

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG
FACULTÉ DE MÉDECINE, MAÏEUTIQUE ET SCIENCES DE LA SANTÉ

ANNÉE : 2023

N° : 25

THÈSE

PRÉSENTÉE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT

DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Diplôme d'État

Mention : D.E.S. de CHIRURGIE ORTHOPÉDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE

PAR

BALTASSAT Antoine, Robert, Charles

Né le 07 juillet 1994 à Ambilly

Création d'un modèle anatomique reproductible de terrible triade du coude in vitro

Président de thèse : Professeur Philippe CLAVERT

Directeur de thèse : Docteur Florent BALDAIRON

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG
FACULTÉ DE MÉDECINE, MAÏEUTIQUE ET SCIENCES DE LA SANTÉ

ANNÉE : 2023

N° : 25

THÈSE

PRÉSENTÉE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT

DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Diplôme d'État

Mention : D.E.S. de CHIRURGIE ORTHOPÉDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE

PAR

BALTASSAT Antoine, Robert, Charles

Né le 07 juillet 1994 à Ambilly

Création d'un modèle anatomique reproductible de terrible triade du coude in vitro

Président de thèse : Professeur Philippe CLAVERT

Directeur de thèse : Docteur Florent BALDAIRON

F1 - PROFESSEURS EMÉRITES

- de droit et de médecine (suite)
 - QUÉLIN Pierre (Géométrie et Biologie mathématiques)
 - ROUSSEL Jean-Luc (Physique et Biologie moléculaire)
- pour médecine (suite)
 - BOUJARD Jean Pierre (Service de Pédiatrie)
 - CHASTAGNER Daniel (Maladies Infectieuses et Parasitaires)
 - CHATEL Jean-Luc (Physiologie)
 - GRUDET Daniel (Physiologie Moléculaire)
 - LEMER Jean-François (Chirurgie orthopédique et de la main)
 - MONTAUDO-METZ Jacques (Général, Maladies Infectieuses et Parasitaires)
 - MULLER André (Service d'Anatomie et de Thérapeutique de l'Endocrinologie et du Développement)
- pour médecine (suite)
 - DAVIGNY Anne (Pathologie Infectieuse Moléculaire)
 - LEMOINE Hervé (Système zéro et interactions chromosomales)
 - ROUSSEL Jean-Luc (Anatomie)
 - TRUC Jean-François (Chirurgie de l'adulte)
- pour médecine (suite)
 - BOUJARD Jean-Luc (Service de Pédiatrie)

F2 - PROFESSEURS des UNIVERSITÉS ASSOCIÉES (mi-temps)

U. de Lausanne U. de Liège UCLouvain

F3 - PROFESSEURS CONVENTIONNÉS DE L'UNIVERSITÉ

M. KAMINSKI (Géométrie)	(1994-2010)
M. KAMINSKI (Géométrie)	(1994-2010)
M. LANGE (Mathématiques)	(2003-2020)
M. LANGE (Mathématiques)	(2003-2020)
M. MATHIEU (Mathématiques)	(1999-2020)
M. PÉRISSIN (Mathématiques)	(2010-2020)
M. PÉRISSIN (Mathématiques)	(2010-2020)

SERMENT D'HIPPOCRATE



“ En présence des Maîtres de cette École, de mes chers condisciples et devant l'effigie d'Hippocrate, je promets et je jure, au nom de l'Être suprême, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine.

Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.

Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux n'y verront pas ce qui s'y passe ; ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque. ”

REMERCIEMENTS

Au **Professeur Philippe Clavert** :

Merci d'avoir eu l'idée de ce sujet de thèse passionnant, de m'avoir ouvert les portes du laboratoire d'Anatomie pour que je puisse mener à bien ce projet et d'assurer la présidence de mon jury de thèse.

J'attends avec impatience mon retour au sein de votre service pour approfondir cette chirurgie de l'épaule et du coude qui vous tient tant à cœur.

Que ce travail soit le reflet de tout mon respect.

Au **Professeur François Bonnomet** :

Merci de me faire l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Je respecte votre sens du détail, votre rigueur et votre investissement auprès de vos patients.

Je ferai en sorte de les appliquer tout au long dans ma future pratique.

Au **Professeur Philippe Adam** :

Merci de me faire l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Votre expertise dans le domaine de la traumatologie est connue et respectée. C'est une chance de pouvoir bénéficier de celle-ci pour juger la qualité de ce travail.

Au **Professeur Nadia Bahlouli** :

Merci de m'avoir permis de travailler auprès de votre équipe, de bénéficier du matériel de votre laboratoire et de me faire l'honneur de participer à mon jury de thèse.

C'est une chance de pouvoir profiter de votre expertise en Biomécanique pour juger la qualité de ce travail.

Au **Docteur Florent Baldaïron** :

J'ai eu la chance de te découvrir comme chef, puis la fierté de te compter comme un ami.

Tu m'inspires par ta pédagogie, ton professionnalisme et ta bienveillance auprès de tous qui permettent de rendre les gens qui te côtoient meilleurs.

Merci d'être ce que tu es et plus encore de le rester avec les années. Yessaï, t'es loin d'avoir tout de rien tête rare !

A ma famille, **Maman, Papa, Jeanne, Adèle** : Vous êtes mes fondations. Nos preuves d'amour sont aussi fréquentes que nos engueulades à table. Merci de m'avoir offert une enfance aussi heureuse, de me soutenir dans chacun de mes projets (surtout le stop et le couchsurfing) et de me montrer ce qu'une famille unie signifie.

A mes amis depuis l'enfance et l'adolescence, **Axelle, Mélanie, Caroline, Alicia, Romain, Guillaume, Charles, Bryan, Maxence, Valentin, Benjamin** : Certaines amitiés se dissipent avec le temps ou la distance, la nôtre est le meilleur contre-exemple. Ce qui nous lie est pur et je ne saurais résumer en quelques lignes ce qui ne se comprend qu'en le vivant. Merci de me façonner depuis plus de 10 ans.

A **Stéphane** : Je garde précieusement les images de notre dernier Noël ensemble. Malgré ton départ tu es une présence quotidienne auprès de moi. J'aurais aimé partager ces moments avec toi.

A **Marilou, Audrey, Clarisse, Laura, Giulia, Cynthia, Julia, Marco, Igor, Akira, Chico, Lucas, Felipe, Henri, Alessandro** : Sans le savoir, vous avez marqué le début d'une nouvelle période de ma vie lors de ce semestre en Pologne. Les moments que j'ai vécu puis ce voyage au Brésil font partie des plus marquants de ma vie. Merci pour ce nouvel élan qui ne me quitte plus depuis.

A mes amis de Grenoble, **Huet, Sihame, Lola, Léa, Ambre, Lucie, Mélaïne, Honorine, Blandine, Aline, Solenne, Bruno, Lionel, Alex, Adrien, Quentin, Maxime, Thibault, Mickaël** : Vous avez fait passer ces années grenobloises trop rapidement. Les kilomètres qui nous séparent depuis l'Alsace ne me font pas oublier tout l'amour que je vous porte, les soirées à se péter la voix dans la cave du Jules Vernes ou au Loco Mosquito, la Sambuca du Sun Valley ou les campings des festivals. Ah oui et un peu l'externat aussi...

A **Yordi/Yoshi/Yosh-Yosh/...** (il y en a trop !) : Comme quoi, une amitié peut naître autour d'un tacos suintant le graillon. Merci pour ces moments partagés sur les chemins des Cinque Terre, ces concerts de rap bras dessus, bras dessous et ces fous-rires dans l'amphi de Jean Roget (c'est typique !). Tu m'impressionnes par ton investissement et ta bienveillance quotidienne dans ta passion (pour ne pas dire raison de vivre) qu'est la Pédiatrie.

A **Alice** : Je garde les souvenirs de nos moments partagés depuis la Pologne et notre soutien mutuel pendant l'externat. Je te souhaite le meilleur.

Au **Docteur Laurent Selek** : Comme pour de nombreux étudiants, tu as fait naître mon goût pour la Chirurgie en te côtoyant au début de mes études puis à nouveau lors de ce mémoire au LADAF. Ton départ influence encore beaucoup mes choix de carrière et de vie. Merci d'avoir marqué mon apprentissage comme tu l'as fait.

Au **Docteur Sébastien Ruatti** : Merci d'avoir rendu évidente ma passion pour la Chirurgie orthopédique lors de mon stage auprès de toi.

Au **Docteur Annick Bosseray** : Je respecte votre ténacité à offrir cette qualité pédagogique aux étudiants de votre unité. Merci pour toute cette bienveillance cachée derrière vos blagues sur les orthopédistes lors de mon résidanat auprès de vous.

Au **LADAF** : Mon intérêt pour la Chirurgie et l'Anatomie n'aurait pas pu se développer sans ces années régulières auprès de vous. Merci aussi pour les répétitions musicales improvisées en salle de TP et ce concert déguisé au Gala.

Philippe : Tu as été une bouffée d'air frais quotidienne durant mon externat. Je te souhaite le meilleur ainsi qu'à ta famille et encore pleins de « brioches ».

Alexandre : Merci d'avoir pris le temps de m'aider pour les statistiques de cette thèse et pour ton investissement auprès des étudiants grenoblois depuis plusieurs années, c'est une chance d'avoir quelqu'un comme toi auprès d'eux.

A **Franck** et **Patrice** : Merci de votre aide précieuse au laboratoire d'Anatomie de Strasbourg.

A **Samuel** : Merci de m'avoir accompagné dans la partie biomécanique de ma thèse. Tes conseils ont été d'une aide immense. Je te souhaite une bonne continuation dans la tienne.

A **Alexandra Elbakyan** : Merci pour votre combat qui permet de préserver le libre accès aux données scientifiques.

Aux **personnes faisant don de leur corps à la Science** : Votre générosité permet l'apprentissage de générations de médecins et chirurgiens ainsi que de grandes avancées dans le domaine de la Santé. Je vous présente mon respect le plus profond.

Au **Bonne AC** : Merci pour ces fous-rires, ces chants, ces barbecues, cet esprit d'équipe même (et surtout) dans la défaite. J'ai découvert grâce à vous qu'on peut avoir sa place sur un terrain même en étant un latéral gauche droitier. Et plus récemment, merci à l'**AS Hattstatt** pour cette piqûre de rappel (même si les CSC restent encore traumatisants à 27 ans...).

A la **Synagod** : Tellement de chemin parcouru depuis cette balade dans Strasbourg à la semaine de pré-rentree. Ces Tonus, ces gamelles à ski entrecoupées de gorgées de Chartreuse, ce voyage hors du temps à travers l'Europe et notre soutien mutuel m'ont marqué à vie.

Jérémy : Merci pour cette Bromance partagée sur fond de Mister V. Tu vas presque finir par me faire apprécier l'Auvergne si tu continues. Tu resteras mon Boubou à vie(cii). Dré dans l'pentu !

Nathan : Merci pour ces pétanques à Contades, pour ces passe-passes des Casseurs (#Wondercash) sur le télésiège, nos Coca en garde et pour imiter à la perfection les backs de Niska.

Léo : Le plus orthopédiste des ophtas. Tu fais partie intégrante de ces années d'internat, je me souviendrai toujours de notre mission mercurochrome (malgré le passage à La Faluche), de notre « EVG commun » et de notre pause clope de drague ratée devant le Bunnys.

A **Babite** : Impossible de prévoir qu'une telle amitié naîtrait quand je t'ai appelé pour me renseigner sur l'internat strasbourgeois. Merci pour ton soutien, ton enthousiasme et notre complicité. J'ai hâte de partager ces futurs moments de vie et au bloc ensemble.

A **Thomas** et **Nicolas** : Merci pour votre pédagogie comme co-internes puis comme chefs, nos sessions footballistiques, nos apéros, nos concerts avec ces pogos torse-nus et nos répétitions musicales. L'influence que vous avez sur moi est bien plus large que professionnelle.

Aux **Docteurs Antoni, Brax, Kretz, Lhommet, Guinard** ainsi qu'à **Agostino, Fufu, Geoffrey, Maroun** : Votre qualité pédagogique m'a permis de grandir et me rappelle la chance que j'ai d'apprendre et de pratiquer ce fabuleux métier de chirurgien.

Au **Professeur Ehlinger**, ainsi qu'aux **Docteurs Ronde-Oustau, Jenny, Boeri, Di Marco, Niglis, Schenck, Brinkert, Klein** : J'ai beaucoup appris sur de nombreux plans en vous côtoyant au quotidien lors de mes semestres d'interne au CHU et j'aurai encore l'occasion de continuer cela en revenant auprès de vous ces prochaines années.

A **Kiti, Ludo, Alexis** et à mes co-internes pendant ce semestre d'ortho-pédiatrie **Manon, (R)Wawan, Consuelo, Francesca, Salomé, Audrey, Lucas, Oumar, Kamal** : Merci pour ce semestre auprès de vous, l'apprentissage de cette vaste spécialité qu'est la chir ped et cette super ambiance au bureau. Par contre pensez à faire votre visite matinale plus tard les viscéraux, j'en ai marre des réveils en panique quand vous débarquez !

A l'équipe paramédicale d'orthopédie du **7862** : Merci pour votre accueil et votre bienveillance lors de ma première année d'internat. Je souhaite à tout bébé interne de travailler avec une équipe comme vous.

A l'équipe paramédicale du **bloc d'ortho** : Merci pour l'aide apportée au bizut que j'étais (et que j'espère ne plus trop être...), de supporter mes craquages récurrents lors de la fermeture et de ne pas me laisser chanter Kyo et Céline Dion tout seul. J'ai hâte de vous retrouver pour la fin de mon internat et mes débuts comme senior.

A l'équipe paramédicale de chirurgie vasculaire et thoracique du **CH de Colmar** : Ce stage a été une réussite sur tous les plans et c'est en grande partie grâce à vous. C'était un plaisir de travailler ensemble et de partager ces petits déj.

A l'équipe paramédicale de **SOS Mains** : Merci pour votre professionnalisme, votre bienveillance et votre soutien auprès des internes. Vous avez été une bouffée d'air frais pour moi pendant ces 6 mois.

A l'équipe paramédicale de chirurgie orthopédique du **CH de Haguenau** : Par vos compétences dans les soins et la gestion des patients, votre bonne humeur et surtout votre bizutage de départ, vous avez rendu ce semestre inoubliable. J'espère avoir la chance de travailler avec vous à nouveau dans le futur.

A **Pierrette, Marie, Rawan, Adeline, Elena, Yohan, Charles, Vinh, Guillaume, Aurélien, Grégoire, Anthony, Pierre, Samuel, Mekki, Eduard, Ianis, Destin, Karim, Stefan** et à tous les autres co-internes que j'ai côtoyé : Merci d'avoir rendu l'internat plus agréable, pour les piratages de mails, pour accepter mes choix musicaux (parfois discutables) dans le bureau et pour tous ces moments de vie partagés ensemble à l'Hôpital et en-dehors.

A **Mathilde, Manon, Pascaline, Yoanna, Sahra, Elisa, Aline, Anaïs, Camille, Syna, Marine, Laura, Marion, Francky la gâchette, Joseph, Hadrien, Tanguy, Jules, Olivier, Mathieu** et tous mes autres amis de Strasbourg : Vous avez rendu mon arrivée en Alsace complètement folle et inoubliable. Je n'aurais jamais pu imaginer tout ça en cliquant sur Strasbourg il y a 4 ans. Je garde précieusement tous ces moments partagés et je vous souhaite le meilleur.

A **Hanna** : Il aura fallu quitter nos montagnes et déménager 600 kms plus au Nord pour qu'on découvre cette amitié. Tu fais partie de mes plus belles rencontres sur Strasbourg. Merci pour ta singularité et ta bienveillance qui te rendent si exceptionnelle.

A **Charlotte** : Dire qu'à une époque je te snobais pour aller jouer au foot dans le jardin... Maintenant, que ce soit dans les cuisines du Nid D'aigle, sur les bancs de Grenoble, sur les routes des Cinque Terre ou dans les blocs de chir pédiatrique, on est les best cousins qu'il soit. Je te souhaite de continuer à vivre ce qu'il y a de meilleur, comme tu le fais auprès de Ludo.

A **Joeffrey et Jean** : Merci pour ces répètes autour de la fine fleur de la musique : Blink-182, Sum 41, Red Hot, Les Jones ... Sah quel plaisir de jouer avec des Vrais Mecs De Strasbourg !!!

A la **Staphylocoloque / Cancoillocoloque** : Vous êtes mes amis, mes colocs et le début d'internat avec ses confinements me font dire que vous m'avez aussi offert une famille en Alsace (avec Thib dans le rôle du petit frère relou) même à des kilomètres de la mienne.

Laure : Merci de ton soutien constant, de partager la majorité de mes souvenirs depuis mon arrivée en Alsace, de supporter mes élans de folie pluri-quotidiens, d'écouter des vinyles de bobo avec moi et d'amener un peu de ton accent chantant dans ce patois alsacien. « La fille du Sud, elle est comme un soleil, qui rayonne et qui donne, le sourire au réveil ».

Thibaut : Sans le dire, on sait qu'on s'aime autant qu'on se déteste. Finalement notre amour est à l'image de ton animal totem, vache.

Luca : Une complicité s'est vite installée et j'espère continuer à la partager longtemps ensemble. Par contre, arrête de me mettre des petits ponts si tu veux qu'on ouvre une chaîne fitness ensemble !

Camille : "I wanna live inside your headphones babe !"

Bientôt 2 ans que je vis une bande originale constante avec toi, passant de Jay Jay Pistolet à JeanJass et de Foals à Pierre Perret (merci encore Thib et Lolo...). J'espère que cette playlist durera encore très longtemps.

Il y a trop de choses à dire, on n'explique pas une évidence. Donc tout simplement : merci d'être toi-même TDL et surtout de l'être auprès de moi.

« Pour moi c'est trop facile, je ne fais même pas d'effort. Entre nous c'est logique, pourquoi j'ferais des efforts ? »

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	23
MATÉRIEL ET MÉTHODES	26
1. PREPARATION DES PIÈCES ANATOMIQUES.....	26
1.1. Protocole de congélation.....	26
1.2. Dissection.....	28
2. BANC D'ESSAI.....	29
2.1. Détermination de la force appliquée au banc d'essai.....	29
2.2. Détermination de la position du coude dans le banc d'essai.....	29
2.3. Installation du coude au sein du banc d'essai.....	31
3. PROTOCOLES APPLIQUÉS AUX MODÈLES.....	33
3.1. Protocole rapide.....	34
3.2. Protocole lent.....	35
3.3. Points communs aux deux protocoles.....	39
3.3.1. Pré-charge.....	39
3.3.2. Données communes mesurées.....	39
3.3.3. Arrêt de la procédure.....	40
3.3.4. Dissection et bilan lésionnel.....	40
4. ANALYSE STATISTIQUE.....	43
RÉSULTATS	44
1. REPRODUCTIBILITÉ DU MODÈLE ANATOMIQUE DE TTC.....	44
2. CHARGES À LA RUPTURE.....	46
3. ROTATION RELATIVE DE L'AVANT-BRAS PAR RAPPORT À L'HUMÉRUS.....	49
DISCUSSION	54
1. REPRODUCTIBILITÉ DU MODÈLE ANATOMIQUE DE TTC.....	54
2. CHARGES À LA RUPTURE ENTRE LES MODÈLES.....	57
3. ROTATION RELATIVE ENTRE LES MODÈLES.....	63
4. FORCES ET LIMITES DE NOTRE ÉTUDE.....	65
CONCLUSION	67
PERSPECTIVES	68
ANNEXES	69
ANNEXE 1 : THÉORIE DES TREPIEDS DE O'DRISCOLL.....	69
ANNEXE 2 : TECHNIQUE DE DISSECTION DES PIÈCES ANATOMIQUES.....	70

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 (page 27) : Pièce anatomique de coude gauche après les coupes proximale et distale

Figure 2 (page 28) : Pièce anatomique de coude droit après dissection

Figure 3 (page 31) : Préparation du banc d'essai et installation de la pièce anatomique de coude avec une flexion de 15°

Figure 4 (page 32) : Interface métallique de maintien proximal

Figure 5 (page 33) : Cupule métallique de maintien distal avec 6 vis

Figure 6 (page 34) : Pièce anatomique de coude droit après installation au sein du banc d'essai avant le protocole rapide

Figure 7 (page 36) : Pièce anatomique de coude gauche après application de la peinture mouchetée et installation au sein du banc d'essai

Figure 8 (page 37) : Construction du cylindre ajusté aux éléments sélectionnés

Figure 9 (page 37) : Visualisation du champ de déformation, de l'angle de rotation en fonction du temps et de la variation du diamètre du cylindre en fonction du temps

Figure 10 (page 38) : Mesure de l'angle de rotation pour le corps 4, répétée 3 fois suivant la même méthode

Figure 11 (page 42) : Classification de Mason pour les fractures de la tête radiale

Figure 12 (page 42) : Classification de Regan-Morrey pour les fractures du processus coronoïde

Figure 13 (page 45) : Tableau récapitulatif du bilan lésionnel des modèles anatomiques, des charges à la rupture et des rotations relatives de l'avant-bras par rapport à l'humérus.

Figure 14 (page 47) : Comparaison des charges à la rupture moyennes lors des protocoles rapides entre les corps 1 à 4

Figure 15 (page 47) : Comparaison des charges à la rupture moyennes par paires lors des protocoles rapides entre les corps 1 à 4

Figure 16 (Page 48) : Répartition des écarts de charges à la rupture de chacune des structures lésées (LCL, TR et PC) entre les protocoles lent et rapide d'un même corps pour les corps 1 à 4

Figure 17 (page 50) : Photographies des lésions de TTC postéro-latérale après application du protocole rapide sur le coude gauche du corps 4

Figure 18 (page 51) : Exemple de courbe force-déplacement typique de TTC postéro-latérale (protocole rapide appliqué au coude gauche du corps 4)

Figure 19 (page 52) : Photographies des lésions de TTC avec divergence antéro-postérieure après application du protocole rapide sur le coude gauche du corps 5

Figure 20 (page 53) : Exemple de courbe force-déplacement typique avec divergence antéro-postérieure (protocole rapide appliqué au coude gauche du corps 5)

Figure 21 (page 56) : Schéma d'une luxation du coude divergente antéro-postérieure et reconstruction tomodensitométrique d'une TTC divergente antéro-postérieure d'un coude droit vue de profil

Figure 22 (page 58) : Schéma de la chronologie lésionnelle d'une TTC

Figure 23 (page 59) : Reconstruction tomodensitométrique de TTC d'un coude gauche

Figure 24 (page 64) : Schéma explicatif de la rotation externe pathologique forcée (REPF) de l'avant-bras

La présente thèse est issue d'un travail conçu à l'initiative du Professeur Clavert et réalisée au CHU de Strasbourg conjointement avec l'institut d'Anatomie Normale et Pathologique et l'équipe Matériaux Multi-échelles et Biomécanique (MMB) du laboratoire ICube. Elle s'organise comme un article scientifique, constituant le travail original.

La terrible triade du coude constitue un challenge technique pour le chirurgien qui la traite et son mécanisme reste encore mal compris. La réalisation d'un modèle anatomique a pour vocation la compréhension du phénomène et l'amélioration de la prise en charge de ce traumatisme complexe.

Cette thèse permet de rappeler les différents types de luxation de l'articulation du coude, la place primordiale des travaux cadavériques et de l'étude biomécanique dans la compréhension des mécanismes lésionnels.

INTRODUCTION

L'articulation du coude est une structure complexe d'une grande importance fonctionnelle. Anatomiquement, elle relie le poignet à l'épaule. Ses rôles sont notamment de positionner la main dans l'espace pour faciliter la réalisation de mouvements fins (attraper un objet, amener la main à la bouche, lacer ses chaussures, etc.) et de servir de point d'appui pour l'avant-bras.

Le coude est la seconde articulation la plus souvent luxée, avec une incidence annuelle estimée à 6-8 pour 100 000 par an (1), dont une incidence plus importante chez les hommes de moins de 30 ans (2).

Les luxations du coude représentent 11-28% des lésions du coude (3), se font le plus souvent dans une direction postéro-latérale (4) et sont catégorisées comme simples ou complexes : une luxation simple étant une lésion capsulo-ligamentaire sans lésions osseuses associées (3).

Même si les résultats fonctionnels post-traumatiques ont été grandement améliorés (5), les luxations de coudes restent responsables de séquelles à long terme, d'autant plus pour les luxations complexes qui représentent 49% des luxations du coude (1), par leur conséquences sur les activités de la vie quotidienne, professionnelles et récréationnelles (6). Elles occasionnent notamment des douleurs résiduelles (62%), des raideurs (56%) ou encore une instabilité chronique (8%) (7,8) accélérant l'évolution dégénérative (7).

Parmi l'ensemble des situations cliniques, la terrible triade du coude (TTC) est une entité particulière définie par une luxation complexe du coude avec fracture de la tête radiale (TR) et du processus coronoïde (PC). Elle a été nommée ainsi par Hotchkiss à cause de son évolution défavorable malgré sa prise en charge (9) du fait des lésions d'au moins deux stabilisateurs primaires et trois stabilisateurs secondaires du coude décrits par O'Driscoll & al. (10) responsables de sa complication principale qu'est l'instabilité chronique, comme expliqué dans l'Annexe 1.

Des études se sont intéressées à la TTC mais comportaient des limites notables ou ne travaillaient pas spécifiquement sur la création d'un modèle anatomique reproductible de la TTC (1,11-14).

Depuis les années 1980, on note un intérêt croissant autour de l'étude de la biomécanique du coude, qui a permis de révolutionner la prise en charge de l'instabilité du coude (5). Concernant plus spécifiquement la TTC, ces études ont permis d'accroître les connaissances de la physiopathologie et notamment de mieux comprendre le mécanisme lésionnel et la chronologie des lésions aboutissant à la TTC (1,7,15-19). Néanmoins, certaines étapes restent imprécises, notamment les charges à la rupture et la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus avant la luxation.

En effet, même si plusieurs études ont décrit un mécanisme de rotation externe pathologique forcée (REPF) de l'avant-bras comme étape initiale lors d'une luxation postérieure du coude (1,7,16,17,20), une étude a rapporté au contraire la possibilité d'une rotation interne de l'avant-bras (1).

De plus, à notre connaissance, une seule étude a pu quantifier une charge à la rupture mesurée lors d'une TTC (1) et une autre a quantifié la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus (19). Cependant celles-ci présentaient des limites notables, n'approfondissaient pas ces deux notions et ne s'intéressaient pas spécifiquement à la TTC. Or, la compréhension de ces mécanismes physiopathologiques, notamment biomécaniques, ainsi que leur quantification, sont des étapes nécessaires à la bonne compréhension de cette entité lésionnelle et ainsi à sa prise en charge optimale.

Dans ce contexte, une étude s'intéressant spécifiquement à la TTC et à ses facteurs biomécaniques, notamment aux charges à la rupture ainsi qu'à la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus avant la luxation est justifiée afin de créer un modèle reproductible.

L'objectif principal de ce travail était de créer et valider un modèle cadavérique de TTC. Les objectifs secondaires étaient de mesurer et comparer les charges à la rupture et la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus avant la luxation.

Selon notre hypothèse, le mécanisme des TTC correspondrait à une compression axiale sur un coude en sub-flexion et en pronation.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Il s'agissait d'une étude expérimentale, prospective et comparative, réalisée au sein d'un Institut d'Anatomie et d'un laboratoire certifié et spécialisé en Biomécanique. Ce travail a été réalisé en accord avec nos règles d'éthique institutionnelles et la déclaration d'Helsinki de 1964 et ses amendements.

1. Préparation des pièces anatomiques

1.1. Protocole de congélation

Le protocole de congélation était le suivant : chaque don de corps, immédiatement après le décès était acheminé au laboratoire de l'Institut d'Anatomie Normale et Pathologique de la Faculté de Médecine de Strasbourg. Le corps était alors disposé dans un réfrigérateur à 4°C pendant trois jours pour que les sérologies virales soient réalisées (VIH, Hépatites B et C). Si celles-ci étaient négatives, les corps étaient préparés en fonction des besoins à l'Institut d'Anatomie ou en fonction des besoins des instituts collaborateurs.

L'étude portait sur cinq cadavres humains, frais, d'âge moyen $87,4 \pm 8,6$ ans, dont trois de sexes féminins et deux de sexes masculins, permettant de tester 10 coudes appairés par leur latéralité, à l'institut d'Anatomie Normale de Strasbourg.

Les coudes ne comportaient pas de cicatrices afin d'éliminer les antécédents chirurgicaux. Ils étaient systématiquement contrôlés radiographiquement pour éliminer une malformation, une lésion ou pathologie osseuse, la présence d'un corps étranger métallique et confirmer le respect de l'interligne articulaire. Un contrôle des amplitudes articulaires était pratiqué pour éliminer une raideur.

La coupe osseuse était pratiquée de manière reproductible à 80 mm des épicondyles sur l'humérus et à 150 mm de l'olécrâne sur l'avant-bras permettant le positionnement des épicondyles en regard de l'axe de rotation du banc d'essai et un déplacement dans les trois plans de l'espace lors de la compression.

Les pièces anatomiques étaient alors conservées à -30° Celsius, en attendant d'être utilisées.



Figure 1 : Pièce anatomique de coude gauche après les coupes proximale et distale avant dissection (Vues respectives : antérieure, latérale, postérieure, médiale)

1.2. Dissection

La décongélation débutait la veille de l'expérimentation : la pièce anatomique était déstockée du congélateur à 16 heures et était laissée immergée dans l'eau tiède jusqu'au lendemain 9 heures.

Les coudes ont tous été préparés par le même chirurgien, en retirant l'intégralité des tissus mous excepté le plan ligamentaire médial et latéral, la membrane interosseuse, la capsule articulaire, le ligament annulaire et les 2 mm distaux de l'insertion tendineuse du muscle brachial afin de ne pas léser la capsule et le PC, leur proximité anatomique risquant de les fragiliser et d'influencer nos analyses. Les diaphyses humérales, radiales et ulnaires étaient ruginées afin d'avoir une surface corticale lisse sur laquelle appliquer la peinture.

La technique de dissection est décrite en Annexe 2.



Figure 2 : Pièce anatomique de coude droit après dissection (Vues respectives : antérieure avec pincette tenant le moignon tendineux distal du muscle brachial, latérale, postérieure, médiale)

2. Banc d'essai

2.1. Détermination de la force appliquée au banc d'essai

Une TTC est le plus souvent causée par une chute avec réception sur la main en extension (15). Plusieurs études ont réussi à reproduire une TTC grâce à une compression axiale (1,11,12). Nous avons décidé d'appliquer ce même mécanisme lésionnel à l'aide d'une machine d'essai dynamique Instron Electropuls E10000® fonctionnant par traction-compression électromécanique avec une cellule de force bi-axiale, à 10 kN en traction-compression et avec un couple de 100 Newtons/mètres (non utilisé dans cette étude).

2.2. Détermination de la position du coude dans le banc d'essai

La position de flexion-extension du coude a été étudiée à différents degrés lors d'études anatomiques, une TTC a pu être créée en extension complète (1) et en flexion de 0 à 30° (11,12). Nous avons donc décidé de positionner les coudes dans notre modèle en flexion de 15°.

Fitzpatrick & al. ont montré que la prono-supination de l'avant-bras était un élément déterminant lors d'une compression axiale sur un coude en extension complète. En effet, avec l'avant-bras en pronation, la compression axiale aboutissait à une TTC alors que lorsqu'il était en supination, elle provoquait une luxation postéro-latérale simple (1).

La pronation exposait une portion différente de la TR à l'impaction sur le capitulum et donc à la fracture (11).

Il a aussi été montré qu'en positionnant l'avant-bras à des degrés variables de pronation, celui-ci atteignait sa pronation maximale lors d'une compression axiale (1). Nous avons donc pris la décision de positionner d'emblée les coudes en pronation maximale au sein du modèle.

La position de varus-valgus a aussi été étudiée. Même s'il est classiquement rapporté que la TTC est secondaire à une contrainte en valgus (4,15,19,21,22), notamment par O'Driscoll & al. qui décrivaient que lors du traumatisme le coude restait fixe et le corps imposait un valgus associé à un moment rotatoire postéro-latéral (15,19,21), ce critère ne faisait pas consensus lors d'études anatomiques. En effet, Fitzpatrick & al. rapportaient que les fractures-luxations du coude résultaient d'un valgus ou d'un varus additionné à la compression axiale sur coude fléchi (1). D'autre part, Wake & al. rapportaient avoir créé des fractures-luxations postérieures de coude en imposant un varus ou un valgus en plus de la compression axiale (11). Devant l'absence de consensus au sein de la littérature et l'existence de variations intra et inter-individuelles de valgus entre les pièces anatomique (le valgus physiologique variant selon de nombreux facteurs tels que la main dominante, l'âge, le sexe, l'ethnie, etc. (23,24)), empêchant ainsi d'avoir un degré de valgus précis et reproductible, nous avons pris la décision de laisser les coudes dans leur position native, sans leur appliquer de contrainte en valgus ou en varus.

2.3. Installation du coude au sein du banc d'essai

Le banc d'essai était incliné à 15° à l'aide d'un goniomètre, avec la portion supérieure à la verticale.

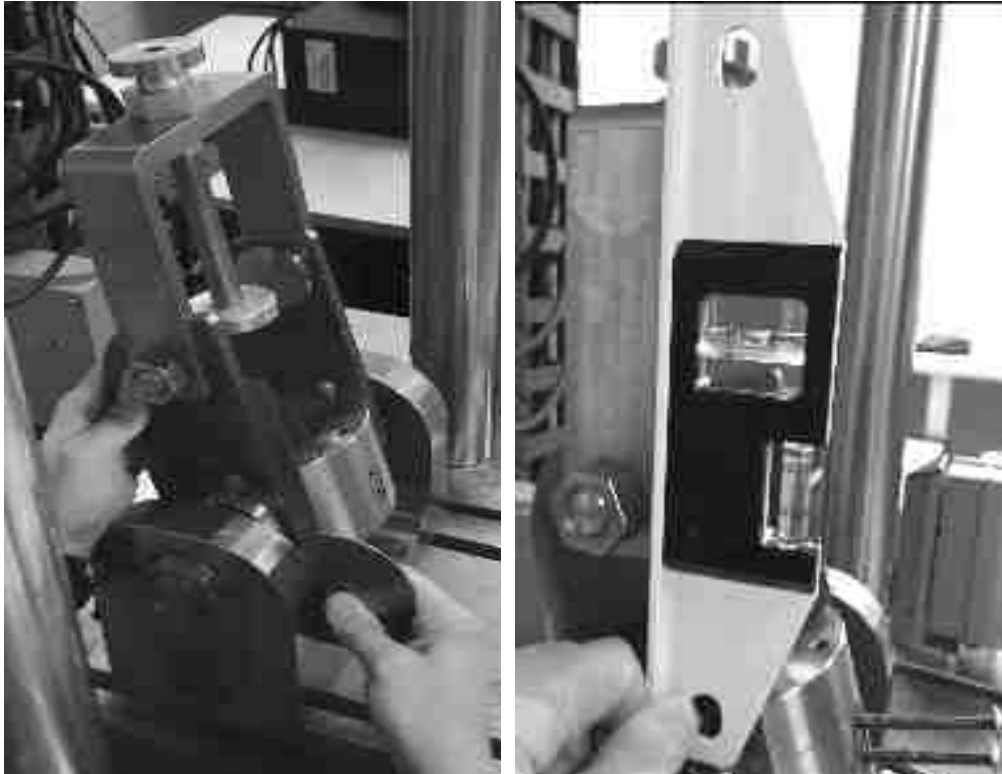


Figure 3 : Préparation du banc d'essai et installation de la pièce anatomique de coude avec une flexion de 15°

Le coude était ensuite installé de manière reproductible en son sein de façon à ce que les épicondyles soient en regard de l'axe de rotation du banc d'essai et ainsi alignés dans le plan frontal avec l'humérus à la verticale.

La diaphyse humérale était cimentée grâce à du ciment chirurgical Palacos® au sein d'une interface métallique de 50 mm de diamètre, dotée d'une poche de 30 mm de diamètre et de 15 mm de profondeur, solidarisée à la tige verticale de la presse grâce à son filetage.

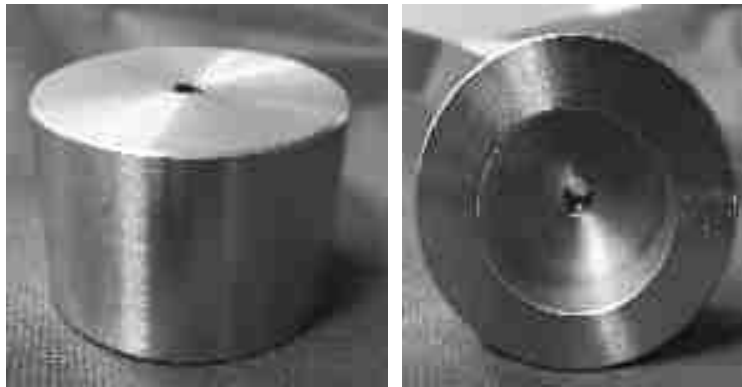


Figure 4 : Interface métallique de maintien proximal (Vues respectives : antérieure, inférieure)

Les diaphyses ulnaire et radiale étaient cimentées en pronation maximale grâce à du ciment chirurgical Palacos® au sein d'une cupule. La mobilité du manteau de ciment était ensuite supprimée par serrage de six vis traversant la cupule avant essai. La base sur laquelle reposait la cupule était fixée au bâti de la machine de compression par l'intermédiaire d'une plaque rainurée permettant l'alignement de l'humérus avec l'axe de la machine, cette mobilité était elle aussi supprimée par serrage avant essai.



Figure 5 : Cupule métallique de maintien distal avec 6 vis (Vue supérieure)

On note que durant toutes ces manipulations, la pièce anatomique a été régulièrement hydratée par du sérum physiologique afin de ne pas altérer les propriétés biomécaniques des tissus par déshydratation.

3. Protocoles appliqués aux modèles

A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée spécifiquement à la réalisation d'un modèle reproductible de TTC. Néanmoins, certaines ont étudié la variabilité des lésions résultantes de différents positionnements de pièces anatomiques de coude lors d'une compression axiale avec notamment deux de ces études qui ont réussi à reproduire des TTC (1,11).

En se basant sur celles-ci, nous avons appliqué deux protocoles différents sur les pièces anatomiques. Pour cela, nous avons pratiqué un appariement des protocoles sur les deux coudes du même corps par randomisation à l'aide d'une génération aléatoire par ordinateur.

3.1. Protocole rapide

Ce protocole rapide permettait de simuler précisément le contexte traumatique d'une TTC et de mesurer les charges à la rupture.

Le pilotage de la presse se faisait en déplacement à 100 mm/minute.

Nous avons volontairement choisi cette vitesse de mise en charge élevée en nous basant sur les travaux de Fitzpatrick & al. (1) afin de nous rapprocher du mécanisme lésionnel *in vivo*, car une luxation est un événement brutal (25).

Néanmoins les caméras à notre disposition ne permettant pas une acquisition d'image supérieure à 10 Hz dans les conditions d'utilisation imposées par notre expérience, nous ne pouvions pas étudier la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus par stéréocorrélation avec ce protocole.

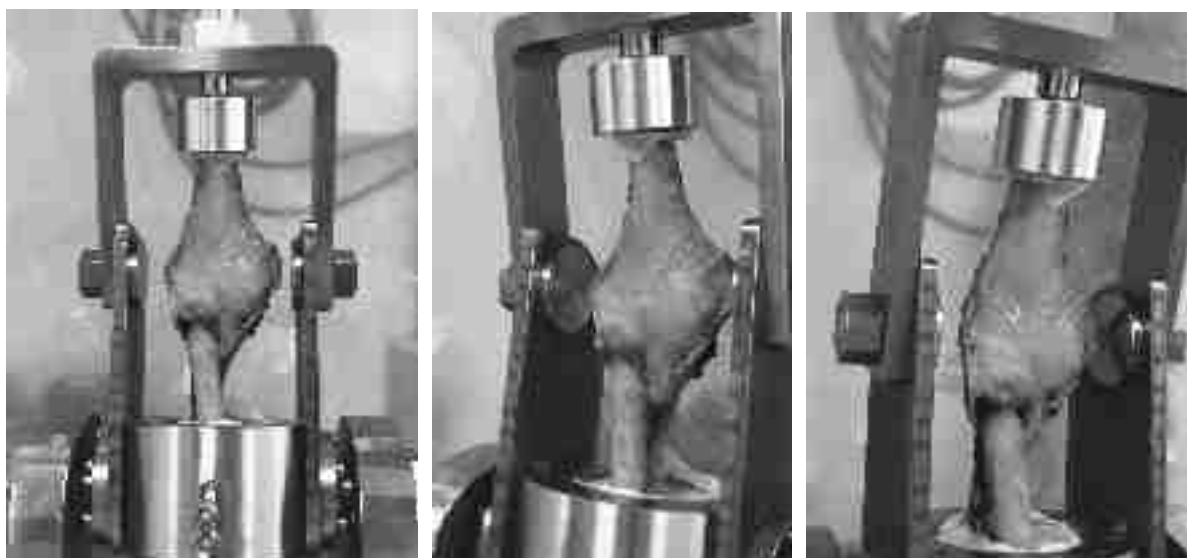


Figure 6 : Pièce anatomique de coude droit après installation au sein du banc d'essai avant le protocole rapide (Vues respectives : antérieure, antéro-médiale, antéro-latérale)

3.2. Protocole lent

Ce protocole lent permettait aussi de simuler le contexte traumatique d'une TTC, de mesurer les charges à la rupture, mais aussi d'étudier la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus.

Le pilotage de la presse se faisait en déplacement à 10 mm/minute.

Nous avons choisi cette vitesse de mise en charge plus lente en nous basant sur les travaux de Wake & al. (11).

La rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus était évaluée par stéréocorrélation d'images numériques. Nous appliquions une peinture mouchetée noire sur blanche à la surface des pièces anatomiques 10 minutes avant de débiter la compression axiale afin de ne pas altérer les propriétés biomécaniques des tissus par déshydratation. Puis à l'aide de deux caméras, calibrées au préalable, positionnées à 40 cm et selon un angle de 40° du banc d'essai, avec une acquisition d'images à 10 Hz, nous pouvions estimer le sens de la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus et la quantifier en degré sur la dernière image avant la luxation à l'aide du logiciel GOM Correlate®.

La stéréocorrélation d'images numériques est une méthode d'instrumentation optique qui permet de suivre des déplacements, des rotations et des déformations d'un solide lors d'essais mécaniques. Dans notre cas, nous souhaitions mesurer un angle de rotation entre l'avant-bras fixe dans le dispositif et l'humérus. Afin de traiter les données de ces essais, l'avant-bras et l'humérus étaient considérés comme des solides indéformables.

La première difficulté était de définir l'axe principal de l'humérus autour duquel la rotation devait être mesurée. Pour cela, un ensemble d'éléments était sélectionné dans la partie cylindrique de l'humérus. Une méthode de construction de cylindre basée sur le calcul de la distance maximale était utilisée. Cela signifiait qu'un élément d'ajustement, ici un cylindre, était calculé de manière à minimiser la distance entre les éléments d'ajustement et les éléments sélectionnés. La construction est présentée dans la figure 8.

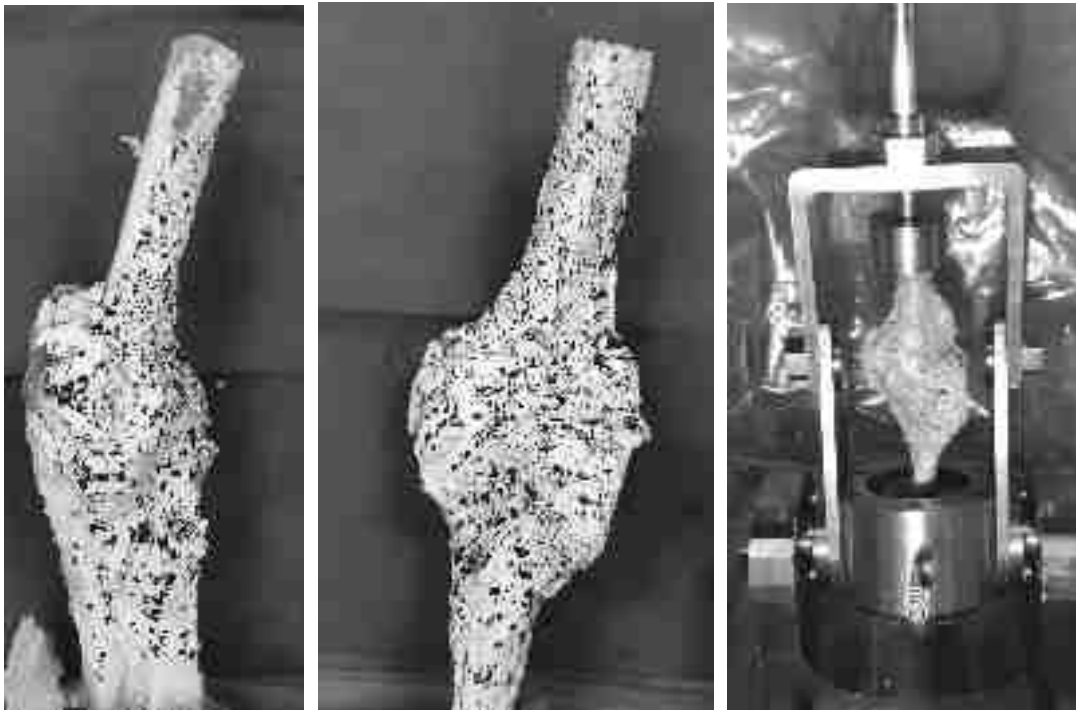


Figure 7 : Pièce anatomique de coude gauche après application de la peinture mouchetée
(Vues respectives : médiale et antérieure) et installation au sein du banc d'essai

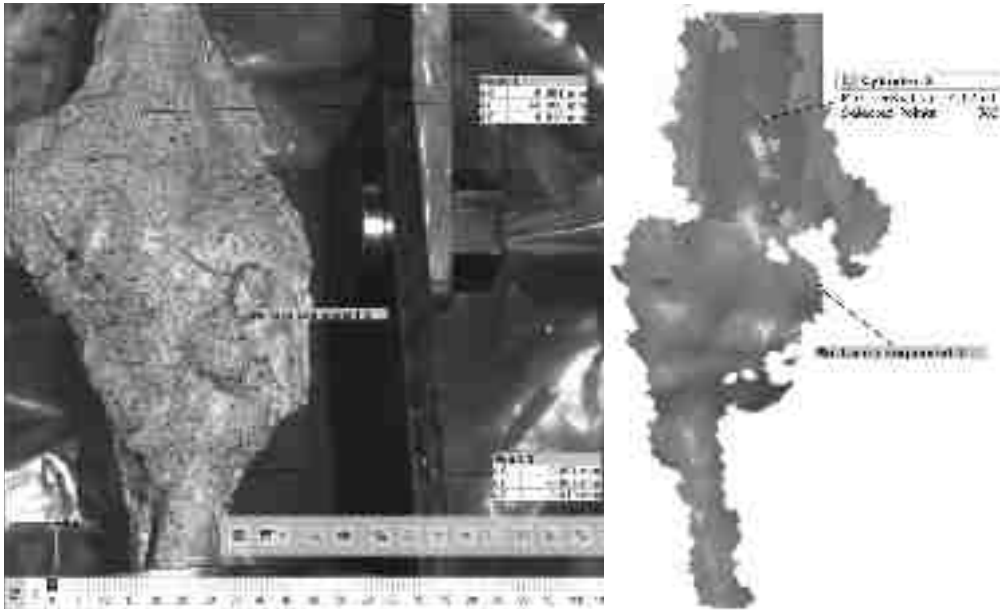


Figure 8 : Construction du cylindre ajusté aux éléments sélectionnés

L'axe de révolution du cylindre était alors considéré comme l'axe principale de l'humérus autour duquel la rotation serait mesurée. Comme on peut le voir sur la figure 9, la déformation se localisait principalement au niveau de la capsule articulaire et non pas au niveau des os, ce qui soutenait l'hypothèse de corps indéformables.

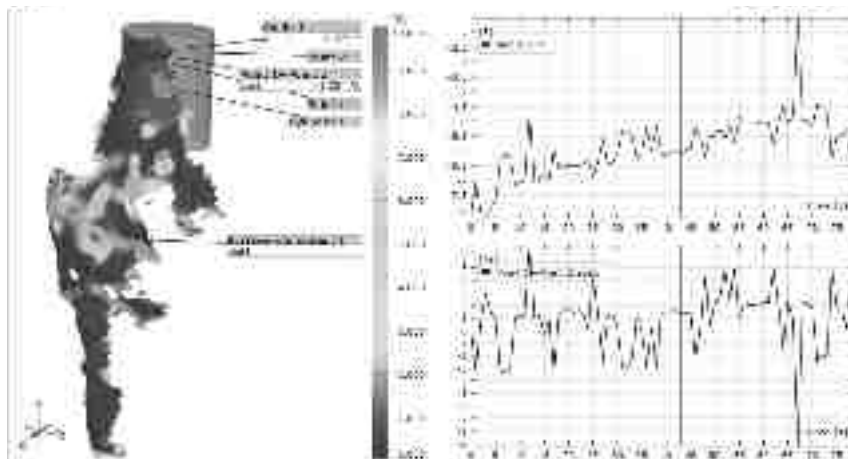


Figure 9 : Visualisation du champ de déformation (à gauche), de l'angle de rotation en fonction du temps (à droite en haut) et de la variation du diamètre du cylindre en fonction du temps (à droite en bas)

L'angle était mesuré et présenté (figure 9, à droite en haut). On pouvait constater que le signal semblait parasité : en effet à chaque image, le cylindre était recalculé et si trop d'éléments disparaissaient d'une image à une autre, alors le cylindre résultant s'éloignait du cylindre initial. Or, l'os étant indéformable, ce cylindre qui s'appuyait sur la surface devait toujours être le même. Afin de filtrer nos résultats et ne garder que les valeurs pertinentes d'angle, une méthode a été proposée : on mesurait la variation de diamètre, comme sur la figure 9 (à droite en bas), par rapport à la valeur initiale, si la valeur était supérieure à 1%, alors la valeur de l'angle calculé pour cette image était supprimée. Le signal traité est présenté figure 10. Afin de prendre en compte toutes les variabilités de cette méthode, chaque mesure était répétée 3 fois. La valeur pour l'image (correspondant à une valeur de temps) précédant la luxation était relevée. Sur cette valeur, l'erreur était calculée pour l'ensemble des essais. Elle était de $7,9 \pm 3,1\%$. La méthode proposée était donc adaptée pour mesurer la rotation relative entre l'avant-bras et l'humérus.

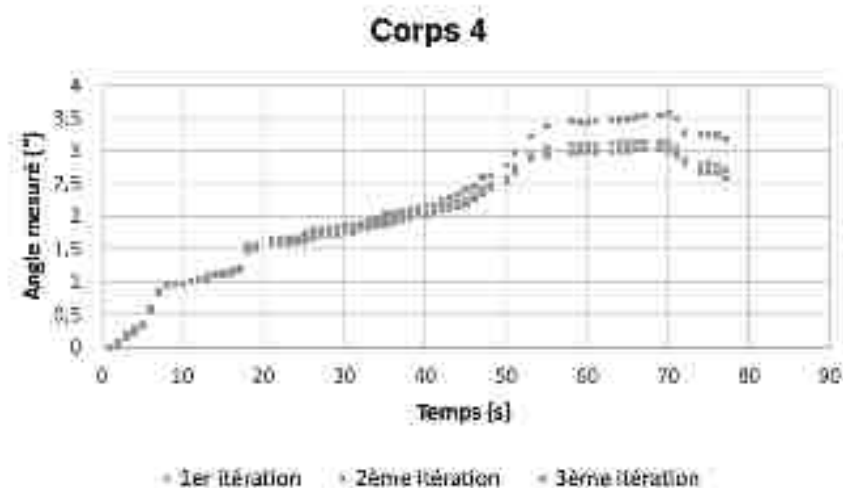


Figure 10 : Mesure de l'angle de rotation pour le corps 4, répétée 3 fois suivant la même méthode

3.3. Points communs aux deux protocoles

3.3.1. Pré-charge

Une pré-charge de 10 Newtons était appliquée sur chacun des modèles.

3.3.2. Données communes mesurées

Les données communes mesurées, à une fréquence d'acquisition de 10 000 Hz, étaient :

- La charge appliquée, en Newtons (N), enregistrée par la cellule de charge.
- Le déplacement du vérin, en millimètres (mm).

Celles-ci permettaient de déterminer la charge à la rupture, correspondant sur la courbe « force-déplacement » au moment où la portion linéaire ascendante s'infléchit. C'est la charge maximale imposée aux structures avant leur rupture.

De plus, le déplacement du coude en valgus ou en varus en cours de compression axiale était déterminé lors du protocole.

3.3.3. Arrêt de la procédure

L'arrêt de la procédure se faisait si une des trois conditions suivantes était atteinte :

- Application d'une charge supérieure à 6500 N. Ce seuil maximal a été déterminé car il était largement au-dessus de la charge à la rupture moyenne enregistrée lors d'une TTC qui était estimée à 2 355 N selon Fitzpatrick & al. (1).
- Chute brutale de 80% de la force maximale appliquée. Ce seuil était volontairement élevé car nous suspicions de retrouver une courbe comportant plusieurs plateaux, avec une première chute brutale de la force liée à la rupture capsulo-ligamentaire, notamment du plan ligamentaire latéral, précédant la rupture osseuse de la TR puis du PC (1,7), afin de ne pas stopper le protocole entre les 2.
- Déplacement supérieur à 50 mm. Ce seuil étant la limite maximale de la machine.

3.3.4. Dissection et bilan lésionnel

Nous déterminions l'occurrence d'une luxation ainsi que son sens (postéro-latéral, postéro-médial, antérieur, divergent) selon la position de l'ulna et du radius par rapport à l'humérus au sein de notre banc d'essai.

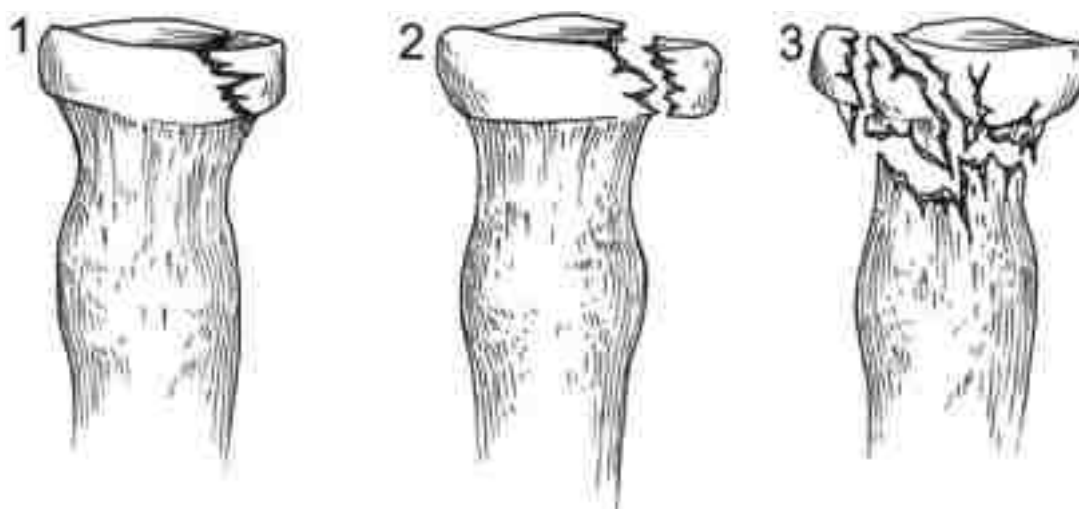
Une fois le modèle retiré du banc d'essai, une dissection était pratiquée par une incision transversale de la capsule antérieure afin d'objectiver si une fracture de la TR et/ou du PC s'était produite.

Les fractures de la TR étaient décrites selon la classification de Mason, détaillée en figure 11, permettant de séparer les fractures selon leur localisation, le caractère déplacé et le degré de comminution (26). A noter que certains auteurs ont décrit un type 4 selon Mason correspondant à une fracture de TR associée à une luxation de coude, quelles que soient ses caractéristiques fracturaires. La TTC incluant systématiquement une luxation de coude, nous avons volontairement décidé de ne pas classifier selon ce type afin de permettre une meilleure caractérisation des fractures de TR.

Les fractures du PC étaient décrites selon la classification de Regan-Morrey (18), détaillée en figure 12.

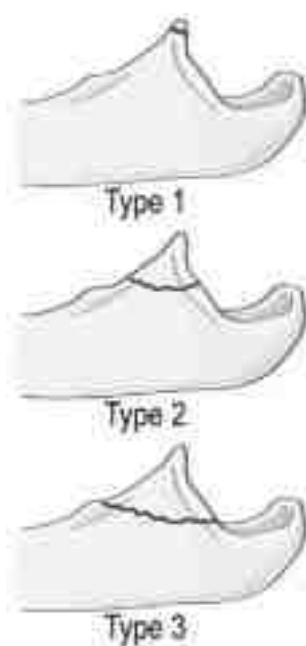
Des photographies étaient pratiquées à chacune de ces étapes.

Puis les pièces anatomiques étaient conservées par congélation.



- Type 1 : fracture de la tête radiale ou du col avec un déplacement inférieur à 2mm ;
- Type 2 : fracture de la tête radiale ou du col avec un déplacement supérieur à 2mm et concernant 30% de la surface articulaire au moins ;
- Type 3 : fracture comminutive de la tête radiale ou du col ;

Figure 11 : Classification de Mason pour les fractures de la tête radiale



- Type 1 : Avulsion du bec
- Type 2 : Détachement d'un fragment représentant moins de 50% du processus coronoïde
- Type 3 : Détachement d'un fragment représentant plus de 50% du processus coronoïde

Figure 12 : Classification de Regan-Morrey pour les fractures du processus coronoïde

4. Analyse statistique

Les analyses descriptives ont été exprimées par un effectif et un pourcentage pour les variables qualitatives, tandis que les variables quantitatives ont été exprimées par une moyenne et un écart-type.

Pour les analyses univariées, des tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis ont été utilisés.

En cas de significativité statistique, au seuil de 5%, une comparaison par paires était réalisée selon la méthode de Dwass, Steel Critchlow et Fligner. Les analyses ont été réalisées avec le logiciel Jamovi (Version 2.3, The Jamovi Project, Sydney, Australia).

RÉSULTATS

1. Reproductibilité du modèle anatomique de TTC

Le protocole rapide a reproduit 4/5 (80%) TTC dans un sens postéro-latéral et 1/5 (20%) dans un sens divergent antéro-postérieur.

Le protocole lent a reproduit 5/5 (100%) TTC dans un sens postéro-latéral.

Les TTC avec luxation postéro-latérale comportaient toujours une fracture de la TR, une fracture du PC, une rupture du ligament collatéral latéral (LCL), une rupture capsulaire antérieure et postérieure, sans lésions retrouvées au niveau du ligament collatéral médial (LCM).

La TTC avec luxation divergente antéro-postérieure comportait une fracture de la TR, une fracture du PC, une rupture du LCL et du LCM, une rupture capsulaire antérieure et postérieure, ainsi qu'une rupture du ligament annulaire et de la membrane interosseuse.

Le bilan lésionnel de chacune des TTC a été détaillé dans la figure 13.

Les photographies des lésions de TTC du protocole rapide du corps 4 (TTC avec luxation postéro-latérale) et du corps 5 (TTC avec luxation divergente antéro-postérieure) ont été présentées dans les figures 17 et 19 respectivement.

	Personne modélisée	Localisation lésionnelle	Direction de la lésion	Volume Vols	Translat en X [mm]	Translat en Y [mm]	Direction du PC Solus Solus Médial	Statistiques biomécaniques (N)	Rotation relative avant lésion (de l'avant-bras par rapport à l'humérus)	Gratit Lésionnel
Général Age : 40 Sexe : M	Postérieur-médial	Coûté droit	Postéro-latérale	Volgus	1	1		TL : 10200 TR : 8180 EC : 3000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000		TTC
	Postérieur-latéral	Coûté gauche	Postéro-médiale	Volgus	3	3		TL : 10200 TR : 10200 EC : 2000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000	Tête radiale de 1.41° (± 0,20°)	TTC
Général Age : 40 Sexe : F	Postérieur-médial	Coûté gauche	Postéro-latérale	Volgus	8	1		TL : 10200 TR : 8180 EC : 3000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000		TTC
	Postérieur-latéral	Coûté droit	Postéro-médiale	Volgus	1	3		TL : 10200 TR : 10200 EC : 2000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000	Tête radiale de 0,02° (± 0,00°)	TTC
Général Age : 50 Sexe : M	Postérieur-médial	Coûté droit	Postéro-latérale	Volgus	3	3		TL : 10200 TR : 8180 EC : 3000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000		TTC
	Postérieur-latéral	Coûté gauche	Postéro-médiale	Volgus	2	1		TL : 10200 TR : 10200 EC : 2000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000	Tête radiale de 0,67° (± 0,04°)	TTC
Général Age : 60 Sexe : F	Postérieur-médial	Coûté gauche	Postéro-latérale	Volgus	3	1		TL : 10200 TR : 8180 EC : 3000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000		TTC
	Postérieur-latéral	Coûté droit	Postéro-médiale	Volgus	3	3		TL : 10200 TR : 10200 EC : 2000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000	Tête radiale de 1,17° (± 0,20°)	TTC
Général Age : 80 Sexe : F	Postérieur-médial	Coûté gauche	Divergence antéro- postérieure (triple : proximal, médial, latéral postérieur)	Volgus	3	3		TL : 10200 TR : 10200 EC : 2000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000		TTC avec lésions LCL et LCM antéro- postérieures
	Postérieur-latéral	Coûté droit	Postéro-médiale	Volgus	3	1		TL : 10200 TR : 10200 EC : 2000 LCL (force) : 10000 LCM (force) : 10000	Tête radiale de 1,00° (± 0,00°)	TTC

Figure 13 : Tableau récapitulatif du bilan lésionnel des modèles anatomiques, des charges à la rupture et des rotations relatives de l'avant-bras par rapport à l'humérus (TR : Tête radiale, PC : Processus coronoïde, LCL : Ligament collatéral latéral, LCM : Ligament collatéral médial)

2. Charges à la rupture

Les charges à la rupture retrouvées pour chacune des TTC ont été détaillées dans la figure 13.

Nous retrouvons une charge à la rupture moyenne du LCL de $3\,126 \pm 1\,066$ N, de la TR de $3\,026 \pm 1\,308$ N et du PC de $2\,613 \pm 1\,120$ N.

Les courbes « forces-déplacement » des TTC du protocole rapide du corps 4 (TTC avec luxation postéro-latérale) et du corps 5 (TTC avec luxation divergente antéro-postérieure) ont été présentées dans les figures 18 et 20 respectivement.

Une comparaison des charges à la rupture de chacune des structures lésées (LCL, TR et PC) lors des protocoles rapides a été pratiquée pour les corps 1 à 4 et retrouvait une p-value de 0,392 pour chacune d'elle.

Une comparaison des charges à la rupture moyennes (comprenant toutes les structures lésées sur un même coude) lors des protocoles rapides a été pratiquée pour les corps 1 à 4 et retrouvait une p-value de 0,033. Cette comparaison a été présentée dans les figures 14 et 15.

Une comparaison des écarts de charges à la rupture de chacune des structures lésées (LCL, TR et PC) entre les protocoles lent et rapide d'un même corps a été pratiquée pour les corps 1 à 4 et retrouvait une moyenne de -4%. La répartition de ces valeurs a été présentée dans la figure 16.

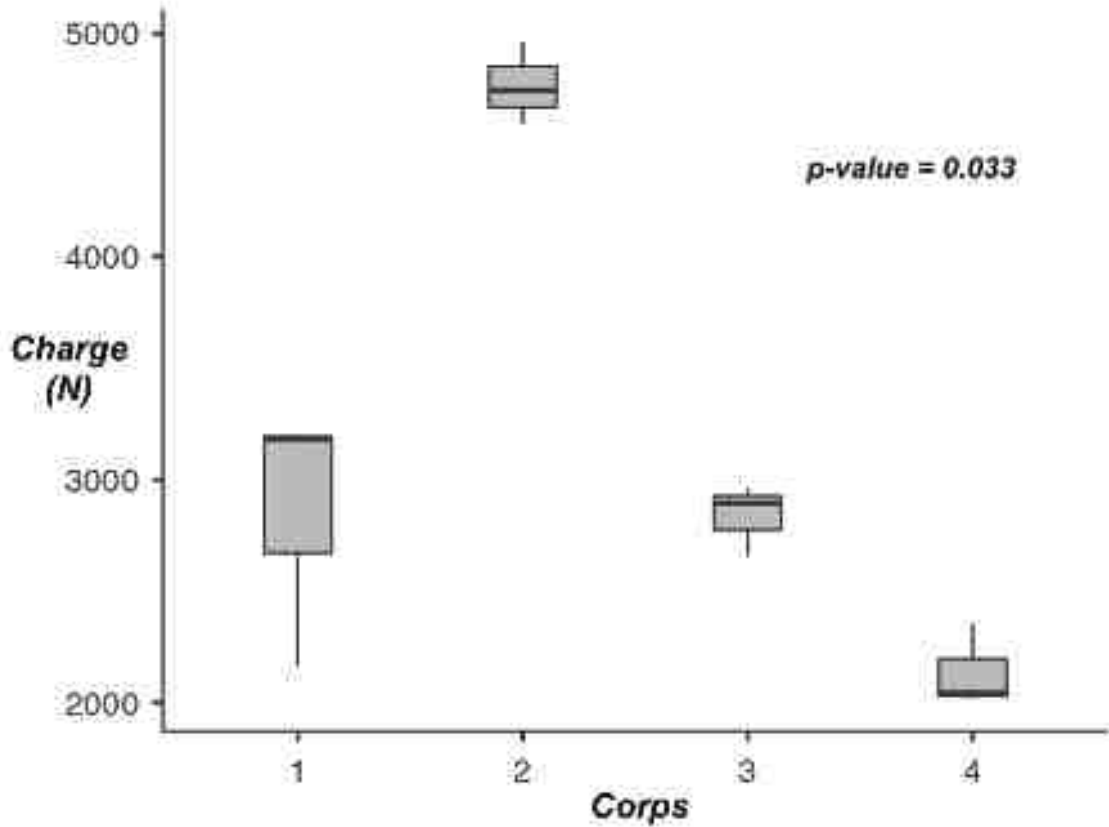


Figure 14 : Comparaison des charges à la rupture moyennes lors des protocoles rapides entre les corps 1 à 4

Paire de corps comparée		W	p-value
1	2	2.777	0.202
1	3	-0.926	0.914
1	4	-2.160	0.421
2	3	-2.777	0.202
2	4	-2.777	0.202
3	4	-2.777	0.202

Figure 15 : Comparaison des charges à la rupture moyennes par paires lors des protocoles rapides entre les corps 1 à 4

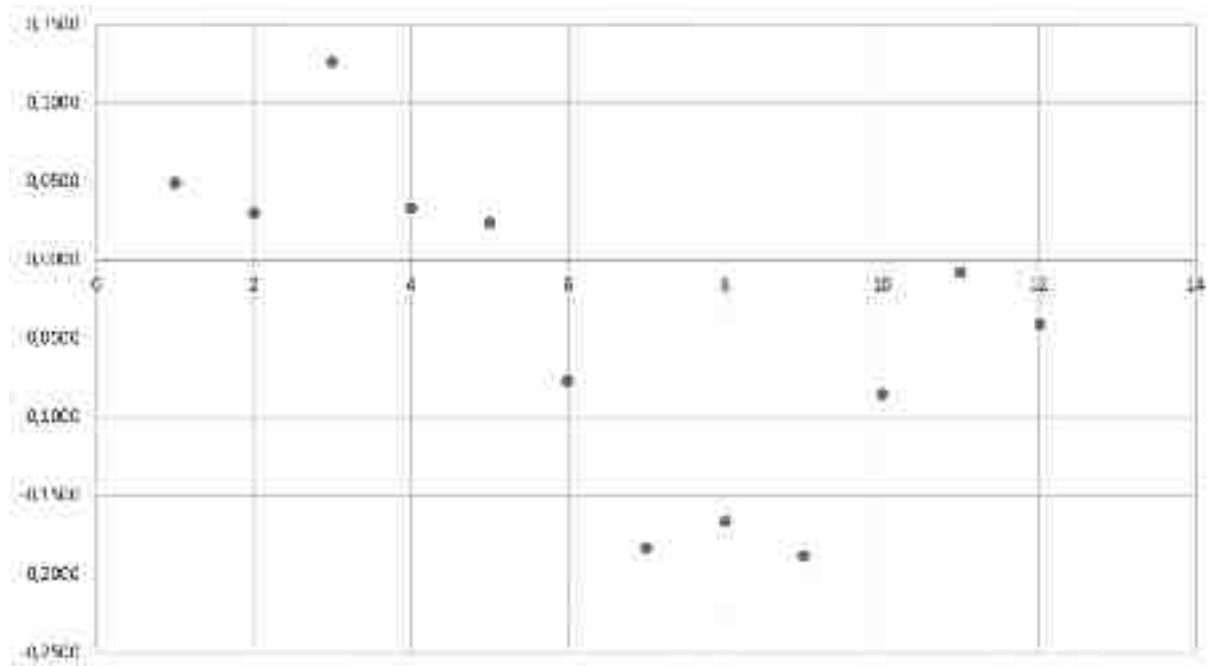


Figure 16 : Répartition des écarts de charges à la rupture de chacune des structures lésées (LCL, TR et PC) entre les protocoles lent et rapide d'un même corps pour les corps 1 à 4

3. Rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus

Les valeurs des rotations relatives de l'avant-bras par rapport à l'humérus avant la luxation pour chacune des TTC ont été détaillées dans la figure 13.

Nous retrouvons une rotation relative moyenne de l'avant-bras par rapport à l'humérus avant la luxation de $1,6^\circ (\pm 1,2)$.

Toutes les rotations relatives de l'avant-bras par rapport à l'humérus avant la luxation se faisaient dans le sens externe.

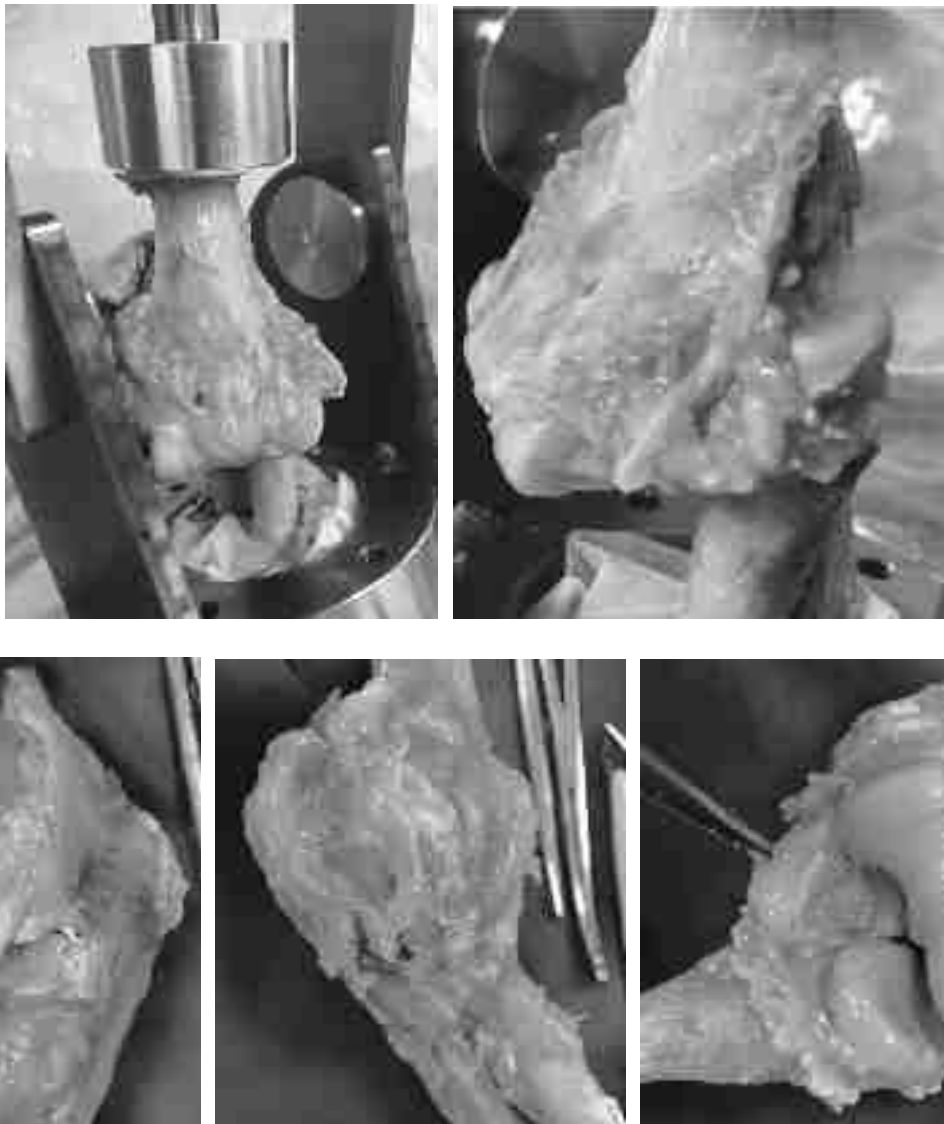


Figure 17 : Photographies des lésions de TTC postéro-latérale après application du protocole rapide sur le coude gauche du corps 4 (Vues respectives : Vues antéro-médiale et antéro-latérale avec luxation postéro-latérale, Vue latérale avec rupture du plan ligamentaire latéral, Vue médiale avec respect du plan ligamentaire médial, Vue antérieure avec fracture de la TR et du PC

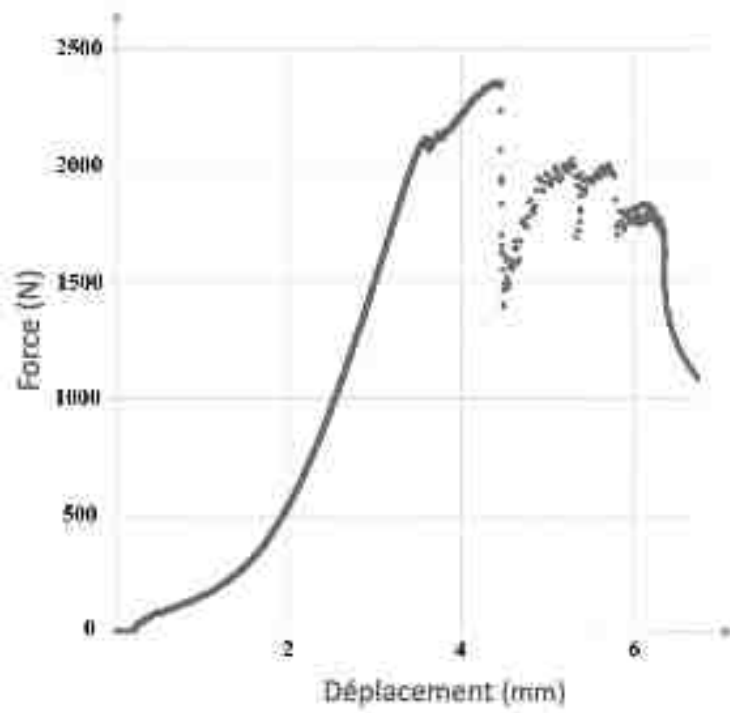


Figure 18 : Exemple de courbe force-déplacement typique de TTC postéro-latérale

(protocole rapide appliqué au coude gauche du corps 4)

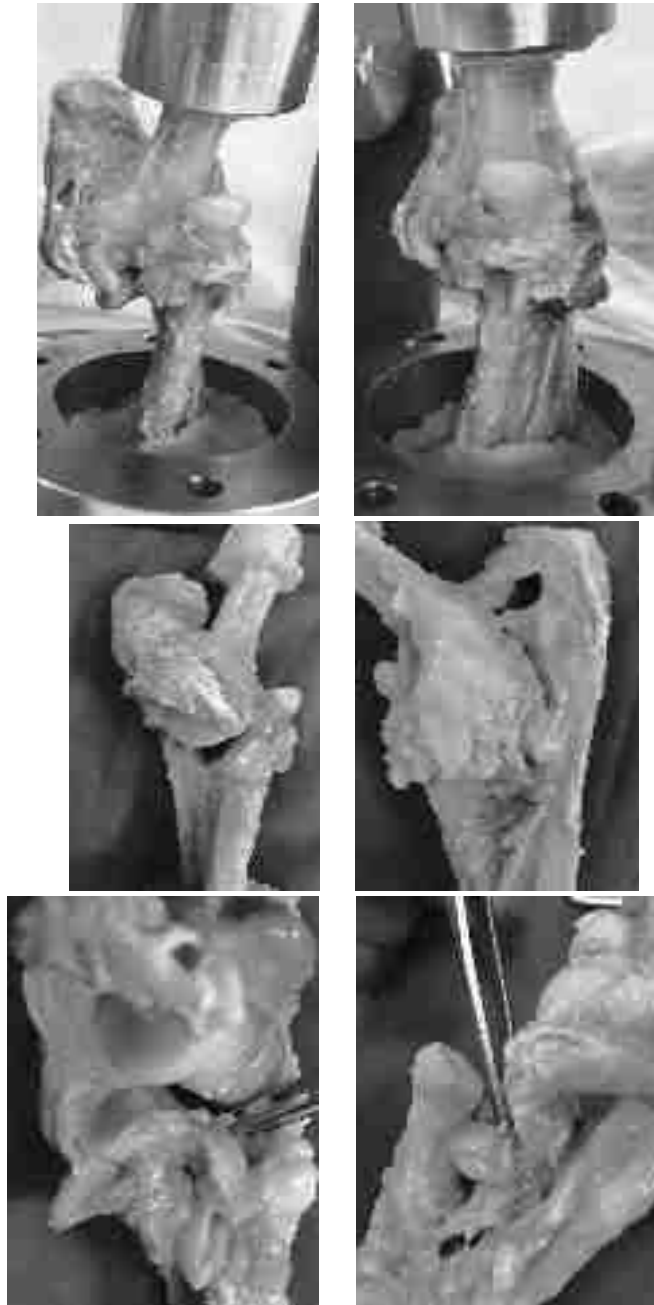


Figure 19 : Photographies des lésions de TTC avec divergence antéro-postérieure après application du protocole rapide sur le coude gauche du corps 5 (Vues respectives : Vues antéro-médiale et antéro-latérale avec luxation divergente antéro-postérieure, Vues médiale et latérale avec rupture des plans ligamentaires médial et latéral, du ligament annulaire et de la membrane interosseuse, Vues médiale et latérale avec fracture du PC et de la TR)

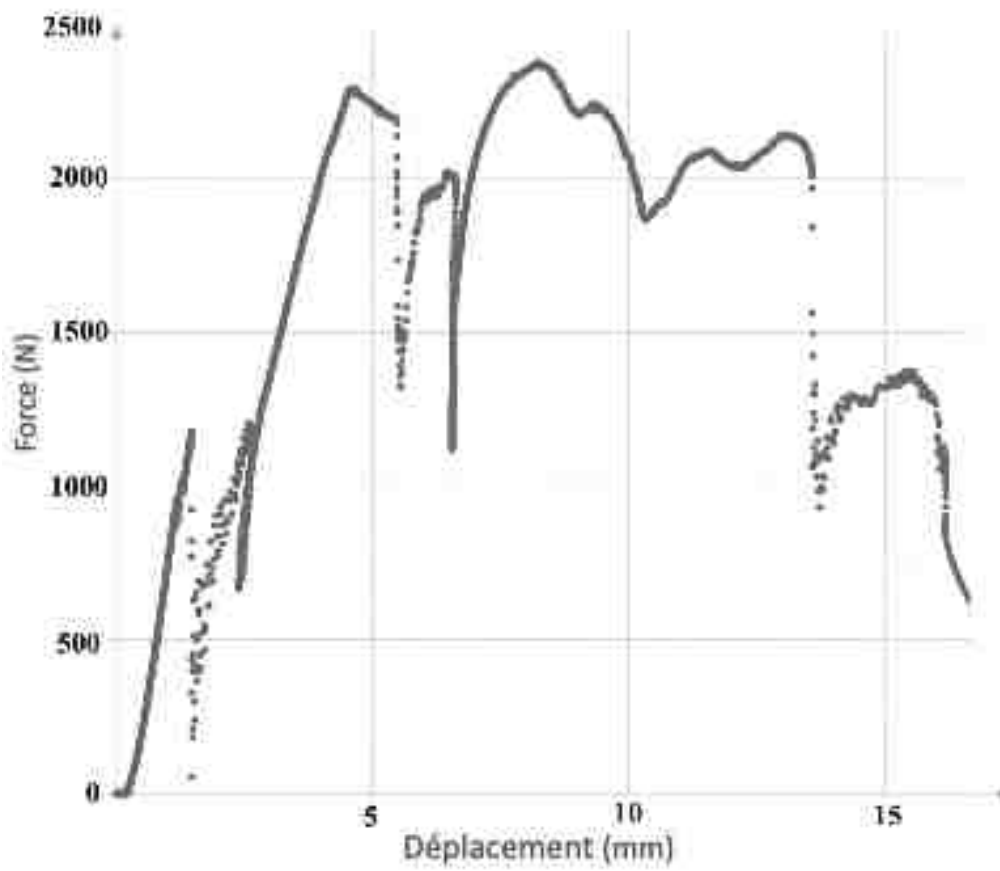


Figure 20 : Exemple de courbe force-déplacement typique avec divergence antéro-postérieure (protocole rapide appliqué au coude gauche du corps 5)

DISCUSSION

L'hypothèse de l'étude a été confirmée : un modèle reproductible de TTC a été créé par une compression axiale sur un coude en sub-flexion et en pronation.

Cette étude était à notre connaissance la première cherchant à créer un modèle anatomique reproductible de TTC. En effet, si de nombreuses études se sont déjà intéressées aux principes théoriques, physiopathologiques ou thérapeutiques des TTC (4,7,15,19,21,22,27,28), aux conséquences biomécaniques de chacune des lésions retrouvées dans celles-ci (13,14,16,17), parfois à la création de modèles anatomiques de luxation du coude, elles n'exploraient cependant pas les problématiques spécifiques de la TTC et présentaient des limites notables (1,11,12).

1. Reproductibilité du modèle anatomique de TTC

Notre modèle a permis de créer 10 TTC : 9/10 (90%) avec une luxation dans le sens postéro-latéral et 1/10 (10%) dans un sens divergent antéro-postérieur.

Il a déjà été rapporté que la TTC présentait classiquement une luxation dans un sens postéro-latéral (1,7,15).

A notre connaissance, si aucune étude n'a étudié spécifiquement la création d'un modèle anatomique reproductible de TTC, certaines ont retrouvé des résultats similaires. Fitzpatrick & al. ont évalué l'influence de la rotation de l'avant-bras sous compression axiale avec un coude en extension, réussissant ainsi à créer six TTC avec une luxation postérieure sur les sept modèles anatomiques étudiés en pronation, néanmoins il n'a pas été pratiqué d'appariement entre les modèles (1).

Wake & al. ont créé cinq TTC avec une luxation postérieure lors d'une compression axiale sur six coudes en extension complète et quatre TTC avec une luxation postérieure sur neuf coudes en flexion de 30°. Cependant, ils ne rapportaient pas d'informations concernant la position de prono-supination des modèles et ceux-ci ont été pratiqués sur des coudes formolés, ce qui a pu modifier les propriétés des tissus et donc influencer la survenue des lésions (11).

La luxation divergente du coude a été décrite radiographiquement par DeLee en 1981 (29), mais est rarement retrouvée dans la pratique clinique (30).

Elle a été définie sous deux formes : une avec divergence antéro-postérieure, la plus commune et une avec divergence médio-latérale, dite transverse, plus rare (30,31).

Concernant la divergence antéro-postérieure, plusieurs études rapportaient que son mécanisme lésionnel était une compression axiale sur la main en extension, l'avant-bras en pronation et le coude en sub-flexion (sans quantification disponible de cette flexion dans la littérature) avec un mouvement de pivot du corps par rapport à la main, imposant donc une hyperpronation forcée sur le coude. Ainsi, l'humérus distal se présentait entre les extrémités proximales du radius et de l'ulna, aboutissant donc à la luxation des 3 articulations du coude (huméro-ulnaire, huméro-radiale et radio-ulnaire) et à de nombreuses lésions des tissus mous péri-articulaires (capsule articulaire antérieure et postérieure, LCM et LCL, ligament annulaire et membrane interosseuse). Cet ensemble amenant ainsi la TR à se déplacer antérieurement jusqu'à la fossette coronoïdienne, suivi du PC se déplaçant postérieurement jusqu'à la fossette olécrânienne (30–32), expliquant ainsi les fractures souvent associées de la TR et du PC (33).

Ce mécanisme lésionnel se rapprochait donc de la position de nos coudes au sein de notre banc d'essai et peut expliquer la création de cette unique TTC avec luxation divergente antéro-postérieure même si le coude controlatéral ainsi que les huit autres modèles ont créé une TTC avec luxation postéro-latérale. D'autant plus que Luukkala & al. ont justement postulé que les variations lésionnelles dépendaient de la direction des forces appliquées lors de la luxation, de la position du membre et des variations de laxité des tissus entre les patients (28).



Figure 21 : Schéma d'une luxation du coude divergente antéro-postérieure et reconstruction tomodensitométrique d'une TTC divergente antéro-postérieure d'un coude droit vue de profil

Enfin, notre étude retrouvait huit fractures du PC de type 2 et deux de type 1 selon Regan-Morrey, ce qui s'accorde avec les travaux de Doornberg & al. qui rapportaient que, dans un contexte de TTC, les fractures du PC correspondaient à environ 35% de la hauteur du PC (34).

2. Charges à la rupture entre les modèles

Notre étude a permis d'étudier les charges à la rupture des différentes structures concernées dans une TTC. Nous avons pris la décision de ne pas placer de capteurs sur ces structures car cela aurait nécessité l'ouverture, même minime, de la capsule articulaire induisant une probable altération des propriétés biomécaniques de notre modèle.

Lors de la compression axiale de l'intégralité des coudes ayant abouti à des TTC avec luxation postéro-latérale, on retrouvait systématiquement un déplacement du coude en valgus avec une rotation externe pathologique forcée de l'avant-bras. Ceci correspondait à la description de O'Driscoll & al., qui rapportaient que, lors du traumatisme, le coude reste fixe et le corps impose un valgus associé à un moment rotatoire postéro-latéral (15,19,24). De plus, la chronologie lésionnelle de TTC par luxation postéro-latérale a été décrite dans plusieurs études et même si plusieurs autres théories ont été proposées (4,5,22,27,28,35)), la principale est celle du cercle d'Horii décrite par O'Driscoll & al. et reprise par de nombreux auteurs. Cette chronologie lésionnelle commençant par une rupture capsulo-ligamentaire, initialement du LCL puis se prolongeant progressivement de latéral en médial, avec une possible lésion des faisceaux postérieur et moyen du LCM et plus rarement de son faisceau antérieur. Celle-ci rapportant ensuite la survenue des fractures de passage en amorçant la luxation postérieure, de la TR puis du PC, ou possiblement aussi par arrachement de la capsule antérieure, avec parfois quelques lésions peu communes associées comme une lésion ostéochondrale ou encore une fracture du capitulum (1,15–19).

Or, durant les protocoles ayant abouti à une TTC avec luxation postéro-latérale, les déplacements des coudes correspondaient exactement à cette physiopathologie décrite par O’Driscoll, avec trois charges à la rupture discernables sur les courbes force-déplacement et un bilan lésionnel retrouvant toujours une rupture du LCL associée à des fractures de la TR et du PC, sans rupture visible des faisceaux du LCM. La rupture capsulaire se faisant de manière progressive dans ce contexte (1,15–19), elle n’apparaissait donc pas sous la forme d’une inflexion de la courbe force-déplacement et ne pouvait donc pas être responsable d’une des trois charges à la rupture visibles sur cette courbe.

Ainsi, nous avons pu relier, grâce à cette chronologie lésionnelle précise, chacune des charges à la rupture mesurées à la structure concernée : la première étant la rupture du LCL, la seconde la fracture de la TR et la dernière celle du PC. Ces lésions ont été détaillées dans la figure 13.

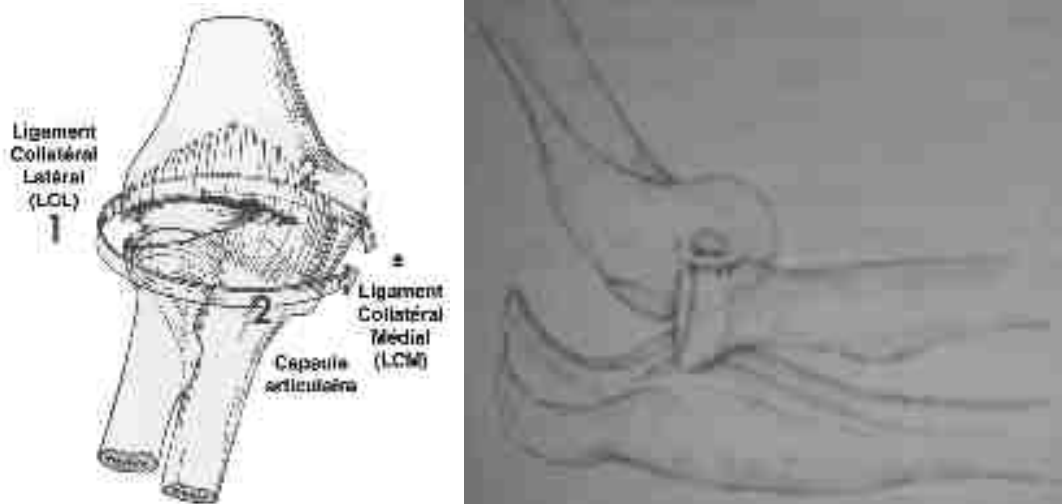


Figure 22 : Schéma de la chronologie lésionnelle d’une TTC (lésions capsulo-ligamentaire de latéral en médial, suivies des lésions osseuses avec l’exemple d’une fracture de passage de la

TR)



Figure 23 : Reconstruction tomodensitométrique de TTC d'un coude gauche (les flèches montrant les fractures de passage de la TR et du PC)

La physiopathologie de la luxation divergente expliquée ci-dessus rapportait les nombreuses lésions osseuses et des tissus mous présentes lors de celle-ci, ce qui peut expliquer les nombreuses charges à la rupture retrouvées lors de nos acquisitions.

Néanmoins, peu d'études se sont intéressées à la luxation divergente du coude et cette physiopathologie ne fait pas consensus (31). De plus, notre modèle ne permettait pas d'étudier visuellement l'ordre lésionnel intra-articulaire à cause du respect de la capsule lors de la dissection, il est donc difficile d'associer une structure précise à chaque charge à la rupture. Pour cette raison, il n'était pas raisonnable de pratiquer une comparaison des charges à la rupture de ce modèle avec celles des modèles ayant abouti à une TTC avec luxation postéro-latérale.

On retrouvait une charge à la rupture moyenne du LCL de $3\,126 \pm 1\,066$ N, de la TR de $3\,026 \pm 1\,308$ N et du PC de $2\,613 \pm 1\,120$ N.

A notre connaissance, l'étude de Fitzpatrick & al. était la seule à s'être intéressée à la charge à la rupture dans un contexte de TTC. Celle-ci retrouvait une charge moyenne à la rupture moyenne de $2\,355,4 \pm 339,8$ N, sans préciser le nombre de charges à la rupture objectivées ni leur lien avec chacune des structures lésées (1).

L'étude d'Amis & al. rapportait une charge à la rupture moyenne de 2900 (300-6100) N pour la TR et de 4 300 (1 600-6 000) N pour le PC. Mais l'étude se concentrait sur des fractures étudiées isolément, en-dehors d'un contexte de TTC et en pratiquant un protocole traumatique éloigné de celui de notre étude puisqu'elle utilisait une masse pendulaire impactant brutalement le coude ou l'avant-bras afin de créer un mécanisme direct ou indirect respectivement (12).

La luxation étant un événement brutal (25), le protocole rapide était celui qui permettait de se rapprocher le plus précisément du contexte traumatique *in vivo* d'une TTC.

Pour les protocoles rapides des corps 1 à 4, si la comparaison des charges à la rupture de chacune des structures lésées (LCL, TR et PC) ne montrait pas de différence statistiquement significative (p-value = 0,392), avec une p-value égale pour chacune des structures pouvant s'expliquer par l'effectif restreint de notre étude, la comparaison des charges à la rupture moyennes (comprenant toutes les structures lésées d'un même coude) montrait une différence statistiquement significative (p-value = 0,033). La variabilité importante des corps notamment concernant l'âge (78 à 98 ans) et le sexe pouvait expliquer cette variabilité des charges à la rupture entre les corps.

Devant cette variabilité des différents corps, nous avons effectué une comparaison des écarts de charges à la rupture de chacune des structures lésées (LCL, TR et PC) entre les protocoles lent et rapide d'un même corps pour les corps 1 à 4. Celle-ci retrouvait une moyenne faible de -4%, avec une répartition aléatoire et homogène des valeurs autour de 0 (comme présentée dans la figure 16). Cela permettait, d'autant plus au sein d'un effectif restreint de 4 corps, de supposer qu'il n'y avait pas de surestimation ou de sous-estimation systématique des valeurs de charges à la rupture entre les 2 protocoles sur un même corps.

Il faut noter qu'au sein de notre étude, les charges à la rupture d'un même modèle ne suivaient pas toujours un ordre décroissant pendant la création des neuf TTC postéro-latérales. En effet, 5/9 (55%) d'entre elles présentaient des charges à la rupture d'ordre décroissant (la plus haute étant la première, suivie de la seconde, puis de la troisième), mais les 4/9 (45%) autres présentaient une charge à la rupture maximale pour la seconde lésion par rapport à la première et à la troisième. L'absence de détails des différentes charges à la rupture dans le cadre d'une TTC au sein de la littérature ne nous permettait pas de comparer ces résultats à d'autres études ni de se prononcer sur la validité de ceux-ci. On pouvait tout de même rappeler que d'autres théories physiopathologiques des TTC ont été proposées par d'autres auteurs (4,5,22,27,28,35), mais elles comportaient tout de même des limites notables : un caractère rétrospectif avec un risque de biais de sélection (35), une reproductibilité incertaine pour déterminer les lésions ligamentaires à l'imagerie (28), l'utilisation de vidéos sans imageries associées pour confirmer les luxations ainsi que les lésions osseuses et ligamentaires (22).

De plus, même si plusieurs auteurs rapportaient que, pour un même modèle anatomique, lorsque la vitesse de mise en charge s'élevait, la charge à la rupture enregistrée diminuait (25), ce n'était pas toujours le cas dans notre étude puisque les coudes des corps 1 et 2 présentaient des charges à la rupture plus basses dans le protocole rapide par rapport au protocole lent, alors que c'était l'inverse pour les coudes des corps 3 et 4.

Enfin, notre étude n'a pas retrouvé de lésion des faisceaux antérieur, moyen et postérieur du LCM lors des TTC avec luxation postéro-latérale. Même si plusieurs études rapportaient des lésions du LCM lors des luxations simples ou complexes du coude (28,35,36), O'Driscoll rapportait aussi cette absence classique de lésion du faisceau antérieur du LCM dans la TTC, qui est le principal responsable de la stabilité du coude au sein du plan médial, notamment en valgus (37,38). Il expliquait ceci grâce aux fractures de la TR et du PC qui permettaient de dissiper une grande partie de l'énergie de la luxation du coude (19).

3. Rotation relative entre les modèles

Nous retrouvons une rotation externe systématique de l'avant-bras par rapport à l'humérus dans l'intégralité des modèles lors de la compression axiale avec une rotation externe moyenne de $1,6^\circ (\pm 1,2)$ avant la luxation.

Comme décrit ci-dessus, la comparaison des écarts de charges à la rupture de chacune des structures lésées (LCL, TR et PC) entre les protocoles lent et rapide d'un même corps a montré qu'il n'y avait pas de surestimation ou de sous-estimation systématique des valeurs entre les 2 protocoles. Ainsi, nous pouvons supposer que les valeurs de rotations relatives retrouvées lors des protocoles lents sont applicables à celles des protocoles rapides.

Plusieurs auteurs ont décrit l'existence d'une REPF de l'avant-bras comme étape initiale lors d'une luxation postérieure du coude (7,17,20). Celle-ci étant définie par la rotation relative combinée de l'ulna par rapport à la trochlée humérale et du radius par rapport au capitulum, ce qui la distingue de la prono-supination définie par le mouvement relatif du radius par rapport à l'ulna (17). La REPF réduisant l'effet stabilisateur du PC contre la luxation postérieure en cas de compression axiale (17).

Cette REPF serait expliquée par la surface inclinée de la partie latérale des deux-tiers médiaux de la trochlée humérale, permettant de convertir les forces de compression axiale de l'avant-bras en une force de rotation latérale (5).

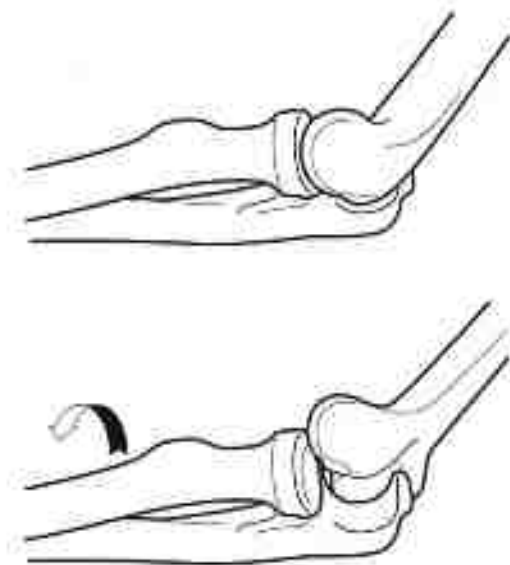


Figure 24 : Schéma explicatif de la rotation externe pathologique forcée (REPF) de l'avant-bras

Selon O'Driscoll, la luxation postéro-latérale résulte d'un coude restant fixe lors d'un stress en valgus avec un moment postéro-latérale qui lui est imposé (15,19,21) et cette rotation latérale a été mesurée à 34-50° pour un coude à 80° de flexion, mais sans s'intéresser spécifiquement à la TTC (19), ce qui est très éloigné des conditions de notre étude. A notre connaissance, aucune mesure de cette REPF n'a été pratiquée dans le cadre d'une TTC.

Néanmoins, cette REPF ne semblait pas systématique. En effet, Fitzpatrick & al. rapportaient que sur les six TTC créées lors d'une compression axiale en pronation maximale, quatre d'entre elles débutaient par une REPF avec rupture initiale du LCL et deux d'entre elles par une rotation interne forcée de l'avant-bras avec rupture initiale du LCM, en concluant que la rotation latérale ou médiale de l'avant-bras déterminait le plan ligamentaire lésé initialement (LCL ou LCM respectivement) dans le cadre d'une luxation postéro-latérale (1).

4. Forces et limites de notre étude

Cette étude était, à notre connaissance, la première cherchant à créer un modèle anatomique reproductible de TTC, à mesurer la rotation relative entre l'avant-bras et l'humérus avant la luxation et les charges à la rupture de chacune des structures concernées lors d'une TTC. Une autre force de l'étude était l'utilisation de pièces anatomiques fraîches permettant d'éviter l'utilisation du formol, connu pour altérer les propriétés biomécaniques des tissus en les solidifiant ce qui augmente leur rigidité (39–41), comme d'autres études anatomiques l'ont fait (11). L'appariement par randomisation entre le protocole lent et rapide, permettant d'éviter de nombreux facteurs de confusion, ainsi que le déroulement de l'étude dans un laboratoire certifié et spécialisé en Biomécanique étaient aussi des forces notables de notre étude. Enfin, la reproductibilité entre les modèles était assurée par une méthode de dissection précise pratiquée par un même opérateur, ainsi qu'un positionnement standardisé au sein du banc d'essai avec une seule flexion et le maximum de pronation possible.

Néanmoins, la création d'une TTC avec luxation divergente alors que le coude controlatéral ainsi que les huit autres modèles ont créé une TTC avec luxation postéro-latérale fait penser qu'une amélioration de cette reproductibilité reste possible, car un manque de reproductibilité du degré de flexion peut influencer la lésion créée. En effet, Wake & al. ont montré que lorsque la flexion du coude augmentait pendant une compression axiale, les contraintes en compression qui lui sont imposées se déplaçaient du PC vers l'olécrâne (11).

Il serait justifié de proposer une étude ultérieure avec des critères plus précis que ceux utilisés macroscopiquement dans notre protocole, par exemple l'utilisation d'un contrôle informatique du positionnement au sein du banc d'essai pour accompagner notre contrôle visuel. De plus, même si le sexe et l'âge des corps utilisés étaient disponibles, nous n'avons pas pratiqué de densitométrie osseuse sur les pièces anatomiques, alors que le lien entre celle-ci et le risque fracturaire a déjà bien été rapporté (42). Ce point est donc à considérer pour interpréter les résultats des charges à la rupture de nos modèles.

Les autres limites étaient notamment celles inhérentes à toute étude *in vitro*, rendant *de facto* l'extrapolation des résultats au domaine clinique incertaine, notamment par l'absence de considération dans notre modèle du rôle des muscles péri-articulaires (*flexor carpi ulnaris*, *extensor carpi ulnaris*, *brachialis*, *anconeus*) qui sont des stabilisateurs secondaires du coude par leur rôle dynamique (43,44).

CONCLUSION

Sur la base des résultats de cette étude, nous pouvons affirmer avoir créé et validé un modèle cadavérique de TTC en imposant une compression axiale sur un coude fléchi de 15° en pronation maximale à une vitesse de 100 et 10 mm/minute.

De plus, nous retrouvions une charge à la rupture moyenne du LCL de $3\,126 \pm 1\,066$ N, de la TR de $3\,026 \pm 1\,308$ N et du PC de $2\,613 \pm 1\,120$ N avec une rotation externe de l'avant-bras par rapport à l'humérus moyenne avant la luxation de $1.6^\circ (\pm 1.2)$.

VU et approuvé
Strasbourg, le 13 FEV. 2023
Le Doyen de la Faculté de
Médecine, Maïeutique et Sciences de la Santé
Professeur Jean SIBILIA

VU
Strasbourg, le 8.2.2023
Le président du jury de thèse
Professeur Philippe CLAVERT

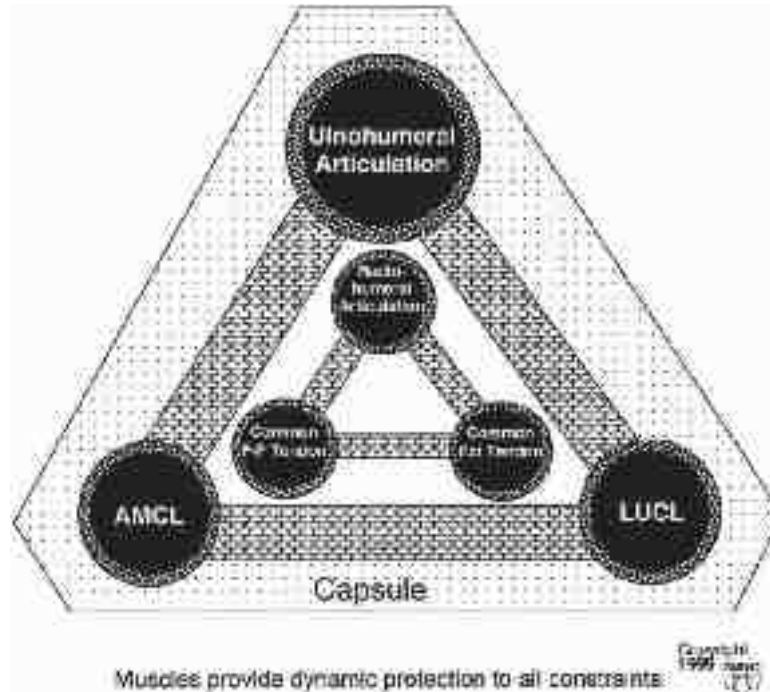
PERSPECTIVES

Ce travail préliminaire de validation d'un modèle reproductible permettra par la suite son utilisation dans l'étude d'autres problématiques liées aux TTC : en s'intéressant notamment à la prise en charge des TTC avec des tests portant sur différents moyens d'ostéosynthèses ou prothétiques, ainsi qu'à la biomécanique des TTC. Cela permettrait de mieux appréhender la complexité physiopathologique de cette entité lésionnelle et de guider le praticien dans la prise en charge opératoire ainsi que dans les consignes de rééducation qui en découlent.

En effet, de nombreuses études s'étant intéressées à ces problématiques ont dû créer manuellement les lésions de TTC (par section des plans ligamentaires, ostéotomie du PC, résection de la TR ...) (13,14,16,45) alors que l'utilisation d'un modèle anatomique reproductible et validé de TTC permettra de se rapprocher plus précisément de la situation en pratique courante.

ANNEXES

Annexe 1 : Théorie des trépieds de O'Driscoll



O'Driscoll a expliqué la stabilité du coude en hiérarchisant les éléments stabilisateurs selon leur importance fonctionnelle. Il décrivait d'une part des stabilisateurs primaires, qui sont l'articulation huméro-ulnaire, le LCL avec une fonction stabilisatrice prédominante de son faisceau postérieur et le LCM avec une fonction stabilisatrice prédominante de son faisceau antérieur. Et d'autre part des stabilisateurs secondaires, qui sont l'articulation huméro-radiale, la capsule articulaire et les muscles péri-articulaires permettant de compenser la lésion d'un des stabilisateurs primaires et donc de préserver la stabilité du coude par l'interdépendance entre chacune de ces structures.

Dans le cas d'une lésion de type TTC, la quasi-totalité des stabilisateurs sont lésés :

- La luxation, qui est postéro-latérale dans la majorité des cas, induit une lésion du LCL, de la capsule articulaire et des muscles péri-articulaires, notamment des épicondyliens latéraux ainsi qu'une possible lésion du LCM dont parfois son faisceau antérieur.
- La fracture de la TR induit une lésion de l'articulation huméro-radiale.
- La fracture du PC induit une lésion de l'articulation huméro-ulnaire et possiblement du LCM, du fait de son faisceau antérieur qui s'insère distalement sur la facette antéro-médiale du PC, ainsi que de la capsule articulaire, celle-ci s'insérant sur la pointe du PC.

Par conséquent, une TTC va induire des lésions d'au moins deux stabilisateurs primaires et trois stabilisateurs secondaires, ce qui explique sa complication principale qu'est l'instabilité chronique.

Annexe 2 : Technique de dissection des pièces anatomiques

Installation du membre sur un support maintenant le coude dans l'axe et en sub-flexion.

Incision médiane antérieure sur toute la longueur du membre.

Dissection afin de décoller le tissu adipeux des masses musculaires médiales et latérales

Dissection au sein de l'espace entre les 2 chefs du biceps brachial jusqu'à leur insertion tendineuse commune distale.

Décollement des adhérences entre le chef long du biceps brachial et la surface corticale humérale antéro-latérale.

Décollement des adhérences entre le chef court du biceps brachial et la surface corticale humérale antéro-médiale.

Désinsertion du tendon proximal du muscle brachial, puis décollement de ses adhérences sur la surface corticale humérale antéro-latérale jusqu'à voir apparaître la capsule articulaire (en prenant soin de ne pas la léser), en emportant le nerf radial.

Désinsertion du tendon distal du muscle coraco-brachial, puis décollement de ses adhérences sur la surface corticale humérale médiale jusqu'à voir apparaître la capsule articulaire (en prenant soin de ne pas la léser), en emportant l'artère humérale et les nerfs ulnaire, médian et musculo-cutané.

Décollement des adhérences entre les muscles de l'avant-bras et la diaphyse radiale puis les 2 faces de la membrane interosseuse, en progressant depuis la distalité jusqu'à voir apparaître le tendon bicipital distal, en emportant les artères ulnaire et radiale ainsi que les nerfs médian, ulnaire et les 2 branches (superficielle et profonde) du nerf radial.

Libération circonférentielle du tendon bicipital distal puis désinsertion sur la tubérosité radiale.

Installation du membre en légère rotation latérale sur le même support.

Dissection fine des adhérences entre les muscles épicondyliens médiaux et la capsule articulaire (en prenant soin de ne pas la léser) puis désinsertion sur l'épicondyle médial, jusqu'à rejoindre la face médiale du tendon distal du triceps brachial.

Repérer et libérer le tendon distal du muscle brachial, puis l'inciser à 2 mm de son insertion (afin de ne pas léser la capsule et le processus coronoïde).

Installation du membre en légère rotation médiale sur le même support.

Dissection fine des adhérences entre les muscles épicondyliens latéraux et la capsule articulaire (en prenant soin de ne pas la léser) puis désinsertion sur l'épicondyle latéral.

Installation du membre en rotation médiale complète sur le même support.

Décollement des adhérences entre les muscles de l'avant-bras et la crête ulnaire.

Décollement des adhérences entre le triceps brachial et la surface corticale humérale postérieure et la capsule articulaire postérieure (en prenant soin de ne pas la léser), puis désinsertion du tendon distal du triceps brachial sur l'olécrâne jusqu'à rejoindre la dissection pratiquée depuis le bord médial du coude.

Retirer l'ensemble des tissus mous disséqués de manière circonférentielle.

Installation du membre à nouveau dans l'axe sur le même support.

Terminer par une dissection fine permettant de retirer l'intégralité des fibres musculaires restantes (en prenant toujours soin de ne pas la léser la capsule articulaire) et en respectant le plan ligamentaire médial et latéral ainsi que le ligament annulaire.

Ruginer les diaphyses humérales, radiales et ulnaires jusqu'à avoir une surface corticale lisse.

BIBLIOGRAPHIE

1. Fitzpatrick MJ, Diltz M, McGarry MH, Lee TQ. A New Fracture Model for “Terrible Triad” Injuries of the Elbow: Influence of Forearm Rotation on Injury Patterns. *J Orthop Trauma*. oct 2012;26(10):591-6.
2. Stoneback JW, Owens BD, Sykes J, Athwal GS, Pointer L, Wolf JM. Incidence of Elbow Dislocations in the United States Population: *J Bone Jt Surg-Am Vol*. févr 2012;94(3):240-5.
3. Rezaie N, Gupta S, Service BC, Osbahr DC. Elbow Dislocation. *Clin Sports Med*. juill 2020;39(3):637-55.
4. Rhyou IH, Kim YS. New mechanism of the posterior elbow dislocation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA*. déc 2012;20(12):2535-41.
5. Bozon O, Chrosciany S, Loisel M, Dellestable A, Gubbiotti L, Dumartinet-Gibaud R, et al. Terrible triad injury of the elbow: a historical perspective. *Int Orthop*. oct 2022;46(10):2265-72.
6. Fornalski S, Gupta R, Lee TQ. Anatomy and Biomechanics of the Elbow Joint: *Tech Hand Up Extrem Surg*. déc 2003;7(4):168-78.
7. Sanchez-Sotelo J, Morrey M. Complex elbow instability: surgical management of elbow fracture dislocations. *EFORT Open Rev*. mai 2016;1(5):183-90.
8. van der Horst AS, Stephens AR, Wei G, Presson AP, Tashjian RZ, Kazmers NH. Prognostic Factors Affecting Long-Term Outcomes After Elbow Dislocation: A Longitudinal Cohort Study. *J Hand Surg Glob Online*. sept 2021;3(5):260-5.
9. Hotchkiss RN: Fractures and dislocations of the elbow, in Rockwood CA Jr, Green DP, Bucholz RW, Heckman JD (eds): *Rockwood and Green’s Fractures in Adults*, ed 4, Philadelphia, PA: Lippincott-Raven, 1996, vol 1, pp 929-1024.
10. O’Driscoll SW, Jupiter JB, King GJ, Hotchkiss RN, Morrey BF. The unstable elbow. *Instr Course Lect*. 2001;50:89-102.
11. Wake H, Hashizume H, Nishida K, Inoue H, Nagayama N. Biomechanical analysis of the mechanism of elbow fracturedislocations by compression force. *J Orthop Sci*. janv 2004;9(1):44-50.
12. Amis AA, Miller JH. The mechanisms of elbow fractures: an investigation using impact tests in vitro. *Injury*. avr 1995;26(3):163-8.
13. Fern SE, Owen JR, Ordyna NJ, Wayne JS, Boardman ND. Complex varus elbow instability: A terrible triad model. *J Shoulder Elbow Surg*. mars 2009;18(2):269-74.

14. Beingessner DM, Dunning CE, Stacpoole RA, Johnson JA, King GJW. The effect of coronoid fractures on elbow kinematics and stability. *Clin Biomech.* févr 2007;22(2):183-90.
15. Mathew PK, Athwal GS, King GJW. Terrible Triad Injury of the Elbow: Current Concepts: *J Am Acad Orthop Surg.* mars 2009;17(3):137-51.
16. Deutch SR, Jensen SL, Tyrdal S, Olsen BS, Sneppen O. Elbow joint stability following experimental osteoligamentous injury and reconstruction. *J Shoulder Elbow Surg.* sept 2003;12(5):466-71.
17. Deutch SR, Jensen SL, Olsen BS, Sneppen O. Elbow joint stability in relation to forced external rotation: an experimental study of the osseous constraint. *J Shoulder Elbow Surg.* mai 2003;12(3):287-92.
18. Ohl X, Siboni R. Surgical treatment of terrible triad of the elbow. *Orthop Traumatol Surg Res.* févr 2021;107(1):102784.
19. O'Driscoll SW, Morrey BF, Korinek S, An KN. Elbow subluxation and dislocation. A spectrum of instability. *Clin Orthop.* juill 1992;(280):186-97.
20. Osborne G, Cotterill P. Recurrent dislocation of the elbow. *J Bone Joint Surg Br.* mai 1966;48(2):340-6.
21. O'Driscoll SW, Bell DF, Morrey BF. Posterolateral rotatory instability of the elbow. *J Bone Joint Surg Am.* mars 1991;73(3):440-6.
22. Schreiber JJ, Warren RF, Hotchkiss RN, Daluiski A. An online video investigation into the mechanism of elbow dislocation. *J Hand Surg.* mars 2013;38(3):488-94.
23. Verma V, Singh A, Kushwaha NS, Sharma Y, Singh A. Correlation Between Morphometric Measurements and Carrying Angle of Human Elbow. *Cureus [Internet].* 27 juill 2022 [cité 14 nov 2022]; Disponible sur: <https://www.cureus.com/articles/105861-correlation-between-morphometric-measurements-and-carrying-angle-of-human-elbow>
24. Kushwaha NS, Verma V, Singh A, Sharma Y, Singh A. A Study of Factors Associated With Carrying Angle of the Human Elbow in Pediatric Age Group. *Cureus [Internet].* 30 mai 2022 [cité 14 nov 2022]; Disponible sur: <https://www.cureus.com/articles/97707-a-study-of-factors-associated-with-carrying-angle-of-the-human-elbow-in-pediatric-age-group>
25. Clavert P, Kempf JF, Bonnomet F, Kahn JL. 214 Évaluation des caractéristiques mécaniques primaires de deux interventions de stabilisation antérieure de l'épaule : le Bankart et la butée coracoïdienne. Modèle cadavérique de luxation antérieure traumatique de l'épaule. *Rev Chir Orthopédique Réparatrice Appar Mot.* oct 2004;90(6):128-9.
26. Iannuzzi NP, Leopold SS. In Brief: The Mason Classification of Radial Head Fractures. *Clin Orthop.* juin 2012;470(6):1799-802.

27. Ring D, Jupiter JB. Fracture-dislocation of the elbow. *J Bone Joint Surg Am.* avr 1998;80(4):566-80.
28. Luukkala T, Temperley D, Basu S, Karjalainen TV, Watts AC. Analysis of magnetic resonance imaging-confirmed soft tissue injury pattern in simple elbow dislocations. *J Shoulder Elbow Surg.* févr 2019;28(2):341-8.
29. DeLee JC. Transverse divergent dislocation of the elbow in a child. Case report. *J Bone Joint Surg Am.* févr 1981;63(2):322-3.
30. Zaricznyj B. Transverse divergent dislocation of the elbow. *Clin Orthop.* avr 2000;(373):146-52.
31. Wu Y, Jiang H, Miao W. A case report of children's divergent dislocation of the elbow and review of literature. *Medicine (Baltimore).* nov 2016;95(44):e4772.
32. Nanno M, Sawaizumi T, Ito H. Transverse divergent dislocation of the elbow with ipsilateral distal radius fracture in a child. *J Orthop Trauma.* févr 2007;21(2):145-9.
33. Parikh SN, Lykissas MG, Mehlman CT, Sands S, Herrera-Soto J, Panchal A, et al. Convergent and divergent dislocation of the pediatric elbow: two case reports and comprehensive review of literature. *J Pediatr Orthop Part B.* mars 2014;23(2):158-67.
34. Doornberg JN, van Duijn J, Ring D. Coronoid Fracture Height in Terrible-Triad Injuries. *J Hand Surg.* mai 2006;31(5):794-7.
35. Schreiber JJ, Potter HG, Warren RF, Hotchkiss RN, Daluiski A. Magnetic Resonance Imaging Findings in Acute Elbow Dislocation: Insight Into Mechanism. *J Hand Surg.* févr 2014;39(2):199-205.
36. Josefsson PO, Johnell O, Wendeberg B. Ligamentous injuries in dislocations of the elbow joint. *Clin Orthop.* août 1987;(221):221-5.
37. Schwab GH, Bennett JB, Woods GW, Tullos HS. Biomechanics of elbow instability: the role of the medial collateral ligament. *Clin Orthop.* 1980;(146):42-52.
38. Regan WD, Korinek SL, Morrey BF, An KN. Biomechanical study of ligaments around the elbow joint. *Clin Orthop.* oct 1991;(271):170-9.
39. Ling Y, Li C, Feng K, Duncan R, Eisma R, Huang Z, et al. Effects of fixation and preservation on tissue elastic properties measured by quantitative optical coherence elastography (OCE). *J Biomech.* mai 2016;49(7):1009-15.
40. Estermann SJ, Förster-Streffleur S, Hirtler L, Streicher J, Pahr DH, Reisinger A. Comparison of Thiel preserved, fresh human, and animal liver tissue in terms of mechanical properties. *Ann Anat - Anat Anz.* juill 2021;236:151717.

41. Hayashi S, Naito M, Kawata S, Qu N, Hatayama N, Hirai S, et al. History and future of human cadaver preservation for surgical training: from formalin to saturated salt solution method. *Anat Sci Int.* janv 2016;91(1):1-7.
42. Bracker MD, Watts NB. How to get the most out of bone densitometry: Results can help assess fracture risk and guide therapy. *Postgrad Med.* oct 1998;104(4):77-86.
43. Lin F, Kohli N, Perlmutter S, Lim D, Nuber GW, Makhsous M. Muscle contribution to elbow joint valgus stability. *J Shoulder Elbow Surg.* nov 2007;16(6):795-802.
44. Cohen MS, Hastings H. Rotatory Instability of the Elbow. The Anatomy and Role of the Lateral Stabilizers*: *J Bone Jt Surg.* févr 1997;79(2):225-33.
45. Chanlalit C, Shukla DR, Fitzsimmons JS, An KN, O'Driscoll SW. The biomechanical effect of prosthetic design on radiocapitellar stability in a terrible triad model. *J Orthop Trauma.* sept 2012;26(9):539-44.

DÉCLARATION SUR L'HONNEUR

DÉCLARATION SUR L'HONNEUR



Document avec signature originale devant être joint :

- à votre mémoire de D.E.S.
- à votre dossier de demande de soutenance de thèse

Nom : BALTASAT Prénom : ANTOINE

Ayant été informé(e) qu'en m'appropriant tout ou partie d'une œuvre pour l'intégrer dans mon propre mémoire de spécialité ou dans mon mémoire de thèse de docteur en médecine, je me rendrais coupable d'un délit de contrefaçon au sens de l'article L335-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle et que ce délit était constitutif d'une fraude pouvant donner lieu à des poursuites pénales conformément à la loi du 23 décembre 1901 dite de répression des fraudes dans les examens et concours publics,

Ayant été avisé(e) que le président de l'université sera informé de cette tentative de fraude ou de plagiat, afin qu'il saisisse la juridiction disciplinaire compétente.

Ayant été informé(e) qu'en cas de plagiat, la soutenance du mémoire de spécialité et/ou de la thèse de médecine sera alors automatiquement annulée, dans l'attente de la décision que prendra la juridiction disciplinaire de l'université

J'atteste sur l'honneur

Ne pas avoir reproduit dans mes documents tout ou partie d'œuvre(s) déjà existante(s), à l'exception de quelques brèves citations dans le texte, mises entre guillemets et référencées dans la bibliographie de mon mémoire.

A écrire à la main : « J'atteste sur l'honneur avoir connaissance des suites disciplinaires ou pénales que j'encours en cas de déclaration erronée ou incomplète ».

J'atteste sur l'honneur avoir connaissance des suites disciplinaires ou pénales que j'encours en cas de déclaration erronée ou incomplète.

Signature originale :

À STRASBOURG, le 04/02/2022

Photocopie de cette déclaration devant être annexée en dernière page de votre mémoire de D.E.S. ou de Thèse.

RÉSUMÉ

Introduction :

La terrible triade du coude (TTC) est une luxation complexe du coude associant une fracture de la tête radiale (TR) et du processus coronoïde (PC). Il n'existe pas de modèle anatomique reproductible de celle-ci et sa physiopathologie reste imprécise. L'objectif principal était de créer et valider un modèle cadavérique de TTC. Les objectifs secondaires étaient de mesurer et comparer les charges à la rupture et la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus avant la luxation lors d'une TTC.

Matériel et méthode :

Il s'agissait d'une étude expérimentale, prospective et comparative portant sur cinq cadavres humains frais d'âge moyen 87,4 ans ($\pm 8,6$) permettant de tester 10 membres supérieurs appariés sur leur latéralité. Après une dissection respectant le plan ligamentaire médial et latéral, la membrane interosseuse et la capsule articulaire, les coudes étaient positionnés de manière reproductible en pronation maximale avec une flexion de 15° pour induire une compression axiale lors d'un protocole rapide (vitesse de 100 mm/minute) ou lent (vitesse de 10 mm/minute) par randomisation, permettant de mesurer les charges à la rupture et la rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus avant la luxation.

Résultats :

Le protocole rapide a reproduit quatre TTC postéro-latérale et une dans un sens divergent antéro-postérieur. Le protocole lent a reproduit cinq TTC postéro-latérale. Nous retrouvions une charge à la rupture moyenne du LCL de $3\,126 \pm 1\,066$ N, de la TR de $3\,026 \pm 1\,308$ N et du PC de $2\,613 \pm 1\,120$ N. La comparaison, pour les corps 1 à 4, des charges à la rupture moyennes (comprenant toutes les structures lésées sur un même coude) entre les coudes des protocoles rapides retrouvait une p-value de 0,033 et celle des écarts de charges à la rupture de chacune des structures lésées (LCL, TR et PC) entre les protocoles lent et rapide d'un même corps retrouvait une moyenne de -4%. La rotation relative de l'avant-bras par rapport à l'humérus moyenne avant la luxation était de 1,6° ($\pm 1,2$) et se faisait toujours dans le sens externe.

Conclusion :

Sur la base des résultats de cette étude, nous pouvons affirmer avoir créé et validé un modèle cadavérique de TTC en imposant une compression axiale sur un coude fléchi de 15° en pronation maximale à une vitesse de 100 et 10 mm/minute. De plus, nous retrouvions une charge à la rupture moyenne du LCL de $3\,126 \pm 1\,066$ N, de la TR de $3\,026 \pm 1\,308$ N et du PC de $2\,613 \pm 1\,120$ N avec une rotation externe de l'avant-bras par rapport à l'humérus moyenne avant la luxation de 1,6° ($\pm 1,2$).

Rubrique de classement : Chirurgie Orthopédique et traumatologique

Mots clés : Coude – Luxation – Fractures - Instabilité

Président : Pr Philippe Clavert

Assesseurs : Pr François Bonnomet – Pr Philippe Adam – Pr Nadia Bahlouli –
Dr Florent Baldaïron

Adresse de l'auteur : Antoine Baltassat, 3 rue du Général Rapp, 67000 STRASBOURG