



HAL
open science

Analyse morphologique tridimensionnelle informatisée des fractures de l'humérus proximal : étude de faisabilité

Thomas Ripoll

► To cite this version:

Thomas Ripoll. Analyse morphologique tridimensionnelle informatisée des fractures de l'humérus proximal : étude de faisabilité. Médecine humaine et pathologie. 2019. dumas-02505475

HAL Id: dumas-02505475

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02505475>

Submitted on 11 Mar 2020

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.

UFR de Médecine
Université Nice Sophia-Antipolis

THÈSE

Pour l'obtention du Diplôme d'État de Docteur en Médecine

par

Thomas RIPOLL

Né le 28 août 1993 à Nice

Analyse morphologique tridimensionnelle
informatisée des fractures de l'humérus proximal
Étude de faisabilité

Présentée et soutenue publiquement le

25 octobre 2019

à la Faculté de Médecine de Nice

Président du jury :

M. le Professeur Pascal BOILEAU

Directeur de thèse :

M. le Docteur Mikaël CHELLI

Assesseurs :

M. le Professeur Fernand DE PERETTI

M. le Professeur Jean-François GONZALEZ

M. le Professeur Christophe TROJANI

M. le Docteur Olivier GASTAUD

Mme. le Docteur Héroïse VASSEUR

Liste des enseignants au 1er septembre 2019 à la Faculté de Médecine de Nice

Doyen

Pr. BAQUÉ Patrick

Vice-doyens

**Pédagogie
Recherche
Etudiants**

**Pr. ALUNNI Véronique
Pr DELLAMONICA jean
M. JOUAN Robin**

Chargé de mission projet Campus

Pr. PAQUIS Philippe

Conservateur de la bibliothèque

Mme AMSELLE Danièle

Directrice administrative des services

Mme CALLEA Isabelle

Doyens Honoraires

M. RAMPAL Patrick
M. BENCHIMOL Daniel

Liste des enseignants au 1er septembre 2019 à la Faculté de Médecine de Nice

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

M.	BAQUÉ Patrick	Anatomie - Chirurgie Générale (42.01)
M.	BERNARDIN Gilles	Réanimation Médicale (48.02)
M.	BOILEAU Pascal	Chirurgie Orthopédique et Traumatologique (50.02)
M.	DARCOURT Jacques	Biophysique et Médecine Nucléaire (43.01)
M.	ESNAULT Vincent	Néphrologie (52-03)
M.	FUZIBET Jean-Gabriel	Médecine Interne (53.01)
M.	GILSON Éric	Biologie Cellulaire (44.03)
M.	GUGENHEIM Jean	Chirurgie Digestive (52.02)
M.	HASSEN KHODJA Reda	Chirurgie Vasculaire (51.04)
M.	HÉBUTERNE Xavier	Nutrition (44.04)
M.	HOFMAN Paul	Anatomie et Cytologie Pathologiques (42.03)
Mme	ICHAÏ Carole	Anesthésiologie et Réanimation Chirurgicale (48.01)
M.	LACOUR Jean-Philippe	Dermato-Vénérologie (50.03)
M.	LEFTHERIOTIS Geogres	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (51.04)
M.	MARQUETTE Charles-Hugo	Pneumologie (51.01)
M.	MARTY Pierre	Parasitologie et Mycologie (45.02)
M.	MICHIELS Jean-François	Anatomie et Cytologie Pathologiques (42.03)
M.	MOUROUX Jérôme	Chirurgie Thoracique et Cardiovasculaire (51.03)
Mme	PAQUIS Véronique	Génétique (47.04)
M.	PAQUIS Philippe	Neurochirurgie (49.02)
M.	QUATREHOMME Gérald	Médecine Légale et Droit de la Santé (46.03)
M.	RAUCOULES-AIMÉ Marc	Anesthésie et Réanimation Chirurgicale (48.01)
M.	ROBERT Philippe	Psychiatrie d'Adultes (49.03)
M.	THYSS Antoine	Cancérologie, Radiothérapie (47.02)
M.	TRAN Albert	Hépto Gastro-entérologie (52.01)

Liste des enseignants au 1er septembre 2019 à la Faculté de Médecine de Nice

PROFESSEURS PREMIERE CLASSE

Mme	ASKENAZY-GITTARD Florence	Pédopsychiatrie (49.04)
M.	BARRANGER Emmanuel	Gynécologie Obstétrique (54.03)
M.	BÉRARD Étienne	Pédiatrie (54.01)
Mme	BLANC-PEDEUTOUR Florence	Cancérologie – Génétique (47.02)
M.	BONGAIN André	Gynécologie-Obstétrique (54.03)
Mme	BREUIL Véronique	Rhumatologie (50.01)
M.	CASTILLO Laurent	O.R.L. (55.01)
M.	CHEVALLIER Patrick	Radiologie et Imagerie Médicale (43.02)
M.	DE PERETTI Fernand	Anatomie-Chirurgie Orthopédique (42.01)
M.	DRICI Milou-Daniel	Pharmacologie Clinique (48.03)
M.	FERRARI Émile	Cardiologie (51.02)
M.	FERRERO Jean-Marc	Cancérologie ; Radiothérapie (47.02)
M.	FONTAINE Denys	Neurochirurgie (49.02)
M.	GIBELIN Pierre	Cardiologie (51.02)
M.	HANNOUN-LEVI Jean-Michel	Cancérologie ; Radiothérapie (47.02)
M.	LEVRAUT Jacques	Médecine d'urgence (48.05)
M.	LONJON Michel	Neurochirurgie (49.02)
M.	MOUNIER Nicolas	Cancérologie, Radiothérapie (47.02)
M.	PADOVANI Bernard	Radiologie et Imagerie Médicale (43.02)
M.	PICHE Thierry	Gastro-entérologie (52.01)
M.	PRADIER Christian	Épidémiologie, Économie de la Santé et Prévention (46.01)
Mme	RAYNAUD Dominique	Hématologie (47.01)
M.	ROSENTHAL Éric	Médecine Interne (53.01)
M.	SCHNEIDER Stéphane	Nutrition (44.04)
M.	STACCINI Pascal	Biostatistiques et Informatique Médicale (46.04)
M.	THOMAS Pierre	Neurologie (49.01)
M.	TROJANI Christophe	Chirurgie Orthopédique et Traumatologique (50.02)

Liste des enseignants au 1er septembre 2019 à la Faculté de Médecine de Nice

PROFESSEURS DEUXIEME CLASSE

Mme	ALUNNI Véronique	Médecine Légale et Droit de la Santé (46.03)
M.	ANTY Rodolphe	Gastro-entérologie (52.01)
M.	BAHADORAN Philippe	Cytologie et Histologie (42.02)
Mme	BAILLIF Stéphanie	Ophthalmologie (55.02)
Mme	BANNWARTH Sylvie	Génétique (47.04)
M.	BENIZRI Emmanuel	Chirurgie Générale (53.02)
M.	BENOIT Michel	Psychiatrie (49.03)
M.	BERTHET Jean-Philippe	Chirurgie Thoracique (51-03)
M.	BOZEC Alexandre	ORL- Cancérologie (47.02)
M.	BREAUD Jean	Chirurgie Infantile (54-02)
Mme	BUREL-VANDENBOS Fanny	Anatomie et Cytologie pathologiques (42.03)
M.	CHEVALIER Nicolas	Endocrinologie, Diabète et Maladies Métaboliques (54.04)
Mme	CHINETTI Giulia	Biochimie-Biologie Moléculaire (44.01)
M.	CLUZEAU Thomas	Hématologie (47.01)
M.	DELLAMONICA Jean	réanimation médicale (48.02)
M.	DELOTTE Jérôme	Gynécologie-obstétrique (54.03)
M	FAVRE Guillaume	Néphrologie (44-02)
M.	FOURNIER Jean-Paul	Thérapeutique (48-04)
Mlle	GIORDANENGO Valérie	Bactériologie-Virologie (45.01)
Mme	GIOVANNINI-CHAMI Lisa	Pédiatrie (54.01)
M.	GUÉRIN Olivier	Méd. In ; Gériatrie (53.01)
M.	IANNELLI Antonio	Chirurgie Digestive (52.02)
M.	ILIE Marius	Anatomie et Cytologie pathologiques (42.03)
M	JEAN BAPTISTE Elixène	Chirurgie vasculaire (51.04)
M.	PASSERON Thierry	Dermato-Vénérologie (50-03)
M.	ROHRLICH Pierre	Pédiatrie (54.01)
M.	ROUX Christian	rhumatologie (50.01)
M.	RUIMY Raymond	Bactériologie-virologie (45.01)
Mme	SACCONI Sabrina	Neurologie (49.01)
M.	SADOUL Jean-Louis	Endocrinologie, Diabète et Maladies Métaboliques (54.04)
M.	VANBIERVLIET Geoffroy	Gastro-entérologie (52.01)

Liste des enseignants au 1er septembre 2019 à la Faculté de Médecine de Nice

MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

M.	AMBROSETTI Damien	Cytologie et Histologie (42.02)
M.	BENOLIEL José	Biophysique et Médecine Nucléaire (43.01)
Mme	BERNARD-POMIER Ghislaine	Immunologie (47.03)
M.	BRONSARD Nicolas	Anatomie Chirurgie Orthopédique et Traumatologique (42.01)
M.	CAMUZARD Olivier	Chirurgie Plastique (50-04)
Mme	CONTENTI-LIPRANDI Julie	Médecine d'urgence (48-04)
M.	DOGLIO Alain	Bactériologie-Virologie (45.01)
M	DOYEN Jérôme	Radiothérapie (47.02)
M.	FOSSE Thierry	Bactériologie-Virologie-Hygiène (45.01)
M.	GARRAFFO Rodolphe	Pharmacologie Fondamentale (48.03)
Mme	HINAULT Charlotte	Biochimie et biologie moléculaire (44.01)
M.	HUMBERT Olivier	Biophysique et Médecine Nucléaire (43.01)
Mme	LAMY Brigitte	Bactériologie-virologie (45.01)
Mme	LONG-MIRA Elodie	Cytologie et Histologie (42.02)
Mme	MAGNIÉ Marie-Noëlle	Physiologie (44.02)
M.	MASSALOU Damien	Chirurgie Viscérale (52-02)
Mme	MOCERI Pamela	Cardiologie (51.02)
M.	MONTAUDIE Henri	Dermatologie (50.03)
Mme	MUSSO-LASSALLE Sandra	Anatomie et Cytologie pathologiques (42.03)
M.	NAÏMI Mourad	Biochimie et Biologie moléculaire (44.01)
Mme	POMARES Christelle	Parasitologie et mycologie (45.02)
M.	SAVOLDELLI Charles	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie (55.03)
Mme	SEITZ-POLSKI barbara	Immunologie (47.03)
M.	SQUARA Fabien	Cardiologie (51.02)
M.	TESTA Jean	Épidémiologie Économie de la Santé et Prévention (46.01)
Mme	THUMMLER Susanne	Pédopsychiatrie (49-04)
M.	TOULON Pierre	Hématologie et Transfusion (47.01)

Liste des enseignants au 1er septembre 2019 à la Faculté de Médecine de Nice

MAITRE DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS

M.	DARMON David	Médecine Générale (53.03)
Mme	GROS Auriane	Orthophonie (69)

PROFESSEURS AGRÉGÉS

Mme	LANDI Rebecca	Anglais
-----	---------------	---------

PRATICIEN HOSPITALIER UNIVERSITAIRE

M.	DURAND Matthieu	Urologie (52.04)
M.	SICARD Antoine	Néphrologie (52-03)

PROFESSEURS ASSOCIÉS

M.	GARDON Gilles	Médecine Générale (53.03)
Mme	MONNIER Brigitte	Médecine Générale (53.03)

MAITRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS

Mme	CASTA Céline	Médecine Générale (53.03)
M.	GASPERINI Fabrice	Médecine Générale (53.03)
M.	HOGU Nicolas	Médecine Générale (53.03)

Liste des enseignants au 1er septembre 2019 à la Faculté de Médecine de Nice

Constitution du jury en qualité de 4ème membre

Professeurs Honoraires

M. AMIEL Jean	M. FREYCHET Pierre
M ALBERTINI Marc	M. GASTAUD Pierre
M. BALAS Daniel	M. GÉRARD Jean-Pierre
M. BATT Michel	M. GILLET Jean-Yves
M. BLAIVE Bruno	M. GRELLIER Patrick
M. BOQUET Patrice	M. GRIMAUD Dominique
M. BOURGEON André	M. JOURDAN Jacques
M. BOUTTÉ Patrick	M. LAMBERT Jean-Claude
M. BRUNETON Jean-Noël	M. LAZDUNSKI Michel
Mme BUSSIERE Françoise	M. LEFEBVRE Jean-Claude
M. CAMOUS Jean-Pierre	M. LE FICHOUX Yves
M. CANIVET Bertrand	Mme LEBRETON Elisabeth
M. CASSUTO Jill-patrice	M. MARIANI Roger
M. CHATEL Marcel	M. MASSEYEFF René
M. COUSSEMENT Alain	M. MATTEI Mathieu
Mme CRENESSE Dominique	M. MOUIEL Jean
M. DAR COURT Guy	Mme MYQUEL Martine
M. DELLAMONICA Pierre	M. ORTONNE Jean-Paul
M. DELMONT Jean	M. PRINGUEY Dominique
M. DEMARD François	M. SANTINI Joseph
M. DESNUELLE Claude	M. SAUTRON Jean Baptiste
M. DOLISI Claude	M. SCHNEIDER Maurice
Mme EULLER-ZIEGLER Liana	M. TOUBOL Jacques
M. FENICHEL Patrick	M. TRAN Dinh Khiem
M . FRANCO Alain	M VAN OBERGHEN Emmanuel
	M. ZIEGLER Gérard

M.C.U. Honoraires

M. ARNOLD Jacques	M. GIUDICELLI Jean
M. BASTERIS Bernard	M. MAGNÉ Jacques
M. BENOLIEL José	Mme MEMRAN Nadine
Mlle CHICHMANIAN Rose-Marie	M. MENGUAL Raymond
Mme DONZEAU Michèle	M. PHILIP Patrick
M. EMILIOZZI Roméo	M. POIRÉE Jean-Claude
M. FRANKEN Philippe	Mme ROURE Marie-Claire
M. GASTAUD Marcel	

REMERCIEMENTS

**A notre Maitre et Président de thèse, Monsieur le Professeur Pascal BOILEAU,
Professeur de Chirurgie Orthopédique et Traumatologie**

C'est un privilège que de vous avoir comme président de jury.

Je mesure chaque jour la chance d'être un de vos élèves.

Votre rayonnement international, vos connaissances chirurgicales et votre analyse scientifique nous rendent fier de sortir de cette belle école niçoise.

J'espère pouvoir faire honneur à votre implication dans notre formation à travers ce travail.

**A notre Maitre, Monsieur le Professeur Fernand DE PERETTI,
Professeur de Chirurgie Orthopédique et Traumatologie**

C'est un honneur de vous compter parmi mes juges.

C'est un plaisir d'apprendre chaque matin lors du staff de traumatologie à vos cotés.

Votre grande connaissance de la traumatologie est une aubaine pour de jeunes internes comme nous.

Même si l'épaule n'est pas votre terrain de prédilection, j'espère que ce travail reflètera le profond respect que j'ai pour vous.

**A notre Maitre, Monsieur le Professeur Christophe TROJANI,
Professeur de Chirurgie Orthopédique et Traumatologie**

C'est un honneur de vous compter parmi mes juges.

Votre connaissance chirurgicale, votre culture générale et votre amour pour le sport sont pour moi une source d'inspiration.

Votre esprit de synthèse et votre charisme forcent le respect. Tout ce que vous entreprenez est une réussite.

Que ce travail soit le reflet de mon profond respect et de ma sincère reconnaissance.

**A notre Maitre, Monsieur le Professeur Jean François GONZALEZ,
Professeur de Chirurgie Orthopédique et Traumatologie**

C'est un honneur de vous compter parmi mes juges.
Je vous remercie pour votre enseignement et votre rigueur.
J'espère pouvoir rapidement travailler et apprendre à vos cotés.
Que ce travail soit le reflet de mon respect.

**A notre Maitre, Monsieur le Docteur Olivier GASTAUD,
Docteur en médecine, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique**

C'est un privilège de te compter parmi ce jury.
Ce semestre cannois a été exceptionnel malgré les quelques difficultés rencontrées.
Ton implication dans ce service est incroyable et force l'admiration.
Tes connaissances chirurgicales et ton sens pédagogique sont des atouts hors normes pour un futur chef de service.
Je te remercie de m'avoir dégagé du temps et j'espère que ce travail reflètera ma grande considération envers toi.

**Madame le Docteur Héloïse VASSEUR,
Docteur en médecine, Radiologue ostéo-articulaire.**

C'est un honneur de compter une radiologue parmi ce jury.
Ton implication, ton soutien de tous les jours ont été indispensables à cette réussite collective.
Travailler avec toi a été un plaisir.
J'espère pouvoir à travers ce travail te rendre un peu de ton implication.

**A notre Maitre et directeur de thèse, Monsieur le Docteur Mikaël CHELLI,
Docteur en médecine, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique**

Je te remercie de me faire l'honneur de diriger ce travail.

Cette « mission » de thèse en 3 mois n'aurait jamais été faisable sans toi. Ton soutien, ta disponibilité, tes connaissances informatiques et chirurgicales ont été nécessaires à cette réussite. Je ne te remercierais jamais assez de ton aide, et je pense que Caro doit être contente que ça se termine.

De plus tu restes un chef de clinique impliqué dans notre formation clinique et chirurgicale ce qui est très appréciable.

J'espère que ce travail sera digne de ma reconnaissance. Et n'oublie pas, ce n'est qu'un début.

A Sergii POLTARETSKYI,

Grace à toi j'ai découvert la magnifique ville de Plouzané. Plus sérieusement je te remercie pour ton investissement dans ce projet, ta volonté de nous aider, ta disponibilité et ta rapidité d'exécution.

Tu as dépensé beaucoup de ton temps personnel et de ton énergie pour faire que je sois là aujourd'hui.

Même si se n'est qu'un début et qu'il nous reste beaucoup de travail à venir, merci pour tout Sergii.

A ma famille,

A ma grand mère, NANOU,

Je te l'avais promis cette thèse, et la voilà.

Tu es une Femme extraordinaire par ton dévouement et ta force.

Tu as été un des éléments de ma réussite tout au long de ces années.

J'espère te rendre fière chaque jour. Je t'aime.

A mon grand père, PAPY Antoine,

Le meilleur chirurgien du bois et du plastique que je connaisse. Je crois que mon métier vient probablement de l'amour pour le bricolage que tu m'as transmis. Heureusement que je préfère le bricolage à la pêche !

En tant qu'ingénieur et passionné de mathématiques j'espère que tu apprécieras mon travail de thèse

Mon Papy je t'aime.

A ma grand mère, AMA,

Que c'est BEAAAAUUUUUUUU, BRAVOOOOO, OUHOUH, MAIS REGARDE MOI CE CHATEAUUUUUUU, tant de phrases qui te caractérisent. Tu es une grand mère formidable, toujours joviale et prête à se décarcasser pour tes petits enfants.

Je t'aime AMA

A mon père,

Que dire, c'est aujourd'hui grâce a toi que j'en suis là. Tu es le moteur de ma réussite.

Comme tu le dis souvent, j'ai rêvé de faire 2 métiers, médecin et pilote d'avion. Ton grand a fait pilote et me voilà Docteur. J'espère te rendre fier. Je te suis reconnaissant pour tout.

Je t'aime Papa

A ma mère,

Personne ne peut prétendre avoir une mère aussi géniale. Tu es dévouée pour tes enfants et tu nous as prodigué une éducation presque parfaite (sauf peut être la partie religieuse). Je te suis reconnaissant pour tout.

Je t'aime Maman

A mon frère,

La prunelle de mes yeux, mon meilleur pote, mon conseiller, mon bras droit. Tu es un frère parfait. Je trouve en toi quelqu'un de très complémentaire et c'est juste merveilleux.

Je t'aime Guigui.

A ma sœur,

Ce ne fut pas rose tout les jours mais aujourd'hui tu es quelqu'un d'incroyable et pleine de ressources. Je suis extrêmement fier de ton parcours. Je prendrais toujours soin de ma petite sœur du mieux que je peux.

Je t'aime Poupoule

A ma copine Laurie,

Le soutien de ses 3 derniers mois, sans qui je pense il aurait été difficile de réussir. Tu as passé de longues heures à me regarder travailler et à m'aider comme tu le pouvais. Tu n'as pas craqué toi non plus (sauf peut être pour ta robe).

J'ai hâte de souffler un peu à tes cotés en Nouvelle Calédonie.

Merci

Je t'aime

A Dan et Ségo,

Je vous remercie de rendre mon frère et ma sœur heureux. J'ai hâte de passer du temps avec vous sur le Caillou !!!

A Pinky,

Tu es une femme exceptionnelle. Ta force de caractère est incroyable. Je te remercie pour cette P1 qui n'aurait pas été la même sans toi.

Aux Lecha',

A mon parrain **Serge**, Co fondateur de ma connerie avec mon père, tu as toujours été présent, comme peu de parrains le seraient. Prend soin de toi sinon je vais finir par t'opérer.

A Annick et Katia avec qui j'ai passé beaucoup de mon enfance.

Aux Debove,

Vous êtes une famille en or. Nadine ton amour se fait ressentir. Comment ne pas associer Daniel qui nous manque terriblement à ces remerciements. Arnaud, même si tu m'as maltraité avec Gugui enfant je ne t'en veux pas.

Titi, toi qui me ressemble « cousin », on en aura des histoires à raconter à nos enfants. T'es un chique type. Je t'aime mon Titi bo.

Aux Corchia-Berard,

Esther ma marraine, Djé, Léa et Djess, pour tout nos voyages et nos bons moments passés tous ensembles.

Aux Golkar,

Ali pour la passion de la médecine que tu m'as transmis tout au long de mes études. Aida, tes plats vont me manquer pendant les 6 mois loin de vous. Tara et Kimi vous êtes des voisines et amies au top.

Aux Rollin,

Qu'est ce que c'était bien de vivre en face de chez vous (et même maintenant dans votre ancien chez vous). **Ben**, que le chemin a été long depuis les années Ligue des Champions retournés acrobatiques sur le canapé de Ama. Mais on ne s'est jamais perdu de vue, c'est ça les amis.

Aux Suisses,

Votre compagnie est toujours très agréable même si Claude ne comprend rien au sport. Je ne vous remercierai jamais assez de vous être occupé de moi pendant ma P1. Vous êtes de belles personnes. (Crétin junior)

Aux Druet,

Vero et JP je vous remercie d'avoir fait des kilomètres pour venir me voir. Pierro, j'aime bien me souvenir des années Hakkinen-Schumacher, c'est toujours un plaisir de te voir. Chloé, tu commences une belle spécialité qui je l'espère te plaira, même si l'orthopédie reste au dessus !

Aux Quinti,

Merci d'être là à chaque fois pour tous les moments importants de nos vies.

Et aussi, Famille **Juan**, les **Monges**, les **Balkin**, Les **Conso**, Les **Popoff**, Les **Panis**, **Les copains du kart ...**
merci

A mes maitres chirurgiens,

Le Docteur BERNARD DE DOMPSURE,

Tu es un chirurgien hors paire, te voir opérer est un plaisir. En plus tes expressions légendaires me resteront toute ma vie de chirurgien (L-A-M-E, de guingois, ambicenestre, bah voilà mon petit lapin, pas mal pour un cheval ...). Merci

Le Docteur BRONSARD,

Ton enseignement en anatomie est crucial dans notre formation de chirurgien. Merci pour la travail de fond que tu effectues pour ce service.

Le Docteur THOMAS, qui m'a tant appris.

Tu m'as fait progresser chirurgicalement (je pense aussi t'avoir appris la patience). Tu es un exemple à suivre et le type de chef que je voudrais être plus tard.

Tes mots doux et tes petits cris vont me manquer.

Merci pour ce semestre Cannois. J'ai hâte de te retrouver à Nice

Le Docteur DECROOCQ,

Celle qui m'a pris sous son aile à mon arrivée en premier semestre. Tu m'as appris la rigueur et la passion de mon métier. Nous te regrettons dans notre formation. Merci

Le Docteur CAVALIER,

Elle n'était peut-être pas si démente que ça cette première PIH. Merci pour tes phrases culte « MOI J'SUIS PAS COMME DECROOCQ, J'SUIS PAS LA POUR TE FAIRE DES BISOUS DANS LE COU ». Merci pour tout ce que tu m'as appris. J'espère refaire du surf avec toi dans les années à venir.

Tu feras un très bon père je n'en doute pas. Merci Max.

Le Docteur RAYNIER,

Dire que c'est en partie grâce à toi que je suis là aujourd'hui. Oui le grand tas de merde d'1m88 passe sa thèse.

Ta folie et ton aisance chirurgicale sont un exemple à suivre. Merci pour tout Jean-Luc. Promis on les fera les prothèses pour chevaux.

Le Docteur AZAR,

Parce que parfois les chefs deviennent des potes. J'suis triste que tu sois parti Michou. Merci pour tes conseils chirurgicaux qui ont toujours été précieux.

Le Docteur GAUCI,

Ta rigueur force le respect. Je suis heureux d'apprendre la chirurgie à tes cotés. Merci pour tes conseils et pour l'ordinateur qui m'a permis de mettre à terme ce travail.

Le Docteur DARMENTE,

Même si tu me fais un peu peur au bloc je suis heureux d'avoir travaillé avec toi. Ça fait quand même bizarre de te retrouver dans mon appart en lendemain de soirée.

Le Docteur CLOWEZ,

La force tranquille. A cette association maléfique en garde pasteurienne et en astreinte Cannoise. Ta précision chirurgicale est un exemple à suivre.

Le Docteur ALLIA,

Tu as été un co-interne au top, j'ai hâte de te retrouver en chef.

Le Docteur LAVOUE,

Même si toi aussi tu me fais un peu peur, ta rigueur et ta justesse chirurgicale sont des exemples à suivre.

Le Docteur LAYET,

Toujours à raconter des conneries. Ces un an avec toi ont été un véritable plaisir

Les docteurs **LEVY**, **BLASCO** et **MUCCIOLI** avec qui je n'ai pas encore eu la chance de travailler.

Merci aux filles du 4 OUEST : Tuso et Marion, le duo infernal, Ram, Broquet, Fred la spécialiste du WE, Céline, Cindy, Jeanne, Bajard, Caro, Mélany, Lorraine et Quentin

Merci aux filles de la consult : Christelle, Elodie, Morgane, Charlène et Johanna

Merci aux secrétaires de traumatologie et d'orthopédie

Agnès URANOVICZ, **Anne FREGEAC**, **Caroline TREFOURET**, merci pour votre grande aide dans tous les projets scientifiques.

Merci aux orthopédistes pédiatres de Lenval,

Le Docteur ROSELLO,

Une machine de guerre, un exemple de travail. Ce stage a été exceptionnel par ton investissement et ta rigueur. Et en plus on s'est quand même bien marré avec BB.

Le Docteur CHAU,

Vos connaissances en chirurgie pédiatrique et orthopédique ont été bénéfiques pour ma formation. Opérer avec vous est un plaisir. Je vous en remercie.

Les **Docteurs RAMPAL**, on va y arriver à écrire cet article, **OBOROCIANU** qui m'a fait progresser en arthroscopie, **SOLLA** et **CLEMENT** pour leur formation et leur connaissance de la chirurgie rachidienne.

Merci aux orthopédistes Cannois et leurs équipes d'infirmiers (bloc et service),

Au Docteur CAMBAS et son humour piquant.

Au Docteur VOGT, pour ses mots sympas et son soutien pendant ce dernier mois.

Ce stage a été très formateur grâce à vous tous.

Merci aux secrétaires de Cannes : Mémé, Titon, Estelle et Sandra. Toujours de bonne humeur, rigolote et sympathique. Mais franchement : « à quoi elle sert cette thèse ? »

A tous mes amis anesthésistes et réanimateurs : Dr LETALEC, Dr DE JACGER, Dr LEFEBVRE, Dr TRUC, Dr BELLANTONIO, Dr PAULUS, Dr BERTRAND, Dr CHAMBON, Dr PAILLOT, Dr FRAITURE, Dr MACCI, Dr TRAN c'est un plaisir de travailler avec vous.

Merci aux **brancardiers, aides-soignants, manip radio ...**

A mes co-internes et amis d'orthopédie :

Emilien, je te compte encore parmi nous, toute l'orthopédie te regrette B.

Bastien, BB, Bijou c'est un plaisir de travailler avec toi. Hâte d'aller jouer au Golf et faire du Karting quand tout ça sera fini.

Coincoin, ma mère, je ne te remercierais jamais assez de tout ce que tu as fait pour moi. Tu es drôle et toujours chaude pour tout, et c'est très agréable

Barret, mon père, depuis ma première garde ou tu es resté jusque 23h avec moi, et jusqu'à aujourd'hui tu prends soin de moi. J'ai hâte de te retrouver comme chef.

Antoine, toujours dévoué. Mon partenaire de garde pour qui je serai toujours là.

Adil, tu as été avec Antoine ma garde rapprochée pendant mon premier semestre. Vous êtes aujourd'hui des amis plus que des co-internes.

Laure, Merci pour ton aide durant cette thèse. Tu es une bonne recrue. J'ai hâte que l'on soit en stage ensemble.

Brieuc, content que tu sois dans la maquette.

Yann et Tristan, passer cette thèse à vos côtés est un privilège. Que la fête soit belle !

Marie-Charlotte, merci d'avoir partagé 6 mois de notre passion.

Marie, la castafiore, toujours un petit instinct maternel avec moi.

Romain, le marin, c'est un plaisir de penser à toi à chaque sortie sur BipBip.

Alessander, Coco, Yann S, Tristan L, Greg, Gaya, Karim, Sami, c'est un plaisir de travailler dans la même équipe que vous.

Aux internes **des urgences de Nice, de Lenval et de Cannes** avec qui je me suis bien entendu ...

A mes amis,

Ken, Tatasse et Sarkiss, La coloc' du mal. Cette coloc est une franche réussite. En même temps vivre avec ses 3 meilleurs potes c'est quand même stylé !

Ken, j'aime te savoir dans le creux de la vague, je suis sûr que tu arriveras à te lever en Wake un jour.

Léo, Tatasse, la méduse, pour tous les traquenards que tu m'as tendus et les nombreux restant.

Sarkiss, Albi quoi, le roi de la glande.

Vous êtes de bons Connards, comme on en trouve rarement. J'vous aime les copains. Vous aller me manquer pendant ces 6 mois.

A **Leonard**, bébé, tu es la réincarnation du mal mais t'es un bon gars. Dommage que tu sois parti si loin. Vivement le prochain DIU ensemble.

A **Bisch**, prend soins de la coloc pendant mon absence Colonel .

A **Cochon**, le plus classe des orthopédistes. Ce voyage en post D4 restera un de mes plus beau souvenir

A mes amis des années médecine, **Raph, Chloé, Alice, Rouanet, Eug, Trapa, Mégane, Panto, Rémi, Gordo, Fortier, Marie, Manon, Laure**. Que de belles années passées à vos cotés.

A mes amis du collège-lycée, **Seb, Vassou**, on a bien fait de pas faire de la musique, **Anis**, maintenant c'est à ton tour, **Ben**, la grande gigue, **MC**, ma petite catin, **Chloé**, le chef de la bande, **Caro**, l'éternelle étudiante **et Marjo**, même si tu ne comprends pas toujours tout on t'aime bien. C'est rare de compter des amis depuis si longtemps. Je suis très content que vous soyez là ce soir. On forme une bonne team. J'vous aime les copains .

Aux Bretons, **Clément, François et Marion**, j'espère que ces vacances et que cette latte pourront perdurer.

Merci d'être mes amis.

Et à tous ceux que j'aurais oublié...

A la **Nouvelle-Calédonie**, je crois que ce voyage est bien mérité.

Table des matières

Résumé.....P2

Introduction.....P4

Méthodes.....P6

Caractéristiques des patients

Acquisition des images

Analyse manuelle

Analyse informatisée

Évaluation des mesures manuelles

Analyse statistique

Résultats.....P15

Description des fractures

Concordance inter-observateurs

Mesures informatisées des déplacements

Précision des mesures manuelles

Discussion.....P22

Conclusion.....P25

Références.....P26

Résumé

Analyse morphologique tridimensionnelle informatisée des fractures de l'humérus proximal.

Etude de faisabilité

Introduction. La classification de Neer des fractures de l'humérus proximal (FHP) en 4 fragments reste la plus utilisée en pratique chirurgicale, même si la reproductibilité inter-observateurs est faible. L'objectif de notre étude était de mettre au point une méthode informatisée originale et standardisée de mesure des déplacements dans l'espace des 4 fragments osseux fracturés : tête humérale, diaphyse, tubercule majeur et tubercule mineur.

Méthodes. Quatre-vingts FHP chez 79 patients pris en charge au CHU de Nice entre décembre 2017 et décembre 2018, pour lesquelles des radiographies et un scanner étaient disponibles, ont été incluses. Pour chaque fracture, nous avons segmenté manuellement la tête humérale et les tubérosités afin de modéliser en 3D l'humérus proximal fracturé. Un modèle statistique de forme permettait de prédire l'humérus pré-fracturaire à partir des 6cm proximaux de diaphyse non fracturée. L'analyse de la différence entre l'humérus pré-fracturaire prédit et les fragments segmentés permettait la mesure tridimensionnelle des déplacements en translation et en rotation. Trois observateurs (un chirurgien, un interne, un radiologue) ont aussi effectué des mesures manuelles à l'aide de radiographies et de scanner deux et trois dimensions.

Résultats. L'analyse inter-observateurs retrouvait 41% d'accord unanime pour la classification de Neer. Pour la rotation de la tête dans le plan coronal, on observait grâce au logiciel 39% de valgus, 45% de varus et 16% de rotation $<5^\circ$. Huit pour cent étaient considérées comme déplacées ($> 45^\circ$ de varus ou valgus) selon les critères de Neer. Le tubercule majeur était fracturé dans 70 cas et le tubercule mineur dans 34 cas. La mesure informatique retrouvait un déplacement de plus de 10mm dans 39% des fractures du tubercule majeur et dans 53% des fractures du tubercule mineur. En considérant le logiciel comme la mesure de référence, l'analyse des trois observateurs était exacte dans 35% des cas pour la tête humérale, et dans 61% et 49% pour le tubercule majeur et le tubercule mineur.

Conclusions. Les résultats de notre étude de faisabilité confirment la faible reproductibilité de la classification en 4 fragments des fractures de l'humérus proximal selon Neer et montrent qu'il est possible de mesurer le déplacement tridimensionnel des fragments osseux fracturés grâce à une méthode de mesure informatisée originale (preuve de concept).

Abréviations

FHP : Fracture de l'Humérus Proximal

TM : Tubercule majeur

TM1 : Tubercule majeur 1 = Partie antérieure du tubercule majeur, située à moins de 10mm de la gouttière bicipitale

TM2 : Tubercule majeur 2 = Partie postérieure du tubercule majeur, située à plus de 10mm de la gouttière bicipitale

Tm : Tubercule mineur

GB : Gouttière Bicipitale

GE : General Electric

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

DICOM : Digital Imaging and Communications in Medicine

PACS : Picture Archiving and Communication System

2D : 2 Dimensions

3D : 3 Dimensions

Introduction

Les fractures de l'humérus proximal (FHP) sont un problème de santé publique. Elles sont la troisième fracture la plus fréquente chez les plus de 65 ans après les fractures du fémur proximal et du radius distal (1,2) et sont le plus souvent d'origine ostéoporotique (3,4). Elles peuvent, notamment chez le sujet jeune, être sources de séquelles handicapantes.

En 1934, Codman décrit quatre fragments osseux caractéristiques séparés par les lignes de fusion des noyaux épiphysaires : diaphyse, tête humérale, tubercule majeur et tubercule mineur (5). Depuis, les différentes classifications sont issues de son travail. La classification de Neer (6,7) est aujourd'hui la plus utilisée de par sa simplicité et son intérêt pronostic (8). Chaque fragment est considéré comme déplacé si sa translation est supérieure à 10mm et/ou si sa rotation est supérieure à 45°. Ainsi sont définies des fractures à 1-part qui sont peu ou pas déplacées, et des fractures déplacées à 2-parts, 3-parts et 4-parts. Cette classification présente un intérêt chirurgical majeur en permettant de définir la stratégie thérapeutique car la restauration de l'anatomie de l'humérus proximal reste la clef de voute de la prise en charge de ces fractures (9,10).

Mais son utilisation, bien que consensuelle (11,12), est limitée par une mauvaise reproductibilité inter-observateurs et intra-observateurs (13–15). Shrader et al. (14) ont ainsi montré que trois chirurgiens présentaient un agrément de 42% pour la classification de Neer, et de 61% pour la stratégie thérapeutique, ce qui a été retrouvé par de nombreux auteurs (8,13,15–24). La classification initiale de Neer est basée sur des radiographies de face et de profil (6,25), mais l'accès au scanner est aujourd'hui courant et il a été montré que son usage - notamment avec reconstructions en trois dimensions - augmente sa reproductibilité (23,24,26) bien qu'elle reste modérée.

Cette classification présente néanmoins de nombreux avantages : elle est anatomique, physiopathologique, simple, pronostique, guide l'indication chirurgicale et est largement utilisée dans la littérature internationale, permettant la comparaison des résultats. Elle représente la meilleure option à ce jour pour analyser les FHP mais reste limitée par sa reproductibilité.

L'analyse de la littérature récente montre qu'elle reste la plus utilisée pour décrire les FHP mais que son usage n'est pas standardisé (12,27), c'est à dire qu'il ne repose pas sur une méthodologie consensuelle. Ainsi, parmi les articles publiés en 2017 et 2018, seuls 24% utilisaient le scanner pour classer les fractures, 6% utilisaient des règles digitales pour évaluer la translation et 24% des goniomètres pour mesurer les rotations (27–42). Ces variations dans les méthodes de mesures peuvent expliquer le manque de reproductibilité inter-observateurs.

De nombreuses autres classifications ont été décrites (43–48). Cependant, aucune n'établit de référentiel spatial permettant de décrire les déplacements. Habituellement, pour les fractures, on définit le déplacement de l'extrémité distale d'un os par rapport à sa portion proximale. Dans le cadre des FHP, la situation est plus complexe. La partie proximale de l'humérus ne peut servir de référence puisqu'elle est fracturée ; la diaphyse (portion distale) non plus, car elle est généralement déplacée. Enfin, les déplacements de chacun de ces fragments se produisent dans des plans indépendants, et associent rotations et translations en 3 dimensions (6 degrés de liberté). On comprend donc la difficulté diagnostique que représentent ces fractures à géométrie variable, ce qui peut également expliquer la faible reproductibilité des classifications.

La prise en charge des fractures de l'humérus proximal reste donc complexe : mauvaise reproductibilité des différentes classifications (18,19,24,49), absence de consensus sur l'attitude thérapeutique (11,28,50), séquelles difficiles à traiter (51,52) et pourvoyeuses de mauvais résultats fonctionnels. La consolidation des tubérosités en position anatomique est notamment le facteur le plus important à prendre en compte pour le résultat final (9,10,53–56) et la mesure de leurs déplacements est capitale pour guider la thérapeutique. La reproductibilité des résultats nécessite dans un premier temps la reproductibilité des diagnostics. La définition de référentiels et d'une méthodologie standardisée pour analyser ces fractures est donc indispensable.

L'objectif de notre étude était donc d'étudier les déplacements des fragments des FHP grâce à une méthode tridimensionnelle et standardisée.

L'hypothèse principale était que la reproductibilité inter-observateurs de la classification de Neer et de l'analyse des fractures est faible, mais qu'il est possible d'obtenir une mesure informatique tridimensionnelle grâce à une méthode de mesure standardisée.

Méthodes

Caractéristiques des patients

Dans cette étude rétrospective, l'ensemble des patients (>18 ans) présentant une fracture de l'humérus proximal accueillis aux urgences du *trauma center* de niveau 1 du CHU de Nice entre Décembre 2017 et Décembre 2018 étaient éligibles. Nous avons inclus tous les patients ayant bénéficié d'un scanner de l'épaule et de radiographies de face et de profil dans les 48h suivant le traumatisme. Nous avons exclu les patients présentant des antécédents de fracture ou de chirurgie de l'épaule fracturée, les fractures pathologiques, les fractures s'étendant à la diaphyse, les fractures de glène ou les luxations gléno-humérales associées (Figure 1).

La cohorte finale était composée de 79 patients pour 80 fractures. Il s'agissait de femmes dans 80% des cas, pour un âge moyen de 70 ans (29-95ans). Les données épidémiologiques sont résumées dans le Tableau 1.

Figure 1. Diagramme de flux

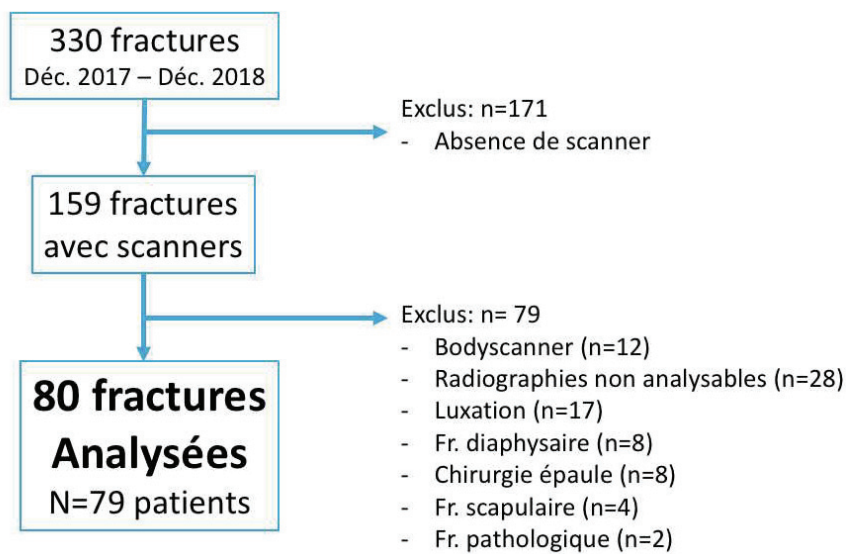


Tableau 1. Caractéristiques de la population

Variable	Moyenne (minimum – maximum) Fréquence (%)
Age	70 ans (29-95)
Sexe féminin	63 (80%)
Coté	Droit : 41 (51%) / Gauche : 39 (49%)
Coté dominant	39/80 (49%)
Mécanisme	Chute de sa hauteur : 62 (78%) Chute supérieure à sa hauteur : 4 (5%) Accident de la voie publique : 8 (10%) Accident de sport : 6 (7%)
Antécédents	Hypertension artérielle : 23 (29%) Démence : 10 (12%) Diabète : 10 (12%) Épilepsie : 1 (1%) Tabac : 8 (10%) Alcool : 4 (5%)

Acquisition des images

Tous les scanners ont été réalisés dans le service de radiologie du CHU de Nice sur un appareil General Electric (GE) Optima 64 barrettes en acquisition hélicoïdale en fenêtrage osseux avec des coupes de 0,625mm d'épaisseur. Des reconstructions dans les 3 plans (frontal, coronal et sagittal) ainsi que des reconstructions en fenêtrage parties molles et rendu volumique (3D) ont été réalisées sur la console GE, puis envoyées sur le PACS® (Picture Archiving and Communication System). Tous les scanners ont été exportés en fichier DICOM afin de pouvoir effectuer une analyse via le logiciel HOROS® (version 3.3.5, Pixmeo, swiss).

Analyse manuelle

Trois observateurs ont analysé indépendamment les déplacements fracturaires sur des radiographies de face et de profil ainsi que des reconstructions scanner 2D et 3D : un chirurgien orthopédiste

spécialisé en chirurgie de l'épaule, un interne en chirurgie orthopédique et un radiologue spécialisé en imagerie ostéo-articulaire.

Pour chaque fracture, étaient analysés : le nombre de fragments fracturés, le nombre de fragments déplacés selon les critères de Neer ($\geq 1\text{cm}$ ou $\geq 45^\circ$ d'angulation), le déplacement en millimètres des tubérosités et de la diaphyse (en 3 classes $< 5\text{mm}$; $5-9,9\text{mm}$; $\geq 10\text{mm}$), et la rotation en degrés de la tête humérale (en 5 classes : neutre, varus $< 45^\circ$, varus $\geq 45^\circ$, valgus $< 45^\circ$, valgus $\geq 45^\circ$).

Les observateurs disposaient du goniomètre et de la règle digitale du logiciel HOROS® pour analyser les déplacements. Afin d'homogénéiser les pratiques, une session d'entraînement commune préalable a été organisée, pour analyser quinze cas non inclus dans cette étude.

En plus des fragments définis par Codman et Neer (5,6) (tubercule majeur, tubercule mineur, tête et diaphyse) nous avons analysé la gouttière bicipitale ainsi que le tubercule majeur (TM) divisé en 2 parties comme décrit par Hasan (57). Nous avons ainsi différencié les atteintes du TM en fonction ou non du contact avec la gouttière bicipitale (TM1 = fragment au contact de la gouttière et TM2 = fragment situé au moins 10mm en arrière de la gouttière).

Analyse informatisée des déplacements fracturaires

Nous avons développé une méthode informatique permettant de standardiser la mesure des déplacements fracturaires. L'originalité de cette méthode résidait dans :

- 1) l'utilisation de l'humérus pré-fracturaire comme référence des déplacements.
- 2) la mesure des déplacements en 3 dimensions.

Nous en détaillons ci-dessous les différentes étapes.

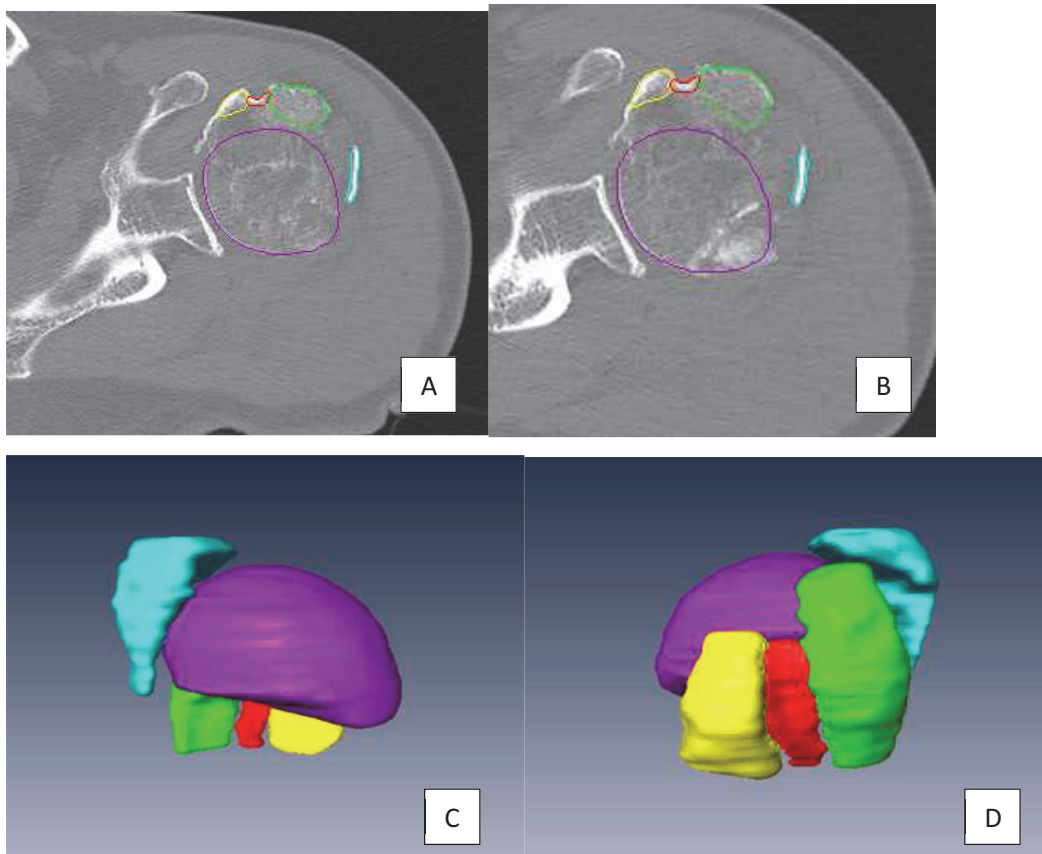
Segmentation

La segmentation avait pour objectif d'obtenir une représentation tridimensionnelle (maillage) pour chacun des fragments osseux fracturés à l'aide du logiciel AMIRA® (version 5.3, Zuse Institute Berlin, Berlin, Germany). Sur les séquences natives de scanner (coupes axiales), chacun des fragments était calqué manuellement pour en définir les contours : le tubercule majeur (TM1, TM2 s'il existait un refend entre les 2 parties du tubercule majeur), le tubercule mineur (Tm), la gouttière bicipitale (GB) et la tête (Figures 2A et 2B).

La segmentation de chaque fragment osseux fracturé était réalisée toutes les 2 coupes de scanner (tous les 1,25mm) sur toute la hauteur de l'humérus proximal. Le maillage 3D de chaque fragment

était ensuite construit par interpolation pour simuler les points non segmentés entre deux coupes de scanner (Figure 2C, Figure 2D).

Figure 2. Segmentation des fragments fracturés à l'aide du logiciel AMIRA®



2A. Toutes les deux coupes axiales, les fragments composant l'humérus proximal sont calqués à la main. Ici, la tête humérale est en violet, le tubercule majeur en vert pour sa partie antérieure (TM1) et bleu pour sa partie postérieure (TM2), la gouttière bicipitale en rouge, le tubercule mineur en jaune.

2B. On effectue la même manœuvre 2 coupes en dessous.

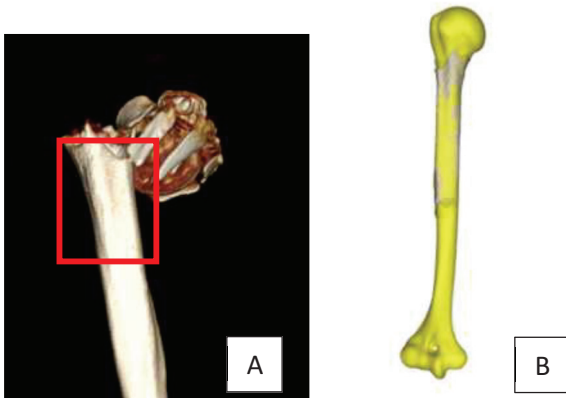
2C. Vue de la partie postérieure du maillage 3D.

2D. Vue de la partie antérieure du maillage 3D.

Prédiction de l'anatomie de l'humérus proximal pré-fracturaire

En nous basant sur les travaux de Poltaretskyi et al. (58) , nous avons prédit l'anatomie de l'humérus proximal tel qu'il était avant la fracture, à partir des 6 cm les plus proximaux de la diaphyse non fracturée (Figure 3A, Figure 3B). Cette technologie repose sur un modèle de forme statistique (SSM, Statistical Shape Model) permettant de prédire la morphologie pré-morbide de l'humérus proximal à partir d'une partie saine de la diaphyse (notamment plusieurs repères sur la gouttière bicipitale) pour définir la rétroversion, l'inclinaison, la hauteur, le rayon de courbure et l'offset postérieur et médial. Dans un premier temps, les fragments fracturés étaient supprimés manuellement afin de ne garder que la diaphyse saine et la scapula qui étaient segmentés automatiquement grâce au logiciel Glénosys® (version 10.4.4, IMASCAP S.A.S, France). A l'issue de cette étape, nous disposons d'une prédiction tridimensionnelle de l'humérus tel qu'il était avant la fracture (Figure 3).

Figure 3. Prédiction de l'humérus pré-fracturaire



3A. Un modèle statistique de forme permet de reconstruire l'humérus proximal pré-fracturaire à partir des 6 cm les plus proximaux de la diaphyse non fracturée.

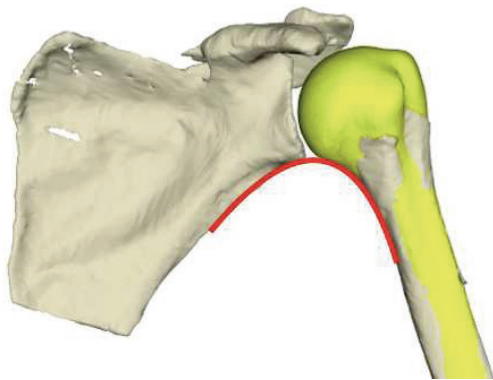
3B. L'humérus pré-fracturaire a été prédit et est affiché en jaune. La diaphyse non fracturée originale est affichée en beige. Il s'agissait ici d'une fracture avec un déplacement important de la diaphyse par rapport à la tête.

Positionnement anatomique de l'humérus proximal pré-fracturaire

La diaphyse humérale étant souvent déplacée (rotation et adduction dans la plupart des cas), il nous était nécessaire de la replacer dans sa position pré-fracturaire afin de prédire la position correcte dans l'espace de la tête humérale telle qu'elle était avant la fracture.

Pour reconstituer une épaule saine, nous avons donc intégré en face de la glène humérale notre humérus pré-fracturaire. Le positionnement de celui-ci pouvait être modifié en ajustant manuellement sa position dans le plan sagittal (hauteur), ou dans le plan axial (antéro-postérieur). La restitution du cintre scapulo-huméral et de l'interligne gléno-huméral étaient les deux principaux critères utilisés pour positionner l'humérus (Figure 4).

Figure 4. Positionnement de l'humérus pré-morbide en face de la glène

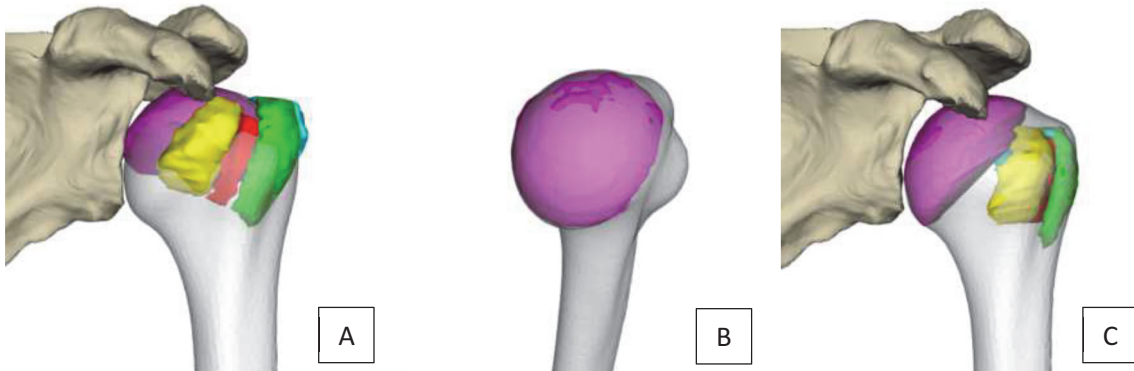


La position de l'humérus pré-fracturaire peut être modifiée en hauteur et en rotation axiale pour restituer l'interligne gléno-huméral et le cintre scapulo-huméral.

Réduction informatisée des fragments osseux

La dernière étape était de réduire les fragments osseux à leur position anatomique sur l'humérus proximal pré-fracturaire. Pour ceci, nous avons développé conjointement avec la société IMASCAP un logiciel spécifique (*Reductor version 0.9*) intégrant, sur une même fenêtre de visualisation 3D, l'humérus pré-fracturaire prédit, la scapula et les fragments fracturés segmentés précédemment (Figure 5A). À l'aide de commandes clavier et d'une interface de visualisation 3D, chaque fragment était réduit en position anatomique sur l'humérus pré-fracturaire (Figure 5B, Figure 5C).

Figure 5. Réduction informatisée des fragments osseux fracturés



5A. Le maillage 3D de la fracture (violet, jaune, rouge, vert et bleu) est superposé sur l'humérus proximal pré-fracturaire prédit (gris). Les fragments ne sont pas réduits à ce stade.

5B. Chaque fragment est réduit manuellement via le logiciel Reductor. Ici la tête fracturée (en violet) est réduite en se basant sur l'humérus pré-fracturaire (gris). La manœuvre est répétée fragment par fragment dans le but d'obtenir la réduction la plus anatomique possible.

5C. A la fin de cette étape, la fracture est réduite. Le tubercule majeur est en vert dans sa partie antérieure et en bleu dans sa partie postérieure, le tubercule mineur en jaune et la gouttière en rouge. L'anatomie de l'humérus proximal pré-fracturaire est restituée.

Mesures informatisées des déplacements

La réduction des fragments sur l'humérus proximal pré-fracturaire permettait de mesurer en trois dimensions les déplacements en translation et en rotation de chaque fragment.

Nous avons défini 3 plans de référence (axial, sagittal et coronal), basés sur l'humérus pré-fracturaire repositionné en face de la scapula. L'intersection de ces 3 plans forme le centre du repère O , correspondant au centre de la tête de l'humérus pré-fracturaire (centre de la sphère comprenant la tête humérale).

Le déplacement permettant de réduire chaque fragment était enregistré sous la forme d'une matrice de transformation linéaire T (matrice 4×4). Cette matrice était ensuite décomposée en deux composantes : Translation et Rotation.

Analyse de la translation

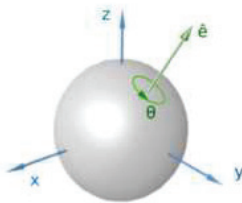
Nous avons mesuré le déplacement de chaque fragment P de manière indépendante. Le déplacement était fonction du barycentre du fragment avant réduction G_P et après réduction G_R . Ces 2 points forment un vecteur tridimensionnel $\overrightarrow{(G_P G_R)} = \overrightarrow{Trans(P)}$. Ce vecteur était ensuite projeté sur chacun des 3 plans de référence pour obtenir une mesure des translations dans les plans axial, coronal et sagittal.

La mesure de la translation globale tridimensionnelle (distance dans l'espace 3D entre le centre du fragment avant et après réduction) était aussi réalisée. La translation était mesurée en millimètres et correspondait à la norme du vecteur $\|\overrightarrow{Trans(P)}\|$.

Analyse de la rotation

Nous avons ensuite mesuré en 3 dimensions la rotation de chacun des fragments, définie par un axe de rotation (dont le vecteur unitaire était déterminé d'après la matrice de transformation) et un angle de rotation (Figure 6). L'axe et l'angle de rotation étaient ensuite projetés dans les 3 plans (axial (Oxy), coronal (Oyz) et sagittal (Oxz)) pour déterminer la rotation en deux dimensions.

Figure 6. Rotation dans un espace 3D selon Euler



L'espace tridimensionnel est représenté par les 3 axes Ox , Oy et Oz . L'axe de rotation est ici représenté en vert par le vecteur unitaire \hat{e} . La rotation de la sphère se fait autour de cet axe avec un angle θ .

Évaluation des mesures manuelles

Analyse inter-observateurs

Dans un premier temps, nous avons étudié la reproductibilité des 3 observateurs sur leur capacité à évaluer les déplacements fracturaires et à classifier les fractures de l'humérus proximal selon la classification de Neer.

Précision des observateurs

Nous avons également comparé les mesures des 3 observateurs à celle du logiciel. Pour ceci, nous avons considéré la méthode informatisée comme la méthode de référence et avons observé le nombre de cas dans lesquels les observateurs étaient en accord avec cette mesure informatisée.

Pour exemple, si le déplacement d'une tubérosité était estimé entre 0 et 4,9mm par un observateur et que la mesure informatisée de la translation tridimensionnelle de cette tubérosité était de 2,7mm, nous avons considéré la mesure manuelle comme exacte. Autrement, elle était considérée comme inexacte.

Analyse statistique

Les variables continues sont exprimées par leur moyenne (\pm écart-type, minimum, maximum) et les variables discrètes par leurs fréquences absolues et relatives (%). Les coefficients kappa de Cohen (κ) (59) et de Fleiss (60,61) étaient calculés pour analyser la corrélation inter-observateurs. Les valeurs des coefficients κ étaient interprétées selon les critères de Landis et Koch (62) (0.00 – 0.20 : accord très faible, 0.21 – 0.40 : accord faible, 0.41 – 0.60 : accord modéré, 0,61 – 0,80 : accord fort, 0,81 – 1,00 : accord presque parfait). L'accord unanime était défini comme l'accord parfait entre les 3 observateurs. Le test t de Student pour données appariées était utilisé pour comparer les translations planaires et tridimensionnelles. Le seuil de significativité était fixé à 0,05. L'analyse statistique a été réalisée avec EasyMedStat (www.easymedstat.com; France).

Résultats

Description des fractures

Nous avons observé une fracture du col chirurgical dans 90% des cas. La partie antérieure du tubercule majeur (à moins de 10mm de la gouttière bicipitale) était fracturée dans 73% des cas et la partie postérieure dans 91% des cas. Le tubercule mineur était moins souvent atteint que le tubercule majeur (43% de fractures), et la gouttière bicipitale était rarement fracturée (15%).

Après analyse collégiale par les 3 observateurs, les fractures ont été classées 1-part (n=28), 2-parts (n=25), 3-parts (n=20) et 4-parts (n=7).

Concordance inter-observateurs

Traits de fracture

L'analyse des radiographies et scanners 2D et 3D montrait une excellente concordance pour l'existence d'un trait de fracture du col chirurgical où nous étions unanimement d'accord dans 95% des cas. Cependant, déterminer s'il existait un trait sur le tubercule majeur et le localiser à sa partie antérieure ou postérieure amenait à un accord faible (Tableau 2).

Tableau 2. Corrélations inter-observateurs sur l'existence d'un trait de fracture

	Chirurgien vs Interne (κ)	Interne vs Radiologue (κ)	Radiologue vs Chirurgien (κ)	Accord unanime (%)
Fracture du col chirurgical	0,88	0,80	0,80	95%
Fracture TM1	0,30	0,22	0,27	50%
Fracture TM2	0,22	0,37	0,42	78%
Fracture Tubercule mineur	0,35	0,63	0,58	64%
Fracture Gouttière Bicipitale	0,37	0,40	0,24	70%

TM1 : Partie du tubercule majeur au contact de la gouttière bicipitale, TM2 : partie du tubercule majeur au-delà du TM1. En vert accord fort ou presque parfait. En orange : accord modéré. En rouge : accord faible.

Déplacements

L'analyse du déplacement des différents fragments montrait un accord inter-observateurs très faible à modéré avec des κ entre 0.08 et 0.44 (Tableau 3). Le déplacement de la partie antérieure du tubercule majeur n'a jamais permis d'accord unanime.

Tableau 3. Corrélation inter-observateurs sur le déplacement des fragments

	Chirurgien vs Interne (κ)	Interne vs Radiologue (κ)	Radiologue vs Chirurgien (κ)	Accord unanime (%)
Déplacement col chirurgical	0,41	0,41	0,44	39%
Déplacement TM1	0,14	0,08	0,22	0%
Déplacement TM2	0,31	0,38	0,43	39%
Déplacement du Tubercule mineur	0,41	0,39	0,39	51%

TM1 : Partie du tubercule majeur au contact de la gouttière bicipitale, TM2 : partie du tubercule majeur au-delà du TM1. En vert : accord fort ou presque parfait. En orange : accord modéré. En rouge : accord faible ou très faible.

Classification de Neer

La corrélation inter-observateurs de la classification de Neer était faible à modérée avec des valeurs entre 0,37 et 0,56 (Tableau 4). Nous n'étions d'accord de manière unanime que dans 41% des cas. Notre concordance (κ de Fleiss) était la plus faible pour les fractures 2-parts et 3-parts avec respectivement 0,33 et 0,36, et plus élevée pour les fractures 1-part (0,65) et 4-parts (0,57).

Tableau 4. Corrélation inter-observateurs sur la classification de Neer

	Chirurgien vs Interne (κ)	Interne vs Radiologue (κ)	Radiologue vs Chirurgien (κ)	Accord unanime (%)
Classification de Neer	0,47	0,37	0,56	41%

En orange : accord modéré. En rouge : accord faible.

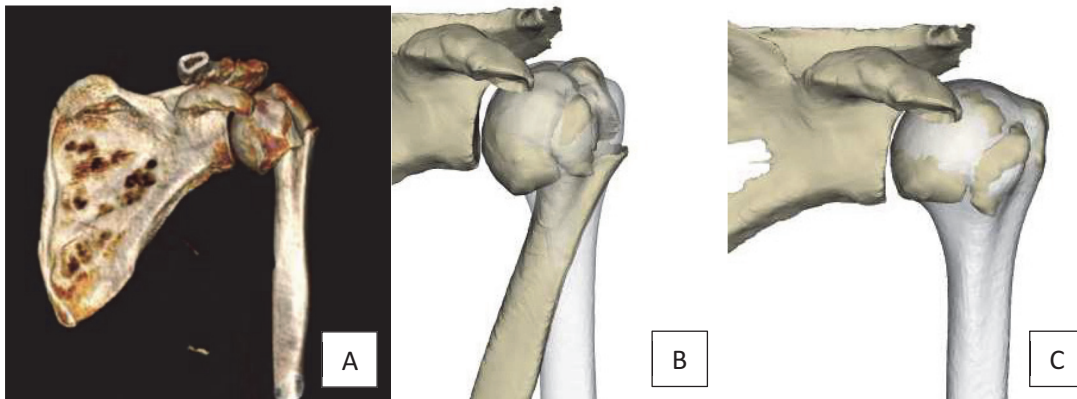
Mesures informatisées des déplacements

Dans 3 cas, la prédiction de l'humérus pré-fracturaire à l'aide de la méthode statistique de forme a échoué, le logiciel n'étant pas en mesure de générer un humérus à partir de la diaphyse saine. Ces 3 dossiers n'ont pas pu être analysés. L'analyse suivante porte donc sur 77 fractures.

Rotation coronale de la tête humérale (varus/valgus)

Soixante-neuf fractures concernaient le col chirurgical de l'humérus. L'utilisation du logiciel *Reductor*[™] nous a permis de mesurer la rotation dans le plan coronal de la tête humérale, que l'on définit en varus et valgus (Figure 7). Nous avons observé 39% de fractures déplacées en valgus de 5° ou plus, 45% de fractures en varus de 5° ou plus et 16% de fractures dont la rotation était de moins de 5°. Dans 8% des cas, les déplacements étaient supérieurs au critère utilisé dans la classification de Neer ($\geq 45^\circ$). La majorité (37/69) des déplacements était mesurée entre 10 et 40° (Figure 8)

Figure 7. Exemple de rotation dans le plan coronal (varus).

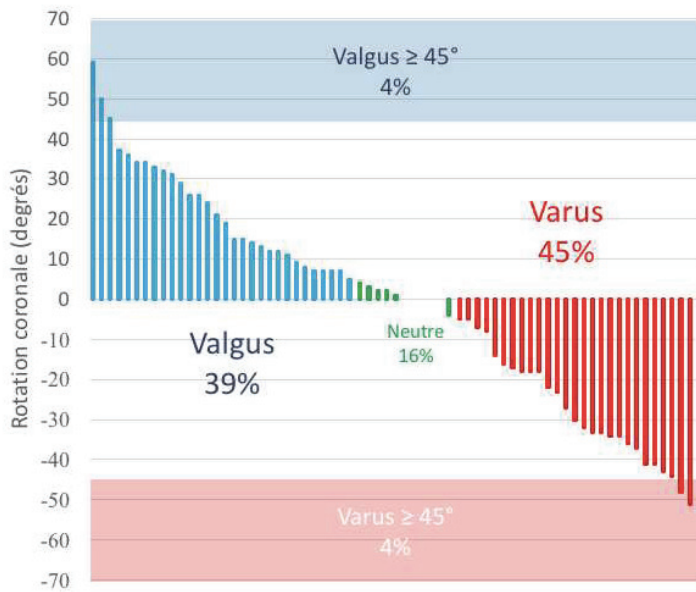


7A. Fracture du col chirurgical (scanner 3D).

7B. En blanc, l'humérus proximal pré-fracturaire est positionné en face de la glène. En beige, l'humérus fracturé avec la diaphyse déplacée en adduction et la tête déplacée en varus.

7C. La fracture est réduite sur l'humérus pré-morbide, le logiciel calcule un varus de 33°.

Figure 8. Mesures informatisées de la rotation de la tête humérale dans le plan coronal



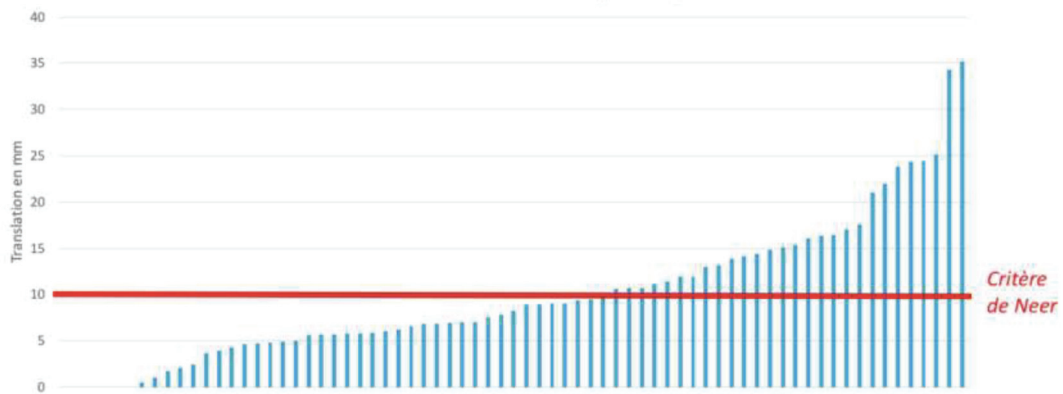
Chaque fracture est représentée par une colonne verticale.

Translation des tubérosités

Le tubercule majeur était fracturé dans 70 cas sur 77. Le déplacement était minime ($< 5\text{mm}$) ou inférieur à 10mm dans 61% de cas. Les déplacements de plus de 10mm et de plus de 15mm représentaient respectivement 18% et 21% des cas (Figure 9). Le tubercule mineur était fracturé dans 34 cas. Le déplacement était inférieur au critère de Neer dans 45% des cas, mais pouvait dépasser les 15mm dans 1/3 des cas (Figure 10).

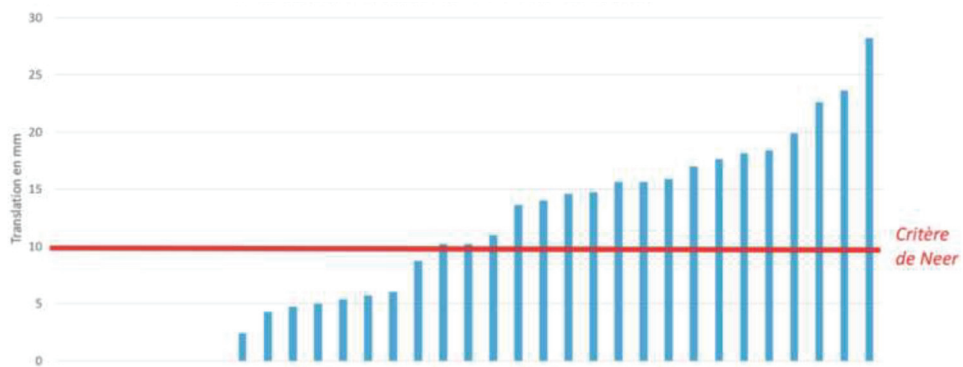
Ces déplacements correspondaient aux translations dans l'espace 3D (Figure 11 et Figure 11). La mesure planaire du déplacement réalisée après projection sur un plan 2D était corrélée dans chaque plan à la mesure 3D. Cependant elle sous-estimait le déplacement de $-2,1\text{mm}$ dans le plan coronal, de $-2,6\text{mm}$ dans le plan sagittal et de -1mm dans le plan axial de manière significative ($p < 0,001$).

Figure 9. Mesures informatisées de la translation du tubercule majeur



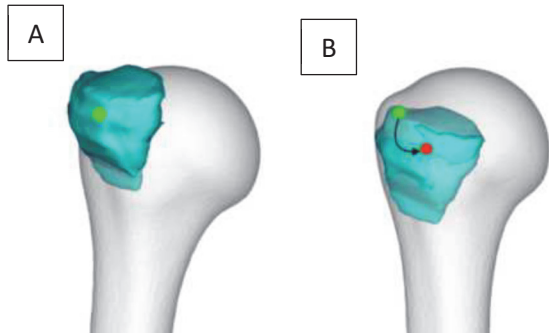
Chaque fracture est représentée par une colonne verticale. La ligne rouge représente le critère de Neer de 10mm de translation.

Figure 10. Mesures informatisées de la translation du tubercule mineur



Chaque fracture est représentée par une colonne verticale. La ligne rouge représente le critère de Neer de 10mm de translation.

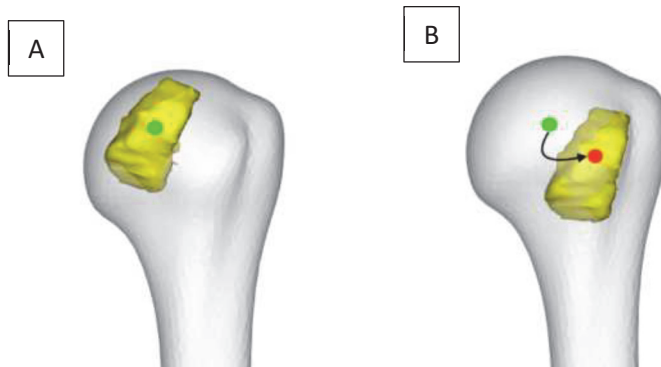
Figure 11. Réduction du tubercule majeur dans l'espace 3D



11A. Tubercule majeur avant réduction. En vert le barycentre du fragment avant réduction.

11B. Tubercule majeur après réduction. En rouge le barycentre du fragment après réduction. Le déplacement 3D est représenté par la flèche noir et associe translation et rotation.

Figure 12. Réduction du tubercule mineur dans l'espace 3D



12A. Tubercule mineur avant réduction. En vert le barycentre du fragment avant réduction.

12B. Tubercule mineur après réduction. En rouge le barycentre du fragment après réduction. Le déplacement 3D est représenté par la flèche noir.

Précision des mesures manuelles

En considérant la mesure du logiciel comme la référence, les 3 observateurs ayant participé à cette étude ont correctement décrit le degré de varus/valgus dans 35% des cas. Concernant le tubercule majeur (n=70), et toujours en prenant comme référence le logiciel, la précision des observateurs à 5mm près était de 61% des cas. Pour le tubercule mineur (n=34), cette précision était de 49% (Tableau 5).

Tableau 5. Accord des mesures manuelles avec les mesures informatisées

	Observateur 1	Observateur 2	Observateur 3	Moyenne des 3 observateurs
Rotation dans le plan coronal				
Varus $\geq 45^\circ$ (n=3)	33%	100%	67%	67%
Varus $< 45^\circ$ (n=29)	14%	38%	31%	28%
Valgus $< 45^\circ$ (n=23)	17%	48%	39%	35%
Valgus $\geq 45^\circ$ (n=3)	100%	67%	67%	78%
Total (n=58)	21%	47%	38%	35%
Translation du Tubercule Majeur (TM2)				
0-4,9 mm (n=18)	72%	61%	83%	72%
5-9,9mm (n=24)	42%	46%	42%	43%
≥ 10 mm (n=28)	68%	75%	68%	70%
Total (n=70)	60%	61%	63%	61%
Translation du Tubercule Mineur				
0-4,9 mm (n=11)	64%	73%	100%	79%
5-9,9mm (n=5)	0%	60%	0%	20%
≥ 10 mm (n=18)	56%	17%	44%	39%
Total (n=34)	50%	41%	56%	49%

Discussion

Notre analyse des fractures de l'humérus proximal est peu reproductible en accord avec la littérature (8,13–17,19,20,24,49). Notre concordance pour la classification de Neer allait de 0,37 à 0,56, comme retrouvé dans la littérature (Tableau 6). Même avec l'ensemble des examens à notre disposition et notamment le scanner en 3D, celle-ci est restée faible comme dans les études de Bruinsma, Berkes et Brunner (18,23,26). Seul Brunner retrouvait une amélioration substantielle de la reproductibilité grâce à l'apport du scanner 3D, celle-ci passant de 0,48 en 2D à 0,80 après lecture du scanner 3D (26). Les concordances élevées observées par ce dernier auteur n'ont cependant jamais été retrouvées dans la littérature chez d'autres auteurs. Notre reproductibilité était encore plus faible lorsque l'on s'intéressait au déplacement indépendant de chacun des fragments. Cette faible concordance inter-observateurs dans l'analyse des fractures selon Neer pose un double problème : les indications sont variables d'un chirurgien à l'autre et il ne peut y avoir de consensus car il n'y a pas de comparaison possible des nombreuses séries thérapeutiques publiées dans la littérature.

Tableau 6. Concordance inter-observateurs de la classification de Neer

Auteurs	Année	Concordance (κ)
Kristiansen ⁽⁸⁾	1987	0,30
Sjödén ⁽¹⁹⁾	1997	0,42
Shrader ⁽¹⁴⁾	2005	0,45
Mora ⁽²⁰⁾	2006	0,27
Bahrs ⁽³²⁾	2008	0,36
Brorson ⁽¹³⁾	2009	0,19-0,30
Foroohar ⁽¹⁵⁾	2011	0,14
Majed ⁽⁴⁹⁾	2011	0,33
Handoll ⁽¹⁶⁾	2016	0,29
Iordens ⁽²⁴⁾	2016	0,29

C'est précisément le manque de reproductibilité de l'analyse et la complexité des déplacements qui se produisent en 3 dimensions nous ont poussés à développer une approche informatisée et standardisée de mesure. Nous avons donc développé un logiciel spécifique (*Reductor™*) pour cette étude qui nous a permis de mesurer en 3 dimensions les déplacements en translation et rotation des 4 fragments fracturés.

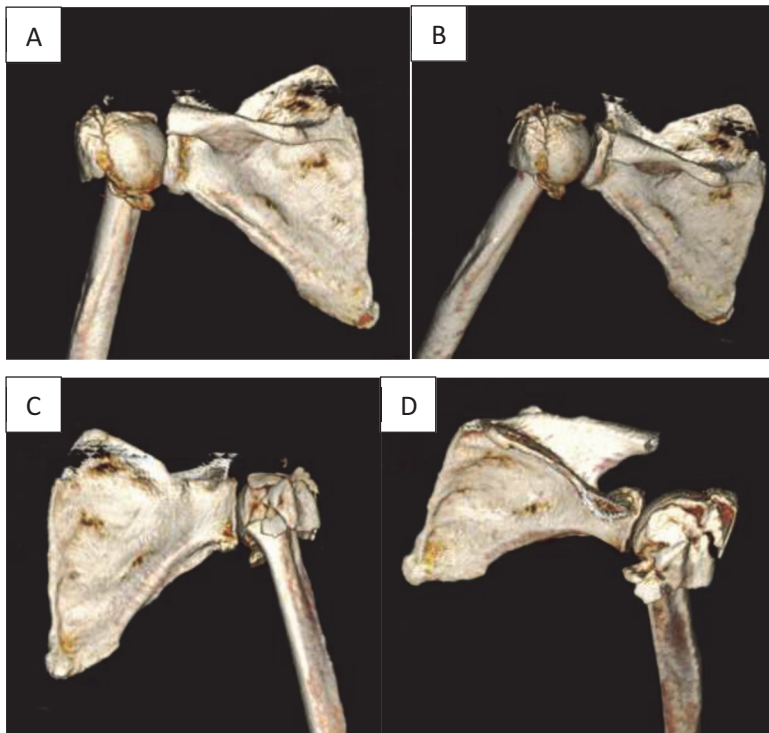
Un modèle statistique de forme avait déjà été utilisé dans d'autres études et pour d'autres articulations que l'épaule avec notamment le poignet (63) et le fémur diaphysaire ou proximal (64,65). Ce modèle statistique était utilisé à des fins de réduction et d'analyse d'ostéosynthèse pour guider les chirurgiens mais ne permettait pas l'analyse et la mesure du déplacement. Une seule étude (66) s'est intéressée à la réduction informatisée des fractures de l'humérus proximal. Les auteurs ont utilisé une méthode semi-automatique permettant de reconstruire 12 humeri en alignant bord à bord les fragments fracturaires à l'aide d'un algorithme. Nous pensons que cette approche est limitée dans le cas des fractures de l'humérus proximal par la comminution très fréquente de ces fractures ostéoporotiques (3,4). Ainsi, comme nous l'avons observé dans notre travail, l'ensemble des fragments segmentés ne permet pas de reconstruire l'humérus dans son intégralité. Il persiste des espaces entre les différents fragments, correspondant aux zones de comminution ou aux fragments de petite taille non segmentés. Ainsi Vlachopoulos et al.(66) ont exclu les fragments dont la surface était inférieure à 195mm².

Notre méthode reposant sur l'utilisation d'un humérus pré-fracturaire est donc une méthode originale pour l'étude du déplacement des fractures, puisqu'à notre connaissance il n'a jamais été publié – pour aucun os – de travail similaire. La prédiction de cet humérus pré-morbide – proposée par Poltaretskyi et al. (58) – présente l'avantage de ne pas nécessiter la réalisation d'un scanner controlatéral (67–69).

Les résultats des mesures informatisées que nous avons obtenus nous ont permis de mieux appréhender les déplacements dans l'espace 3D de chacun des fragments. Concernant la tête humérale, le varus ou valgus de la tête n'était supérieur au critère de Neer de 45° (6) que dans 8% des cas. Pourtant, les 3 observateurs avaient estimé cette rotation supérieure à 45° dans 42% à 75% des cas. Le critère de 45° de Neer ne semble pas discriminer de manière satisfaisante les fractures et pourrait être rediscuté comme l'a proposé Lill (70). En outre, le caractère tridimensionnel des déplacements rend l'analyse manuelle difficile. Nous avons observé que la rotation coronale s'accompagne de rotations sagittale (flexion-extension) et axiale (antéversion-rétroversion), qui modifient l'appréciation du varus/valgus selon le point de vue avec lequel est observé la reconstruction 3D (Figure 13).

Concernant la translation des tubérosités, nos résultats retrouvent un nombre important de fractures déplacées au-delà du critère de Neer de 10mm (6) puisque 39% des tubercules majeurs fracturés et 47% des tubercules mineurs fracturés étaient déplacés de plus de 10mm. Ce critère de 10mm semble donc bien discriminer les fractures en classes d'effectifs comparables. Cependant, nous avons ici utilisé une mesure 3D et non une projection planaire 2D comme dans le cas de la rotation de la tête humérale. En effet, les projections 2D des translations étaient systématiquement sous-estimées de 1 à 2,6mm en comparaison des translations 3D.

Figure 13. Exemple de fracture déplacée en varus



13A. Vue antérieure ; 13B. Vue antérieure oblique ; 13C. Vue postérieure oblique ; 13D. Vue postérieure. On observe que selon l'orientation de l'humérus dans l'espace 3D, l'importance du déplacement en varus semble différente.

Notre méthode présente plusieurs limites. Lors de la première étape de segmentation, certains fragments de petite taille n'ont pas été segmentés pour se limiter aux 4 fragments habituellement décrits dans les FHP. Ceci a pu impacter la qualité de la réduction lors de l'étape suivante et donc biaiser nos mesures. Il existe aussi des erreurs de prédiction de l'humérus proximal pré-fracturaire à partir du modèle statistique de forme utilisé. Elles ont été estimées par Poltaretskyi et al. (58) et sont pour la rétroversion, l'inclinaison, la hauteur, le rayon de courbure, l'offset postérieur et l'offset médial respectivement de $3.8^\circ (\pm 2.9^\circ)$, $3.9^\circ (\pm 3.4^\circ)$, $2.4 \text{ mm} (\pm 1.9 \text{ mm})$, $1.3 \text{ mm} (\pm 0.9 \text{ mm})$, $0.8 \text{ mm} (\pm 0.5 \text{ mm})$ and $0.9 \text{ mm} (\pm 0.6 \text{ mm})$. Cependant les erreurs de prédiction semblent inférieures pour certains paramètres à celles estimées lors de l'utilisation de l'humérus controlatéral (71). Une autre source d'erreur possible est le positionnement de l'humérus pré-fracturaire prédit sur une appréciation subjective de la restauration de l'arche scapulo-humérale et de l'interligne gléno-huméral. Enfin, l'analyse était chronophage puisqu'il fallait pour chaque fracture environ une heure de travail pour le chirurgien et trente minutes pour l'informaticien pour permettre de réaliser la mesure. Un nombre important d'étapes, si ce n'est toute la procédure est donc à automatiser pour permettre son

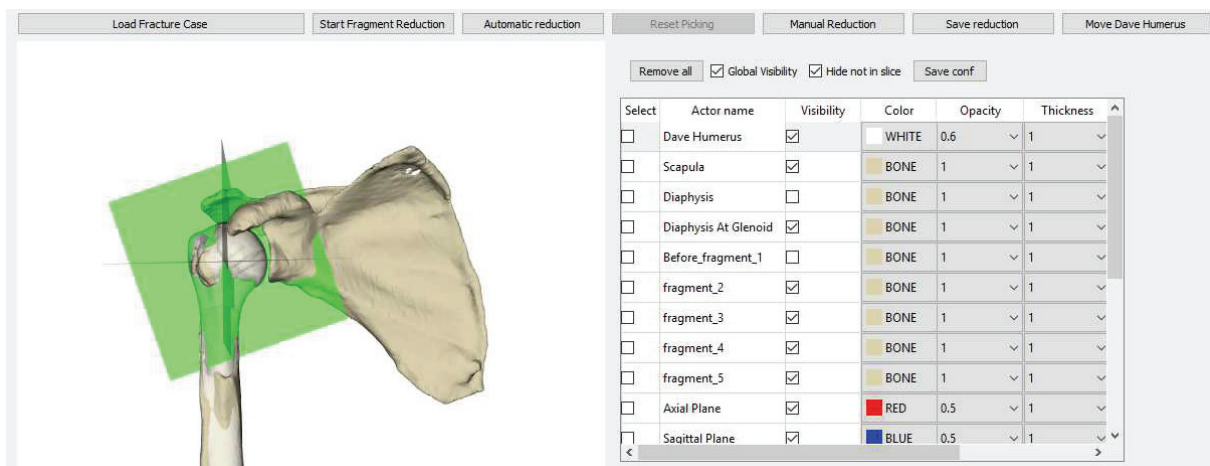
utilisation en pratique courante. D'autres sujets doivent également faire l'objet de recherches comme l'analyse du déplacement de la diaphyse et la généralisabilité de la méthode aux fractures-luxations.

Notre travail présente cependant plusieurs forces. Les déplacements ont pour la première fois été mesurés en 3 dimensions, avec une méthode définie de manière mathématique et précise. Nous avons inclus un large spectre de fractures, allant de fractures non déplacées à des fractures très déplacées, ce qui nous a permis de développer le logiciel pas à pas en étalonnant les mesures sur les cas peu ou pas déplacés. Enfin, nous avons réalisé ce travail en collaboration avec des ingénieurs de la société IMASCAP, spécialisés dans le domaine de l'imagerie 3D de l'épaule et de son application à la chirurgie (72,73).

Conclusions

Les résultats de notre étude pilote confirment la faible reproductibilité de la classification en 4 fragments des fractures de l'humérus proximal selon Neer et montrent qu'il est possible de mesurer le déplacement tridimensionnel des fragments osseux fracturés grâce à une méthode de mesure informatisée originale (preuve de concept). Le développement d'un logiciel spécifique pour cette étude (Réductor™) (Figure 14) ouvre des perspectives de diagnostic automatisé des fractures de l'humérus proximal facilitant la décision thérapeutique.

Figure 14. Capture d'écran du logiciel *Reductor*



Le logiciel *Reductor* dans sa version V0.9, avec à gauche, l'humérus pré-morbide en blanc et l'humérus réduit couleur beige en 3D. À droite, la fenêtre permettant de sélectionner les différents plans et les différents fragments.

Références

1. Baron JA, Barrett JA, Karagas MR. The epidemiology of peripheral fractures. *Bone*. mars 1996;18(3):S209-13.
2. Lippuner K, Popp AW, Schwab P, Gitlin M, Schaufler T, Senn C, et al. Fracture hospitalizations between years 2000 and 2007 in Switzerland: a trend analysis. *Osteoporos Int*. sept 2011;22(9):2487-97.
3. Roux A, Decroocq L, El Batti S, Bonneville N, Moineau G, Trojani C, et al. Epidemiology of proximal humerus fractures managed in a trauma center. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. oct 2012;98(6):715-9.
4. Fjalestad T, Falch JA, Strømsøe K. Proximal humeral fractures and relation to osteoporosis: a cohort study of 49 hospitalized patients with 50 fractures. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*. oct 2009;19(7):461-6.
5. Codman EA. The shoulder: rupture of the supraspinatus tendon and other lesions in or about the subacromial bursa. Boston: Thomas Todd Co., 1934.
6. Neer. Displaced proximal humeral fractures. I. Classification and evaluation. *JBJS*. 1970;
7. Neer. Displaced Proximal Humeral Fractures-PART II. *JBJS*. 1970;
8. Kristiansen B, Andersen ULS, Olsen CA, Varmarken J-E. The Neer classification of fractures of the proximal humerus: An assessment of interobserver variation. *Skeletal Radiol*. sept 1988;17(6):420-2.
9. Ohl X, Bonneville N, Gallinet D, Ramdane N, Valenti P, Decroocq L, et al. How the greater tuberosity affects clinical outcomes after reverse shoulder arthroplasty for proximal humeral fractures. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. déc 2018;27(12):2139-44.
10. Boileau P, Alta TD, Decroocq L, Sirveaux F, Clavert P, Favard L, et al. Reverse shoulder arthroplasty for acute fractures in the elderly: is it worth reattaching the tuberosities? *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. mars 2019;28(3):437-44.
11. Rangan A, Handoll H, Brealey S, Jefferson L, Keding A, Martin BC, et al. Surgical vs Nonsurgical Treatment of Adults With Displaced Fractures of the Proximal Humerus: The PROFHER Randomized Clinical Trial. *JAMA*. 10 mars 2015;313(10):1037.
12. Sumrein BO, Mattila VM, Lepola V, Laitinen MK, Launonen AP, Paloneva J, et al. Intraobserver and interobserver reliability of recategorized Neer classification in differentiating 2-part surgical neck fractures from multi-fragmented proximal humeral fractures in 116 patients. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. oct 2018;27(10):1756-61.
13. Brorson S, Bagger J, Sylvest A, Hrobjartsson A. Diagnosing displaced four-part fractures of the proximal humerus: a review of observer studies. *International Orthopaedics (SICOT)*. avr 2009;33(2):323-7.
14. Shrader MW, Sanchez-Sotelo J, Sperling JW, Rowland CM, Cofield RH. Understanding

proximal humerus fractures: Image analysis, classification, and treatment. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. sept 2005;14(5):497-505.

15. Foroohar A, Tosti R, Richmond JM, Gaughan JP, Ilyas AM. Classification and treatment of proximal humerus fractures: inter-observer reliability and agreement across imaging modalities and experience. *J Orthop Surg Res*. 2011;6(1):38.

16. Handoll HHG, Brealey SD, Jefferson L, Keding A, Brooksbank AJ, Johnstone AJ, et al. Defining the fracture population in a pragmatic multicentre randomised controlled trial: PROFHER and the Neer classification of proximal humeral fractures. *Bone & Joint Research*. oct 2016;5(10):481-9.

17. Bahrs C, Schmal H, Lingenfelter E, Rolauffs B, Weise K, Dietz K, et al. Inter- and intraobserver reliability of the MTM-classification for proximal humeral fractures: A prospective study. *BMC Musculoskelet Disord*. déc 2008;9(1):21.

18. Bruinsma WE, Guitton TG, Warner JJ, Ring D. Interobserver Reliability of Classification and Characterization of Proximal Humeral Fractures: A Comparison of Two and Three-Dimensional CT. *The Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*. sept 2013;95(17):1600-4.

19. Sjöden GOJ, Movin T, Güntner P, Aspelin P, Ahrengart L, Ersmark H, et al. Poor reproducibility of classification of proximal humeral fractures: Additional CT of minor value. *Acta Orthopaedica Scandinavica*. janv 1997;68(3):239-42.

20. Mora Guix JM, Gonzalez AS, Brugalla JV, Carril EC, Baños FG. Proposed Protocol for Reading Images of Humeral Head Fractures: *Clinical Orthopaedics and Related Research*. juill 2006;448:225-33.

21. Majed A, Macleod I, Bull AMJ, Zyto K, Resch H, Hertel R, et al. Proximal humeral fracture classification systems revisited. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. oct 2011;20(7):1125-32.

22. Brunner A, Honigmann P, Treumann T, Babst R. The impact of stereo-visualisation of three-dimensional CT datasets on the inter- and intraobserver reliability of the AO/OTA and Neer classifications in the assessment of fractures of the proximal humerus. *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume*. juin 2009;91-B(6):766-71.

23. Berkes MB, Dines JS, Little MTM, Garner MR, Shifflett GD, Lazaro LE, et al. The Impact of Three-Dimensional CT Imaging on Intraobserver and Interobserver Reliability of Proximal Humeral Fracture Classifications and Treatment Recommendations: *The Journal of Bone and Joint Surgery*. août 2014;96(15):1281-6.

24. Iordens GIT, Mahabier KC, Buisman FE, Schep NWL, Muradin GSR, Beenen LFM, et al. The reliability and reproducibility of the Hertel classification for comminuted proximal humeral fractures compared with the Neer classification. *Journal of Orthopaedic Science*. sept 2016;21(5):596-602.

25. Neer CS. Four-segment classification of proximal humeral fractures: Purpose and reliable use. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. juill 2002;11(4):389-400.

26. Brunner A, Honigmann P, Treumann T, Babst R. The impact of stereo-visualisation of three-dimensional CT datasets on the inter- and intraobserver reliability of the AO/OTA and Neer classifications in the assessment of fractures of the proximal humerus. *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume*. juin 2009;91-B(6):766-71.
27. Gracitelli MEC, Dotta TAG, Assunção JH, Malavolta EA, Andrade-Silva FB, Kojima KE, et al. Intraobserver and interobserver agreement in the classification and treatment of proximal humeral fractures. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. juin 2017;26(6):1097-102.
28. Chivot M, Lami D, Bizzozero P, Galland A, Argenson J-N. Three- and four-part displaced proximal humeral fractures in patients older than 70 years: reverse shoulder arthroplasty or nonsurgical treatment? *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. févr 2019;28(2):252-9.
29. Alberio RL, Del Re M, Grassi FA. Minimally Invasive Plate Osteosynthesis for Proximal Humerus Fractures: A Retrospective Study Describing Principles and Advantages of the Technique. *Advances in Orthopedics*. 3 juin 2018;2018:1-10.
30. Chen AC-Y, Chiu C-H, Hsu K-Y, Chan Y-S. Influence of age, gender, and radiographic features on the deltoid splitting approach for surgical osteosynthesis in displaced proximal humerus fractures: a comparison study. *BMC Musculoskeletal Disorders* [Internet]. déc 2017 [cité 8 sept 2019];18(1). Disponible sur: <https://bmcmusculoskeletaldisord.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12891-017-1840-6>
31. D'Ambrosi R, Palumbo F, Barbato A, Facchini RM. A prospective study for the treatment of proximal humeral fractures with the Galaxy Fixation System. *MUSCULOSKELETAL SURGERY*. avr 2017;101(1):11-7.
32. Bahrs C, Lingenfelter E, Fischer F, Walters EM, Schnabel M. Mechanism of injury and morphology of the greater tuberosity fracture. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. mars 2006;15(2):140-7.
33. Gönç U, Atabek M, Teker K, Tanrıöver A. Minimally invasive plate osteosynthesis with PHILOS plate for proximal humerus fractures. *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica*. janv 2017;51(1):17-22.
34. Jia X, Chen Y, Qiang M, Zhang K, Li H, Jiang Y, et al. Postoperative Evaluation of Reduction Loss in Proximal Humeral Fractures: A Comparison of Plain Radiographs and Computed Tomography: Evaluation of Reduction Loss in PHFS. *Orthopaedic Surgery*. mai 2017;9(2):167-73.
35. Lowry V, Bureau NJ, Desmeules F, Roy J-S, Rouleau DM. Acute proximal humeral fractures in adults. *Journal of Hand Therapy*. avr 2017;30(2):158-66.
36. Mazzucchelli RA, Jenny K, Zdravkovic V, Erhardt JB, Jost B, Spross C. The influence of local bone quality on fracture pattern in proximal humerus fractures. *Injury*. févr 2018;49(2):359-63.
37. Myeroff CM, Anderson JP, Sveom DS, Switzer JA. Predictors of Mortality in Elder Patients

With Proximal Humeral Fracture. *Geriatric Orthopaedic Surgery & Rehabilitation*. janv 2018;9:215145851772815.

38. Panzica M, Brandes J, Schmidem U, Karch A, Hawi N, Krettek C, et al. Fatty degeneration of the deltoid muscle associated with displaced proximal humerus fractures: A computed tomography study in 100 consecutive patients. *Technology and Health Care*. 23 oct 2017;25(5):959-67.

39. Papakonstantinou MK, Hart MJ, Farrugia R, Gosling C, Kamali Moaveni A, van Bavel D, et al. Prevalence of non-union and delayed union in proximal humeral fractures: Prevalence of non-union and delayed union. *ANZ Journal of Surgery*. janv 2017;87(1-2):55-9.

40. Shin YH, Lee YH, Choi HS, Kim MB, Pyo SH, Baek GH. A modified deltoid splitting approach with axillary nerve bundle mobilization for proximal humeral fracture fixation. *Injury*. nov 2017;48(11):2569-74.

41. Spross C, Zeledon R, Zdravkovic V, Jost B. How bone quality may influence intraoperative and early postoperative problems after angular stable open reduction–internal fixation of proximal humeral fractures. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. sept 2017;26(9):1566-72.

42. Wang J-Q, Jiang B-J, Guo W-J, Zhao Y-M. Serial changes in the head-shaft angle of proximal humeral fractures treated by placing locking plates: a retrospective study. *BMC Musculoskeletal Disorders* [Internet]. déc 2018 [cité 8 sept 2019];19(1). Disponible sur: <https://bmcmusculoskeletdisord.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12891-018-2349-3>

43. Müller M, Nazarian S, Koch P. Classification AO des fractures : les os longs. 1987. (springer-verlag).

44. Edelson G, Kelly I, Vigder F, Reis ND. A three-dimensional classification for fractures of the proximal humerus. *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume*. avr 2004;86-B(3):413-25.

45. Hertel R, Hempfing A, Stiehler M, Leunig M. Predictors of humeral head ischemia after intracapsular fracture of the proximal humerus. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. juill 2004;13(4):427-33.

46. Duparc J, Massin P, Hutten D. Classification des fractures de l'extrémité supérieure de l'humérus. *Cahier d'enseignement de la SOFCOT Paris: Expansion Scientifique Française*. 1996;56:27-37.

47. Cuny C, Beau P, Irrazi M. La classification AST des fractures proximales de l'humérus. *Rev Chir Orthop*. 2003;Vol 89:151.

48. Sukthankar AV, Leonello DT, Hertel RW, Ding GS, Sandow MJ. A comprehensive classification of proximal humeral fractures: HGLS system. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. juill 2013;22(7):e1-6.

49. Majed A, Macleod I, Bull AMJ, Zyto K, Resch H, Hertel R, et al. Proximal humeral fracture classification systems revisited. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. oct 2011;20(7):1125-32.

50. Maier D, Jaeger M, Izadpanah K, Strohm PC, Suedkamp NP. Proximal Humeral Fracture

Treatment in Adults: The Journal of Bone & Joint Surgery. févr 2014;96(3):251-61.

51. Boileau P, Walch G, Trojani C. Sequelae of Fractures of the Proximal Humerus: Surgical Classification and Limits of Shoulder Arthroplasty. In: Shoulder Arthroplasty. 1999. p. 349-58. (springer-verlag).
52. Boileau P, Trojani C, Walch G, Krishnan SG, Romeo A, Sinnerton R. Shoulder arthroplasty for the treatment of the sequelae of fractures of the proximal humerus. Journal of Shoulder and Elbow Surgery. juill 2001;10(4):299-308.
53. Boileau P, Krishnan SG, Tinsi L, Walch G, Coste JS, Molé D. Tuberosity malposition and migration: Reasons for poor outcomes after hemiarthroplasty for displaced fractures of the proximal humerus. Journal of Shoulder and Elbow Surgery. sept 2002;11(5):401-12.
54. Gallinet D, Adam A, Gasse N, Rochet S, Obert L. Improvement in shoulder rotation in complex shoulder fractures treated by reverse shoulder arthroplasty. Journal of Shoulder and Elbow Surgery. janv 2013;22(1):38-44.
55. Formaini NT, Everding NG, Levy JC, Rosas S. Tuberosity healing after reverse shoulder arthroplasty for acute proximal humerus fractures: the “black and tan” technique. Journal of Shoulder and Elbow Surgery. nov 2015;24(11):e299-306.
56. Jain NP, Mannan SS, Dharmarajan R, Rangan A. Tuberosity healing after reverse shoulder arthroplasty for complex proximal humeral fractures in elderly patients—does it improve outcomes? A systematic review and meta-analysis. Journal of Shoulder and Elbow Surgery. mars 2019;28(3):e78-91.
57. Hasan AP, Phadnis J, Jaarsma RL, Bain GI. Fracture line morphology of complex proximal humeral fractures. Journal of Shoulder and Elbow Surgery. oct 2017;26(10):e300-8.
58. Poltaretskyi S, Chaoui J, Mayya M, Hamitouche C, Bercik MJ, Boileau P, et al. Prediction of the pre-morbid 3D anatomy of the proximal humerus based on statistical shape modelling. The Bone & Joint Journal. juill 2017;99-B(7):927-33.
59. Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. In: Educational and psychological measurement. 1960. p. 37-46.
60. Scott WA. Reliability of Content Analysis: 1955;5.
61. Fleiss J. Measuring nominal scale agreement among many raters. Psychological Bulletin. 1971;76(5):378-82.
62. Landis JR, Koch GG. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. Biometrics. mars 1977;33(1):159.
63. Gong RH, Stewart J, Abolmaesumi P. Reduction of multi-fragment fractures of the distal radius using atlas-based 2D/3D registration. In: Miga MI, Wong KH, éditeurs. Lake Buena Vista, FL; 2009 [cité 19 oct 2019]. p. 726137. Disponible sur: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.811638>

64. Moghari MH, Abolmaesumi P. Global registration of multiple bone fragments using statistical atlas models: Feasibility experiments. In: 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society [Internet]. Vancouver, BC: IEEE; 2008 [cité 18 oct 2019]. p. 5374-7. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4650429/>
65. Albrecht T, Vetter T. Automatic Fracture Reduction. In: Levine JA, Paulsen RR, Zhang Y, éditeurs. Mesh Processing in Medical Image Analysis 2012 [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2012 [cité 18 oct 2019]. p. 22-9. Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-33463-4_3
66. Vlachopoulos L, Székely G, Gerber C, Fürnstahl P. A scale-space curvature matching algorithm for the reconstruction of complex proximal humeral fractures. *Medical Image Analysis*. janv 2018;43:142-56.
67. Fürnstahl P, Székely G, Gerber C, Hodler J, Snedeker JG, Harders M. Computer assisted reconstruction of complex proximal humerus fractures for preoperative planning. *Medical Image Analysis*. avr 2012;16(3):704-20.
68. Okada T, Iwasaki Y, Koyama T, Sugano N, Yen-Wei Chen, Yonenobu K, et al. Computer-Assisted Preoperative Planning for Reduction of Proximal Femoral Fracture Using 3-D-CT Data. *IEEE Trans Biomed Eng*. mars 2009;56(3):749-59.
69. Bicknell RT, DeLude JA, Kedgley AE, Ferreira LM, Dunning CE, King GJW, et al. Early experience with computer-assisted shoulder hemiarthroplasty for fractures of the proximal humerus: Development of a novel technique and an in vitro comparison with traditional methods. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. mai 2007;16(3):S117-25.
70. Lill H, Voigt C. Proximal humeral fracture. *Z orthop Unfall*. mai 2010;353-60.
71. Vlachopoulos L, Dünner C, Gass T, Graf M, Goksel O, Gerber C, et al. Computer algorithms for three-dimensional measurement of humeral anatomy: analysis of 140 paired humeri. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. févr 2016;25(2):e38-48.
72. Boileau P, Gauci M-O, Wagner ER, Clowez G, Chaoui J, Chelli M, et al. The reverse shoulder arthroplasty angle: a new measurement of glenoid inclination for reverse shoulder arthroplasty. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. juill 2019;28(7):1281-90.
73. Boileau P, Cheval D, Gauci M-O, Holzer N, Chaoui J, Walch G. Automated Three-Dimensional Measurement of Glenoid Version and Inclination in Arthritic Shoulders: *The Journal of Bone and Joint Surgery*. janv 2018;100(1):57-65.

Serment D'Hippocrate



« **A**u moment d'être admise à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.

Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admise dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me sont confiés. Reçue à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonorée et méprisée si j'y manque ».

Résumé

Introduction. La classification de Neer des fractures de l'humérus proximal (FHP) en 4 fragments reste la plus utilisée en pratique chirurgicale, même si la reproductibilité inter-observateurs est faible. L'objectif de notre étude était de mettre au point une méthode informatisée originale et standardisée de mesure des déplacements dans l'espace des 4 fragments osseux fracturés : tête humérale, diaphyse, tubercule majeur et tubercule mineur.

Méthodes. Quatre-vingts FHP chez 79 patients pris en charge au CHU de Nice entre décembre 2017 et décembre 2018, pour lesquelles des radiographies et un scanner étaient disponibles, ont été incluses. Pour chaque fracture, nous avons segmenté manuellement la tête humérale et les tubérosités afin de modéliser en 3D l'humérus proximal fracturé. Un modèle statistique de forme permettait de prédire l'humérus pré-fracturaire à partir des 6cm proximaux de diaphyse non fracturée. L'analyse de la différence entre l'humérus pré-fracturaire prédit et les fragments segmentés permettait la mesure tridimensionnelle des déplacements en translation et en rotation. Trois observateurs (un chirurgien, un interne, un radiologue) ont aussi effectué des mesures manuelles à l'aide de radiographies et de scanner deux et trois dimensions.

Résultats. L'analyse inter-observateurs retrouvait 41% d'accord unanime pour la classification de Neer. Pour la rotation de la tête dans le plan coronal, on observait grâce au logiciel 39% de valgus, 45% de varus et 16% de rotation $<5^\circ$. Huit pour cent étaient considérées comme déplacées ($> 45^\circ$ de varus ou valgus) selon les critères de Neer. Le tubercule majeur était fracturé dans 70 cas et le tubercule mineur dans 34 cas. La mesure informatique retrouvait un déplacement de plus de 10mm dans 39% des fractures du tubercule majeur et dans 53% des fractures du tubercule mineur. En considérant le logiciel comme la mesure de référence, l'analyse des trois observateurs était exacte dans 35% des cas pour la tête humérale, et dans 61% et 49% pour le tubercule majeur et le tubercule mineur.

Conclusions. Les résultats de notre étude de faisabilité confirment la faible reproductibilité de la classification en 4 fragments des fractures de l'humérus proximal selon Neer et montrent qu'il est possible de mesurer le déplacement tridimensionnel des fragments osseux fracturés grâce à une méthode de mesure informatisée originale (preuve de concept).