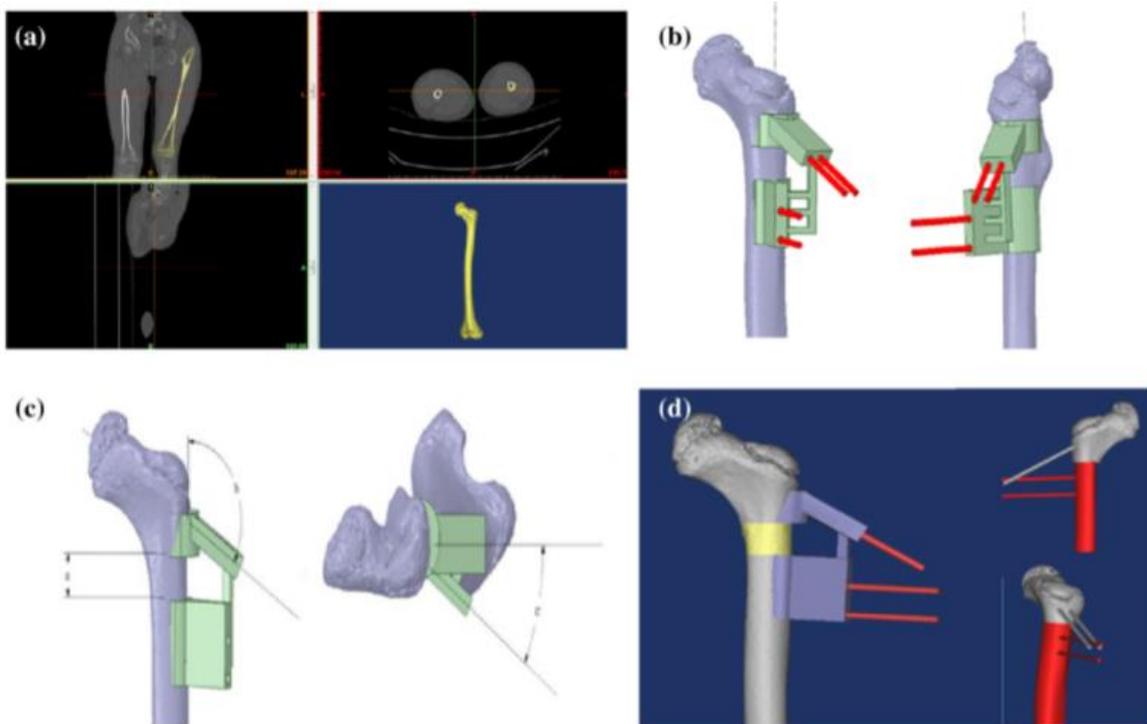


Figure 2. Planification 3D et navigation per opératoire dans le cadre d'une luxation congénitale de hanche. Zheng P, Yao Q, Xu P, Wang L. Application of computer-aided design and 3D-printed navigation template in Locking Compression Pediatric Hip Plate™ placement for pediatric hip disease. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2017 May;12(5):865-871.

En chirurgie maxillo-faciale également, le concept d'ostéotomie a été largement développé, en particulier pour le traitement de déformations (ostéotomie maxillo-mandibulaire, de LeFort, etc.) [6] ou bien dans le cadre de reconstruction après exérèse carcinologique [7] (Fig.3). De même, la population pédiatrique a pu bénéficier des avancées de la planification 3D pour ces pathologies maxillo-faciales [8].



Figure 3. Guide de coupe sur mesure radial distal dans le cadre de reconstruction carcinologique maxillo-faciale. Thomas, McMillan. Use of a Titanium Cutting Guide to Assist Raising the Composite Radial Forearm Free Flap. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2013 Nov;42(11):1414-7.

Les ostéotomies des membres se sont activement développées et perfectionnées depuis les années 1950 [9], surtout pour les pathologies du membre inférieur [10] (Fig.4).

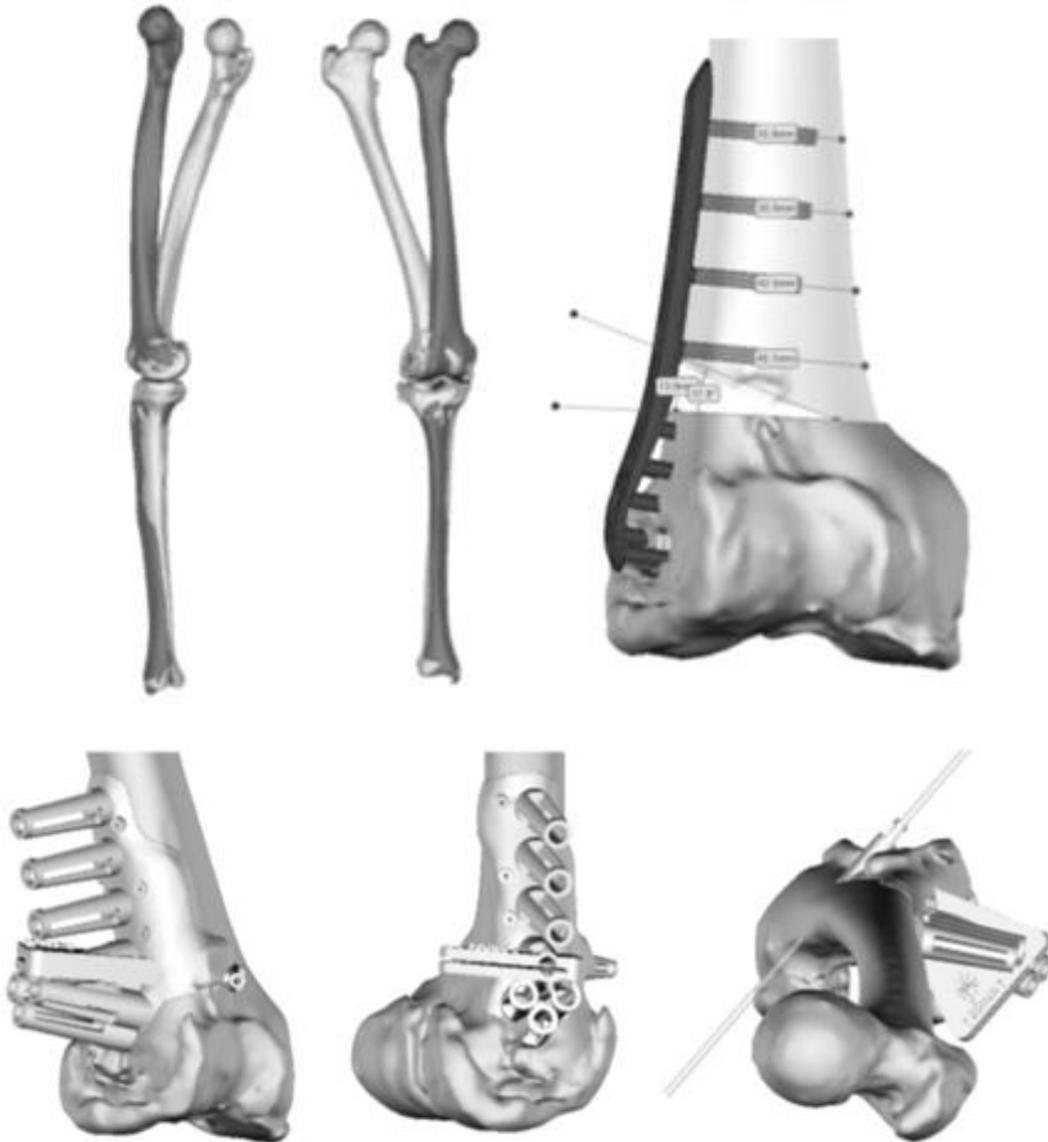


Figure 4. Planification 3D d'ostéotomie du fémur distal et guides de coupe sur mesure.
Victor J, Premanathan A. Virtual 3D planning and patient specific surgical guides for osteotomies around the knee: a feasibility and proof-of-concept study. Bone Joint J. 2013 Nov;95-B(11 Suppl A):153-8.

En ce qui concerne le membre supérieur, les techniques de correction de déformations osseuses de l'avant-bras sont plus récentes. En 1995, Trousdale et Linscheid [11] ont rapporté des résultats cliniques à propos des ostéotomies correctives des cals vicieux d'avant-bras. En 2001, Croitoru et al. [12] ont décrit une technique de modélisation pré opératoire des

ostéotomies en 3D ainsi qu'un système de navigation per opératoire pour les corrections de cals vicieux du radius distal chez des patients d'environ 50 ans (Fig. 5). Ils y détaillent les limites de la technique traditionnelle de planification des ostéotomies en deux dimensions, notamment l'incapacité à prévoir la correction de la rotation, et évoquent également la difficulté de réaliser les allongements osseux du fait de la rétraction des tissus mous, ainsi que l'irradiation fluoroscopique des patients et des chirurgiens durant les interventions.

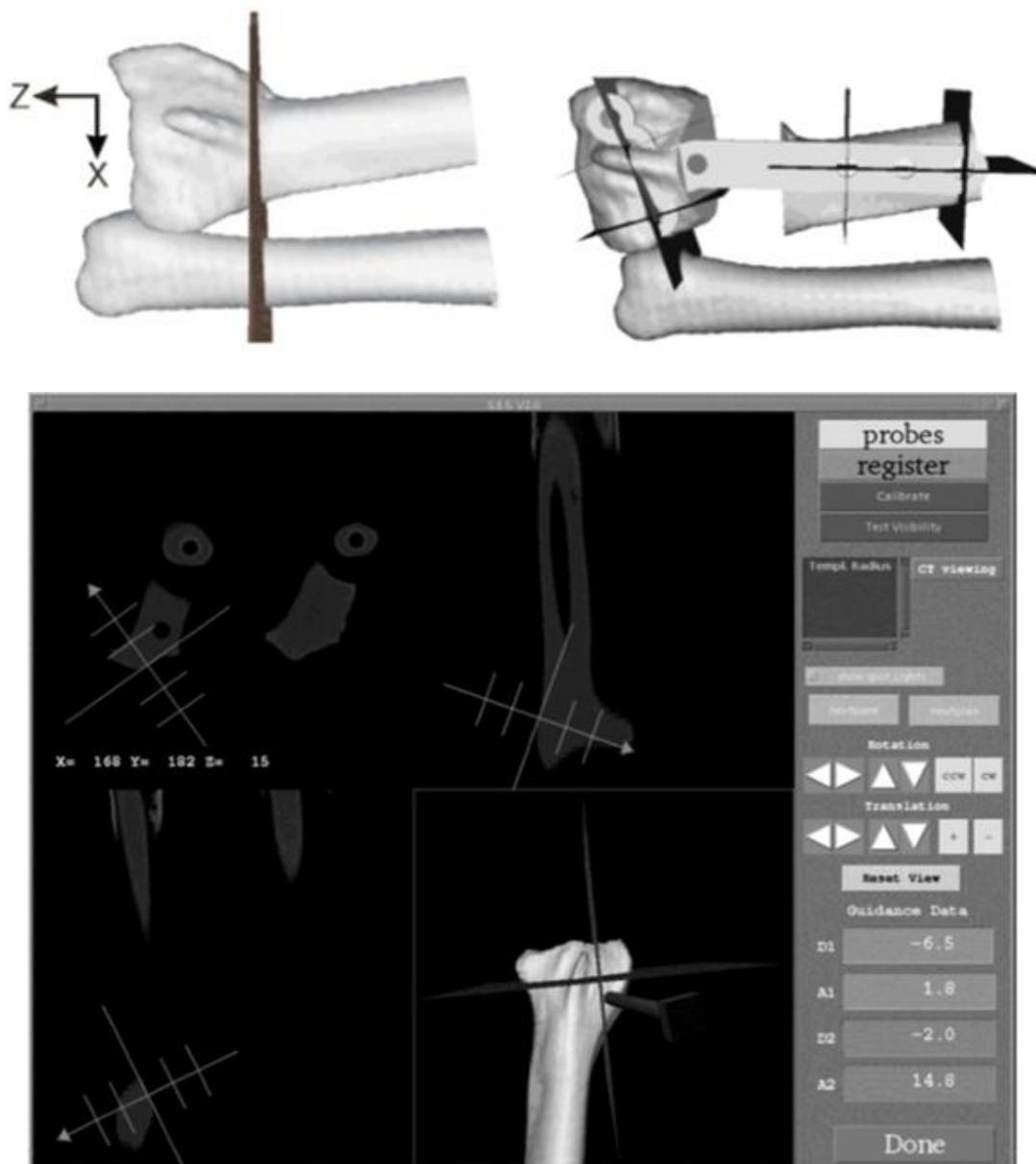


Figure 5. Planification 3D et navigation per opératoire pour ostéotomie du radius distal. Croitoru H, Ellis RE, Prihar R, Small CF, Pichora DR. Fixation-based surgery: a new technique for distal radius osteotomy. *Comput Aided Surg.* 2001;6(3):160-9.

Athwal et al. [13] en 2003, introduisent le concept de planification tridimensionnelle assistée par un scanner tomodensitométrique qui a l'avantage de calculer la position finale correcte de l'extrémité distale du radius, tout en évaluant la déformation rotationnelle, en se basant sur l'avant-bras controlatéral normal.

Ce n'est qu'en 2006 que Price et al. [14] étudient les ostéotomies de cals vicieux d'avant-bras chez les enfants. Il n'est pas encore question de planification tridimensionnelle ni de guide de coupe sur mesure à cette période. Les indications opératoires sont bien étudiées et détaillées et le planning pré opératoire est réalisé sur des radiographies standards de face et de profil. De même en 2007, Van Geenen et al. [15] décrivent les indications et les résultats cliniques des ostéotomies de cals vicieux dans une population pédiatrique de 20 enfants, mais ils n'utilisent pas encore la planification 3D basée sur des scanners ni les guides de coupe sur mesure, pourtant déjà utilisés pour d'autres pathologies orthopédiques ou dans d'autres spécialités.

Murase et al. [16] font apparaître en 2008 le concept de guides de coupe sur mesure synthétisés à partir de la planification 3D réalisée à l'aide de scanners, chez des patients âgés de 10 à 72 ans, atteints de cals vicieux siégeant à l'avant-bras ou bien à l'humérus (Fig. 6). Kunz et al. [17] réalisent le même type d'étude en 2013, toujours chez des adultes, et analysent la précision des ostéotomies réalisées avec ces guides de coupe. Ils simulent un modèle d'avant-bras normal en 3D par le biais d'une image en miroir de l'avant-bras controlatéral normal (Fig. 7).

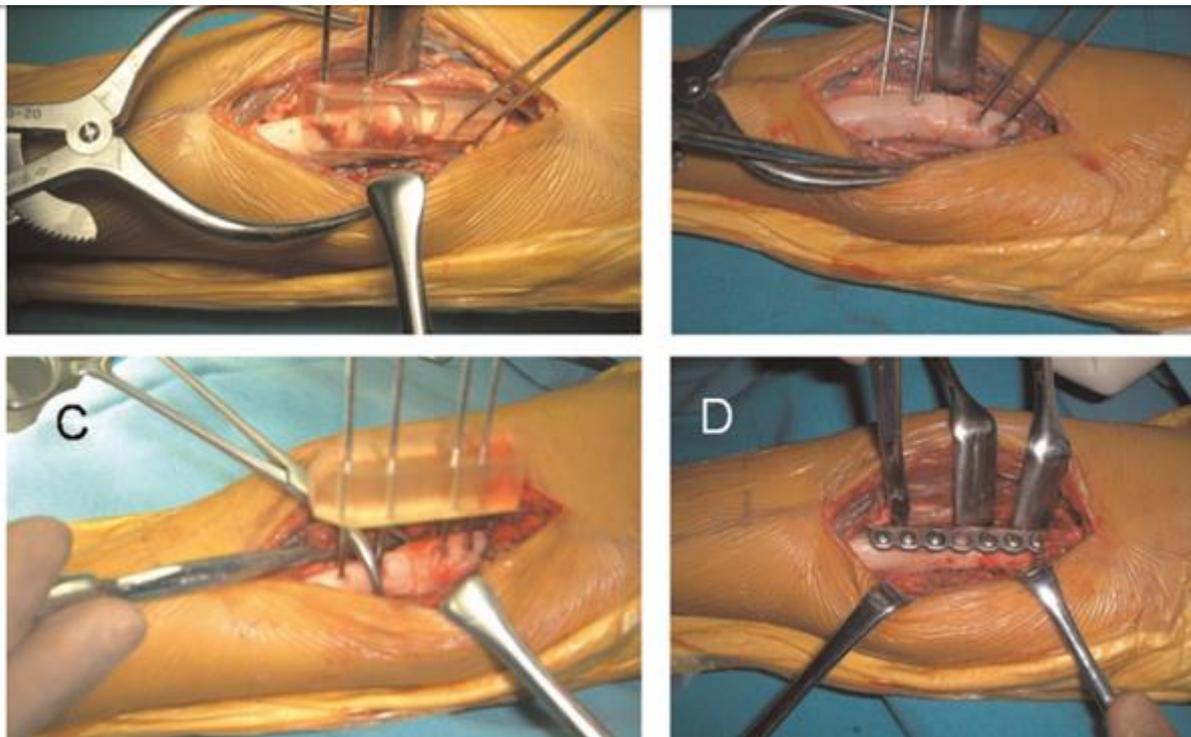
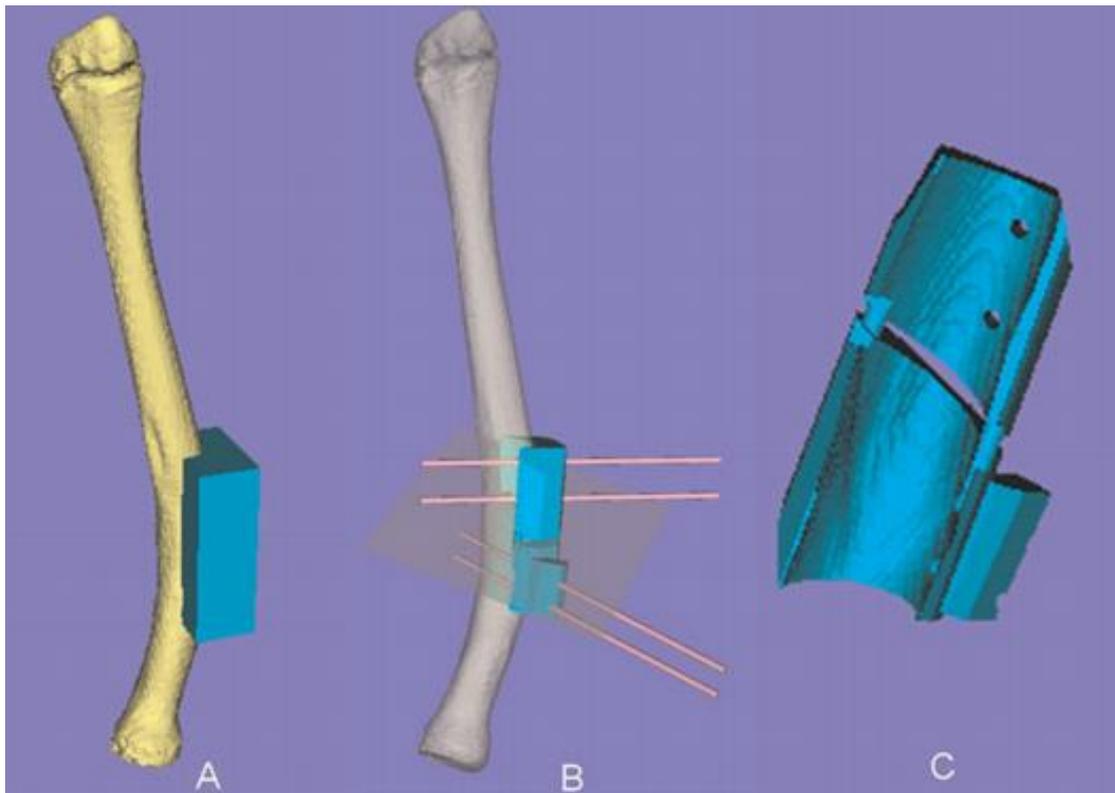


Figure 6. Planification pré-opératoire, guides de coupe 3D sur mesure et photographies per-opératoires de l'ostéotomie d'un cal vicieux diaphysaire du tiers proximal du radius. Murase T, Oka K, Moritomo H, Goto A, Yoshikawa H, Sugamoto K. Three-dimensional corrective osteotomy of malunited fractures of the upper extremity with use of a computer simulation system. *J Bone Joint Surg Am.* 2008 Nov;90(11):2375-89.

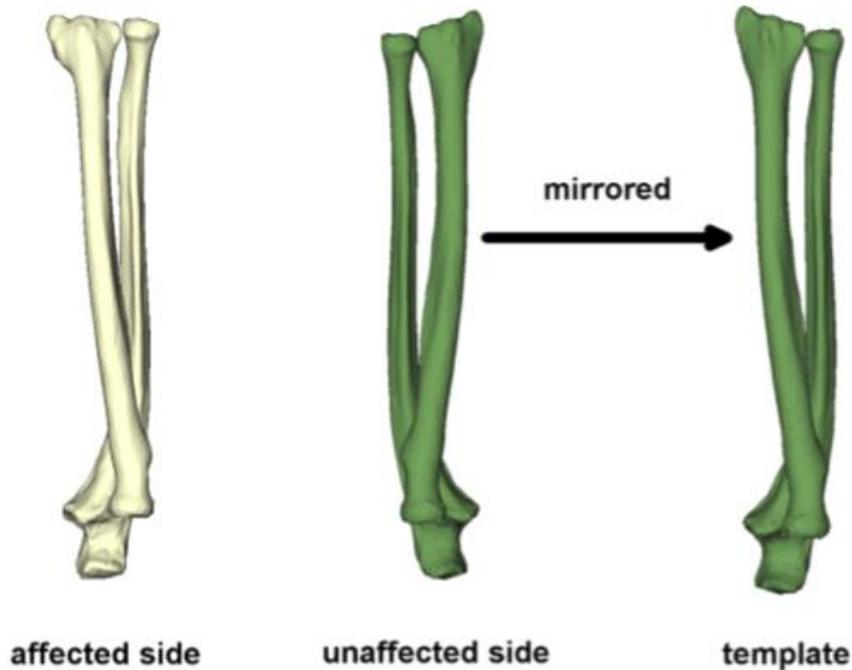


Figure 7. Simulation 3D d'un avant-bras sain via une image en miroir de l'avant-bras controlatéral.
 Kunz M, Ma B, Rudan JF, Ellis RE, Pichora DR. *Image-guided distal radius osteotomy using patient-specific instrument guides.*
J Hand Surg Am. 2013 Aug;38(8):1618-24.

En 2010, Leong et al. [18] sont les premiers à utiliser la même technologie pour ce type de pathologie dans un essai contrôlé randomisé. L'échantillon étudié est composé de deux groupes de patients adultes qui bénéficient d'une ostéotomie planifiée en 3D avec guides de coupe spécifiques ou non (Fig. 8).

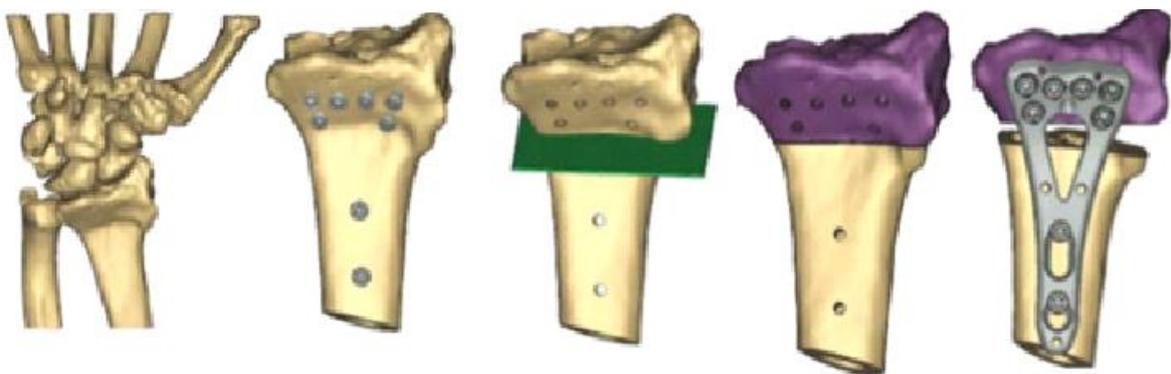


Figure 8. Planification 3D étape par étape d'une ostéotomie d'un cal vicieux du radius distal.
 Leong NL, Buijze GA, Fu EC, Stockmans F, Jupiter JB; Distal Radius Malunion (DiRaM) collaborative group. *Computer-assisted versus non-computer assisted preoperative planning of corrective osteotomy for extra-articular distal radius malunions: a randomized controlled trial.* *BMC Musculoskelet Disord.* 2010 Dec 14;11:282.

Après une étude cadavérique en 2011 [19] et une analyse de case reports de deux adolescents présentant des cals vicieux après fracture de Monteggia en 2012 [20], Oka et al. introduisent en plus le concept d'un guide de réduction après ostéotomie assistée d'un guide de coupe synthétisé à partir d'une planification 3D (Fig. 9 et 10).

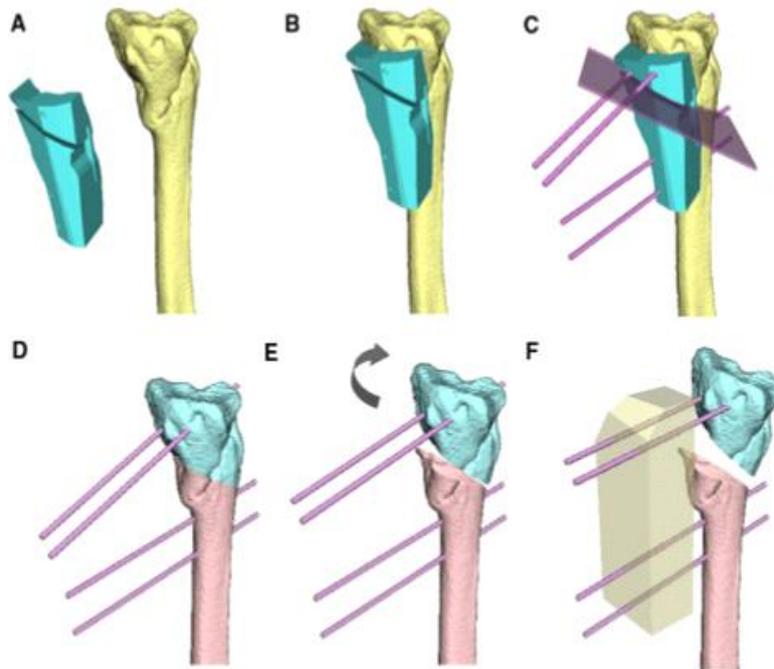


Figure 9. Guide de coupe et guide de réduction (planification 3D). Oka K, Murase T, Moritomo H. Accuracy of corrective osteotomy using a custom-designed device based on a novel computer simulation system. *J Orthop Sci.* 2011 Jan;16(1):85-9.

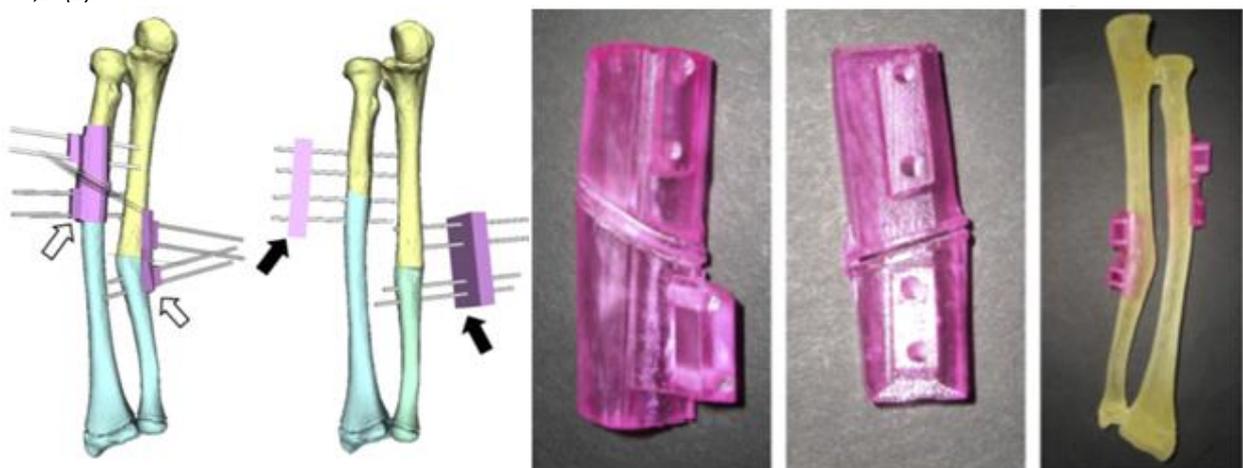


Figure 10. Guides de coupe puis guide de réduction (planification 3D à gauche et photographies de guides et de leur position sur les deux os de l'avant-bras à droite). Oka K, Murase T, Moritomo H, Yoshikawa H. Corrective osteotomy for malunited both bones fractures of the forearm with radial head dislocations using a custom-made surgical guide: two case reports. *J Shoulder Elbow Surg.* 2012 Oct;21(10):e1-8.

Miyake et al. [21] en 2012 poursuivent cette idée avec une série de 20 patients, dont l'âge n'est pas clairement décrit, et précisent à nouveau les indications et contre-indications de cette chirurgie. Entre autres, les contre-indications relevées sont l'atteinte bilatérale des membres supérieurs, les raccourcissements trop importants qui nécessiteraient des allongements osseux et surtout des parties molles et dont les résultats seraient plus qu'aléatoires, ainsi qu'un âge inférieur à 10 ans au moment de la chirurgie.

Kataoka et al. [22] reprennent le concept de guide de réduction en 2013 dans une population adulte et ajoutent cette fois une plaque d'ostéosynthèse pré-cintrée pour une correction encore plus précise après ostéotomie (Fig. 11).



Figure 11. Planification 3D avec plaque d'ostéosynthèse pré-cintrée dans le cadre d'un cal vicieux d'humérus distal. Kataoka T, Oka K, Miyake J, Omori S, Tanaka H, Murase T. 3-Dimensional prebent plate fixation in corrective osteotomy of malunited upper extremity fractures using a real-sized plastic bone model prepared by preoperative computer simulation. *J Hand Surg Am.* 2013 May;38(5):909-19. Epub 2013 Apr 6.

En 2015, Vlachopoulos et al. [23] continuent l'étude de la fiabilité des ostéotomies avec la même technique, en comparant la précision de correction du résultat post-opératoire par rapport au plan pré-opératoire prévu en 3D chez des patients âgés de 23 ans en moyenne. Ils utilisent également des modèles 3D stériles des 2 os de l'avant-bras entier atteint et de l'avant-bras controlatéral sain, afin de mieux positionner leur guide de coupe durant l'opération.

La même année, Bauer et al. [24] sont les premiers à utiliser les scanners 3D et les guides de coupe spécifiques sur une population pédiatrique de 19 enfants, âgés de 7 à 18 ans (Fig. 12). En 2017, Byrne et al. [25] réalisent le même type d'analyse chez 5 enfants et utilisent pour la première fois des plaques d'ostéosynthèse sur mesure, synthétisées à partir de la planification 3D. Jeuken et al. [26] sont les seuls à présenter la même année un case report d'une jeune fille de 15 ans qui présente elle aussi un cal vicieux et à analyser la précision de leur ostéotomie en comparant un scanner 3D pré opératoire avec un autre scanner post opératoire à 6 mois. Le niveau de fiabilité de l'analyse est très élevé mais ne concerne qu'un seul cas, et implique l'irradiation supplémentaire d'un deuxième scanner chez une patiente si jeune.

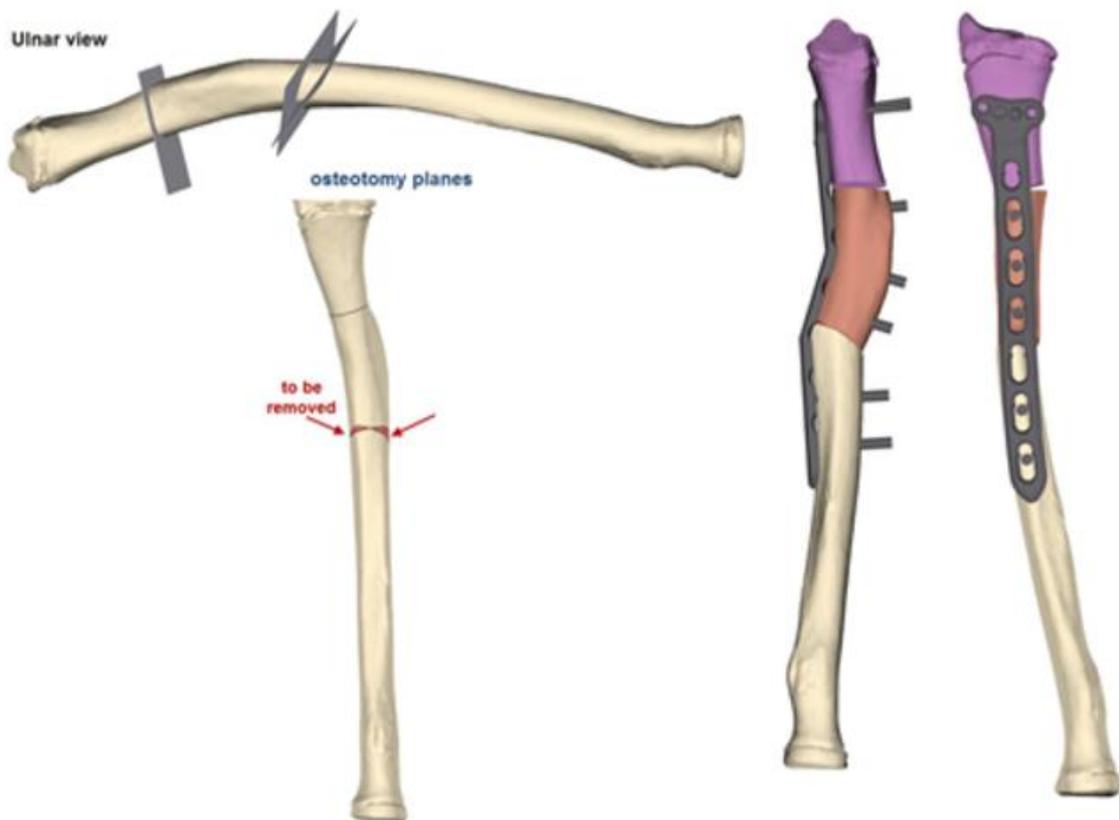


Figure 12. Planification 3D d'un cal vicieux du tiers distal du radius chez l'enfant. Bauer AS, Storelli DAR, Sibbel SE, McCarroll HR, Lattanza LL. Preoperative Computer Simulation and Patient-specific Guides are Safe and Effective to Correct Forearm Deformity in Children. *J Pediatr Orthop.* 2017 Oct/Nov;37(7):504-510.

Par la suite Roner et al. [27] en 2017 et Rosseels et al. [28] en 2018 continueront d'évaluer la fiabilité de cette technique d'ostéotomie avec encore plus de précision, dans tous les plans de l'espace, en comparant un scanner 3D pré opératoire avec des radiographies post opératoires, dans des populations adultes (Fig. 13). Ils noteront d'ailleurs que cette technologie conduit plus souvent à un défaut de correction qu'à une sur-correction, et attribueront cela à la position sub-optimale du guide durant l'intervention, ainsi qu'aux contraintes appliquées par les tissus mous au moment de la réduction.

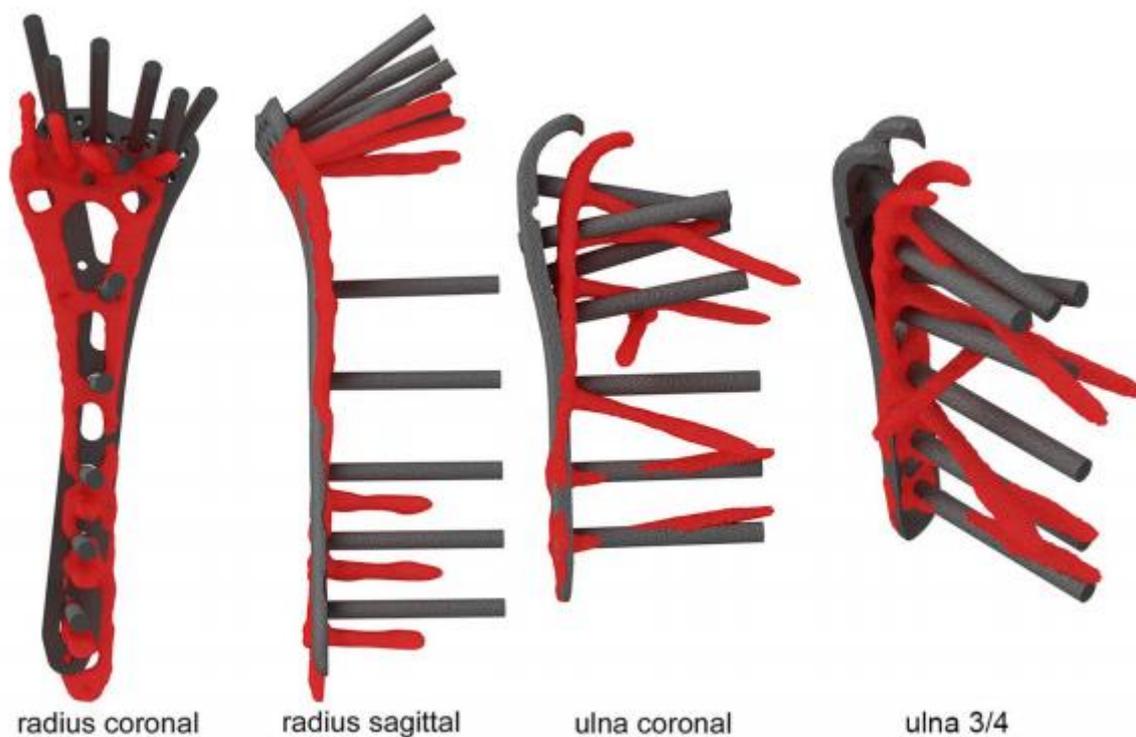


Figure 13. Étude de la précision des ostéotomies : comparaison de la position de la plaque d'ostéosynthèse en gris (= position planifiée optimale) et de la plaque d'ostéosynthèse en rouge (= position réelle post opératoire). Rosseels W, Herteleer M, Sermon A, Nijs S, Hoekstra H. Corrective osteotomies using patient-specific 3D-printed guides: a critical appraisal. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2019 Apr;45(2):299-307. Epub 2018 Jan 12.

En 2019, l'analyse des ostéotomies assistées par guide de coupe 3D de l'étude de Oka et al. [29] montre des chiffres imbattables de précision avec des erreurs de correction inférieures à 1 degré et à 1 millimètre, toujours dans une population adulte. Enfin, la même

année, Zhang et al. [30] étudient rétrospectivement la précision de ces guides de coupe 3D sur mesure dans une population de 25 adolescents qui présentent des déformations de type cubitus varus (Fig. 14). Pour la première fois, ils comparent cette technologie à un groupe témoin de 11 patients opérés par une technique conventionnelle d'ostéotomie. Ils décrivent également les différences de complications et durées opératoires entre les deux groupes. Cette dernière étude est celle qui se rapproche le plus de l'analyse qui fait l'objet de la présente thèse.

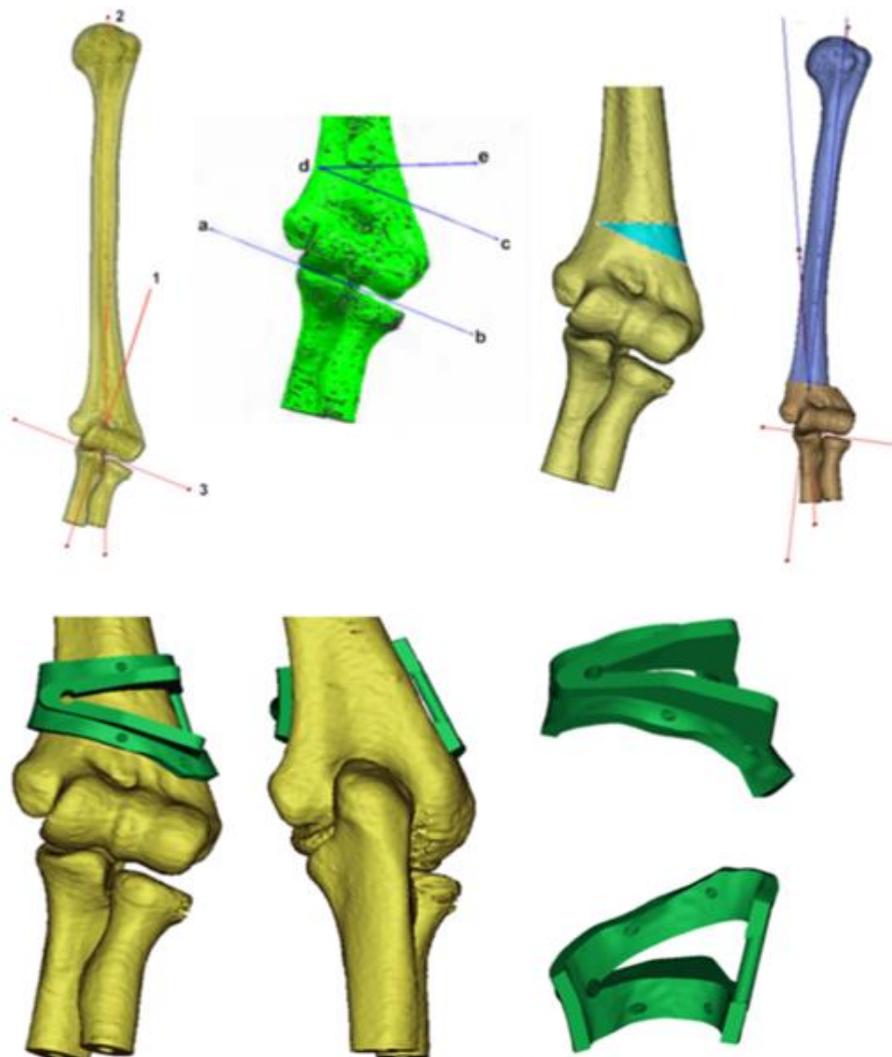


Figure 14. Planification 3D de l'ostéotomie d'un cal vicieux d'humérus distal chez l'adolescent et guides de coupe 3D sur mesure. Zhang YW, Xiao X, Gao WC, Xiao Y, Zhang SL, Ni WY, Deng L. Efficacy evaluation of three-dimensional printing assisted osteotomy guide plate in accurate osteotomy of adolescent cubitus varus deformity. *J Orthop Surg Res.* 2019 Nov 9;14(1):353.

PREMIÈRE PARTIE : PROBLÉMATIQUE

I. Étiologies des déformations de l'avant-bras chez l'enfant

Il est reconnu que l'analyse de la déformation des deux os de l'avant-bras dans les différents plans de l'espace peut être difficile à anticiper lors de la planification d'une ostéotomie de réaxation. Chez les enfants, les déformations du radius et de l'ulna peuvent être attribuées à différentes causes, dont les plus fréquentes sont la maladie de Madelung (Fig. 15) et les cals vicieux de l'avant-bras (Fig. 16), ainsi que les épiphysiodèses post-traumatiques (Fig. 17). D'autres étiologies sont plus rares comme les dislocations congénitales de la tête radiale, l'arthrogrypose, les paralysies post obstétricales du plexus brachial, les tumeurs (exostoses héréditaires multiples ou maladie de Trevor entre autres) [24] ou les syndromes de Volkmann faisant suite à un syndrome des loges de l'avant-bras.

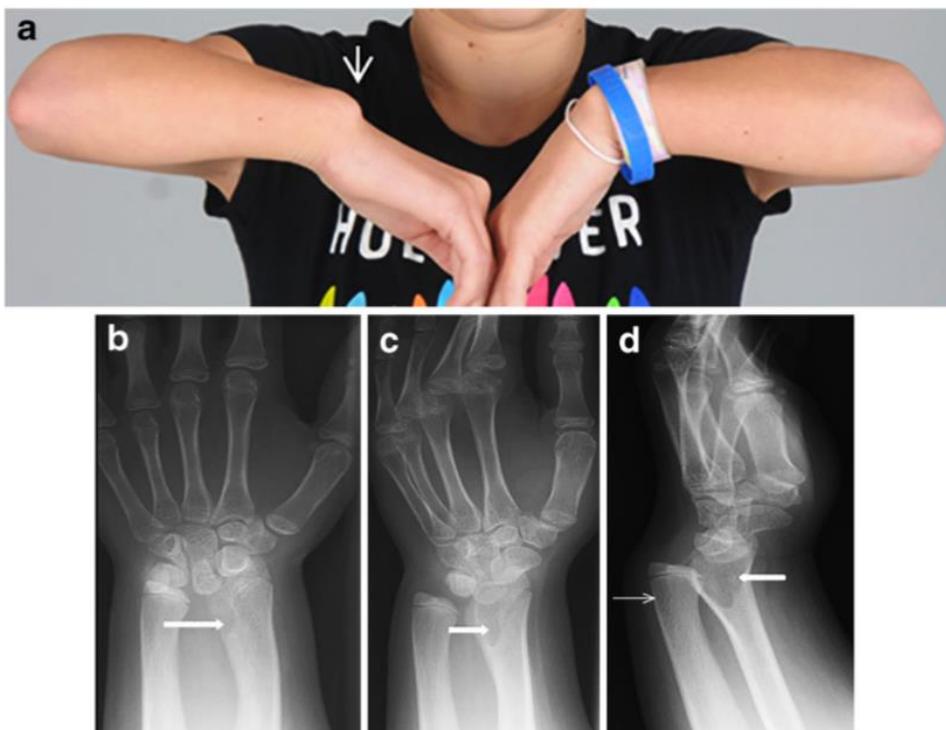


Figure 15. Maladie de Madelung : présentation clinique (poignet droit) et radiographies de face, trois-quart et profil. Ali S, Kaplan S, Kaufman T, Fenerty S, Kozin S, Zlotolow DA. Madelung deformity and Madelung-type deformities: a review of the clinical and radiological characteristics. *Pediatr Radiol.* 2015 Nov;45(12):1856-63. Epub 2015 Jul 2.

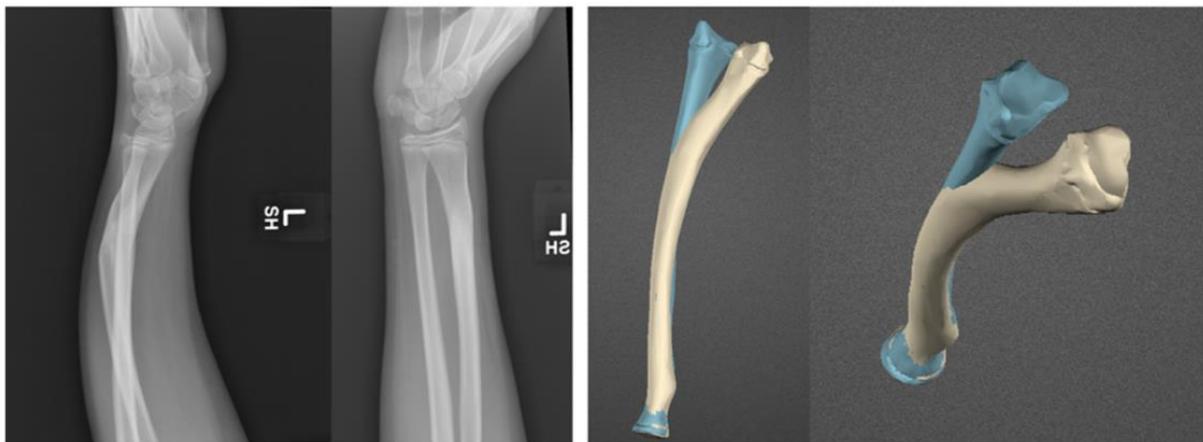


Figure 16. Cal vicieux diaphysaire du radius distal : radiographies de profil et de face à gauche, planification 3D de la position finale du radius après ostéotomie. Bauer AS, Storelli DAR, Sibbel SE, McCarroll HR, Lattanza LL. *Preoperative Computer Simulation and Patient-specific Guides are Safe and Effective to Correct Forearm Deformity in Children.* J Pediatr Orthop. 2017 Oct/Nov;37(7):504-510.



Figure 17. Traumatisme du poignet gauche passé inaperçu chez une enfant de 10 ans. A gauche : radiographies bilatérales comparatives de face au moment de l'accident. A droite : radiographies bilatérales comparatives de face 2 ans plus tard, épiphysiodèse médiale et déformation du radius distal. Fractures du poignet de l'enfant Brice Henry et Pierre-Louis Docquier – Université Catholique de Louvain – Belgique.

II. Problématique des cals vicieux d'avant-bras

Chez les enfants, les cals vicieux post-traumatiques de l'avant-bras surviennent dans 15 % à 35 % des cas [31,32]. La consolidation d'une fracture dans une position qui n'est pas anatomique peut causer un handicap fonctionnel important ainsi qu'une gêne esthétique non négligeable, notamment chez les adolescents [33]. Le raccourcissement et la déformation angulaire du radius [34,35,36,37,38] peuvent entraîner des douleurs, une limitation des amplitudes articulaires, en particulier de la rotation de l'avant-bras, et une instabilité de

l'articulation radio-ulnaire distale [23,27,31,32,39,40,41,42]. Un cal vicieux résiduel diaphysaire avec une angulation supérieure à 20 degrés et une déformation axiale dépassant 30 degrés est peu susceptible de se remodeler suffisamment après l'âge de 9 ans [14] (Fig.18 et 19). Une telle déformation entraîne une anomalie significative de l'arc de rotation de l'avant-bras malgré la croissance osseuse [14,39,40]. Une prono-supination inférieure à 50% voire 60% de l'amplitude normale est associée à un handicap fonctionnel considérable, et à plus long terme, à un risque d'arthrose ; une intervention chirurgicale est alors indiquée [15,42].



Figure 18. À gauche : cal vicieux diaphysaire à la jonction tiers moyen-tiers proximal de l'avant-bras. Bauer AS, Storelli DAR, Sibbel SE, McCarroll HR, Lattanza LL. Preoperative Computer Simulation and Patient-specific Guides are Safe and Effective to Correct Forearm Deformity in Children. *J Pediatr Orthop.* 2017 Oct/Nov;37(7):504-510.

Figure 19. À droite : cal vicieux diaphysaire au tiers moyen de l'avant-bras. Byrne AM, Impelmans B, Bertrand V, Van Haver A, Verstreken F. Corrective Osteotomy for Malunited Diaphyseal Forearm Fractures Using Preoperative 3-Dimensional Planning and Patient-Specific Surgical Guides and Implants. *J Hand Surg Am.* 2017 Oct;42(10):836.e1-836.e12. Epub 2017 Jul 12.

III. Problématique de la maladie de Madelung

Le symptôme le plus typique de la maladie de Madelung est la déformation significative du poignet provoquée par la proéminence de la tête ulnaire, subluxée du fait d'une réorientation ulno-palmaire de l'articulation radio-carpienne, et d'un ulna relativement long [43] (Fig.20, 21 et 22). La gêne fonctionnelle est dominée par la limitation de l'amplitude articulaire en extension et par la douleur de l'articulation radio-ulnaire distale. La perte de l'extension du poignet est proportionnelle à la déformation sagittale du radius. Malgré la subluxation de la tête ulnaire, la restriction de la rotation de l'avant-bras est rare [44,45]. La prise en charge dépend de l'âge du patient, du degré de la déformation et de l'ampleur des symptômes. La plupart des patients sont asymptomatiques et aucune intervention chirurgicale n'est par conséquent indiquée. Chez le jeune enfant dont le potentiel de croissance est considérable, la progression de la déformation avec l'âge nécessite une intervention pour prévenir l'aggravation [44,45]. La libération du ligament de Vickers (Fig. 23) ainsi que l'épiphysiodèse du radius distal sont des interventions relativement mineures et offrent une occasion de restaurer la plaque de croissance [43].

L'ostéotomie de simple raccourcissement de l'ulna sans correction de la déformation radiale peut être indiquée dans les déformations évoluées mais asymptomatiques. Les patients présentant une déformation symptomatique persistante après un traitement non chirurgical peuvent être éligibles à une ostéotomie radiale métaphysaire en dôme. Dans le cas de déformations complexes, plusieurs ostéotomies de correction sont indiquées et planifiées à l'aide d'une modélisation tridimensionnelle radiographique pour restaurer l'anatomie des articulations radio-carpienne et radio-ulnaire distale, et par la suite améliorer le pronostic fonctionnel [44].



Figure 20. Aspect clinique de déformation de l'avant-bras dans la maladie de Madelung. Cours Pr Pannier, Dr Salon et Pr Glorion, Hôpital Necker-Enfants Malades. Université Paris Descartes.



Figure 21. Radiographies de poignet de face et de profil chez un enfant atteint de la maladie de Madelung. PACS Hôpital Armand-Trousseau, APHP.



Figure 22. Reconstruction 3D de face et de $\frac{3}{4}$, à partir d'un scanner, d'un poignet d'un enfant atteint de la maladie de Madelung. PACS Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

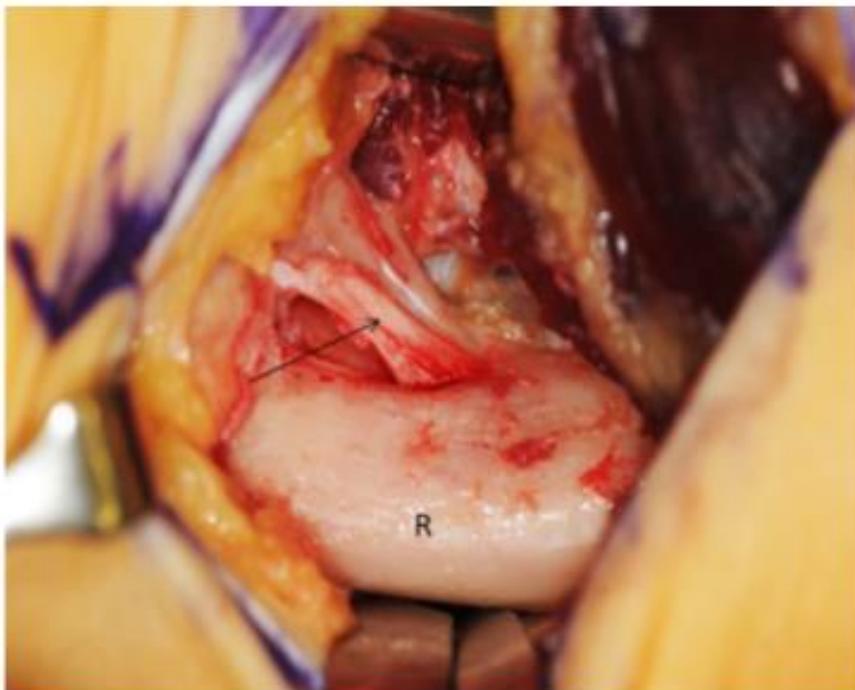


Figure 23. Photographie per opératoire d'un ligament de Vickers dont l'insertion se fait aux dépends du radius distal. Ali S, Kaplan S, Kaufman T, Fenerty S, Kozin S, Zlotolow DA. Madelung deformity and Madelung-type deformities: a review of the clinical and radiological characteristics. *Pediatr Radiol.* 2015 Nov;45(12):1856-63. Epub 2015 Jul 2.

IV. Planification radiologique pré opératoire : radiographie 2D ou scanner 3D ?

La technique chirurgicale d'ostéotomie de correction de cals vicieux ou de maladies de Madelung est réputée comme techniquement difficile. L'appréciation simultanée dans plusieurs plans de l'espace de l'angulation diaphysaire ou métaphysaire de face ou de profil, de l'alignement axial, de la variance ulnaire et de la congruence de l'articulation radio-ulnaire distale est complexe mais nécessaire pour planifier une reconstruction précise de l'avant-bras [25]. La planification préopératoire conventionnelle avec des radiographies en deux dimensions n'est souvent pas suffisante pour évaluer la complexité de la déformation tridimensionnelle [16,21,46] (Fig.24). Les progrès récents des scanners 3D ont facilité la simulation des ostéotomies correctives en prenant comme référence une image en miroir des os de l'avant-bras normal controlatéral [16,47]. La fabrication rapide de guides chirurgicaux sur mesure, personnalisés pour chaque patient, est maintenant possible grâce à des prototypes en 3D pour effectuer avec précision l'ostéotomie selon la planification pré opératoire (Fig. 25). Récemment, plusieurs études ont décrit l'utilisation de ces nouvelles technologies et ont démontré des résultats favorables en particulier chez les adultes [16,17,18,21,22,23,27,28, 29] mais aucune n'a comparé ces résultats à un groupe témoin.



Figure 24. Planification en 2 dimensions sur des radiographies de face et de profil d'une ostéotomie d'un cal vicieux diaphysaire des deux os de l'avant-bras, résultats post opératoires. Price CT, Knapp DR. *Osteotomy for malunited forearm shaft fractures in children. J Pediatr Orthop.* 2006 Mar-Apr;26(2):193-6.

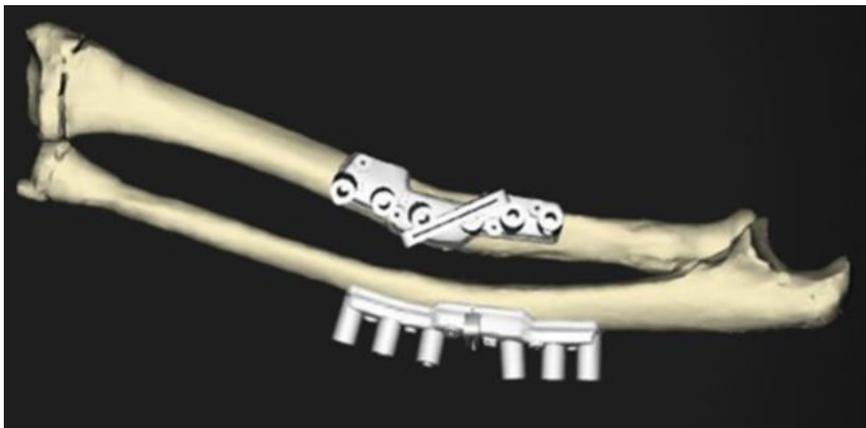
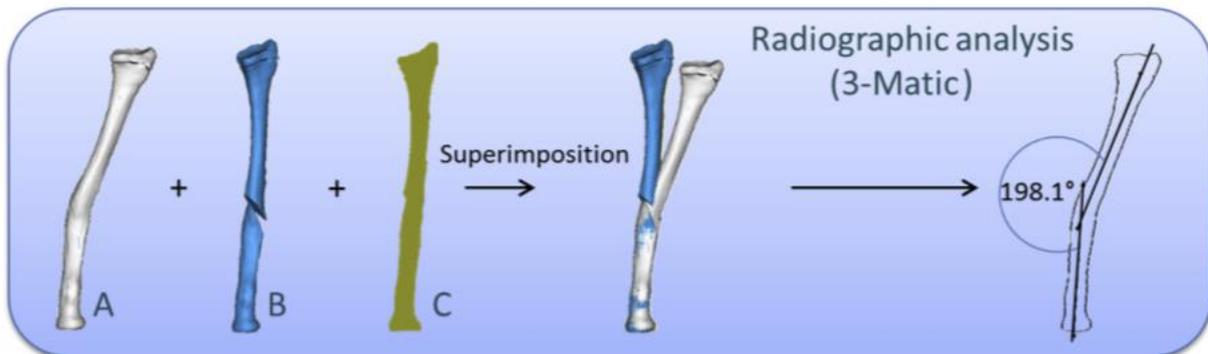


Figure 25. Planification en 3D d'une ostéotomie d'un cal vicieux diaphysaire des deux os de l'avant-bras, guides de coupe en place. Byrne AM, Impelmans B, Bertrand V, Van Haver A, Verstreken F. *Corrective Osteotomy for Malunited Diaphyseal Forearm Fractures Using Preoperative 3-Dimensional Planning and Patient-Specific Surgical Guides and Implants. J Hand Surg Am.* 2017 Oct;42(10):836.e1-836.e12. Epub 2017 Jul 12.

V. Objectifs de notre étude

L'objectif principal de notre étude était d'évaluer la précision des ostéotomies des deux os de l'avant-bras à l'aide de guides de coupe et de la planification tridimensionnelle préopératoire chez les enfants. Les objectifs secondaires étaient la comparaison avec un groupe témoin opéré par une technique d'ostéotomie classique, sans guide spécifique, de la durée opératoire, du taux d'irradiation fluoroscopique, de la survenue de complications et des résultats cliniques post opératoires.

Tableau 1. Études similaires et différences notables en comparaison avec notre étude (population, échantillon, précision, groupe témoin, objectifs secondaires).

Études	N	Population	Précision ostéotomie réelle vs planification 3D	Comparaison avec ostéotomie classique	Amélioration durée intervention / irradiation / clinique
Bauer2015	19	Enfants	Non étudiée	Non	Non étudiée
Vlachopoulos2015	14	Adultes	Ouverture → 8.30° ± 5.35° Fermeture → 3.47° ± 1.09°	Non	Non étudiée
Roner2017	10	Adultes	5,8°±3,6°	Non	Non étudiée
Byrne2017	5	Enfants	1.63°	Non	Non étudiée
Oka2019	16	Adultes	< 1°	Non	Non étudiée
Trousseau2020	9	Enfants	...	OUI → 15 témoins	...

PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES

CHAPITRE I : Population et évaluation préopératoire

De mars 2018 à mai 2020, 24 enfants souffrant de déformations osseuses de l'avant-bras âgés de 10 à 18 ans ont été inclus dans cette étude (Service de Chirurgie Orthopédique et Réparatrice de l'Enfant, hôpital Armand Trousseau, à Paris, en France).

Les critères d'inclusion étaient : un patient âgé d'au moins 9 ans (aucune chance de correction spontanée par le remodelage et la croissance osseuse au-delà de cet âge [14]) et de moins de 18 ans ; une déformation de l'avant-bras ou du poignet, associée à un handicap fonctionnel (douleur, limitation de l'amplitude articulaire, particulièrement dans les mouvements rotatoires de pronation et supination, instabilité de l'articulation radio-ulnaire distale) ; une gêne esthétique entraînant un handicap social significatif. Dans les cas de malformations congénitales (Fig. 26), la chirurgie était indiquée quand les patients devenaient symptomatiques et se plaignaient de douleur ou de diminution des amplitudes articulaires.

Les critères d'exclusion étaient : une participation de l'articulation huméro-ulnaire dans la déformation (anomalie congénitale ou post-traumatique de l'articulation du coude, par exemple : un cal vicieux de l'humérus avec déformation en cubitus varus ou valgus) ; une déformation de l'avant-bras controlatéral (à l'exception des maladies de Madelung) et enfin une incapacité à adhérer aux soins due à d'autres comorbidités (physiques, cognitives ou psychiatriques).

Dans les cas de cals vicieux post-traumatiques (Fig. 27), la prise en charge initiale de la fracture s'est traduite par une réduction à foyer fermé sous anesthésie générale, puis par une immobilisation de type plâtre circulaire brachio-antébrachio-palmaire ou manchette plâtrée circulaire pendant 6 à 12 semaines selon la localisation de la fracture. Les patients ont été

suivis pendant un minimum d'un an avant que l'indication chirurgicale ne soit posée. Ils ont bénéficié de radiographies régulières pour confirmer la consolidation et pour vérifier qu'aucun remodelage osseux récent n'avait eu lieu.



Figure 26. Radiographies d'avant-bras de face et de profil chez un enfant atteint de la maladie de Madelung. PACS Hôpital Armand-Trousseau, APHP.



Figure 27. Radiographies d'avant-bras de face et de profil chez un enfant présentant un cal vicieux diaphysaire (jonction tiers proximal-tiers moyen) des deux os de l'avant-bras. PACS Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

Les ostéotomies de correction des deux os de l'avant-bras étaient indiquées chez tous les patients. Vingt-quatre enfants ont été inclus et 50 ostéotomies ont été exécutées : 20 dans le groupe opéré grâce à un guide de coupe spécifique (G+) et 30 dans le groupe opéré sans guide (G-). Pour le groupe G+, un scanner tridimensionnel a été réalisé en vue de la planification préopératoire et les guides d'ostéotomie sur mesure ont été synthétisés par une imprimante 3D. Dans le groupe G-, des ostéotomies classiques ont été réalisées sans guide spécifique. Ce dernier groupe a été considéré comme le groupe témoin.

Tableau 2. Caractéristiques des patients

Caractéristiques et détails		Tous	Groupe G+	Groupe G-
Nombre de patients		24	9	15
Forme bilatérale		1	1	-
Sexe	M	12	7	5
	F	12	2	10
Nombre d'ostéotomies		50	20	30
Diagnostic	Cal vicieux et épiphysiodèses post traumatique	15	6	9
	Maladie de Madelung	9	4	5
	Syndrome de Volkmann	1	-	1
Côté atteint	Droit	11	4	7
	Gauche	14	6	8
Âge au moment de l'ostéotomie (années)		14.7	14.6	14.8
Siège de la déformation	Distal	22	7	15
	Tiers moyen	2	2	-
	Proximal	1	1	-
Délai entre le traumatisme et la chirurgie	Cals vicieux seulement (mois)	23.9	31	18.6
Durée de suivi (mois)		21.3	16.3	26.3

CHAPITRE II : Stratégie chirurgicale

2.1 Planification pré opératoire

Avant l'intervention, des radiographies de face et de profil des deux avant-bras entiers ont été réalisées pour chaque patient.

Dans le groupe G+, tous les patients ont bénéficié en plus de scanners tomodensitométriques des deux avant-bras (SOMATOM Definition AS, Siemens Healthineers, Suisse ; matrice d'image = 512 x 512 pixels; épaisseur de tranche = 0,6 mm; 40 sec par tranche; contrôle de dose pédiatrique spécifique). Les images ont été enregistrées sous un format standard (DICOM - Digital Imaging and Communications in Medicine) après les avoir extraites du PACS (Picture Archiving and Communication System). Les données d'imagerie ont été analysées par le logiciel 3-Matic (créé par Materialise, Louvain, Belgique, impression 3D, optimisation et simulation de données) dont la fonction informatique principale est la simulation, utilisée pour concevoir des modèles virtuels tridimensionnels des deux avant-bras.

Dans les cas post-traumatiques et les cas congénitaux unilatéraux, les ostéotomies virtuelles de correction ont été générées à partir du côté controlatéral sain (Fig.28, 29 et 30). Dans les cas congénitaux bilatéraux, aucune comparaison avec l'avant-bras normal controlatéral n'était directement possible. Par conséquent, les ostéotomies étaient établies à partir d'un modèle virtuel d'avant-bras sain conçu pour servir de modèle de comparaison.

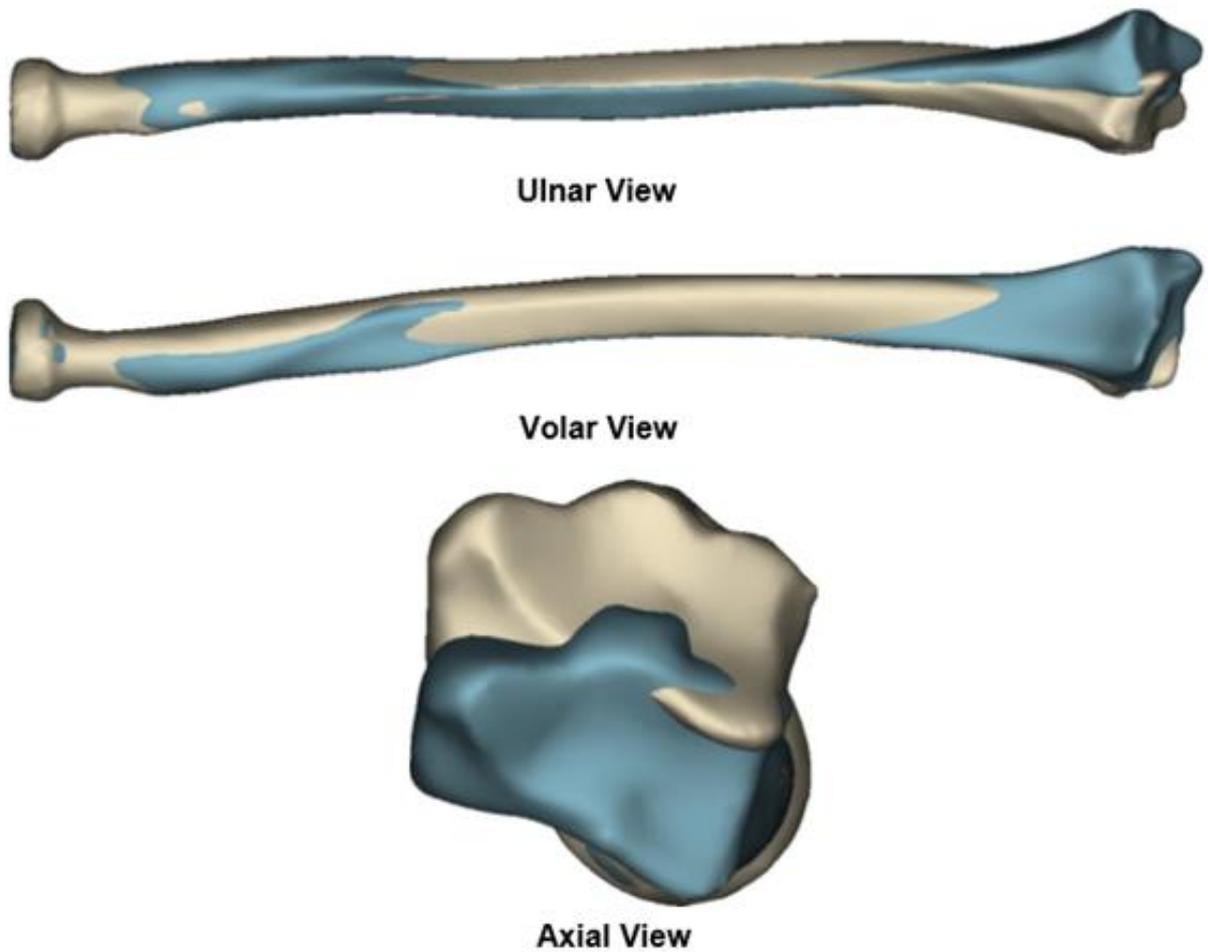


Figure 28. Planification préopératoire d'une ostéotomie de cal vicieux distal de l'avant-bras : analyse 3D du radius et de l'ulna. Superposition du radius atteint en blanc et du radius controlatéral normal en bleu (objectif optimal de l'ostéotomie de correction du radius blanc = radius bleu). Images fournies par Materialise.

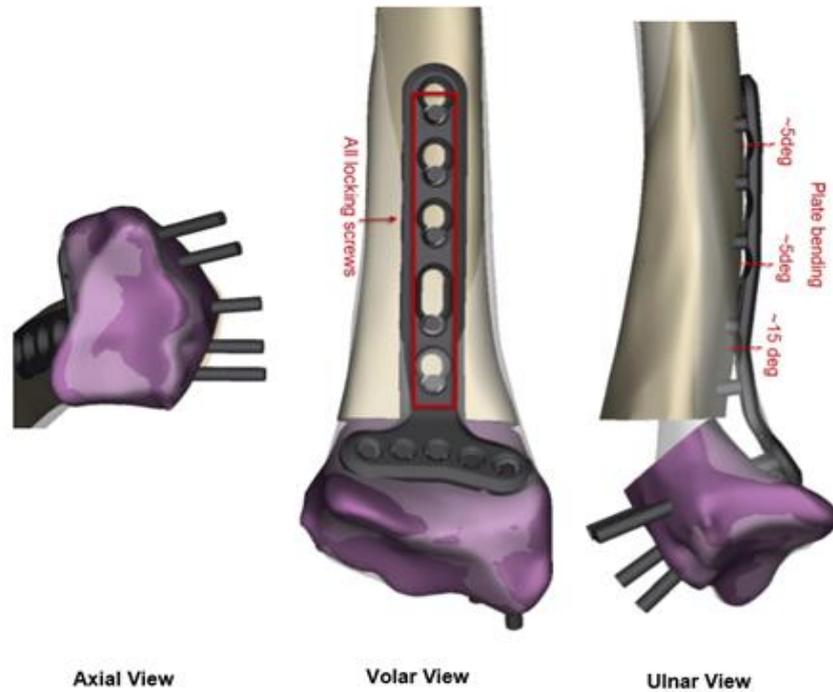


Figure 29. Planification préopératoire d'une ostéotomie de cal vicieux distal de l'avant-bras : analyse 3D du radius et de l'ulna. Objectifs de la planification de l'ostéotomie du radius avec la plaque et les vis en position finale. *Images fournies par Materialise.*

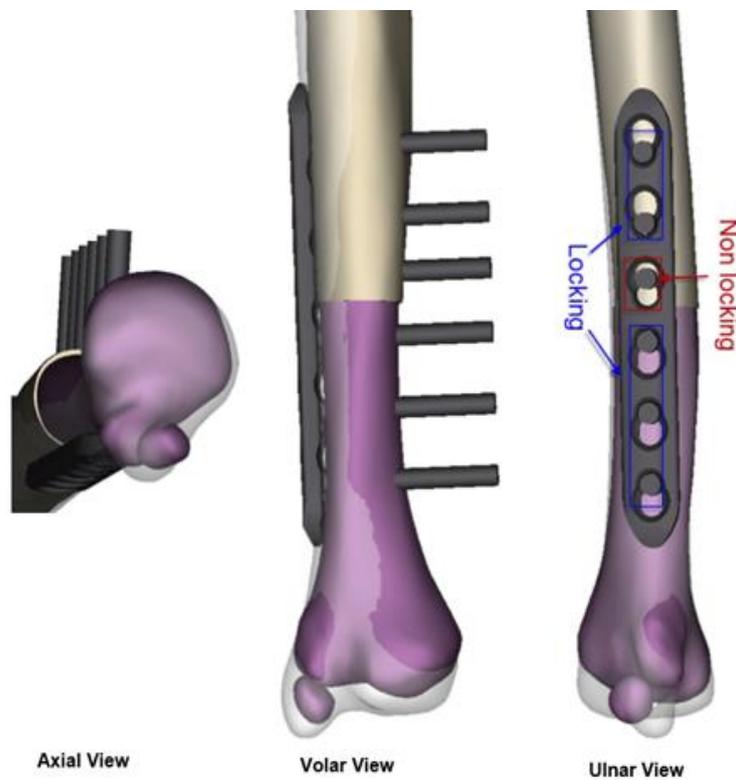


Figure 30. Planification préopératoire d'une ostéotomie de cal vicieux distal de l'avant-bras : analyse 3D du radius et de l'ulna. Objectifs de la planification de l'ostéotomie de l'ulna avec la plaque et les vis en position finale. *Images fournies par Materialise.*

Dans le groupe G-, l'analyse de la déformation a été effectuée uniquement à partir de radiographies orthogonales préopératoires des deux avant-bras. Ces images ont également été recueillies à partir du PACS. Dans les cas de cals vicieux, les déformations angulaires ont été mesurées au niveau du foyer de fracture de face et de profil. Dans les cas ne comportant pas de site de fracture (c'est à dire pour les malformations congénitales et le syndrome de Volkmann), le sommet de la déformation était le point de référence des mesures angulaires. La planification préopératoire a été traditionnellement exécutée en dessinant les lignes de coupe osseuse sur les radiographies bidimensionnelles pour restaurer une anatomie normale (Fig. 31). Ces dessins d'ostéotomie étaient comparés aux radiographies d'avant-bras controlatéral normal quand cela était possible. Les repères utilisés pour cette planification d'ostéotomie à main levée étaient la tubérosité bicipitale et le processus styloïde du radius, ainsi que les processus coronoïde et styloïde de l'ulna [14] (Fig. 32). Dans un deuxième temps, les coupes osseuses étaient ajustées en per opératoire grâce aux scopies réalisées sous amplificateur de brillance.

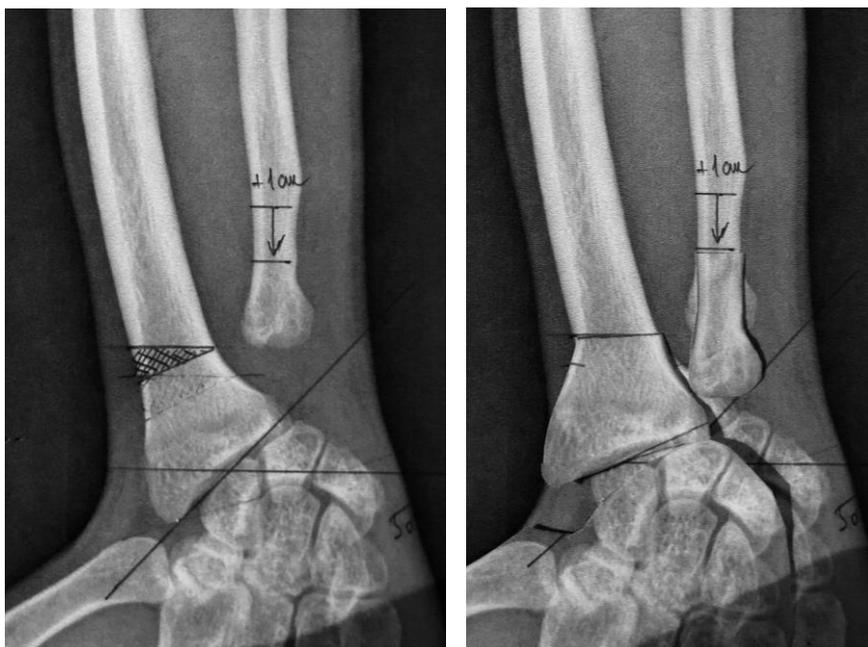


Figure 31. Planification en 2 dimensions sur radiographies de face d'une ostéotomie distale des 2 os de l'avant-bras : méthodes des calques. Images fournies par le Pr Fitoussi, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.



Figure 32. Repères pour planification d'une ostéotomie en 2 dimensions sur radiographies d'avant-bras de face et de profil. La tubérosité bicipitale radiale et la styloïde radiale sont à des extrémités opposées et guident l'alignement axial. L'axe du col du radius définit l'axe de rotation de l'avant-bras. Le processus coronoïde de l'ulna et la styloïde ulnaire sont à des extrémités opposées et guident également l'alignement axial. Price CT, Knapp DR. Osteotomy for malunited forearm shaft fractures in children. *J Pediatr Orthop.* 2006 Mar-Apr;26(2):193-6.

2.2 Fabrication des guides de coupe sur mesure dans le groupe G+

Les guides de coupe sur mesure étaient développés à partir des modèles virtuels 3D des deux avant-bras. Ces guides étaient conçus et moulés pour s'appliquer parfaitement sur la surface corticale osseuse et pour s'adapter à la voie d'abord chirurgicale; de même, la position des pré-trous de vis et des fentes d'ostéotomie devait être anticipée de manière optimale par rapport au geste chirurgical. Les modèles 3D des 2 os et les guides étaient en polyamide et étaient conçus à l'aide du logiciel 3-Matic. Ils ont ensuite été générés par une imprimante 3D spécifique et stérilisés avant la chirurgie (Fig. 33, 34, 35 et 36). La planification, les modèles osseux et les guides de coupe sur mesure ont coûté environ 2200 € par patient avec le laboratoire Materialise, et 250 € avec le laboratoire Newclip.



Figure 33. Photographie des modèles 3D en polyamide du radius (à gauche) et de l'ulna (à droite dans le panier), ainsi que les guides de pré-forage. Matériel en polyamide fourni par Materialise. Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

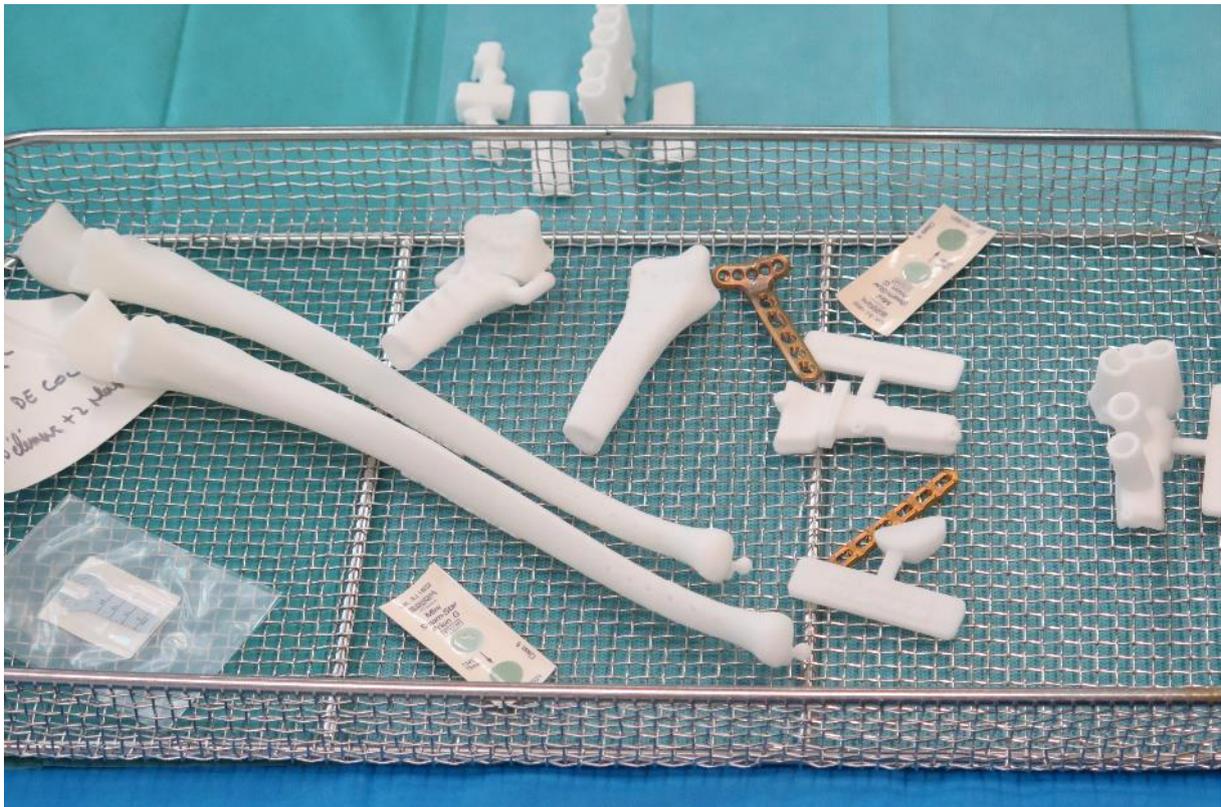


Figure 34. Photographie des modèles 3D en polyamide de l'ulna, ainsi que les guides de pré-forage et les plaques de titane LCP. Matériel en polyamide fourni par Materialise. Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

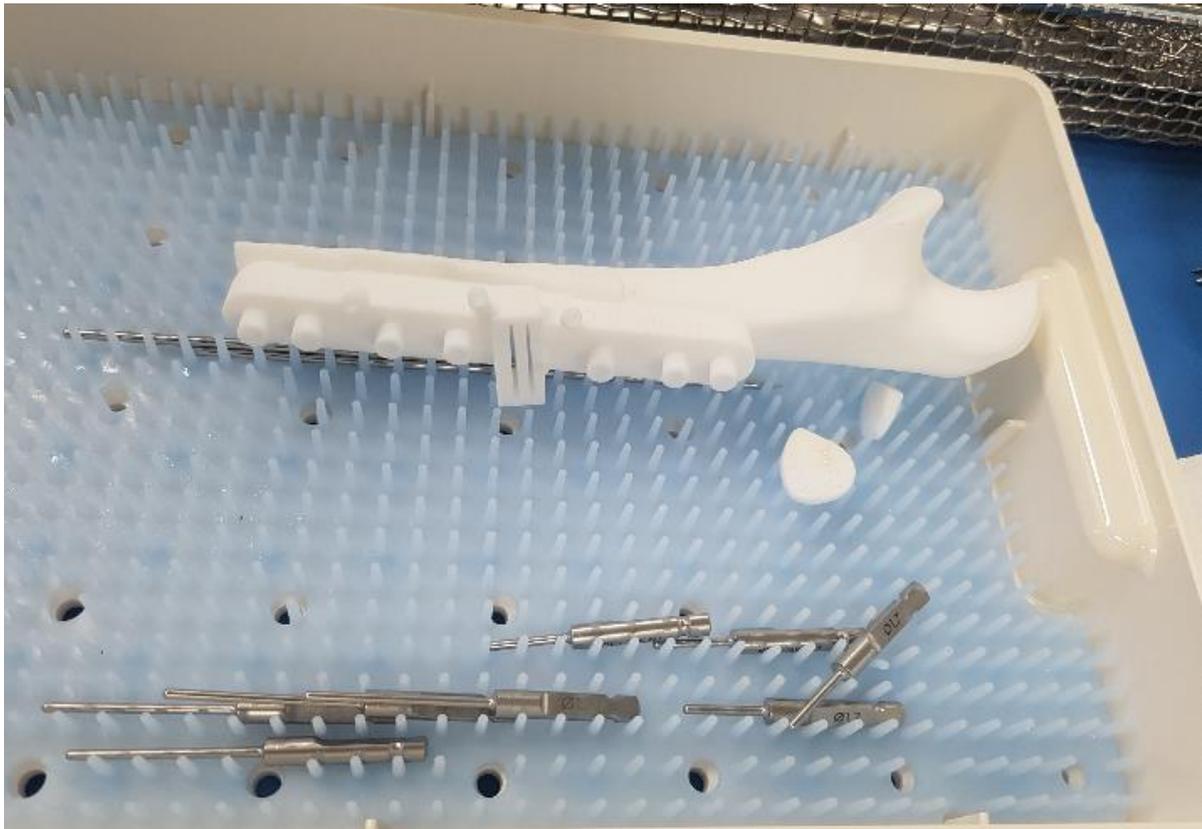


Figure 35. Photographie d'un modèle 3D en polyamide de l'ulna, ainsi que le guide de coupe fixé sur le modèle osseux. Matériel en polyamide fourni par Newclip. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*

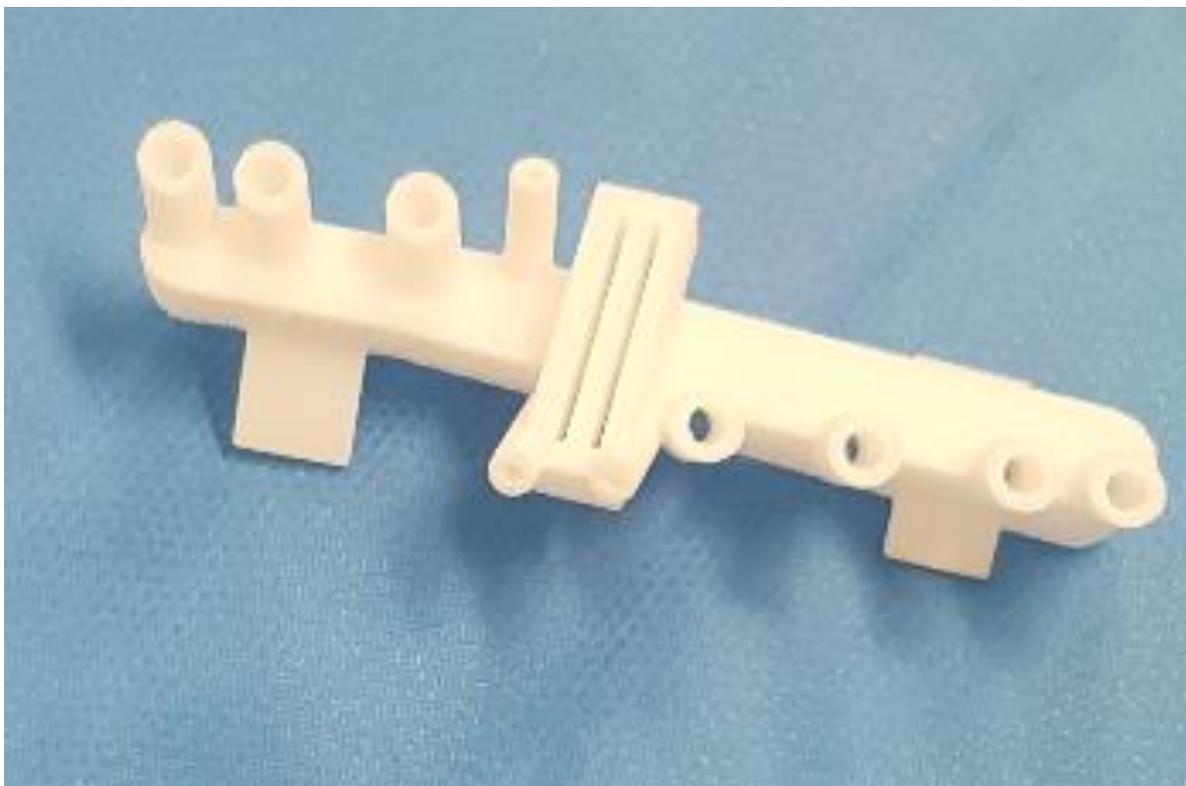


Figure 36. Photographie d'un guide de coupe 3D en polyamide. Matériel fourni par Newclip. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*

2.3 Technique chirurgicale dans le groupe G+

L'intervention était réalisée sous anesthésie générale, le patient était positionné en décubitus dorsal avec un garrot placé à la racine du membre supérieur opéré, sur une table à bras. Le choix d'effectuer d'abord l'ostéotomie du radius ou de l'ulna dépendait de l'expérience du chirurgien. Quatre chirurgiens expérimentés de niveau 3 à 4 ont effectué toutes les interventions [48].

Les deux incisions, centrées sur le sommet de la déformation, suivaient une voie d'abord antérieure de Henry pour le radius (Fig. 37) et une voie d'abord dorso-médiale pour l'ulna, en regard de la crête ulnaire (Fig. 38). À l'aide d'un modèle 3D de l'os pathologique sur lequel un guide était pré-fixé en position optimale, le guide de pré-forage était placé en bonne position et aligné sur la surface corticale osseuse. Le modèle osseux était utile pour confirmer la position idéale du guide. Pour les cals vicieux diaphysaires, la bonne position du guide était vérifiée en mesurant la distance entre le processus styloïde du radius, ou de l'ulna, et l'extrémité distale du guide. Le guide de pré-forage était ensuite fixé à l'os, à l'apex de la déformation et en s'alignant avec l'anatomie, par des broches de Kirschner à travers des trous déjà préformés (Fig. 39). Les trous de vis étaient méchés à travers le guide dans les orifices prévus à cet effet. Dans la technique de Materialise, le guide de pré-forage était retiré puis remplacé par un guide de coupe, alors que Newclip fournissait un seul guide, à la fois de pré-forage et de coupe. Puis, à travers les fentes de coupe du guide de coupe, les ostéotomies étaient réalisées à l'aide d'une scie oscillante (Fig. 40). Le guide était ensuite retiré mais les broches étaient laissées en position pour aider à la bonne réduction sur plaque. La réduction et la fixation de l'os dans la position prévue étaient obtenues directement par l'alignement des extrémités osseuses sur une plaque de titane (Fig. 41, 42 et 43). Les détails des différents

types de plaques d'ostéosynthèse sont décrits dans le tableau 3. Enfin, des vis verrouillées ou bien des vis corticales non verrouillées étaient mises en place. Certains cas nécessitaient une greffe osseuse en forme de coin pour stabiliser les ostéotomies d'ouverture (Tableau 3). Ces greffes osseuses provenaient directement des ostéotomies du radius ou bien de l'ulna et le fragment était retourné sur lui-même puis impacté en press-fit afin de combler la perte de substance osseuse. Des gestes de correction des tissus mous ont été également nécessaires chez certains patients (Tableau 3).



Figure 37. Photographie peropératoire du dessin de la voie d'abord palmaire radiale de Henry. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*



Figure 38. Photographie peropératoire du dessin de la voie d'abord latéro-dorsale ulnaire. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*

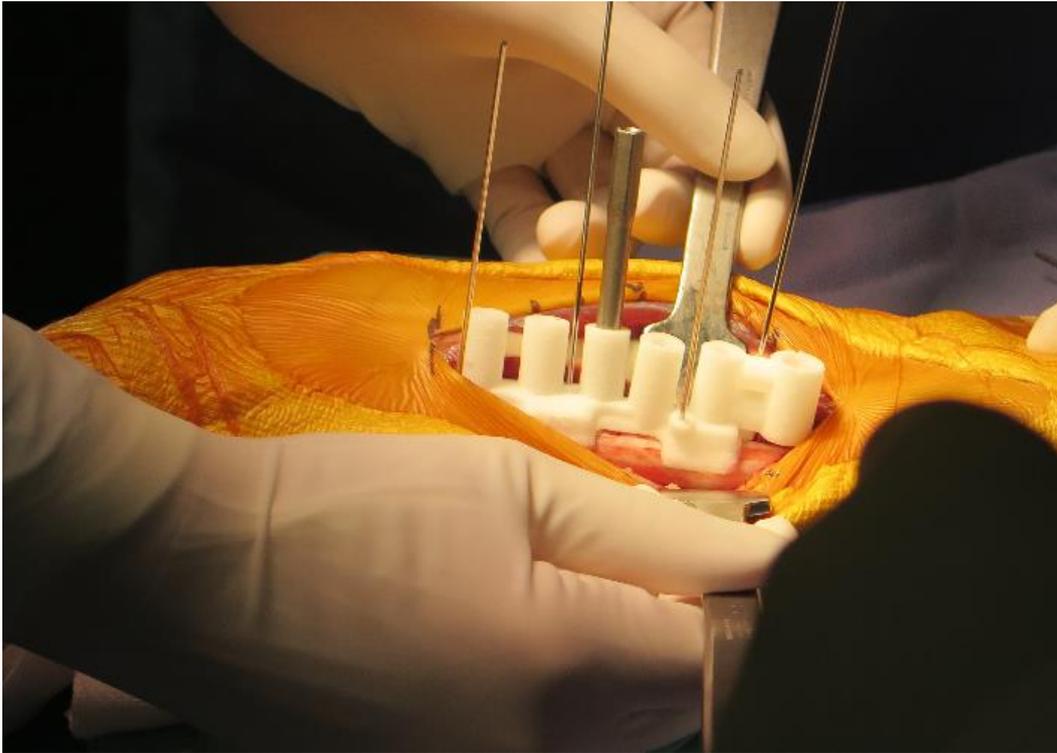


Figure 39. Photographie peropératoire du guide de pré-forage sur mesure en place sur l'ulna, fixé par des broches de Kirschner. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*



Figure 40. Photographie peropératoire du guide de coupe avec ostéotomie de l'ulna à la scie oscillante insérée dans la fente du guide prévue à cet effet. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*



Figure 41. Photographie peropératoire de l'ostéosynthèse par plaque de l'ulna. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*

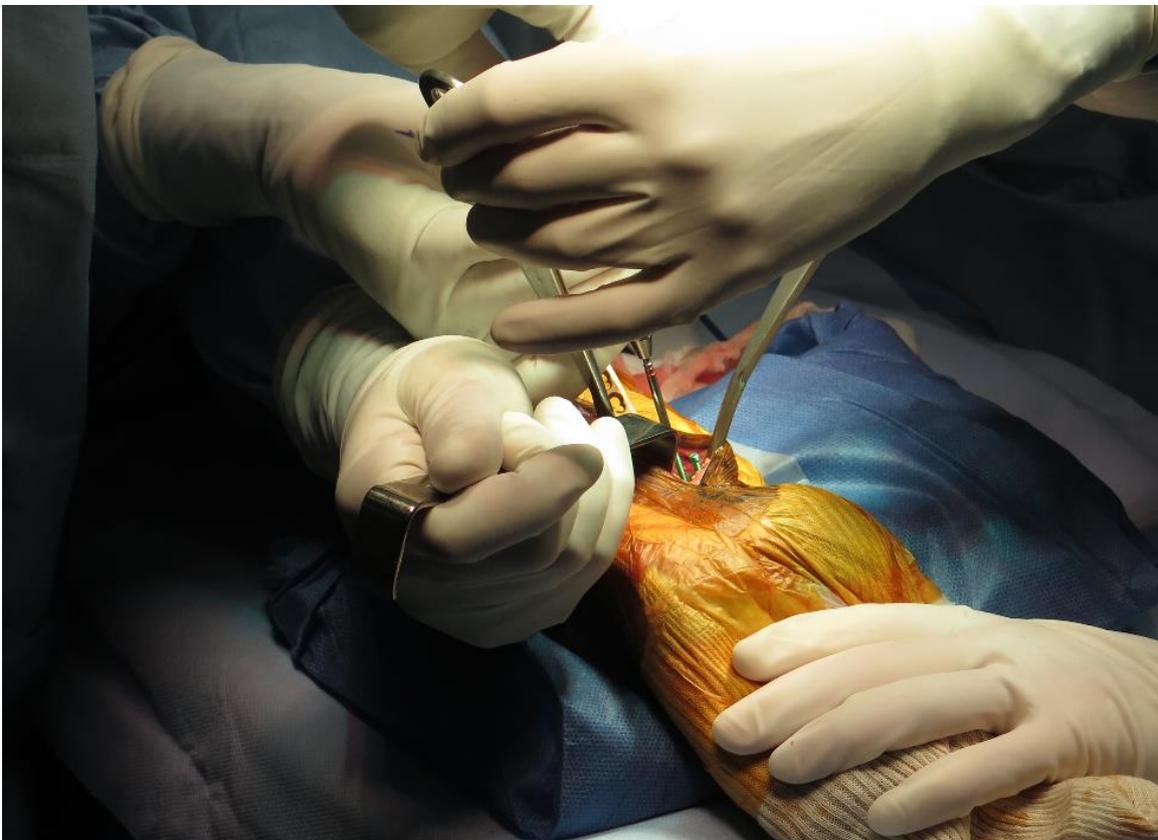


Figure 42. Photographie peropératoire de l'ostéosynthèse par plaque du radius. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*

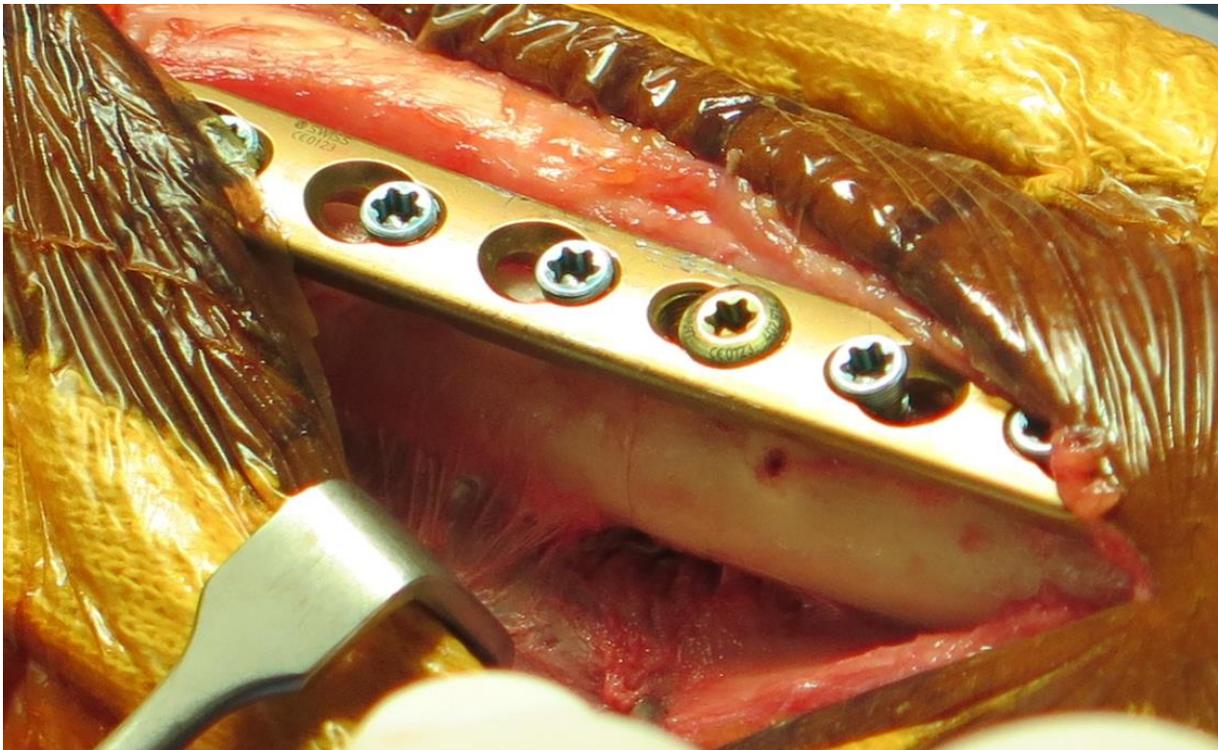


Figure 43. Photographies peropératoires de la plaque d'ostéosynthèse de l'ulna en place. *Hôpital Armand-Trousseau, APHP.*

Avant la fermeture, le résultat de l'ostéotomie et de l'ostéosynthèse était vérifié par fluoroscopie (Fig. 44) et par contrôle visuel ; un testing peropératoire de la récupération des amplitudes articulaires passives (flexion et extension du poignet et du coude, rotations interne et externe de l'avant-bras, inclinaisons ulnaire et radiale du poignet) ainsi que de la stabilité radio-ulnaire distale était réalisé.

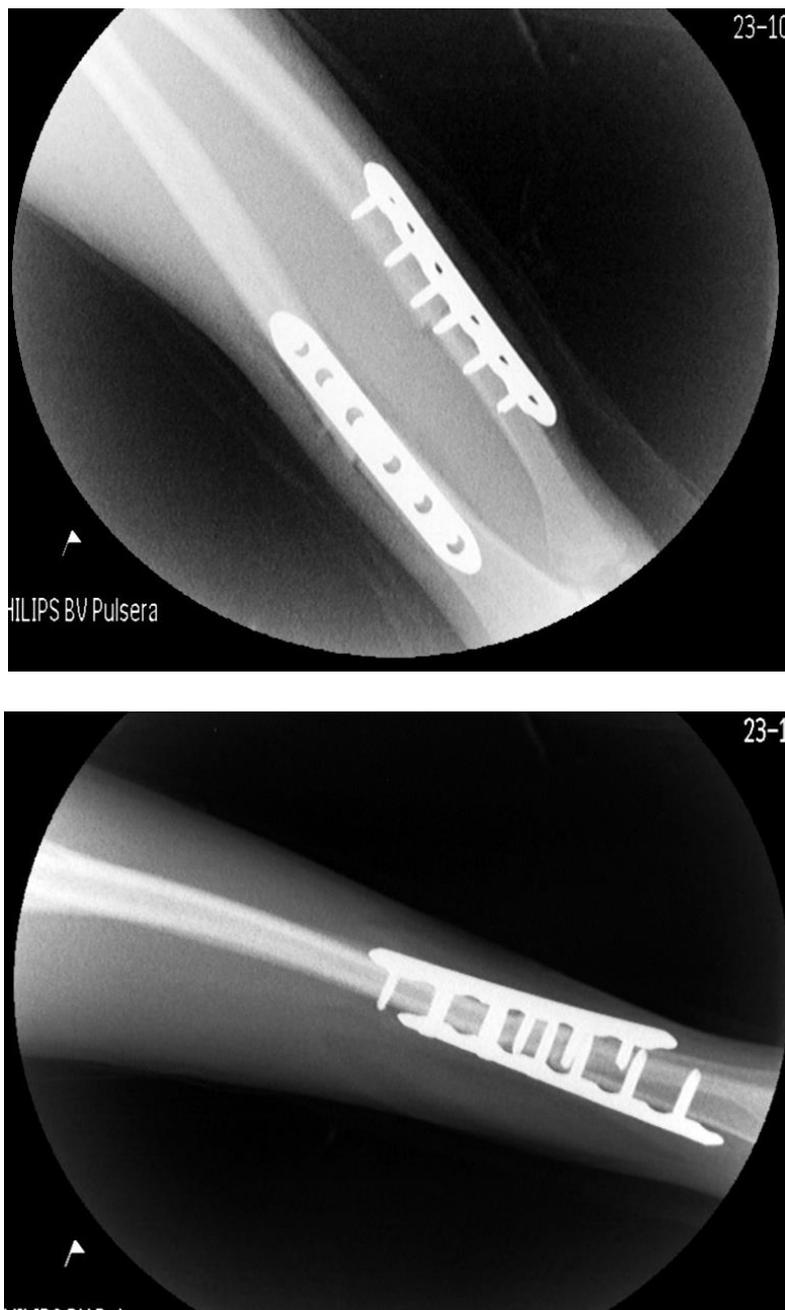


Figure 44. Images des contrôles scopiques post opératoires immédiats de face et de profil d'ostéotomie diaphysaire des 2 os de l'avant-bras. Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

2.4 Technique chirurgicale dans le groupe G-

Dans le groupe G-, la technique chirurgicale était exécutée sans guide et était basée sur les radiographies 2D et les images fluoroscopiques per opératoires. Après avoir déterminé le sommet de la déformation maximale et ainsi, le meilleur plan de coupe, une ostéotomie de fermeture nécessitant deux coupes, et donc le retrait d'un coin osseux, était réalisée, ou bien selon la planification, une ostéotomie d'ouverture nécessitant une seule coupe. Puis l'os était réaligné avec ou sans greffon osseux selon le type d'ostéotomie et le type de correction. Les ostéotomies étaient ajustées après vérification du résultat clinique per opératoire obtenu, notamment par testing des amplitudes articulaires, et également grâce aux contrôles fluoroscopiques. Les détails des interventions sont indiqués dans le tableau 3.

Tableau 3 : Procédure chirurgicale

Abréviations : LCP = Locking Compression Plate; DCP = Dynamic Compression Plate ; PL = Palmaris Longus (long palmaire) ; FCR = Flexor Carpi Radialis (fléchisseur radial du carpe) ; TFCC = Triangular Fibrocartilage Complex.

		Tous	Groupe G+	Groupe G-	
Patients	(nombre)	24	9	15	
Ostéotomies	(nombre)	50	20	30	
Côté atteint	D	11	4	7	
	G	14	6	8	
Niveau de l'ostéotomie	Radius	Métaphyse distale	22	7	15
		Diaphyse moyenne	2	2	-
		Diaphyse proximale	1	1	-
	Ulna	Métaphyse distale	3	-	3
		Diaphyse distale	19	7	12
		Diaphyse moyenne	1	1	-
Type d'ostéotomie	Radius	Ouverture	21	8	13
		Fermeture	4	2	2
	Ulna	Ouverture	3	2	1
		Fermeture	3	1	2
		Accourcissement	16	5	11
		Allongement	1	-	1
Matériel d'ostéosynthèse	Radius	Plaque LCP	17	7	10
		Plaque DCP	1	1	-
		Plaque Initial R	7	2	5
	Ulna	Plaque LCP	19	8	11
		Plaque DCP	4	1	3
		Plaque Initial R	1	1	-
		Vis seules	1	-	1
Greffe osseuse	(nombre)	12	2	10	
Geste sur les tissus mous	Allongement du PL et du FCR	1	-	1	
	Fixation du TFCC	3	1	2	

2.5 Suites opératoires

À la suite de l'intervention, tous les patients ont été immobilisés dans un plâtre circulaire brachio-antébrachio-palmaire avec le coude fléchi à 90°, le poignet en extension à 20° et en

rotation neutre. Après 6 semaines, le plâtre a été retiré y compris dans le cas où la consolidation était incomplète, afin de commencer précocement l'auto-rééducation sous la surveillance des parents et d'éviter l'enraidissement articulaire. Les sports de contact et le port de charges lourdes étaient autorisés une fois que la consolidation était atteinte et confirmée avec certitude, c'est-à-dire qu'au minimum trois corticales continues devaient être observées sur les radiographies de face et de profil sur l'ulna et le radius (Fig. 46). L'ablation du matériel d'ostéosynthèse était planifiée de manière systématique après un délai minimum de six mois (Tableau 2) (Fig. 47).

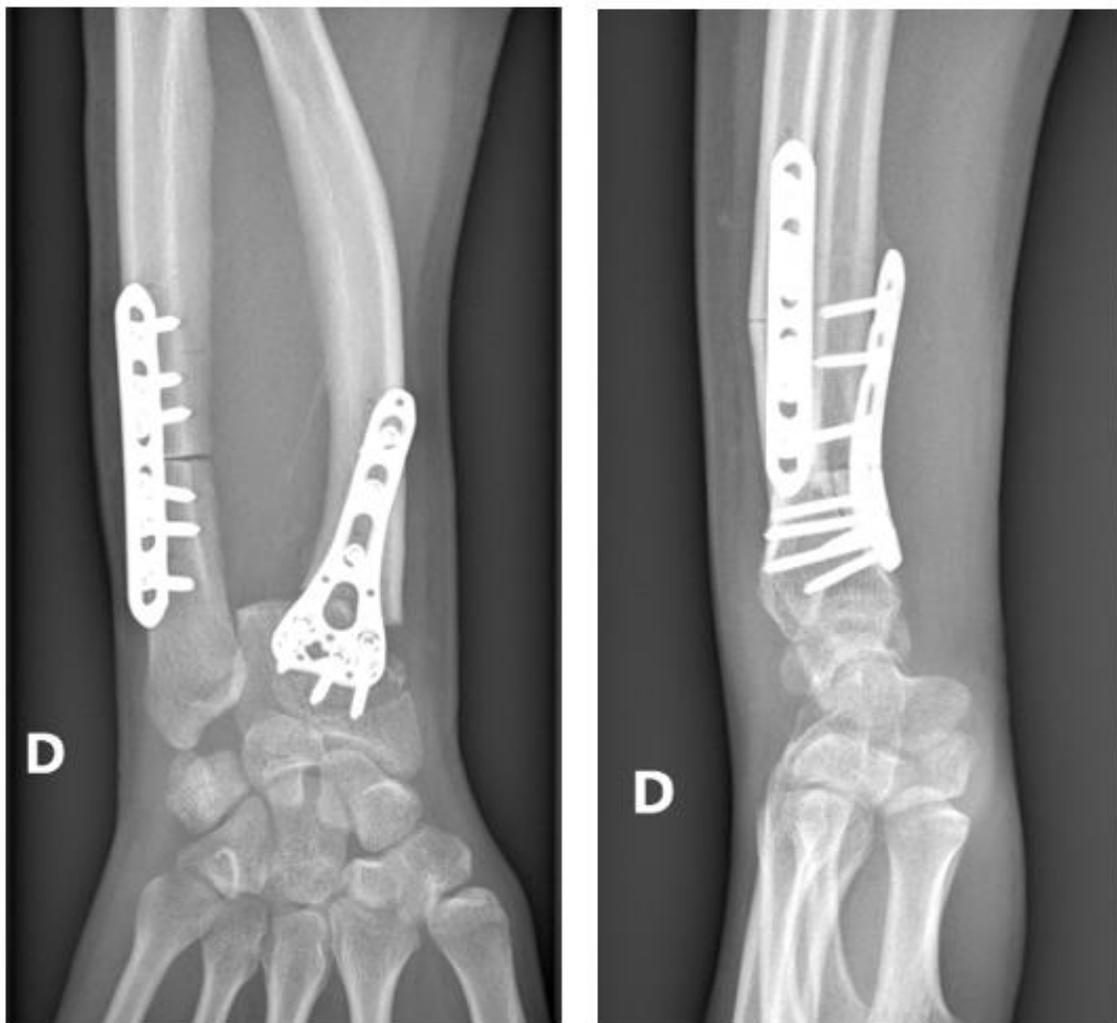


Figure 45. Radiographie post opératoire de face et de profil à 6 semaines d'une ostéotomie distale des deux os de l'avant-bras dans le cadre d'une maladie de Madelung : consolidation non atteinte à ce stade. PACS, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.



Figure 46. Radiographie post opératoire de face et de profil 3 mois d'une ostéotomie diaphysaire des deux os de l'avant-bras dans le cadre d'un cal vicieux : consolidation atteinte avec 4 corticales continues. PACS, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.



Figure 47. Radiographie post opératoire de face et de profil à distance de l'ablation du matériel d'ostéosynthèse suite à une ostéotomie distale des deux os de l'avant-bras dans le cadre d'une maladie de Madelung : consolidation atteinte. PACS, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

CHAPITRE 3 : Collection des données

Les investigations ont été menées conformément aux normes éthiques de la Déclaration d'Helsinki de 1964 [49] et conformément à la méthodologie de référence MR-003 [50]. L'étude a été enregistrée dans le registre de la base de données de la Commission Nationale Informatique et des Libertés (N° 2218140 v 0) et les parents des patients ont été informés et ont tous consenti avant la collecte et/ou l'analyse des données. Les implants tridimensionnels utilisés dans cette étude obéissaient à la directive 93/42/CEE relative aux dispositifs médicaux [51].

3.1. Objectif principal : analyse radiographique de la précision des ostéotomies dans le groupe G+

Dans le groupe G+, les premières radiographies postopératoires ont été comparées aux modèles tridimensionnels planifiés afin de mesurer la précision de la correction de l'ostéotomie (Fig.48). La silhouette des modèles 3D finaux était transférée sur des calques transparents, eux-mêmes positionnés sur les radiographies postopératoires, ce qui permettait d'analyser la différence d'angle entre les contours du modèle souhaité et l'os final réellement corrigé. En guise de repère, la partie proximale des contours du modèle transparent devait, sur les radiographies postopératoires, se superposer aux contours osseux. Dans le cas des calcs vicieux distaux, les angles mesurés étaient la pente radiale (ou inclinaison radiale) et l'orientation ulnaire coronale (ou inclinaison ulnaire coronale) de face ; ainsi que la version de la glène radiale et l'orientation ulnaire sagittale (ou inclinaison ulnaire sagittale) de profil (Fig.49 et 50). Dans le cas des calcs vicieux diaphysaires, des angles diaphysaires ont été mesurés de face et de profil (Fig. 51). Dans les maladies de Madelung, les angles mesurés

étaient les mêmes que pour les cals vicieux distaux. Seules les ostéotomies de raccourcissement, c'est à dire sans correction sagittale ni coronale, ont été exclues de cette analyse radiographique. Un observateur indépendant a effectué ces mesures avec le logiciel Surgimap (Nemaris Inc, New York, NY).



Figure 48. Mesures postopératoires de la précision de l'ostéotomie de correction à l'aide de modèles transparents. Radiographies postopératoires de face et de profil avec un modèle transparent (en rouge) de la position finale planifiée du fragment distal suite à l'ostéotomie. *Images fournies par Materialise.*

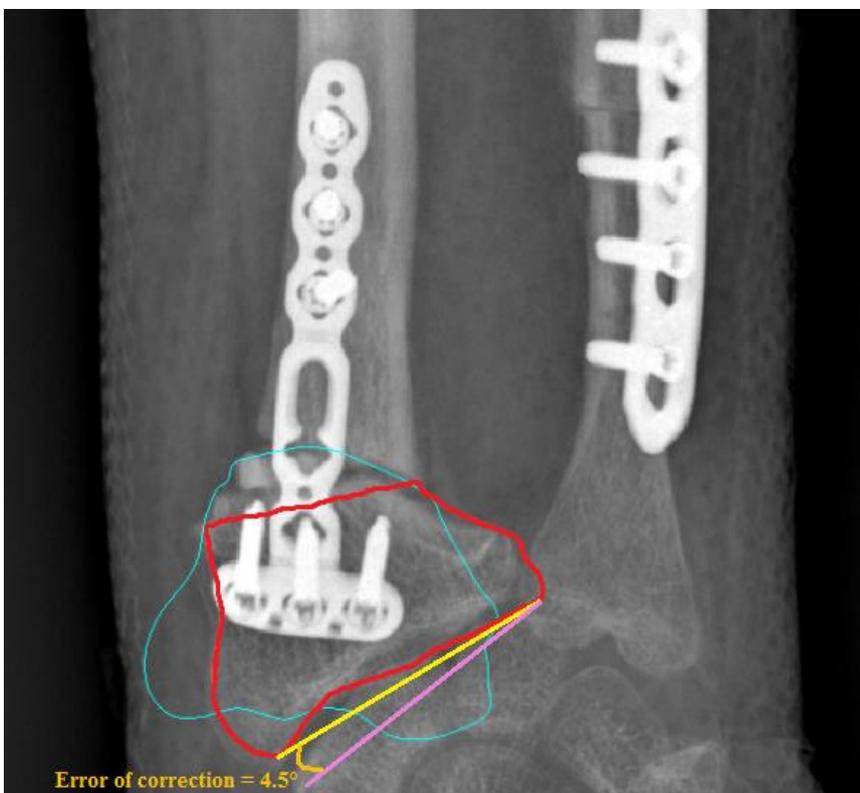
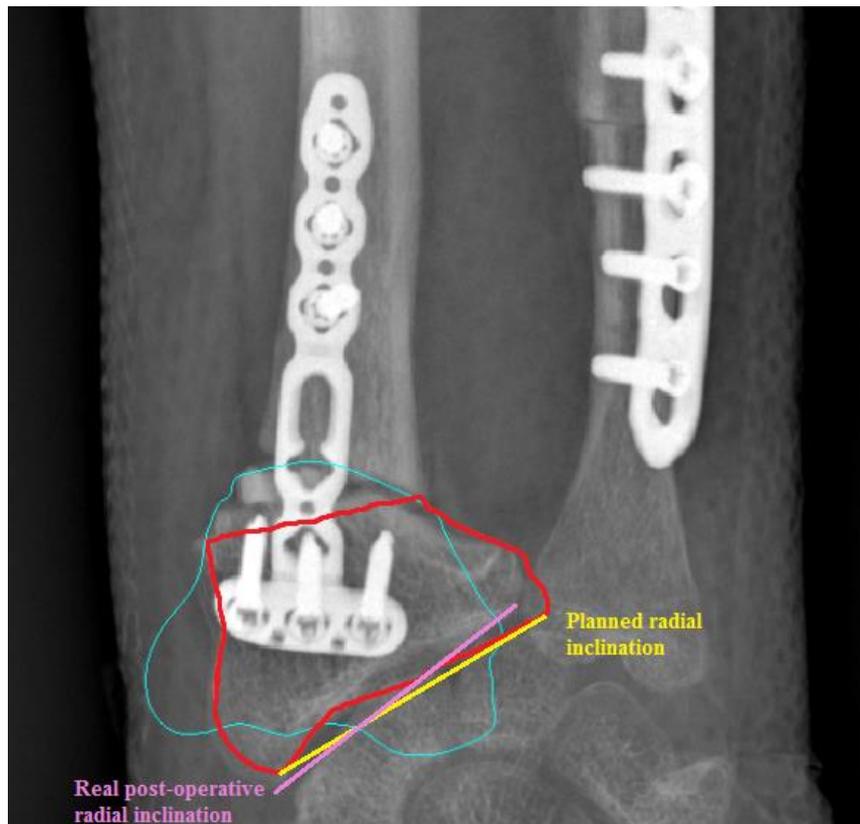


Figure 49. Mesure de l'erreur de correction de face : différence en degrés entre la pente radiale planifiée (en jaune) et la pente radiale réelle finale (en mauve). Images extraites du logiciel Surgimap, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

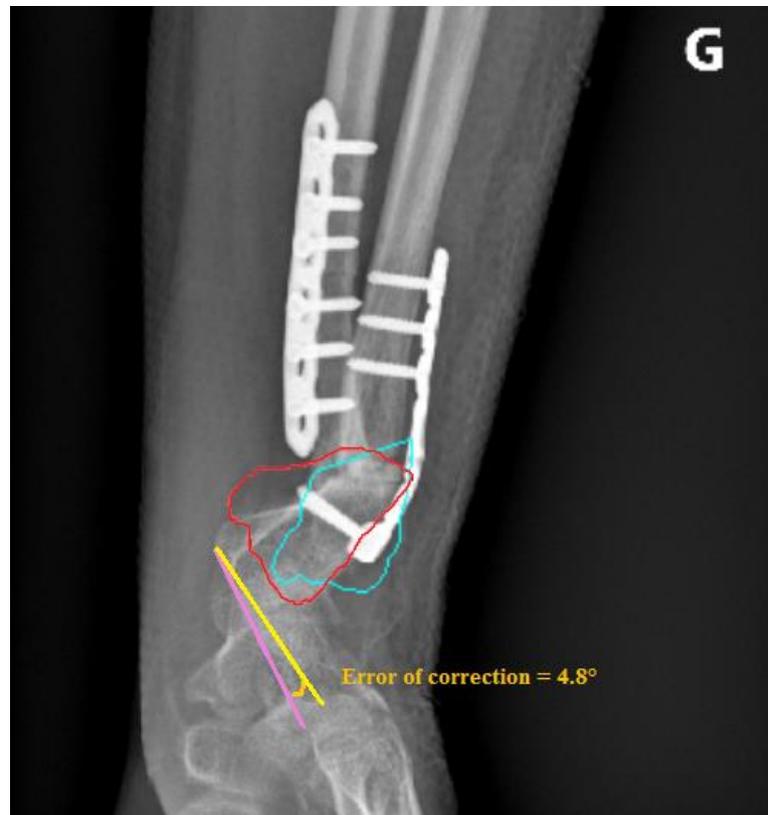
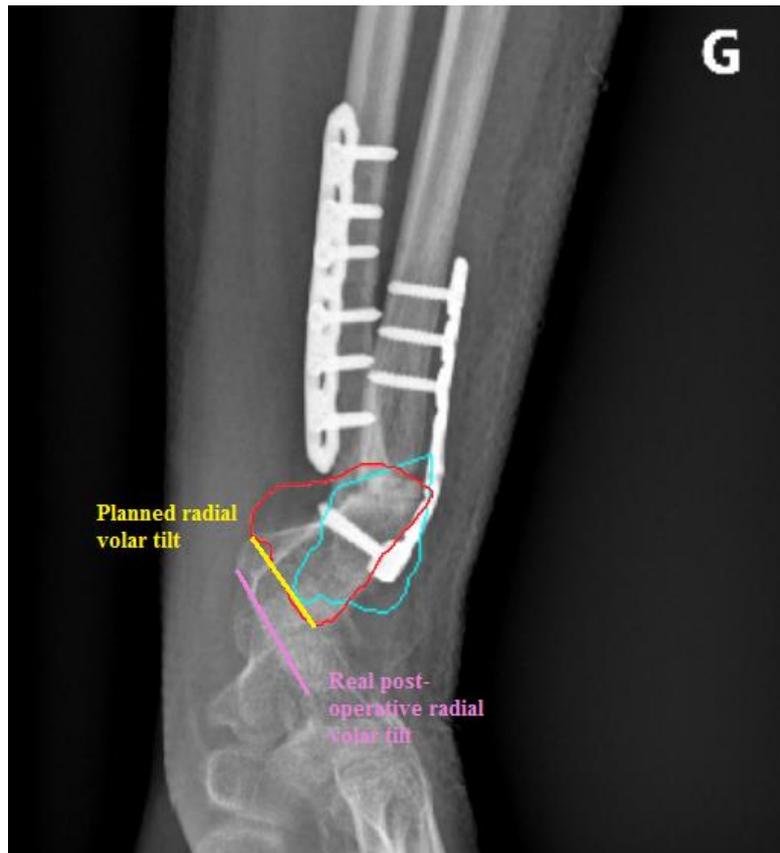


Figure 50. Mesure de l'erreur de correction de profil : différence en degrés entre la version de la glène radiale planifiée (en jaune) et la version de la glène radiale réelle finale (en mauve). Images extraites du logiciel Surgimap, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

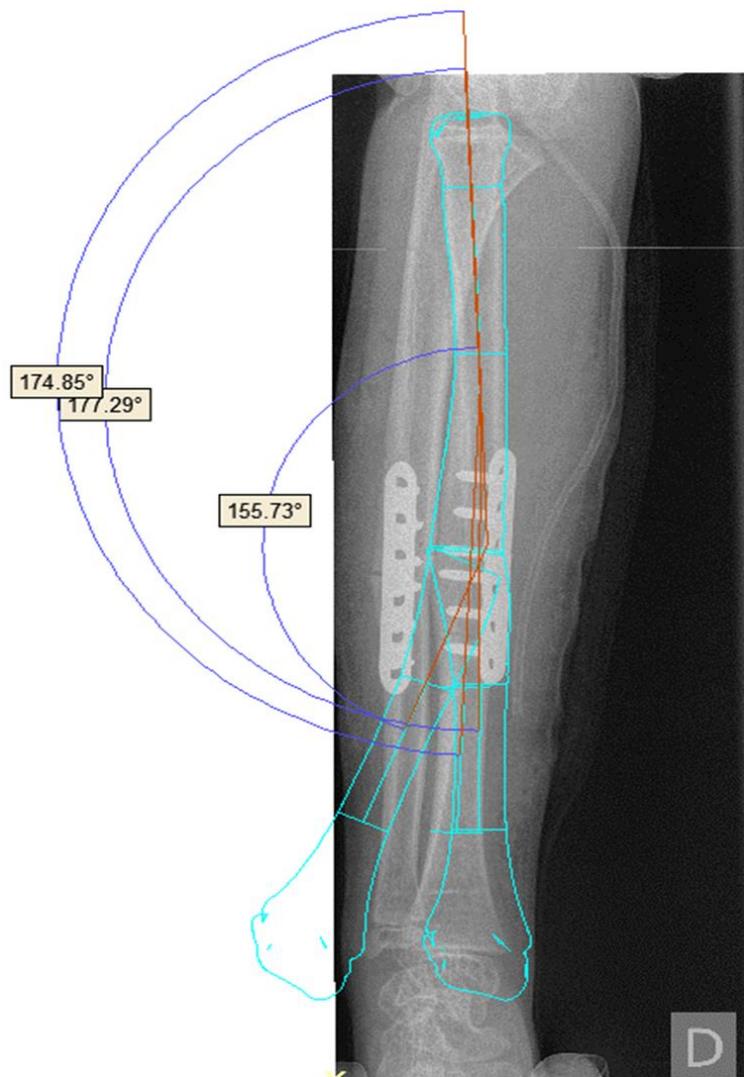


Figure 51. Exemple de calque pour mesure de la précision d'une ostéotomie d'un cal vicieux diaphysaire du radius droit proposé par Materialise. Image fournie par Materialise.

3.2. Objectifs secondaires

2.1 Durée interventionnelle

Pour chaque patient, la durée de l'intervention a été enregistrée en minutes. Le décompte commençait lors de l'incision cutanée et le chronométrage s'arrêtait au moment du dernier point de suture. Ensuite, les durées ont été comparées dans les deux groupes.

2.2 Taux d'irradiation

La durée des rayonnements fluoroscopiques a été enregistrée en secondes tout au long de la chirurgie, pour tous les patients. De même, la dose peropératoire de rayons X reçus a été enregistrée et mesurée en μ Grays (Fig. 52). Dans le groupe G+, l'irradiation due aux scanners préopératoires effectués pour réaliser la planification en trois dimensions a été ajoutée à ces mesures. Aucun scanner n'a été réalisé dans le groupe G-. Les expositions aux rayonnements pré et postopératoires dues aux contrôles radiographiques standards ont été considérées comme équivalentes dans les deux groupes. Par conséquent, les doses de ces radiographies n'ont pas été prises en compte dans le calcul de la dose totale de rayonnement reçue.

8001246328		Hôpital TROUSSEAU Orthopédique 06-03-2018 17:27			
Mode	Dose cumulée		Temps scopie		N°
	mGy	mGym ²		minutes	
RBD	0.0193	0.000347	<input type="text"/>	0.0	
RHD	0	0	<input type="text"/>	0.0	
Totale	0.0193	0.000347		0.0	

Figure 52. Image de l'enregistrement fluoroscopique de la dose per opératoire cumulée de rayons X reçus en mGrays et du temps total de scopie en minutes. PACS, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

2.3 Complications

Au cours du suivi, la revue des dossiers a permis d'identifier les différents types d'événements indésirables ainsi que leurs causes, leur délai d'apparition après la chirurgie, leur prise en charge et l'efficacité du traitement. Le nombre de complications a été comparé dans les deux groupes.

2.4 Évaluation clinique et score de qualité de vie PRWE rempli par les patients

Les amplitudes articulaires actives de chaque mouvement (flexion, extension, pronation, supination, inclinaison radiale et inclinaison ulnaire) (Fig.53) ont été mesurées et répertoriées un mois avant et un an après la chirurgie et ont été rapportées en degrés d'angle. Les valeurs considérées comme normales des amplitudes articulaires étaient celles-ci : 80-90 degrés pour la flexion et l'extension du poignet, 85-95 degrés pour la pronation et la supination de l'avant-bras, 10-20 degrés pour l'inclinaison radiale et 40-50 pour l'inclinaison ulnaire. L'amélioration clinique était ensuite comparée dans les deux groupes pour chaque mouvement.

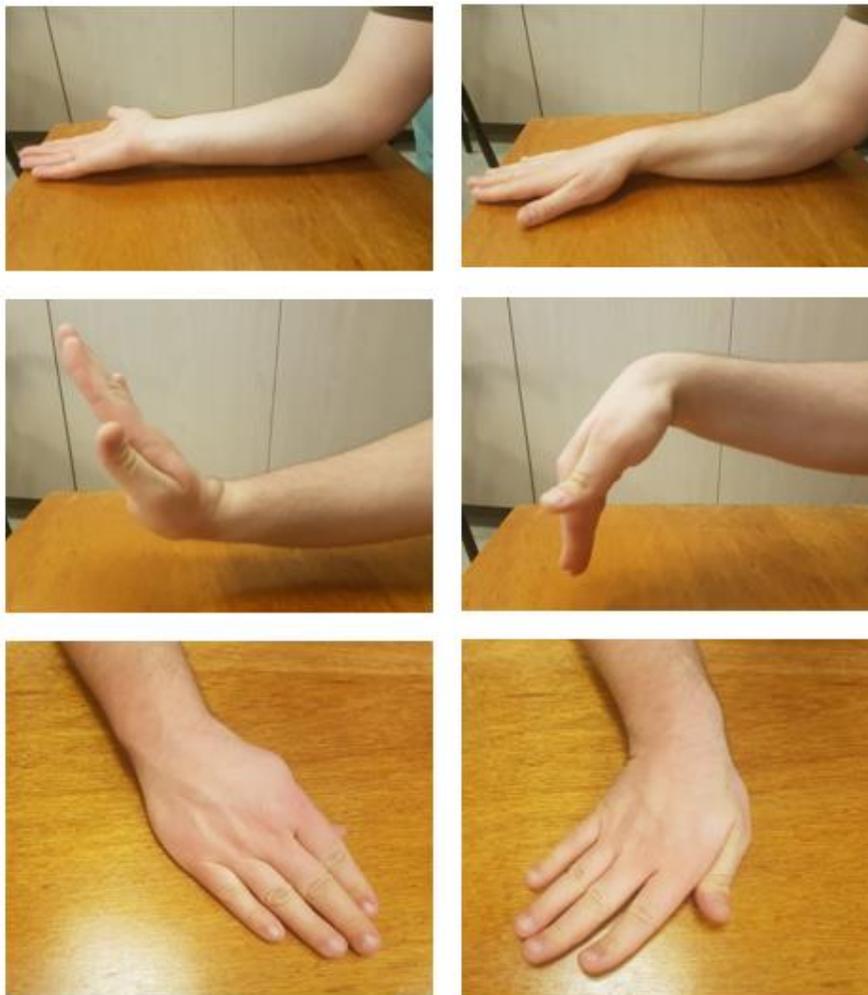


Figure 53. Photographies d'amplitudes articulaires normales (de gauche à droite et de bas en haut) : supination, pronation, extension, flexion, inclinaison radiale, inclinaison ulnaire. Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

L'instabilité radio-ulnaire distale a également été évaluée avant et après l'intervention et se définissait par la présence d'un tiroir antéro-postérieur (test de ballotement) (Fig.55) effectué en pronation maximale et en supination maximale, ou d'une touche de piano à la pression de la tête ulnaire, plus ou moins douloureuse [52,53] (Fig. 55 et 56).



Figure 54. Photographies d'instabilité radio-ulnaire distale préopératoire avec subluxation dorsale de la tête ulnaire en supination. Images fournies par le Pr Fitoussi, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

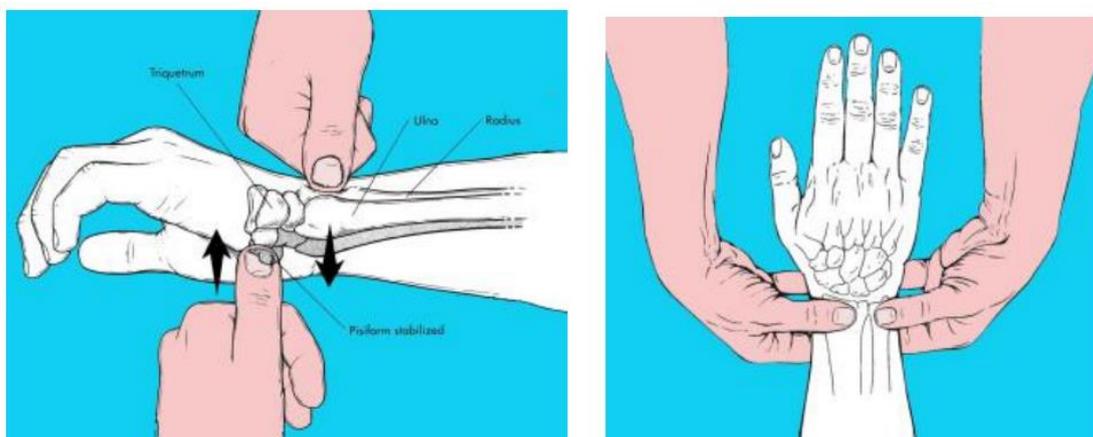


Figure 55. Tests de la touche de piano et ballotement radio-ulnaire distal. Traumatisme du poignet, Hôpitaux Universitaires de Genève.
https://www.urgences-ge.ch/sites/rug/files/protocoles/Protocoles/traumatologie/Poignet/trauma_poignet.pdf



Figure 56. Saillie réductible de la touche de piano de la tête ulnaire. *Traumatisme du poignet, Hôpitaux Universitaires de Genève.*
https://www.urgences-ge.ch/sites/rug/files/protocoles/Protocoles/traumatologie/Poignet/trauma_poignet.pdf

Après l'intervention, tous les patients ont rempli des questionnaires pré et postopératoires pour calculer et comparer les scores PRWE (Patient Rated Wrist Evaluation). Ce score, évalué sur 150, est composé de 15 items qui permettent aux patients d'évaluer subjectivement leurs niveaux de douleur au poignet et de handicap fonctionnel de 0 à 10. Il se compose de deux sous-parties : la douleur (notée sur 50) et la fonction (notée sur 100). L'évaluation de la fonction comporte une partie concernant les activités spécifiques (notée sur 60) et une partie correspondant aux activités habituelles (notée sur 40). Le total varie de 0 à 150, un score de 0/150 correspondant à un poignet normal [18,54]. À la fin du suivi, chaque patient a rempli un questionnaire en ligne issu du score PRWE, puis les scores préopératoire et postopératoire ont été calculés à partir de celui-ci. Ce questionnaire a été spécialement adapté aux enfants (Score PRWE en annexes) et rendu aussi attrayant et ludique que possible (Fig.57). Le lien du questionnaire en ligne était envoyé par mail à l'adresse des parents (<https://www.surveio.com/survey/d/N9V3Q1C1O8D7B3S7C>). Les patients ont pu le remplir avec ou sans l'aide des parents selon leur âge au moment de l'évaluation. Ensuite, les différences entre les scores totaux préopératoires et postopératoires ont été comparées entre les deux groupes.

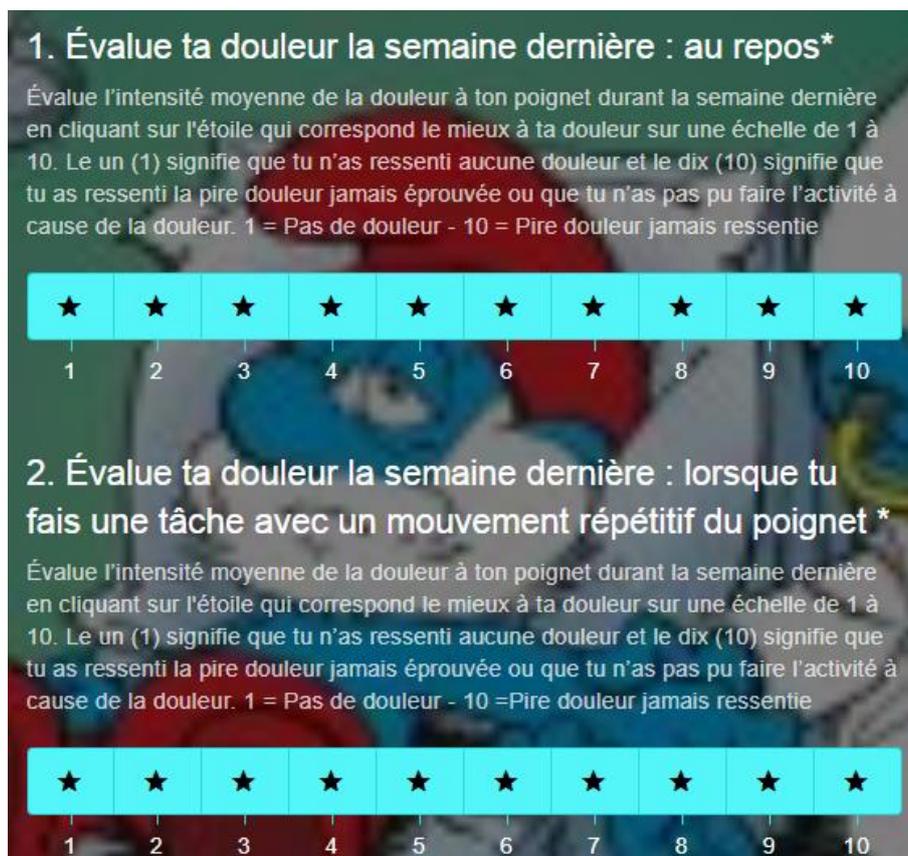
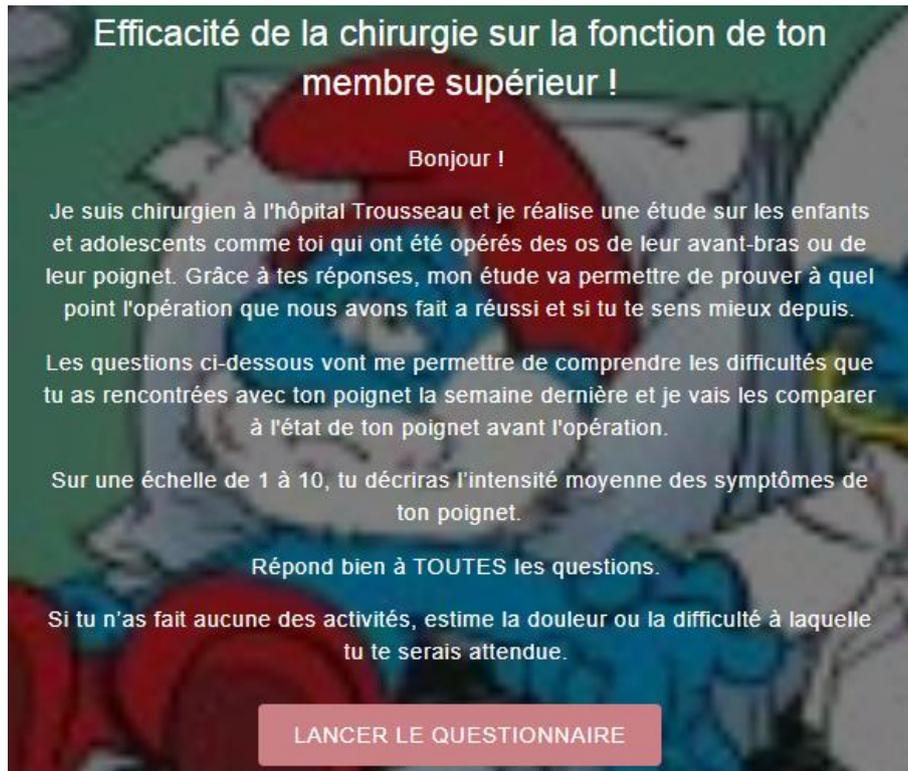


Figure 57. Exemple d'images du questionnaire PRWE en ligne que les enfants de la cohorte ont rempli seuls ou avec leurs parents. <https://www.surveymonkey.com/survey/d/N9V3Q1C1O8D7B3S7C>

CHAPITRE 4 : Analyse statistique

Les données quantitatives ont été analysées et comparées par le t-test de Student, le test de Mann-Whitney et le test de Wilcoxon selon leurs conditions respectives (par exemple : données suivant une distribution normale ou non avec le test de Shapiro-Wilk, données appariées ou non appariées). Une différence statistiquement significative a été établie pour une valeur de $p < 0,05$. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel R (INSERM UMR S1136, Sorbonne University). Les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm écarts types, sauf spécification contraire.

PARTIE 3 : RÉSULTATS

CHAPITRE I : Caractéristiques de la cohorte

Vingt-quatre enfants ont été inclus, ce qui correspondait à un total de 50 ostéotomies d'avant-bras. Vingt d'entre elles, sur 9 patients (1 cas opéré des deux côtés), ont été exécutées à l'aide de guides de coupe sur mesure (groupe G+) tandis que les 30 autres ostéotomies, sur 15 patients, ont été exécutées sans guide (groupe G-). Les données démographiques de la cohorte sont détaillées dans le tableau 2.

CHAPITRE II : Objectif principal : Analyse radiographique de la précision des ostéotomies dans le groupe G+

Deux ostéotomies de raccourcissement de l'ulna ont été exclues de cette analyse, ainsi 18 ostéotomies ont été incluses dans l'analyse radiographique de précision. L'erreur moyenne totale de correction entre les modèles planifiés et les ostéotomies effectivement réalisées étaient de $4,7^\circ \pm 4,1$ (de $0,2^\circ$ à $13,5^\circ$) dans les deux plans. Les erreurs moyennes de correction étaient respectivement de $5,3^\circ \pm 4,1$ ($0,2^\circ$ - $13,3^\circ$) et de $4,2^\circ \pm 4,1$ ($0,2^\circ$ - $13,5^\circ$) dans les plans frontal et sagittal ($p = 0,6$). Dans les maladies de Madelung, l'erreur moyenne totale de correction était de $5,3^\circ \pm 4,1$ ($0,5^\circ$ - $13,3^\circ$) contre $4,5^\circ \pm 4,1$ ($0,2^\circ$ - $13,5^\circ$) pour les cals vicieux post traumatiques dans les deux plans ($p=0,5$). Le détail des résultats est décrit dans le tableau 4.

Tableau 4 : Objectif principal : analyse radiographique de la précision des ostéotomies dans le groupe G+ = “erreur de correction”

Niveau de l'ostéotomie	Diagnostic	Face	Profil
		Pente radiale (°)	Version de la glène radiale (°)
Radius distal (n=7)	Maladie de Madelung (n=4)	13.3	3.1
		9.5	0.5
		4.3	5.3
		6.3	1.9
	Erreur moyenne	8.4 ± 3.9	2.7 ± 2.0
	Cal vicieux du radius distal (n=3)	4.7	4.8
		6.4	11.5
		1.5	0.2
Erreur moyenne	4.2 ± 2.5	5.5 ± 5.7	
Erreur moyenne totale	5.2 ± 4.0		
		Inclinaison ulnaire coronale (°)	Inclinaison ulnaire sagittale (°)
Ulna distal (n=5)	Maladie de Madelung (n=2)	0.7	1.6
		9.7	7.2
	Erreur moyenne	5.2 ± 6.4	4.4 ± 4.0
	Cal vicieux de l'ulna distal (n=3)	0.2	0.7
		9.7	1.1
	0.2	0.8	
Erreur moyenne	3.4 ± 4.6	0.9 ± 1.8	
Erreur moyenne totale	3.2 ± 4.0		
		Angle diaphysaire coronal (°)	Angle diaphysaire sagittal (°)
Diaphyse (n=6)	Cal vicieux de la diaphyse radiale (n=3)	10.8	8
		1.9	2.4
		7.7	13.5
	Erreur moyenne	6.8 ± 4.5	7.97 ± 5.6
	Cal vicieux de la diaphyse ulnaire (n=3)	2.6	9
		4.8	0.3
		1.3	3.1
	Erreur moyenne	2.9 ± 2.4	4.1 ± 4.1
Erreur moyenne totale	5.5 ± 4.2		
Erreur moyenne totale de correction pour les 18 ostéotomies (°)		5.3 ± 4.1	4.2 ± 4.1
		4.7 ± 4.1	

CHAPITRE III : Critères de jugement secondaires

3.1 Durée interventionnelle

La moyenne des durées opératoires dans le groupe G+ était de $129 \pm 35,6$ minutes et de $171 \pm 48,6$ minutes dans le groupe G-, avec une différence significative de 42 minutes ($p=0,02$) entre les deux groupes.

3.2 Taux d'irradiation et durée fluoroscopique per opératoire

La dose totale moyenne de rayonnement reçu était significativement plus élevée dans le groupe G+ ($7663 \pm 3638 \mu\text{Gy}$) que dans le groupe G- ($126 \pm 107 \mu\text{Gy}$), avec une valeur $p < 0,0001$, du fait des scanners 3D réalisés en prévision de la planification préopératoire chez les enfants du groupe G+. Cependant, l'exposition moyenne au rayonnement peropératoire était plus élevée dans le groupe G- ($126 \pm 107 \mu\text{Gy}$) que dans le groupe G+ ($38 \pm 27 \mu\text{Gy}$) ($p = 0,08$). De même, pour les durées de rayonnement fluoroscopique peropératoire, une différence moyenne de 10,9 secondes a été observée entre les deux groupes ($2,4 \pm 3,1$ secondes dans le groupe G+, $13,3 \pm 12,9$ secondes dans le groupe G-); toutefois, cette différence n'était pas significative ($p = 0,05$).

3.3. Complications

Quatre patients opérés suite à un cal vicieux distal post-traumatique de l'avant-bras ont présenté des complications (2 dans chaque groupe). Pour chacun, une fracture itérative post-traumatique non déplacée a été observée au niveau du site d'ostéotomie de l'ulna 2 semaines après ablation de la plaque (c'est à dire 1 an après la première ostéotomie de correction) malgré la confirmation de la bonne consolidation de l'ulna au cours du suivi (Fig. 58). La prise

en charge qui s'en est suivie consistait en un traitement orthopédique avec une immobilisation par plâtre circulaire brachio-antébrachio-palmaire pour une durée de 6 semaines. La consolidation osseuse a été observée à la fin de l'immobilisation dans chaque cas (Fig. 59).

Dans le groupe G+, un patient a présenté une paralysie motrice du nerf radial en post-opératoire immédiat. Un traitement conservateur a été entrepris (attelles antérieures nocturnes et rééducation intensive) jusqu'à la récupération complète qui a eu lieu un an après l'intervention.

Huit mois après l'ostéotomie initiale et malgré l'accourcissement ulnaire déjà réalisé lors de la première intervention, un patient du groupe G- a présenté une croissance persistante de l'ulna, et par conséquent un conflit ulno-carpien qui est devenu douloureux et gênant. L'ulna a donc été raccourci à nouveau par une seconde ostéotomie, associée cette fois-ci à une épiphysiodèse du cartilage de croissance distal. Deux ans après cette première complication, l'ulna long et le conflit ulno-carpien ont récidivé une seconde fois. Un allongement progressif du radius a été effectué par une ostéotomie radiale et à l'aide d'un fixateur externe radio-métacarpien. Douze semaines plus tard, la correction complète et définitive du conflit ulno-carpien ainsi que la restauration de l'index radio-ulnaire distal ont pu être observées. À la fin du traitement, le fixateur a été retiré et il a été constaté une consolidation satisfaisante du site d'ostéotomie.

Aucune pseudarthrose n'a été constatée. La consolidation osseuse a été obtenue pour chaque patient, dans un délai moyen de 4,5 mois (8-3 mois) sans différence significative entre les deux groupes.



Figure 58. À gauche : radiographies post opératoires de face et de profil d'une ostéotomie de cal vicieux distal des deux os de l'avant-bras montrant une consolidation atteinte avant ablation de matériel d'ostéosynthèse. À droite : radiographies de face et de profil chez le même patient montrant une fracture itérative post-traumatique non déplacée au niveau du site d'ostéotomie ulnaire 2 semaines après ablation du matériel d'ostéosynthèse. PACS, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.



Figure 59. Radiographies de face et de profil chez le même patient 6 semaines après immobilisation par plâtre BABP : consolidation atteinte. PACS, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

3.4 Évaluation clinique et critères subjectifs (Tableau 5)

L'analyse préopératoire des amplitudes articulaires montrait un défaut de pronation plus important dans le groupe G+ (la moyenne était 39,5° pour G+ contre 77° pour G-; $p=0,001$) ainsi qu'un défaut de supination également plus grand (la moyenne était 50° pour G+ contre 79,3° pour G-; $p=0,005$). L'inclinaison radiale post opératoire était significativement augmentée dans le groupe G- avec une amplitude de 26,7° contre 20° pour le groupe G+ ($p=0,03$).

Concernant le score PWRE, l'amélioration de la qualité de vie était significativement plus importante dans le groupe G+, avec un gain de 27,5 points ($p=0,004$) alors qu'il était de 14,4 points ($p=0,06$) dans le groupe G-.

Tableau 5 : Moyennes des différences des objectifs fonctionnels secondaires avant et après intervention

p value * ↔ test comparant le groupe G+ et le groupe G –

p value ** ↔ test comparant les données pré opératoires et post opératoires pour chaque groupe
/ = non pertinent

	Tous (N=24)	Groupe G+ (N=9)	Groupe G- (N=15)	p value *
Amplitudes articulaires et critères fonctionnels				
Flexion (°)				
- pré opératoire	79.2	78	80	<i>0.8</i>
- post opératoire	75.6	73.5	77	<i>0.7</i>
- p-value **	<i>0.04</i>	<i>0.4</i>	<i>0.5</i>	
Extension (°)				
- pré opératoire	64.8	60	68	<i>0.4</i>
- post opératoire	64	63.5	64.3	<i>0.9</i>
- p-value **	<i>0.6</i>	<i>0.6</i>	<i>0.2</i>	
Pronation (°)				
- pré opératoire	62	39.5	77	<i>0.001</i>
- post opératoire	67	59	72.3	<i>0.2</i>
- p-value **	<i>0.2</i>	<i>0.08</i>	<i>0.9</i>	
Supination (°)				
- pré opératoire	67.6	50	79.3	<i>0.005</i>
- post opératoire	73.2	67.5	77	<i>0.1</i>
- p-value **	<i>0.5</i>	<i>0.2</i>	<i>0.6</i>	
Inclinaison radiale (°)				
- pré opératoire	20.4	20.9	20.1	<i>0.9</i>
- post opératoire	24	20	26.7	<i>0.03</i>
- p-value **	<i>0.1</i>	<i>0.6</i>	<i>0.08</i>	
Inclinaison ulnaire (°)				
- pré opératoire	32	35.5	29.7	<i>0.6</i>
- post opératoire	34.4	39.5	31	<i>0.2</i>
- p-value **	<i>0.2</i>	<i>0.1</i>	<i>0.4</i>	
Instabilité radio ulnaire distale (nombre)				
- pré opératoire	4/24	4/9	0/15	/
- post opératoire	0/24	0/9	0/15	/
Score PRWE				
Total/150				
- pré opératoire	61.6	64.9	59.3	<i>0.3</i>
- post opératoire	41.9	37.4	44.9	<i>0.7</i>
- p-value **	<i>0.006</i>	<i>0.004</i>	<i>0.06</i>	
Douleur / 50				
- pré opératoire	27	29.2	25.6	<i>0.4</i>
- post opératoire	17.9	17.4	18.2	<i>0.9</i>
- p-value **	<i>0.007</i>	<i>0.005</i>	<i>0.04</i>	
Fonction / 100				
- pré opératoire	34.5	35.7	33.7	<i>0.5</i>
- post opératoire	23.7	19.8	26.3	<i>0.4</i>
- p-value **	<i>0.01</i>	<i>0.02</i>	<i>0.07</i>	

PARTIE 4 : DISCUSSION

1. Introduction et rappels

Les ostéotomies multidirectionnelles sont de plus en plus fréquentes et indiquées, or la planification préopératoire et la gestion chirurgicale des déformations complexes de l'avant-bras sont souvent difficiles car exigeantes [10,13,17,21,22,23,25,27,28,29,38,39,46]. La planification conventionnelle sur des radiographies en 2 dimensions n'est pas aussi fiable que la planification 3D, en particulier pour les corrections axiales de rotation [16]. En effet, une planification ne prenant en compte que les 2 dimensions coronale et sagittale peut mener à des résultats cliniques insatisfaisants du fait d'une correction incomplète.

2. Avantages des guides

2.1 Précision

Des études antérieures ont évalué et encouragé le développement de guides de coupe spécifiques aux patients, développés à partir de systèmes de simulation 3D assistée par ordinateur [13,15,16,17,22,23,25,27,29]. Cette technologie permet de planifier des ostéotomies de correction fiables et également de simplifier la chirurgie [29]. De plus, des modèles de polyamide représentant l'os pathologique sont aussi synthétisés en 3D et sont des outils supplémentaires au cours de l'intervention pour aider au positionnement optimal des guides à l'emplacement exact de la déformation osseuse maximale [22,23,28,29].

Dans une population de 16 adultes, Oka et al. [29] ont conclu à une amélioration de la précision des ostéotomies réalisées avec des guides de coupe sur mesure, avec une erreur de correction de moins de 1°. Bauer et al. [24] ont étudié une population pédiatrique de 19 enfants, mais n'ont tiré aucune conclusion concernant la précision des ostéotomies planifiées

en 3D. Byrne et al. [25] ont analysé 5 enfants et ont retrouvé une erreur moyenne de correction de 1,63°. Notre erreur de correction globale dans les plans sagittal et coronal était de $4,7^{\circ} \pm 4,1^{\circ}$. Un tel résultat est comparable aux conclusions d'autres études [24,25,29,30] et suggère que la planification 3D réalisée sur un scanner préopératoire et les guides de coupe sur mesure permettent une correction très précise chez les enfants.

Tableau 6. Études similaires, différences notables en comparaison avec notre étude et résultats (population, échantillon, précision, groupe témoin, objectifs secondaires).

Études	N	Population	Précision ostéotomie réelle vs planification 3D	Comparaison avec ostéotomie classique	Amélioration durée intervention / irradiation / clinique
Bauer2015	19	Enfants	Non étudiée	Non	Non étudiée
Vlachopoulos2015	14	Adultes	Ouverture → $8.30^{\circ} \pm 5.35^{\circ}$	Non	Non étudiée
			Fermeture → $3.47^{\circ} \pm 1.09^{\circ}$		
Roner2017	10	Adultes	$5,8^{\circ} \pm 3,6^{\circ}$	Non	Non étudiée
Byrne2017	5	Enfants	1.63°	Non	Non étudiée
Oka2019	16	Adultes	$< 1^{\circ}$	Non	Non étudiée
Trousseau2020	9	Enfants	$4.7^{\circ} \pm 4.1^{\circ}$ (pour 18 ostéotomies)	OUI → 15 témoins	OUI

2.2 Durées opératoires

À propos des ostéotomies de correction de cubitus varus chez l'adolescent, Zhang et al. [30] ont prouvé une diminution significative des durées opératoires dans le groupe opéré à l'aide de la planification 3D (Fig. 60). Dans notre étude, les résultats de cette analyse montrent une différence significative de 42 minutes ($p=0,02$) entre les deux groupes d'enfants. Ainsi, les risques d'infection, la durée d'anesthésie et les complications de

décubitus – comme l’hypothermie ou les risque de compression sur les appuis de la table opératoire - sont réduits [55].

Table 2 Comparison of clinical data between two groups of adolescents

Clinical data	Conventional group (n = 11)	3D printing group (n = 14)	P value
Operation time, min	73.5 ± 10.3	48.3 ± 8.9	< 0.001
Intraoperative blood loss, ml	52.1 ± 11.5	35.6 ± 9.7	< 0.001
Osteotomy degrees, °	24.9 ± 6.6	25.7 ± 7.1	0.183
Osteotomy ends union time, week	9.8 ± 2.7	9.3 ± 2.1	0.417
Deformity correction, n (%)			
Excellent	8 (72.7)	12 (85.8)	0.019
Good	2 (18.2)	1 (7.1)	0.193 ^a
Fair	1 (9.1)	1 (7.1)	0.231 ^a
Poor	0	0	–
Rate of excellent deformity correction, %	72.7	85.8	0.019

^aP value for continuity-corrected chi-squared test

Figure 60. Tableau comparatif des données cliniques entre 2 groupes d’adolescents atteints de cubitus varus et opérés par technique d’ostéotomie. Comparaison des durées opératoires avec guide de coupe 3D sur mesure et sans guide de coupe. Zhang YW, Xiao X, Gao WC, Xiao Y, Zhang SL, Ni WY, Deng L. Efficacy evaluation of three-dimensional printing assisted osteotomy guide plate in accurate osteotomy of adolescent cubitus varus deformity. *J Orthop Surg Res.* 2019 Nov 9;14(1):353.

2.3 Complications

Le nombre et le type de complications étaient semblables dans les deux groupes, ce qui n’était pas surprenant par rapport à d’autres études [15]. Par conséquent, ces complications ne sont pas nécessairement liées à la technique chirurgicale. Quatre patients ont subi des effets indésirables majeurs, 2 patients dans chaque groupe. Ces patients présentaient tous initialement un cal vicieux distal de l’avant-bras. La prise en charge

thérapeutique de ces complications a été efficace pour chacun de ces enfants. Toute la cohorte a présenté à terme une consolidation osseuse satisfaisante.

2.4 Amélioration clinique

À propos des objectifs cliniques secondaires, l'amélioration des amplitudes articulaires est confirmée dans les deux groupes, hormis la flexion et l'extension de poignet qui sont moins importantes en postopératoire probablement du fait de la chirurgie connue pour être intrinsèquement enraidissante. L'instabilité radio-ulnaire distale s'est résolue après l'intervention dans les deux groupes. Le score PRWE postopératoire était meilleur dans les deux groupes, avec une différence significative entre le statut préopératoire et postopératoire dans le groupe G+ pour la douleur et la fonction. Ces différences renforcent la théorie selon laquelle la planification 3D préopératoire et les guides sur mesure permettent une meilleure précision des ostéotomies correctives [10,13,16,17,21,22,23,27,30] que la planification 2D et donc au final un meilleur résultat clinique (Fig. 61 et 62).



Figure 61. Photographies post opératoires, à distance de l'intervention, de récupération fonctionnelle complète de la prono-supination chez un adolescent atteint initialement de cal vicieux distal de l'avant-bras gauche. Images fournies par le Pr Fitoussi, Hôpital Armand-Trousseau, APHP.

Table 3 Comparison of postoperative functional outcomes between two groups of adolescents

Outcomes	Conventional group (n = 11)	3D printing group (n = 14)	P value
Follow-up time, month	17.8 ± 3.1	18.3 ± 2.9	0.317
Postoperative carrying angle of deformed side, °	8.3 ± 2.6	8.7 ± 2.4	0.626
Range of elbow joint motion at last follow-up, °			
Flexion	128.7 ± 4.9	131.6 ± 5.8	0.451
Rotation	143.5 ± 7.7	146.2 ± 8.1	0.192
Extension	2.4 ± 1.1	2.6 ± 0.9	0.523
Parents' satisfaction with appearance after deformity correction, n (%)			
Excellent	9 (81.8)	13 (92.9)	0.022
Good	2 (18.2)	1 (7.1)	0.625 ^a
Fair	0	0	–
Poor	0	0	–
Rate of excellent satisfaction, %	81.8	92.9	0.023

^aP value for continuity-corrected chi-squared test

Figure 62. Tableau comparatif des données cliniques entre 2 groupes d'adolescents atteints de cubitus varus et opérés par technique d'ostéotomie. Amélioration globale des amplitudes articulaires et de la satisfaction des patients avec la technique d'ostéotomie par guide de coupe. Zhang YW, Xiao X, Gao WC, Xiao Y, Zhang SL, Ni WY, Deng L. Efficacy evaluation of three-dimensional printing assisted osteotomy guide plate in accurate osteotomy of adolescent cubitus varus deformity. J Orthop Surg Res. 2019 Nov 9;14(1):353.

3. Possibilités d'améliorations futures de l'étude

3.1 Radioprotection

Concernant la fluoroscopie peropératoire, une différence importante de durée d'irradiation de 10,9 secondes ($p=0,05$) et une différence de taux de dose de rayons X reçus de 87,6 μGy ($p=0,08$) ont été trouvées entre les deux groupes. Ces résultats concluent à une meilleure radioprotection des patients grâce aux guides de coupe sur mesure, donc à une diminution des risques de retard de cicatrisation cutanée, ou même de cancer radio-induit. En effet, deux études menées sur des enfants exposés à des rayons X dans le cadre de radiographies diagnostiques [56,57] suggèrent fortement que le taux de dose reçue de rayons X peut être un facteur potentiel de développement de cancers (leucémie, lymphome, etc.).

Croitoru et al. [12] et Kunz et al. [17] ont démontré une diminution des taux de dose de rayons X reçus lorsqu'ils utilisaient des guides chirurgicaux sur mesure. En prenant en compte la dose d'irradiation supplémentaire du scanner effectué pour réaliser la planification tridimensionnelle dans le groupe G+, les résultats ont été carrément inversés, et la radioprotection a finalement été bien pire que dans le groupe G-. C'est la raison pour laquelle aucun scanner postopératoire n'a été exécuté pour évaluer la précision des ostéotomies. Il s'agit d'un défaut de cette étude, mais il conduit à considérer le double avantage de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) dans la planification préopératoire 3D au lieu du scanner avec la même précision et surtout sans irradiation supplémentaire [58,59] (Fig. 63 et 64).

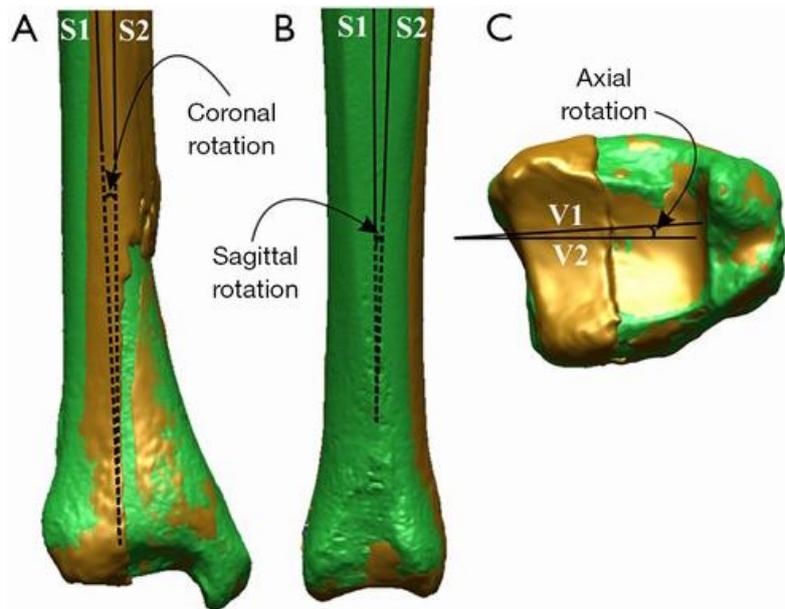


Figure 63. Mesure d'erreurs de correction d'ostéotomie de tibia distal par IRM vs. TDM (modèle planifié en vert, modèle réel post ostéotomie en beige). Radzi S, Dlaska CE, Cowin G, Robinson M, Pratap J, Schuetz MA, Mishra S, Schmutz B. *Can MRI accurately detect pilon articular malreduction? A quantitative comparison between CT and 3T MRI bone models.* *Quant Imaging Med Surg.* 2016 Dec;6(6):634-647.

Table 7 Repeatability test for the respective measurements

Type of measurement	Range of SD	
	CT	MRI
Intra-articular step size	0–0.19	0.05–0.49
Intra-articular gap size	0.04–0.39	NA
Intra-articular surface deviation	0.02–0.08	0.02–0.15
Rotational malalignments	0.02–0.11	0.04–0.18
Translational malalignments	0.04–0.08	0.01–0.09

CT, computed tomography; MRI, magnetic resonance imaging; SD, standard deviation; NA, not applicable.

Figure 64. Test de reproductibilité des mesures d'erreurs de correction entre IRM et TDM : peu de différences de mesure de précision entre les deux techniques d'imagerie. Radzi S, Dlaska CE, Cowin G, Robinson M, Pratap J, Schuetz MA, Mishra S, Schmutz B. *Can MRI accurately detect pilon articular malreduction? A quantitative comparison between CT and 3T MRI bone models.* *Quant Imaging Med Surg.* 2016 Dec;6(6):634-647.

3.2 Maladie de Madelung vs. cal vicieux

Les valeurs moyennes d'erreur de correction dans les maladies de Madelung étaient de $5,3^{\circ} \pm 4,1$ ($0,5^{\circ}$ - $13,3^{\circ}$). Cela peut s'expliquer par le fait que la tension des tissus mous et les contraintes mécaniques ne sont pas équivalentes dans la maladie de Madelung et dans les cals vicieux post traumatiques [43,44,45,60,61] (Fig. 65 et 66). De plus, un avant-bras controlatéral sain n'existe pas chez ces patients (la maladie de Madelung est le plus souvent bilatérale) et la simulation d'un avant-bras virtuel normal ajoute de l'incertitude à la planification (Fig. 67).



Figure 65. Ligament radio-lunaire de Vickers hypertrophique et ligament radio-triquétral (plus rare) qui créent une contrainte en traction par attachement de la 1^{ère} rangée du carpe au radius. Ali S, Kaplan S, Kaufman T, Fenerty S, Kozin S, Zlotolow DA. Madelung deformity and Madelung-type deformities: a review of the clinical and radiological characteristics. *Pediatr Radiol.* 2015 Nov;45(12):1856-63. Epub 2015 Jul 2.

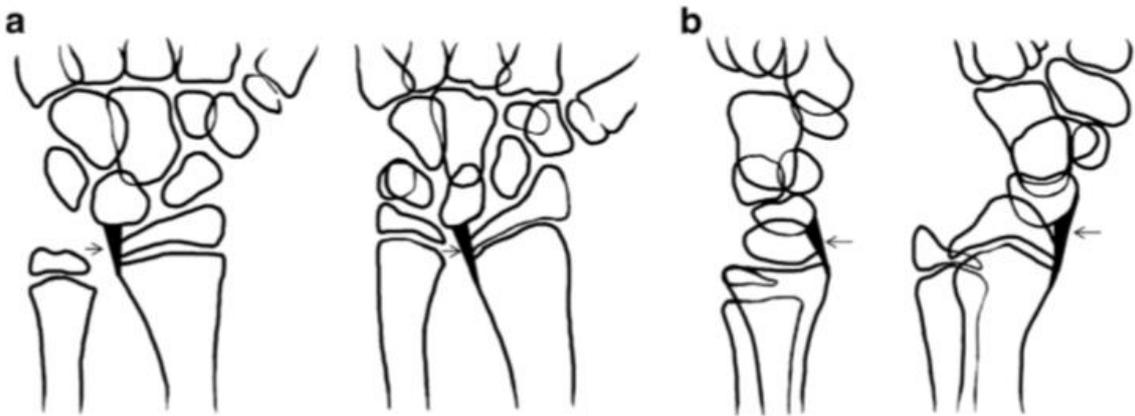


Figure 66.

a : de face, attache du radius au lunatum par le ligament de Vickers, d'où une diminution de la croissance médiale du radius et une augmentation de la pente radiale avec une « pyramidalisation » du carpe.

b : de profil, même description ainsi qu'augmentation de l'inclinaison radiale palmaire (version palmaire de la glène) et subluxation palmaire du carpe.

Ali S, Kaplan S, Kaufman T, Fenerty S, Kozin S, Zlotolow DA. Madelung deformity and Madelung-type deformities: a review of the clinical and radiological characteristics. Pediatr Radiol. 2015 Nov;45(12):1856-63. Epub 2015 Jul 2.



Figure 67. À gauche : radiographies de face de maladie de Madelung avant opération. À droite : radiographies de face et de profil chez le même enfant après opération. PACS, Hôpital Armand Trousseau, APHP.

3.3 Matériel et précision

Aucune plaque d'ostéosynthèse sur mesure n'a été utilisée dans cette étude, contrairement aux études similaires précédentes [25,29] (Fig. 68 et 69) en raison du coût supplémentaire de fabrication de telles plaques. Ce type de matériel aurait pu augmenter la précision des ostéotomies, mais les contraintes financières nous semblaient plus importantes pour pouvoir généraliser cette technique à l'hôpital public.

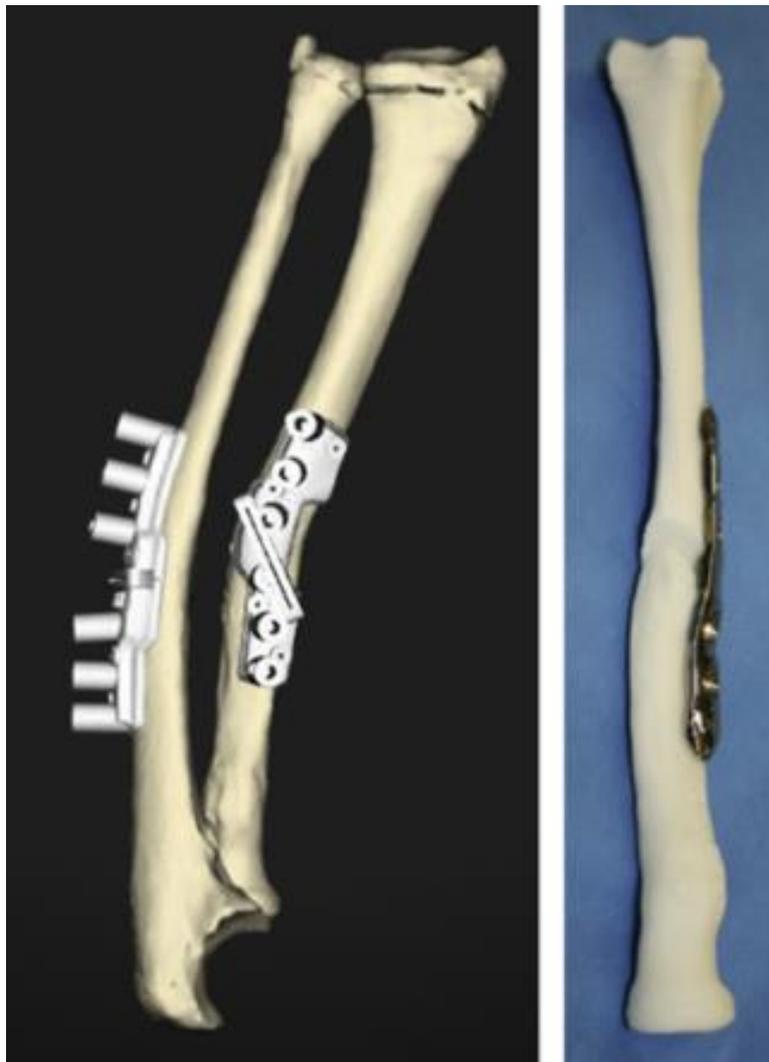


Figure 68. Images de planification 3D et guides de coupe sur mesure à gauche, ainsi que plaque d'ostéosynthèse sur mesure en titane à droite. *Byrne AM, Impelmans B, Bertrand V, Van Haver A, Verstreken F. Corrective Osteotomy for Malunited Diaphyseal Forearm Fractures Using Preoperative 3-Dimensional Planning and Patient-Specific Surgical Guides and Implants. J Hand Surg Am. 2017 Oct;42(10):836.e1-836.e12. Epub 2017 Jul 12.*



Figure 69. Radiographies pré opératoires (A) de face et de profil de cubitus varus, et radiographies postopératoires (B) de face et de profil avec plaques d'ostéosynthèse sur mesure en titane. Oka K, Tanaka H, Okada K, Sahara W, Myoui A, Yamada T, Yamamoto M, Kurimoto S, Hirata H, Murase T. *Three-Dimensional Corrective Osteotomy for Malunited Fractures of the Upper Extremity Using Patient-Matched Instruments: A Prospective, Multicenter, Open-Label, Single-Arm Trial.* *J Bone Joint Surg Am.* 2019 Apr 17;101(8):710-721.

3.4 Prise en compte des parties molles

La libération chirurgicale des parties molles a été nécessaire uniquement dans le cas du syndrome de Volkmann dans le groupe G- pour compléter la correction de la déformation osseuse. Chez ce patient, la réduction optimale des extrémités osseuses après ostéotomie était entravée par la rétraction des tissus mous, qui est une complication classique attendue dans cette pathologie [62], c'est pour cela qu'un allongement du fléchisseur radial du carpe et du long palmaire a été réalisé dans le but de faciliter la réduction.

Aucun patient du groupe G+ et aucune maladie de Madelung dans les deux groupes n'a nécessité une libération des parties molles pendant la chirurgie. Néanmoins, le TFCC a dû être réparé chez trois patients présentant un cal vicieux post traumatique d'avant-bras. Aucune limitation résiduelle d'amplitude articulaire n'a été attribuée à l'absence de libération de tissus mous [21].

À l'avenir, les contraintes induites par les tissus mous pourraient également être mieux analysées à l'aide d'une IRM (Fig. 70).

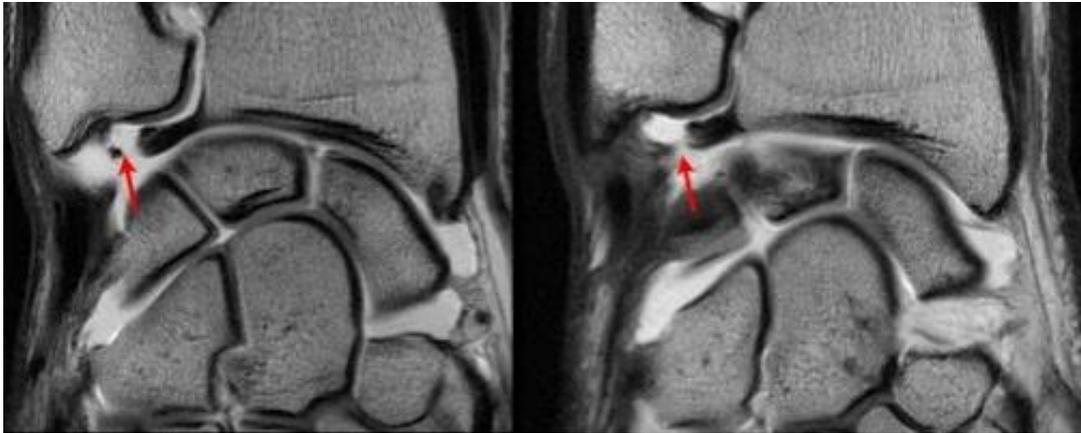


Figure 70. Lésion post traumatique du TFCC en arthro-IRM : coupes coronales en pondération T1.
Centre d'imagerie ostéo-articulaire, clinique du Sport, Bordeaux. <http://www.image-echographie.net/?r=10&ssr=83>

4. Limites de l'étude

4.1 Étude rétrospective

La nature rétrospective de cette étude peut également être critiquée et une future analyse similaire prospective avec un échantillon plus grand serait très appréciable. Les questionnaires PRWE ont été envoyés rétrospectivement en post-opératoire, ce qui rend la fiabilité des résultats plus ou moins critiquable.

4.2 Recul

Le recul limité était sans aucun doute également critiquable et une étude avec un suivi plus long pourrait être recommandée.

4.3 Mesure de la précision : scanner 3D ou radiographies 2D ?

Comme expliqué plus haut, le choix d'analyser les résultats en comparant un scanner préopératoire à des radiographies postopératoires conduit à un manque de précision dans les

mesures. L'objectif principal n'a pas pu être évalué dans le groupe G- car les radiographies de face et de profil n'étaient pas toutes réalisées de manière optimale pour une éventuelle analyse comparative fiable.

4.4 Délai de prise en charge chirurgicale après traumatisme

Dans le cas des patients souffrant de cals vicieux, l'accident menant à la fracture est survenu systématiquement après l'âge de 9 ans et le temps moyen de suivi avant intervention était de 2 ans dans les deux groupes. Ce délai a été plus long que ce que Byrne et al. [25] ont constaté (entre 7 et 16 mois) et cela a peut-être contribué à un meilleur résultat des ostéotomies dans leur étude. Il est fort possible qu'une prise en charge chirurgicale trop tardive ait pu conduire à une limitation d'amplitude articulaire pré-opératoire irréversible, et donc à de moins bons résultats cliniques [11,15].

5. Autres avantages de l'étude

5.1 Nombre de sujets étudiés

Cette étude compare deux groupes d'enfants opérés par technique d'ostéotomie conventionnelle ou à l'aide de guides sur mesure pour corriger une déformation de l'avant-bras. Un échantillon de 24 patients analysés est faible pour détecter des différences significatives entre les groupes, mais cette étude est la seule avec une population pédiatrique aussi grande.

5.2 Coûts et objectifs financiers

Le coût de la planification 3D et de la fabrication des guides était de 2200 € par patient avec le laboratoire Materialise, et de 250 € avec le laboratoire Newclip, ce qui est comparable à d'autres études utilisant la même technologie [25,26,29]. Bien que la différence de prix entre les deux laboratoires soit importante, nous considérons ces valeurs comme acceptables. Notre objectif financier était que le coût de la planification et de la fabrication des guides soit au moins inférieur à deux fois le prix des plaques d'ostéosynthèse. Le délai de réception des modèles 3D et des guides chirurgicaux était d'environ six semaines après commande et planification, ce qui correspondait approximativement à la même durée que dans d'autres études [26] et devait être pris en considération dans le processus de prise en charge.

CONCLUSION

Notre résultat principal démontre la fiabilité et la précision des ostéotomies de correction de l'avant-bras réalisées à l'aide de guides de coupe sur mesure chez les enfants.

Les conclusions des objectifs secondaires sont très prometteuses, notamment avec des résultats en faveur d'une réduction de la durée opératoire, d'une diminution peropératoire de l'exposition aux rayons X et d'une récupération fonctionnelle satisfaisante. Une étude de plus grand effectif permettra de confirmer ces résultats selon les différents types de déformations de l'avant-bras.

Cette étude met donc en avant l'utilisation des guides de coupe sur mesure, qui sont une aide technique à considérer dorénavant dans la prise en charge chirurgicale des déformations de l'avant-bras de l'enfant.

BIBLIOGRAPHIE

1. Sir William Jenner, Bart. Subcutaneous Osteotomy of the Femur. Clinical society of London. Report of societies in The British Medical Journal. May 20, 1876.
2. Bellanova L, Paul L, Docquier PL. Surgical guides (patient-specific instruments) for pediatric tibial bone sarcoma resection and allograft reconstruction. *Sarcoma*. 2013;2013:787653.
3. P. Hernigou. Technique de l'ostéotomie tibiale de valgisation par ouverture interne : Open wedge tibial osteotomy. Conférences d'enseignement 2009 (N°98).
4. C. Glorion. Réduction chirurgicale de hanche dans la luxation congénitale. Conférences d'enseignement 2017.
5. Zheng P, Yao Q, Xu P, Wang L. Application of computer-aided design and 3D-printed navigation template in Locking Compression Pediatric Hip Plate™ placement for pediatric hip disease. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2017 May;12(5):865-871.
6. G. Deffrennes. Ostéotomies maxillo-mandibulaires : techniques chirurgicales et indications. *Chirurgie orale et maxillo-faciale* [88903]. 2017.
7. Thomas, McMillan. Use of a Titanium Cutting Guide to Assist Raising the Composite Radial Forearm Free Flap. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2013 Nov;42(11):1414-7.
8. Poukens J, Haex J, Riediger D The use of rapid prototyping in the preoperative planning of distraction osteogenesis of the cranio-maxillofacial skeleton. *Comput Aided Surg*. 2003;8(3):146-54.
9. D'Aubigne RM. Plane oblique osteotomy in correction of deformities of the extremities. *Bull Mem Arch Chir*. 1952;78(8-9): 271e276.

10. Victor J, Premanathan A.
Virtual 3D planning and patient specific surgical guides for osteotomies around the knee: a feasibility and proof-of-concept study. *Bone Joint J.* 2013 Nov;95-B(11 Suppl A):153-8.
11. Trousdale R T, Linscheid R L, Operative Treatment of Malunited Fractures of the Forearm. *J Bone Joint Surg Am.* 1995 Jun;77(6):894-902.
12. Croitoru H, Ellis RE, Prihar R, Small CF, Pichora DR. Fixation-based surgery: a new technique for distal radius osteotomy. *Comput Aided Surg.* 2001;6(3):160-9.
13. Athwal GS, Ellis RE, Small CF, Pichora DR. Computer-assisted distal radius osteotomy. *J Hand Surg Am.* 2003 Nov;28(6):951-8.
14. Price CT, Knapp DR. Osteotomy for malunited forearm shaft fractures in children. *J Pediatr Orthop.* 2006 Mar-Apr;26(2):193-6.
15. Van Geenen RC, Besselaar PP. Outcome after corrective osteotomy for malunited fractures of the forearm sustained in childhood. *J Bone Joint Surg Br.* 2007 Feb;89(2):236-9.
16. Murase T, Oka K, Moritomo H, Goto A, Yoshikawa H, Sugamoto K. Three-dimensional corrective osteotomy of malunited fractures of the upper extremity with use of a computer simulation system. *J Bone Joint Surg Am.* 2008 Nov;90(11):2375-89.
17. Kunz M, Ma B, Rudan JF, Ellis RE, Pichora DR. Image-guided distal radius osteotomy using patient-specific instrument guides. *J Hand Surg Am.* 2013 Aug;38(8):1618-24.
18. Leong NL, Buijze GA, Fu EC, Stockmans F, Jupiter JB; Distal Radius Malunion (DiRaM) collaborative group. Computer-assisted versus non-computer assisted preoperative planning of corrective osteotomy for extra-articular distal radius malunions: a randomized controlled trial. *BMC Musculoskelet Disord.* 2010 Dec 14;11:282.

19. Oka K, Murase T, Moritomo H. Accuracy of corrective osteotomy using a custom-designed device based on a novel computer simulation system. *J Orthop Sci.* 2011 Jan;16(1):85-9.
20. Oka K, Murase T, Moritomo H, Yoshikawa H. Corrective osteotomy for malunited both bones fractures of the forearm with radial head dislocations using a custom-made surgical guide: two case reports. *J Shoulder Elbow Surg.* 2012 Oct;21(10):e1-8.
21. Miyake J, Murase T, Oka K, Moritomo H, Sugamoto K, Yoshikawa H. Three-Dimensional Corrective Osteotomy for Malunited Diaphyseal Forearm Fractures Using Custom-Made Surgical Guides Based on Computer Simulation. *JBJS Essent Surg Tech.* 2012 Dec 26;2(4):e24. eCollection 2012 Oct.
22. Kataoka T, Oka K, Miyake J, Omori S, Tanaka H, Murase T. 3-Dimensional prebent plate fixation in corrective osteotomy of malunited upper extremity fractures using a real-sized plastic bone model prepared by preoperative computer simulation. *J Hand Surg Am.* 2013 May;38(5):909-19. Epub 2013 Apr 6.
23. Vlachopoulos L, Schweizer A, Graf M, Nagy L, Fürnstahl P. Three dimensional postoperative accuracy of extra-articular forearm osteotomies using CT-scan based patient-specific surgical guides. *BMC Musculoskelet Disord.* 2015 Nov 4;16:336.
24. Bauer AS, Storelli DAR, Sibbel SE, McCarroll HR, Lattanza LL. Preoperative Computer Simulation and Patient-specific Guides are Safe and Effective to Correct Forearm Deformity in Children. *J Pediatr Orthop.* 2017 Oct/Nov;37(7):504-510.
25. Byrne AM, Impelmans B, Bertrand V, Van Haver A, Verstreken F. Corrective Osteotomy for Malunited Diaphyseal Forearm Fractures Using Preoperative 3-Dimensional Planning and Patient-Specific Surgical Guides and Implants. *J Hand Surg Am.* 2017 Oct;42(10):836.e1-836.e12. Epub 2017 Jul 12.

26. Jeuken RM, Hendrickx RPM, Schotanus MGM, Jansen EJ. Near-anatomical correction using a CT-guided technique of a forearm malunion in a 15-year-old girl: A case report including surgical technique. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2017 Sep;103(5):783-790. Epub 2017 Apr 17.
27. Roner S, Vlachopoulos L, Nagy L, Schweizer A, Fürnstahl P. Accuracy and Early Clinical Outcome of 3-Dimensional Planned and Guided Single-Cut Osteotomies of Malunited Forearm Bones. *J Hand Surg Am.* 2017 Dec;42(12):1031.e1-1031.e8. Epub 2017 Sep 6.
28. Rosseels W, Herteleer M, Sermon A, Nijs S, Hoekstra H. Corrective osteotomies using patient-specific 3D-printed guides: a critical appraisal. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2019 Apr;45(2):299-307. Epub 2018 Jan 12.
29. Oka K, Tanaka H, Okada K, Sahara W, Myoui A, Yamada T, Yamamoto M, Kurimoto S, Hirata H, Murase T. Three-Dimensional Corrective Osteotomy for Malunited Fractures of the Upper Extremity Using Patient-Matched Instruments: A Prospective, Multicenter, Open-Label, Single-Arm Trial. *J Bone Joint Surg Am.* 2019 Apr 17;101(8):710-721.
30. Zhang YW, Xiao X, Gao WC, Xiao Y, Zhang SL, Ni WY, Deng L. Efficacy evaluation of three-dimensional printing assisted osteotomy guide plate in accurate osteotomy of adolescent cubitus varus deformity. *J Orthop Surg Res.* 2019 Nov 9;14(1):353.
31. Fuller DJ, McCullough CJ. Malunited fractures of the forearm in children. *J Bone Joint Surg Br.* 1982;64(3):364-7.
32. Schmittenebecher PP. State-of-the-art treatment of forearm shaft fractures. *Injury.* 2005 Feb;36(Suppl 1):A25-34.
33. Hughston JC. Fracture of the forearm in children. *J Bone Joint Surg Am.* 1962;44(8):1678e1693.

34. Ladd AL, Huene DS. Reconstructive osteotomy for malunion of the distal radius. Clin Orthop Relat Res. 1996 Jun;327:158-71.
35. Fernandez DL. Correction of post-traumatic wrist deformity in adults by osteotomy, bone-grafting, and internal fixation. J Bone Joint Surg Am. 1982 Oct;64(8):1164-78.
36. Prommersberger KJ, Van Schoonhoven J, Lanz UB. Outcome after corrective osteotomy for malunited fractures of the distal end of the radius. J Hand Surg Br. 2002 Feb;27(1):55-60.
37. Shea K, Fernandez DL, Jupiter JB, Martin C Jr. Corrective osteotomy for malunited, volarly displaced fractures of the distal end of the radius. J Bone Joint Surg Am. 1997 Dec;79(12):1816-26.
38. Jupiter JB, Fernandez DL. Complications following distal radial fractures. Instr Course Lect. 2002;51:203-19.
39. Dumont CE, Thalmann R, Macy JC. The effect of rotational malunion of the radius and the ulna on supination and pronation. J Bone Joint Surg Br. 2002 Sep;84(7):1070-4.
40. Matthews LS, Kaufer H, Garver DF, Sonstegard DA. The effect on supination/pronation of angular malalignment of fractures of both bones of the forearm. J Bone Joint Surg Am. 1982 Jan;64(1):14-7.
41. Sarmiento A, Ebramzadeh E, Brys D, Tarr R. Angular deformities and forearm function. J Orthop Res. 1992 Jan;10(1):121-33.
42. Schemitsch EH, Richards RR. The effect of malunion on functional outcome after plate fixation of fractures of both bones of the forearm in adults. J Bone Joint Surg Am. 1992 Aug;74(7):1068-78.

43. Vickers D, Nielsen G. Madelung deformity: surgical prophylaxis (physiolysis) during the late growth period by resection of the dyschondrosteosis lesion. *J Hand Surg Br.* 1992 Aug;17(4):401-7.
44. Kozin SH, Zlotolow DA. Madelung Deformity. *J Hand Surg Am.* 2015 Oct;40(10):2090-8. Epub 2015 Sep 1. Review
45. Ali S, Kaplan S, Kaufman T, Fenerty S, Kozin S, Zlotolow DA. Madelung deformity and Madelung-type deformities: a review of the clinical and radiological characteristics. *Pediatr Radiol.* 2015 Nov;45(12):1856-63. Epub 2015 Jul 2.
46. Bilic' R, Zdravkovi'c V, Boljevic' Z. Osteotomy for deformity of the radius. Computer-assisted three-dimensional modelling. *J Bone Joint Surg Br.* 1994 Jan; 76(1):150-4.
47. Vroemen JC, Dobbe JG, Strackee SD, Streekstra GJ. Positioning evaluation of corrective osteotomy for the malunited radius: 3-D CT versus 2-D radiographs. *Orthopedics.* 2013 Feb;36(2):e193-9.
48. Tang JB, Giddins G. Why and how to report surgeons' levels of expertise. *J Hand Surg Eur.* 2016, 41: 365–6.
49. World Medical Association Declaration of Helsinki (1997) *JBJS* 79A:1089-98
50. Journal Officiel de la République Française n°0189 du 14 août 2016, texte n° 77. Délibération n° 2016-263 du 21 juillet 2016 portant homologation d'une méthodologie de référence relative aux traitements de données à caractère personnel mis en œuvre dans le cadre des recherches dans le domaine de la santé ne nécessitant pas le recueil du consentement exprès ou écrit de la personne concernée (MR-003).
51. Directive 93/42/CEE du conseil du 14 juin 1993 relative aux dispositifs médicaux (JO L 169 du 12.7.1993, p. 1).

52. J. R. Haugstvedt, M. F. Langer and R. A. Berger. Distal radioulnar joint: functional anatomy, including pathomechanics. *The Journal of Hand Surgery (European Volume)* XXE(X) 1 –8. 2017 January.
53. Sanjeev Kakar, Brian T Carlsen, Steven L Moran, Richard A Berger. The Management of Chronic Distal Radioulnar Instability. *Hand Clin.* 2010 Nov;26(4):517-28.
54. Pfanner S, Diaz L, Ghargozloo D, Denaro V, Ceruso M. TFCC Lesions in Children and Adolescents: Open Treatment. *J Hand Surg Asian Pac Vol.* 2018 Dec;23(4):506-514.
55. Scheider P, Ganger R, Farr S. Complications of hardware removal in pediatric upper limb surgery: A retrospective single-center study of 317 patients. *Medicine (Baltimore).* 2020 Jan;99(5):e19010.
56. Hammer GP, Seidenbusch MC, Schneider K, Regulla DF, Zeeb H, Spix C, Blettner M. A cohort study of childhood cancer incidence after postnatal diagnostic X-ray exposure. *Radiat Res.* 2009 Apr;171(4):504-12.
57. Harbron RW, Chapple CL, O'Sullivan JJ, Lee C, McHugh K, Higuera M, Pearce MS. Cancer incidence among children and young adults who have undergone x-ray guided cardiac catheterization procedures. *Eur J Epidemiol.* 2018 Apr;33(4):393-401. Epub 2018 Jan 18.
58. Mercado F, Mukaddam K, Filippi A, Bieri OP, Lambrecht TJ, Köhl S. Fully Digitally Guided Implant Surgery Based on Magnetic Resonance Imaging. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2019 Mar/Apr;34(2):529-534.
59. Radzi S, Dlaska CE, Cowin G, Robinson M, Pratap J, Schuetz MA, Mishra S, Schmutz B. Can MRI accurately detect pilon articular malreduction? A quantitative comparison between CT and 3T MRI bone models. *Quant Imaging Med Surg.* 2016 Dec;6(6):634-647.

60. Babu S, Turner J, Seewoonarain S, Chougule S. Madelung's Deformity of the Wrist-Current Concepts and Future Directions. *J Wrist Surg.* 2019 Jun;8(3):176-179. Epub 2019 Apr 22.
61. Peymani A, Johnson AR, Dowlatshahi AS, Dobbe JGG, Lin SJ, Upton J, Streekstra GJ, Strackee SD. Surgical Management of Madelung Deformity: A Systematic Review. *Hand (N Y).* 2019 Nov;14(6):725-734. Epub 2018 Aug 13.
62. Chevalley F, Livio JJ. Progressive correction of an ulnar deviation of the hand following defective healing of the 2 forearm bones and probable sequellae of a Volkmann contracture. *Acta Orthop Belg.* 1992;58(4):460-4.

ANNEXES

Score PRWE adapté aux enfants

PRWE : Evaluation du poignet par l'enfant

Nom:

Signature:

Date:

Les questions ci-dessous vont nous permettre de comprendre les difficultés que tu as rencontrées avec ton poignet la semaine dernière. Sur une échelle de 0 à 10, tu décriras l'intensité moyenne des symptômes de ton poignet durant la semaine dernière. Répond à TOUTES les questions. Si tu n'as fait aucune des activités, estime la douleur ou la difficulté à laquelle tu te serais attendue.

DOULEUR /50

Evalue l'intensité moyenne de la douleur à ton poignet durant la semaine dernière en entourant le chiffre qui correspond le mieux à ta douleur sur une échelle de 0 à 10. Le zéro (0) signifie que tu n'as ressenti aucune douleur et le dix (10) signifie que tu as ressenti la pire douleur jamais éprouvée ou que tu n'as pas pu faire l'activité à cause de la douleur.

Evalue ta douleur : 0 = Pas de douleur - 10 = Pire douleur jamais ressentie

Au repos	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Lorsque tu fais une tâche avec un mouvement répétitif du poignet	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Lorsque tu soulèves un objet lourd	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Lorsque la douleur est à son comble	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
As-tu souvent mal?	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
	0 Jamais 10 Toujours

FONCTION /100

A. ACTIVITÉS SPÉCIFIQUES /60

Evalue le niveau de difficulté que tu as éprouvé à accomplir avec ta main atteinte chacun des gestes listés ci-dessous, au cours de la semaine dernière, en entourant le chiffre qui correspond le mieux à la difficulté éprouvée sur une échelle de 0 à 10. Le zéro (0) signifie que tu n'as rencontré aucune difficulté et le dix (10) signifie que c'était tellement difficile que tu ne pouvais pas le faire du tout.

0 = Aucune difficulté – 10 = Incapable de faire

Tourner une poignée de porte	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Couper de la viande	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Boutonner ta chemise / ton pantalon	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Se lever d'une chaise	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Porter un objet de 5 Kg	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Utiliser du papier toilette	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B. ACTIVITÉS HABITUELLES /40

Evalue le niveau de difficulté que tu as éprouvé à accomplir tes activités habituelles dans chacun des domaines listés ci-dessous, au cours de la semaine dernière, en entourant le chiffre qui correspond le mieux à la difficulté éprouvée sur une échelle de 0 à 10. Le zéro (0) signifie que tu n'as rencontré aucune difficulté et le dix (10) signifie que c'était tellement difficile que tu ne pouvais pas faire tes activités habituelles.

0 = Aucune difficulté – 10 = Incapable de faire

Soins personnels (s'habiller, se laver)	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Tâches quotidiennes habituelles à la maison hors école/collège/lycée (devoirs, ranger sa chambre, faire la cuisine, aider les parents, ...)	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Travail à l'école/collège/lycée (écrire, prendre des notes, taper à l'ordinateur, ...)	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Loisirs (dessin, musique, sport, jeu, ...)	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

ABSTRACT (English)

Introduction: Preoperative 3-dimensional planning and patient-specific surgical guides are increasingly used in the treatment of complex forearm deformities, secondary to trauma or congenital malformation. Our goal was to assess the accuracy and the potential benefits of such devices in the management of pediatric cases.

Material and methods: Twenty-four children with forearm post-traumatic malunion or Madelung deformity were included. Fifteen of them benefited from conventional surgery (i.e., G- group) while the other 9 benefited from pre-operative 3-dimensional planning and patient-specific surgical guides (i.e., G+ group). Measurement of correction error value was performed in the G+ group using postoperative antero-posterior (AP) and profile radiographs. Complication rates, operating times, radiation exposure rates and clinical outcomes of the two groups were compared.

Results: Average error of correction was $4.7^{\circ} \pm 4.1^{\circ}$ (from 0.2° to 13.5°) in the AP and lateral views. Errors of correction were higher in Madelung deformities than in malunion cases, in both planes ($p = 0.6$). Surgery was significantly faster when using guides, with a mean difference of operating time of 42 minutes ($p = .02$). If mean total radiation doses were significantly higher in the G+ group than in the G- group ($p < .0001$), mean per-operative fluoroscopy doses were higher in the G- group than in the G+ group ($p = .08$). Complications rates were similar in both groups (i.e., 2 in each group). Improvements in ranges of motion and quality of life were significantly greater in the G+ group.

Conclusion: In children, 3-dimensional planning and patient-specific osteotomy guides allows to accurately correct complex forearm deformities. This technic seems to improve functional outcomes and while significantly reducing the operating time and intra-operative radiation exposure rates.

Level of evidence: III – retrospective comparative study.

Key words: forearm deformities; children; 3-dimensional planning; patient-specific surgical guide; accuracy of osteotomy.

RÉSUMÉ DE L'ARTICLE (Français)

Introduction : La planification tridimensionnelle préopératoire et les guides de coupe chirurgicaux sur mesure sont de plus en plus utilisés dans la prise en charge des déformations complexes post-traumatiques de l'avant-bras ou suite à une malformation congénitale. L'objectif de notre étude était d'évaluer la précision et les avantages potentiels de tels dispositifs en pédiatrie.

Matériel et méthodes : Vingt-quatre enfants présentant un cal vicieux post-traumatique d'avant-bras ou une maladie de Madelung ont été inclus. Quinze d'entre eux ont bénéficié d'une chirurgie conventionnelle (groupe G-) tandis que les 9 autres ont été opérés à l'aide de guides de coupe sur mesure suite à une planification tridimensionnelle réalisée à partir d'un scanner 3D (groupe G+). Le critère de jugement principal était l'évaluation de la précision des ostéotomies dans le groupe G+, qui a été calculée à partir de la mesure de l'erreur de correction sur des radiographies postopératoires de face et de profil. Les complications, les durées opératoires, les taux d'exposition aux radiations fluoroscopiques et les résultats cliniques des deux groupes ont été comparés.

Résultats : L'erreur moyenne de correction était de $4,7^\circ \pm 4,1^\circ$ ($0,2^\circ$ - $13,5^\circ$) dans les deux plans de face et de profil. Les erreurs de correction étaient plus élevées dans les maladies de Madelung que dans les cals vicieux, dans les deux plans ($p = 0,6$). La chirurgie a été beaucoup plus rapide lors de l'utilisation de guides, avec une différence moyenne de durée opératoire de 42 minutes ($p = 0,02$). Si les doses moyennes d'irradiation totale (fluoroscopie peropératoire et scanner préopératoire) étaient significativement plus élevées dans le groupe G+ que dans le groupe G- ($p < 0,0001$), les doses moyennes de fluoroscopie peropératoire étaient plus élevées dans le groupe G- que dans le groupe G+ ($p = 0,08$). Le nombre de complications était semblable dans les deux groupes (2 dans chaque groupe). L'amélioration des amplitudes articulaires et de la qualité de vie a été significativement plus importante dans le groupe G+.

Conclusion : Chez les enfants, la planification tridimensionnelle et les guides de coupe sur mesure permettent de corriger avec précision les déformations complexes de l'avant-bras. Cette technique semble améliorer les résultats fonctionnels tout en réduisant considérablement les durées opératoires et les taux d'irradiation fluoroscopique peropératoire.

Niveau de preuve : III – étude rétrospective comparative.

Mots clés : déformation de l'avant-bras ; pédiatrie ; planification tridimensionnelle ; guide de coupe sur mesure ; précision des ostéotomies.