



Faculté de médecine

Année 2023/2024

N°

Thèse

Pour le

DOCTORAT EN MEDECINE

Diplôme d'État

par

Chloé IMBERT

Née le 02 Novembre 1996 à Chenôve (21)

TITRE

Le guidage par réalité mixte améliore et permet de niveler la précision du positionnement de la broche de préparation glénoïdienne d'une prothèse d'épaule entre des chirurgiens expérimenté et débutant

Présentée et soutenue publiquement le 18 octobre 2024 devant un jury composé de :

Président du Jury: Professeur Emérite Luc FAVARD, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, Faculté de Médecine - Tours

Membres du Jury :

Professeur Guillaume BACLE, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, Faculté de Médecine - Tours

Professeur Louis-Romée LE NAIL, Cancérologie, Faculté de Médecine - Tours

Directeur de thèse : Professeur Julien BERHOUE, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, Faculté de Médecine - Tours

UNIVERSITE DE TOURS FACULTE DE MEDECINE DE TOURS

DOYEN

Pr Denis ANGOULVANT

VICE-DOYEN

Pr David BAKHOS

ASSESSEURS

Pr Philippe GATAULT, *Pédagogie*

Pr Caroline DIGUISTO, *Relations internationales*

Pr Clarisse DIBAO-DINA, *Médecine générale*

Pr Pierre-Henri DUCLUZEAU, *Formation Médicale Continue*

Pr Hélène BLASCO, *Recherche*

Pr Pauline SAINT-MARTIN, *Vie étudiante*

RESPONSABLE ADMINISTRATIVE

Mme Carole ACCOLAS

DOYENS HONORAIRES

Pr Emile ARON (†) – 1962-1966

Directeur de l'Ecole de Médecine - 1947-1962

Pr Georges DESBUQUOIS (†) - 1966-1972

Pr André GOUAZE (†) - 1972-1994

Pr Jean-Claude ROLLAND – 1994-2004

Pr Dominique PERROTIN – 2004-2014

Pr Patrice DIOT – 2014-2024

PROFESSEURS EMERITES

Pr Daniel ALISON

Pr Gilles BODY

Pr Philippe COLOMBAT

Pr Etienne DANQUECHIN-DORVAL

Pr Patrice DIOT

Pr Luc FAVARD

Pr Bernard FOUQUET

Pr Yves GRUEL

Pr Frédéric PATAT

Pr Loïc VAILLANT

PROFESSEURS HONORAIRES

P. ANTHONIOZ – P. ARBEILLE – A. AUDURIER – A. AUTRET – D. BABUTY – C. BARTHELEMY – J.L. BAULIEU – C. BERGER – JC. BESNARD – P. BEUTTER – C. BONNARD – P. BONNET – P. BOUGNOUX – P. BURDIN – L. CASTELLANI – J. CHANDENIER – A. CHANTEPIE – B. CHARBONNIER – P. CHOUTET – T. CONSTANS – C. COUET – L. DE LA LANDE DE CALAN – P. DUMONT – J.P. FAUCHIER – F. FETISSOF – J. FUSCIARDI – P. GAILLARD – G. GINIES – D. GOGA – A. GOUDEAU – J.L. GUILMOT – O. HAILLOT – N. HUTEN – M. JAN – J.P. LAMAGNERE – F. LAMISSE – Y. LANSON – O. LE FLOCH – Y. LEBRANCHU – E. LECA – P. LECOMTE – AM. LEHR-DRYLEWICZ – E. LEMARIE – G. LEROY – G. LORETTE – M. MARCHAND – C. MAURAGE – C. MERCIER – J. MOLINE – C. MORAINÉ – J.P. MUH – J. MURAT – H. NIVET – D. PERROTIN – L. POURCELOT – R. QUENTIN – P. RAYNAUD – D. RICHARD-LENOBLE – A. ROBIER – J.C. ROLLAND – P. ROSSET – D. ROYERE – A. SAINDELLE – E. SALIBA – J.J. SANTINI – D. SAUVAGE – D. SIRINELLI – J. WEILL

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

AMELOT Aymeric	Neurochirurgie
ANDRES Christian.....	Biochimie et biologie moléculaire
ANGOULVANT Denis	Cardiologie
APETOH Lionel.....	Immunologie
AUDEMARD-VERGER Alexandra.....	Médecine interne
AUPART Michel.....	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BACLE Guillaume.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BAKHOS David.....	Oto-rhino-laryngologie
BALLON Nicolas.....	Psychiatrie ; addictologie
BARILLOT Isabelle.....	Cancérologie ; radiothérapie
BARON Christophe.....	Immunologie
BEJAN-ANGOULVANT Théodora.....	Pharmacologie clinique
BERHOUE Julien.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BERNARD Anne.....	Cardiologie
BERNARD Louis	Maladies infectieuses et maladies tropicales
BLANCHARD-LAUMONNIER Emmanuelle	Biologie cellulaire
BLASCO Hélène.....	Biochimie et biologie moléculaire
BONNET-BRILHAULT Frédérique.....	Physiologie
BOULOUIS Grégoire	Radiologie et imagerie médicale
BOURGUIGNON Thierry	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BRILHAULT Jean.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BRUNAUT Paul	Psychiatrie d'adultes, addictologie
BRUNEREAU Laurent.....	Radiologie et imagerie médicale
BRUYERE Franck.....	Urologie
BUCHLER Matthias.....	Néphrologie
CAILLE Agnès	Biostat., informatique médical et technologies de communication
CALAIS Gilles.....	Cancérologie, radiothérapie
CAMUS Vincent.....	Psychiatrie d'adultes
CORCIA Philippe.....	Neurologie
COTTIER Jean-Philippe.....	Radiologie et imagerie médicale
DEQUIN Pierre-François	Thérapeutique
DESMIDT Thomas.....	Psychiatrie
DESOUBEUX Guillaume	Parasitologie et mycologie
DESTRIEUX Christophe.....	Anatomie
DI GUISTO Caroline.....	Gynécologie obstétrique
DU BOUEXIC de PINIEUX Gonzague	Anatomie & cytologie pathologiques
DUCLUZEAU Pierre-Henri.....	Endocrinologie, diabétologie, et nutrition
EHRMANN Stephan.....	Médecine intensive – réanimation
EL HAGE Wissam.....	Psychiatrie adultes
ELKRIEF Laure	Hépatologie – gastroentérologie
ESPITALIER Fabien.....	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
FAUCHIER Laurent.....	Cardiologie
FOUGERE Bertrand	Gériatrie
FRANCOIS Patrick.....	Neurochirurgie
FROMONT-HANKARD Gaëlle.....	Anatomie & cytologie pathologiques
GATAULT Philippe	Néphrologie
GAUDY-GRAFFIN Catherine	Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
GOUPILLE Philippe.....	Rhumatologie
GUERIF Fabrice.....	Biologie et médecine du développement et de la reproduction
GUILLON Antoine	Médecine intensive – réanimation
GUILLON-GRAMMATICO Leslie	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
GUYETANT Serge	Anatomie et cytologie pathologiques
GYAN Emmanuel	Hématologie, transfusion
HALIMI Jean-Michel.....	Thérapeutique
HANKARD Régis	Pédiatrie
HERAULT Olivier	Hématologie, transfusion
HERBRETEAU Denis	Radiologie et imagerie médicale
HOURIOUX Christophe	Biologie cellulaire
IVANES Fabrice.....	Physiologie
LABARTHE François.....	Pédiatrie
LAFFON Marc	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LARDY Hubert	Chirurgie infantile
LARIBI Saïd.....	Médecine d'urgence
LARTIGUE Marie-Frédérique.....	Bactériologie-virologie

LAURE Boris.....	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
LE NAIL Louis-Romée	Cancérologie, radiothérapie
LECOMTE Thierry	Gastroentérologie, hépatologie
LEFORT Bruno.....	Pédiatrie
LEGRAS Antoine	Chirurgie thoracique
LEMAIGNEN Adrien	Maladies infectieuses
LESCANNE Emmanuel	Oto-rhino-laryngologie
LEVESQUE Éric	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LINASSIER Claude	Cancérologie, radiothérapie
MACHET Laurent	Dermato-vénéréologie
MAILLOT François	Médecine interne
MARCHAND-ADAM Sylvain.....	Pneumologie
MARRET Henri	Gynécologie-obstétrique
MARUANI Annabel.....	Dermatologie-vénéréologie
MEREGHETTI Laurent.....	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
MITANCHEZ Delphine.....	Pédiatrie
MOREL Baptiste.....	Radiologie pédiatrique
MORINIERE Sylvain	Oto-rhino-laryngologie
MOUSSATA Driffa	Gastro-entérologie
MULLEMAN Denis.....	Rhumatologie
ODENT Thierry	Chirurgie infantile
OUAISSI Mehdi	Chirurgie digestive
OULDAMER Lobna.....	Gynécologie-obstétrique
PAINTAUD Gilles	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
PARE Arnaud	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
PASI Marco.....	Neurologie
PERROTIN Franck	Gynécologie-obstétrique
PISELLA Pierre-Jean.....	Ophtalmologie
PLANTIER Laurent.....	Physiologie
REMERAND Francis.....	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
ROINGEARD Philippe.....	Biologie cellulaire
RUSCH Emmanuel.....	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
SAINT-MARTIN Pauline	Médecine légale et droit de la santé
SALAME Ephrem.....	Chirurgie digestive
SAMIMI Mahtab.....	Dermatologie-vénéréologie
SANTIAGO-RIBEIRO Maria	Biophysique et médecine nucléaire
SAUTENET-BIGOT Bénédicte.....	Thérapeutique
THOMAS-CASTELNAU Pierre	Pédiatrie
TOUTAIN Annick	Génétique
VOURC'H Patrick.....	Biochimie et biologie moléculaire
WATIER Hervé	Immunologie
ZEMMOURA Ilyess	Neurochirurgie

PROFESSEUR DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

DIBAO-DINA Clarisse
LEBEAU Jean-Pierre

PROFESSEURS ASSOCIES

LIMA MALDONADO Igor.....Anatomie
MALLET Donatien.....Soins palliatifs

PROFESSEUR CERTIFIE DU 2ND DEGRE

MC CARTHY Catherine.....Anglais

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

CANCEL Mathilde	Cancérologie, radiothérapie
CARVAJAL-ALLEGRIA Guillermo.....	Rhumatologie
CHESNAY Adélaïde.....	Parasitologie et mycologie
CLEMENTY Nicolas.....	Cardiologie
DE FREMINVILLE Jean-Baptiste	Cardiologie
DOMELIER Anne-Sophie.....	Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
DUFOUR Diane	Biophysique et médecine nucléaire
FOUQUET-BERGEMER Anne-Marie	Anatomie et cytologie pathologiques
GARGOT Thomas	Pédopsychiatrie
GOUILLEUX Valérie	Immunologie
HOARAU Cyrille.....	Immunologie
KERVAREC Thibault.....	Anatomie et cytologie pathologiques
KHANNA Raoul Kanav.....	Ophtalmologie
LE GUELLEC Chantal.....	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
LEDUCQ Sophie	Dermatologie
LEJEUNE Julien	Hématologie, transfusion
MACHET Marie-Christine	Anatomie et cytologie pathologiques
MOUMNEH Thomas.....	Médecine d'urgence
PIVER Éric.....	Biochimie et biologie moléculaire
RAVALET Noémie	Hématologie, transfusion
ROUMY Jérôme.....	Biophysique et médecine nucléaire
STANDLEY-MIQUELESTORENA Elodie.....	Anatomie et cytologie pathologiques
STEFIC Karl.....	Bactériologie
TERNANT David.....	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
VAYNE Caroline.....	Hématologie, transfusion
VUILLAUME-WINTER Marie-Laure.....	Génétique

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

AGUILLON-HERNANDEZ Nadia.....	Neurosciences
BLANC Romuald	Orthophonie
EL AKIKI Carole.....	Orthophonie
NICOLOU Antonine.....	Philosophie – histoire des sciences et des techniques
PATIENT Romuald	Biologie cellulaire
RENOUX-JACQUET Cécile	Médecine Générale

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

AUMARECHAL Alain	Médecine Générale
BARBEAU Ludivine	Médecine Générale
CHAMANT Christelle.....	Médecine Générale
ETTORI Isabelle.....	Médecine Générale
MOLINA Valérie.....	Médecine Générale
PAUTRAT Maxime	Médecine Générale
PHILIPPE Laurence.....	Médecine Générale
RUIZ Christophe	Médecine Générale
SAMKO Boris.....	Médecine Générale

CHERCHEURS INSERM - CNRS - INRAE

BECKER Jérôme.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BOUAKAZ Ayache	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BOUTIN Hervé.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BRIARD Benoît.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
CHALON Sylvie.....	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
DE ROCQUIGNY Hugues.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
ESCOFFRE Jean-Michel.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
GILLOT Philippe	Chargé de Recherche Inrae – UMR Inrae 1282
GOMOT Marie	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
GOUILLEUX Fabrice	Directeur de Recherche CNRS – UMR Inserm 1100
GUEGUINOU Maxime	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1069
HAASE Georg.....	Chargé de Recherche Inserm - UMR Inserm 1253
HENRI Sandrine	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
HEUZE-VOURCH Nathalie.....	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
KORKMAZ Brice.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
LABOUTE Thibaut.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
LATINUS Marianne	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
LAUMONNIER Frédéric.....	Directeur de Recherche Inserm - UMR Inserm 1253
LE MERRER Julie	Directrice de Recherche CNRS – UMR Inserm 1253
MAMMANO Fabrizio	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
PAGET Christophe	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
RAOUL William.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1069
SECHER Thomas.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
SI TAHAR Mustapha.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
SUREAU Camille	Directrice de Recherche émérite CNRS – UMR Inserm 1259
TANTI Arnaud	Chargé de Recherche Inserm - UMR Inserm 1253
WARDAK Claire	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

Pour l'éthique médicale

BIRMELE Béatrice.....Praticien Hospitalier

Pour la médecine manuelle et l'ostéopathie médicale

LAMANDE Marc.....Praticien Hospitalier

Pour l'orthophonie

BATAILLE Magalie.....Orthophoniste
 CLOUTOUR Nathalie Orthophoniste || CORBINEAU Mathilde | Orthophoniste |
HARIVEL OUALLI Ingrid.....	Orthophoniste
IMBERT Mélanie	Orthophoniste
SIZARET Eva	Orthophoniste

Pour l'orthoptie

BOULNOIS Sandrine.....Orthoptiste

SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des enseignants et enseignantes
de cette Faculté,
de mes chers condisciples
et selon la tradition d'Hippocrate,
je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur
et de la probité dans l'exercice de la Médecine.

Je donnerai mes soins gratuits aux indigents,
et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.

Admis(e) dans l'intérieur des maisons, mes yeux
ne 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(euse) et reconnaissant(e) envers mes Maîtres,
je rendrai à leurs enfants
l'instruction que j'ai reçue de leurs parents.

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

REMERCIEMENTS :

A mon président de jury :

Monsieur le Professeur **Luc FAVARD** : Merci de me faire l'honneur de présider ma thèse. Votre aisance chirurgicale et votre dévouement pour le service sont un exemple pour moi. Ce fut un réel plaisir d'avoir pu profiter de votre expérience pendant mon semestre à Amboise. Par ce travail, je vous témoigne ma profonde gratitude.

Aux membres du jury :

Monsieur le Professeur **Guillaume BACLE** : C'est un honneur pour moi de te compter parmi les membres de mon jury. Merci pour tes précieux conseils, ton enseignement et ta bonne humeur au bloc opératoire.

Sois assuré de ma reconnaissance et de mon respect.

Monsieur le Professeur **Louis-Romée LE NAIL** : Je suis honorée que tu aies accepté de faire partie de ce jury de thèse. Je suis admirative de tes talents de chirurgien mais aussi de tes qualités humaines et de ton dévouement pour tes patients. J'ai beaucoup appris à tes côtés durant ce semestre en oncologie et j'espère pouvoir continuer à être formée à tes côtés dans les années à venir.

Trouve dans ce travail ma sincère reconnaissance.

A mon directeur de thèse :

Monsieur le Professeur **Julien BERHOUET** : Merci de l'honneur que vous me faites de diriger cette thèse, et de votre aide précieuse pour celle-ci. Merci de votre implication dans notre formation, j'espère continuer à apprendre à vos côtés.

Vous trouverez dans ce travail mon profond respect.

A tous mes chefs et mes anciens chefs :

A **Ramy**, merci de m'avoir permis d'avoir confiance en moi et de m'avoir partagé tes connaissances de la taille d'une encyclopédie, à **Quentin** serein dans toutes les situations, à **Geoffroy** pour ta rigueur et ta gentillesse, au **Dr Marteau** pour ta disponibilité.

A **Rodolphe**, pour ta passion pour l'orthopédie, tu resteras à jamais dans nos pensées.

A mes chefs des premiers semestres : **Guillaume** pour ton soutien et ton envie de nous faire partager tes connaissances, **Steven, Gaspard, Vincent, Mathieu, Benjamin**.

A **Pauline**, ma consœur Aveyronnaise, tu as ensoleillé mes journées avec ta joie de vivre. A **Clara**, travailler avec toi était un vrai plaisir. A **Maxime**, ton efficacité redoutable est un exemple pour moi.

Au service de chirurgie orthopédique du CHU de Tours : Cadres, infirmières, aides soignantes, IBODE, secrétaires, gypsothérapeutes. Hâte de pouvoir retravailler avec vous.

A l'équipe de chirurgie pédiatrique de Clocheville : **Pr Odent, Dr De Courtivron, Dr Bergerault, Dr Agostini, Yanis** ainsi que toute l'équipe paramédicale. Merci pour votre bienveillance tout au long du semestre, de m'avoir aussi permis de m'améliorer à l'oral (on partait de loin !).

A l'équipe de chirurgie plastique : **Nathalie, Aurélie** et **Audrey** ainsi qu'à toute votre équipe, quel bon semestre j'ai passé à vos côtés parmi les brûlés et les nichons. A **Thomas**, pour notre entraide.

A l'équipe de chirurgie du CH de Blois : **Dr Arzour, Romain, Samuel** et à toute l'équipe de bloc opératoire et du service de chirurgie orthopédique. Ce fut un réel plaisir de travailler à vos côtés. Merci également aux **Dr Kraft, Dr Anil, Dr Giretti** et **Dr Dalmasso** pour votre disponibilité et gentillesse devant mes lacunes en chirurgie digestive.

*A l'équipe de l'Académie Royale de Chirurgie Amboisienne : **Vincent**, un grand merci pour ce semestre où j'ai énormément appris à tes côtés, et tout ça dans la bonne humeur avec tes blagues quelques fois douteuses. A **Marion** pour m'avoir appris la rigueur en chirurgie depuis le début de mon internat. Et surtout merci à toutes les IBODE, infirmières, aides-soignantes, cadres et secrétaires, qui rendent ce stage merveilleux.*

*A l'équipe de chirurgie orthopédique Versaillaise : Merci aux **Dr Pujol, Dr Boisrenoult, Dr Desmoineaux, Dr Djebara, Dr Delcourt, Dr Taburet**, et aux assistants **Charles, Nam et Jean-Arthur** pour tout ce que vous m'avez appris. Merci à mes co-internes : **Hélène, Alma, Auriane, Claire, Stuart et Baptiste** pour votre accueil parisien chaleureux (je ne pensais jamais dire ça un jour !).*

A mes co-internes :

A **Elise** pour ton soutien, notre entraide depuis le début et ton toupet qui me fait beaucoup rire. A **Aimery**, toujours là dans bons coups, au-delà d'un copain de soirée, tu es devenu un vrai ami. Au trio infernal : **Alexandre** et ton rire discret, **Benjamin** alias mèche d'or, pour m'avoir sauvé du Milord et **Adrien**, hâte de faire des tours en Mustang et de cette année de DJ avec toi ! A **Soline**, quelle belle rencontre angevine. A **Quentin**, toujours là pour m'écouter et me remonter le moral avec ta bonne humeur. A **Maxime S., Rayane, Marc, Dinah, Louis-Paul, Ophélie, Marine, Jules, Maxime C., Chloé, Mathilde, Lucas, Florian, Paul, Félix**.

A mes amis :

A **Mélissa**, voisine d'alphabet à la fac, puis ma binôme de l'externat avec qui on va boire des verres et faire la fête, puis présente de plus en plus dans ma vie et qui finit par me suivre jusqu'à Tours (pour la « Neurologie » soit disant) ! Mais avant tout, une de mes plus belles rencontres dans ma vie, chez qui j'ai véritablement trouvé toutes les qualités qu'une amie puisse réunir.

A mes déesses : **Solène** pour illuminer ma vie avec ton grand sourire tout droit sorti de chez Colgate, **Pauline** pour tes convictions plus qu'humaines que j'admire et **Ourielle** qui prouve que l'amitié anesthésiste-chirurgien n'est pas impossible !

A **Martin**, tu m'as tellement rendue heureuse dans ma vie que je suis fière tu puisses enfin l'être complètement. A **Charlyne**, bien plus que ma simple colocataire.

A mes dindons : Là depuis le début de mes années de médecine et là pour encore plusieurs années je l'espère. Merci à chacun d'entre vous pour ce que vous m'avez apporté : vos rires, votre écoute, vos conseils et votre présence inestimable. **Couly**, notre maman, merci pour ta loyauté sans faille. **Emma**, nos verres sur ta terrasse à refaire le monde me manquent ! **Mehdi**, pour maîtriser à la perfection l'art de l'insulte qui me fait tant rire. **Julia**, pour nos délires quelques peu bizarres. **Anaël** pour ton talent narratif même si tout n'est pas forcément compréhensible, **Chiara** copine de gourmandise, **Milan** et ton génépi, **JB** pour tes expressions crues sous tes airs raffinés. A **Théo**, **Edo**, **Marine**, **Simon**, **Miléna**, **Celso**, **Aurélie**, **Clémence**, **Tiffany**, **Antoine**, **Félix**, **Maxence**, **Hugo D.**, **Cava**, **Vincent**, **Lina** et **Edouard** (les +1 qu'on aime bien quand même).

A mes amis rencontrés pendant l'internat: **Amaury**, sans toi cette thèse n'aurait jamais pu être écrite. **Ana**, mon autrichienne préférée. **Mathieu**, pour les happy hours.

A mes copines de poney : **Tiffany**, **Sandy** et **Léonie**, toujours là pour me soutenir et avec humour.

A **Carla**, tu es la petite sœur que je n'ai pas eue.

A **Elisa**, ensemble depuis le collège et toujours là pour moi depuis, quoi qu'il arrive.

A ma famille :

A mes parents : **Papa**, pour avoir toujours cru en moi depuis le début, de m'avoir permis de me surpasser par tes encouragements constants. **Maman**, pour ton amour inconditionnel qui a été source de force pour moi.

A mes frères : **Lucas** et **Gautier**, qui chacun à votre manière, a contribué à ma réussite.

A ma **Marraine**, pour la confiance que tu m'accordes et que tu réussis à me faire ressentir.

Et à **toute ma famille** : oncles, tantes, cousins, cousines, neveux, nièces ... pour votre environnement chaleureux et stimulant.

A **Cathy**, **Pascal** et **Charlotte**, pour m'avoir accueillie comme un membre de votre famille.

Une pensée particulière pour mes compagnons à 4 pattes : **Pitchoune, Feeling, Qami & Galak.**

A **Hugo**, mon partenaire de vie,
Pour ta patience et tes encouragements dans les moments difficiles, et pour tous ces moments incroyables que l'on a vécu ensemble. Tu es mon pilier, ma force et mon refuge.
Je t'aime.

RESUME

Le Guidage par Réalité Mixte Améliore et Permet de Nivelier la Précision du Positionnement de la Broche de Préparation Glénoïdienne d'une Prothèse d'Epaule entre des Chirurgiens Expérimenté et Débutant

Introduction : Le potentiel de la réalité mixte pour améliorer la précision du positionnement de la broche de préparation glénoïdienne dans le cadre de l'arthroplastie d'épaule a déjà été rapporté. Un autre intérêt de la réalité mixte serait d'aider des chirurgiens juniors à gagner en précision lors de leurs interventions prothétiques. L'objectif de cette étude était d'évaluer et de comparer la précision de positionnement de la broche de préparation glénoïdienne entre un chirurgien sénior et un chirurgien junior utilisant un guidage par réalité mixte. L'hypothèse de cette étude était que la réalité mixte permettait de niveler la précision chirurgicale entre des opérateurs d'expérience différente.

Matériels et Méthodes : Un chirurgien sénior expérimenté et un chirurgien junior débutant avaient chacun pour objectif de positionner une broche de préparation glénoïdienne, d'abord à mains levées, puis avec une solution de guidage par réalité mixte (Blue Mixed Reality Guidance®, Stryker), respectivement sur 15 et 30 spécimens de scapulae imprimées en 3D (10 type A et 10 type B selon Walch, 10 type E selon Favard), préalablement planifiés avec un logiciel dédié (Blueprint Planning®, Stryker). La précision de positionnement du point d'entrée et d'orientation de la broche glénoïdienne à l'issue des chirurgies, sans et avec guidage par réalité mixte, a été évaluée et comparée entre les deux opérateurs.

Résultats : Sans réalité mixte, il n'existait pas de différence significative entre les deux chirurgiens pour la précision du point d'entrée ($p=0,8$) et de l'orientation de la broche ($p>0,05$). Il existait néanmoins un important écart médian de position pour la version et l'inclinaison, respectivement de $17 \pm 12^\circ$ et $20 \pm 13^\circ$ pour le chirurgien junior, et de $9 \pm 8^\circ$ pour le chirurgien sénior. Avec le guidage par réalité mixte, il n'a pas été mis en évidence de différence significative pour l'inclinaison, la version, le positionnement selon les axes antéro-postérieur et supéro-inférieur de la broche entre les deux chirurgiens. Le chirurgien junior était néanmoins plus précis pour le point d'entrée global de la broche, avec un écart de positionnement médian de $1.39 \pm 1,04$ mm versus $2.10 \pm 0,86$ mm ($p=0,02$). Il n'y avait aucune différence significative de précision entre les deux chirurgiens en fonction du type de glène,

hormis pour le point d'entrée global des glènes de type A, où le chirurgien débutant était plus précis ($p=0,02$), ainsi que pour l'axe antéro-supérieur ($p=0,01$).

Conclusion : L'utilisation de la réalité mixte améliore et nivèle la précision de positionnement et d'orientation d'une broche guide glénoïdienne sur glènes arthrosiques entre 2 chirurgiens d'expérience différente.

Mots clés : Prothèse d'épaule, réalité mixte, réalité augmentée, courbe d'apprentissage, précision, composant glénoïdien.

ABSTRACT

Mixed Reality Guidance Enhances and Levels the Accuracy of Glenoid Preparation Pin Positioning in Shoulder Arthroplasty between Experienced and Junior Surgeons

Introduction: The potential of mixed reality to improve the accuracy of glenoid preparation pin positioning in shoulder arthroplasty has been previously reported. Another benefit of mixed reality may be its ability to assist junior surgeons in enhancing their precision during prosthetic procedures. The aim of this study was to evaluate and compare the accuracy of glenoid preparation pin positioning between a senior surgeon and a junior surgeon utilizing mixed reality guidance. The hypothesis of this study was that mixed reality would equalize surgical accuracy between operators of different experience levels.

Materials and Methods: An experienced senior surgeon and a novice junior surgeon each aimed to position a glenoid preparation pin, first freehand and then using a mixed reality guidance solution (Blue Mixed Reality Guidance™, Stryker), on 15 and 30 3D-printed scapula specimens, respectively (10 Type A and 10 Type B according to Walch, and 10 Type E according to Favard), which were pre-planned with dedicated software (Blueprint Planning™, Stryker). The accuracy of the entry point and orientation of the glenoid pin post-surgery, without and with mixed reality guidance, was evaluated and compared between the two operators.

Results: Without mixed reality, there was no significant difference between the two surgeons regarding entry point accuracy ($p=0.8$) and pin orientation ($p>0.05$). However, there was a significant median positional discrepancy for version and inclination, measuring $17 \pm 12^\circ$ and $20 \pm 13^\circ$ for the junior surgeon, compared to $9 \pm 8^\circ$ for the senior surgeon. With mixed reality guidance, no significant differences were observed in inclination, version, or positioning along the antero-posterior and supero-inferior axes of the pin between the two surgeons. Nevertheless, the junior surgeon demonstrated greater accuracy for the overall entry point of the pin, with a median positional discrepancy of 1.39 ± 1.04 mm versus 2.10 ± 0.86 mm ($p=0.02$). There were no significant differences in accuracy between the two surgeons based on glenoid type, except for the overall entry point of Type A glenoids, where the junior surgeon was more precise ($p=0.02$), as well as for the antero-superior axis ($p=0.01$).

Conclusion: The use of mixed reality improves and levels the accuracy of positioning and orientation of a glenoid guide pin in arthritic glenoids between two surgeons of different experience levels.

Keywords: Shoulder arthroplasty, mixed reality, augmented reality, learning curve, accuracy, glenoid component.

Liste des Abréviations :

3D : tridimensionnel

IC : Intervalle de confiance

PSI : Instrumentation Spécifique au Patient

RA : Réalité Augmentée

RM : Réalité Mixte

RV : Réalité Virtuelle

Tables des Matières :

1. INTRODUCTION	18
2. MATERIELS ET METHODES	20
2.1 Matériels.....	20
a/ Chirurghiens expérimentateurs.....	20
b/ Spécimens de glène.....	20
c/ Solution de Réalité Mixte.....	20
2.2 Méthodes	21
a/ Phase 1 : chirurgie non guidée.....	21
b/ Phase 2 : chirurgie guidée avec RM	21
c/ Analyse du positionnement des broches	22
d / Analyse statistique :	22
3.RESULTATS	23
3.1 Précision de positionnement de la broche en fonction du statut du chirurgien, après chirurgie non guidée	23
3.2 Précision de positionnement de la broche en fonction du statut du chirurgien, avec RM	23
3.3 Influence du type d'usure de glène sur la précision de positionnement de la broche guide avec RM	23
4. DISCUSSION	25
5.CONCLUSION	29
ANNEXES	30
Figures	30
Tableaux.....	34
BIBLIOGRAPHIE	36

1. Introduction

Le bénéfice fonctionnel après implantation d'une prothèse totale d'épaule a largement été démontré ces dernières années(1–4). Il est néanmoins fortement conditionné par l'expérience du chirurgien(5,6), notamment pour ce qui est de la précision du positionnement du composant glénoïdien(7,8). En configuration anatomique, un défaut d'implantation glénoïdienne est associé à un risque de descellement prothétique majoré(9,10). En configuration inversée, une erreur de positionnement de la platine expose à l'encoche scapulaire et à une limitation des amplitudes du mouvement(11–13). Cho et al.(14), après avoir analysé les résultats des 40 premières prothèses d'épaule d'un chirurgien, retrouvait ainsi une encoche scapulaire chez 51,5% des patients et 20 % de complications (descellement glénoïdien, infection, fracture de l'acromion, lésions du plexus brachial, fracture péri-prothétique).

C'est particulièrement pour ce temps opératoire de la préparation glénoïdienne, que les dernières innovations technologiques ont été proposées. La conception de logiciels de segmentation automatique des images figure comme l'une des avancées les plus importantes, pour réaliser une planification pré opératoire tridimensionnelle (3D), étape déterminante avant l'implantation d'une prothèse d'épaule(15,16). L'utilisation de guides spécifiques au patient, permettant de reproduire le planning préopératoire, a aussi montré des résultats prometteurs, avec des niveaux de précision de l'ordre de 3 mm et de 5° respectivement pour le point d'entrée, l'orientation en version et en inclinaison de la broche de préparation glénoïdienne(17–19).

La réalité mixte (RM) apparaît être l'innovation technologique la plus récente en chirurgie arthroplastique de l'épaule(20). Elle a d'abord permis la visualisation peropératoire de la planification préopératoire(21). Elle permet depuis peu le guidage du geste chirurgical, grâce à la superposition d'informations visuelles virtuelles (hologrammes) sur le site opératoire réel visualisé en temps réel par le chirurgien(22–24). Plusieurs études récentes ont démontré une précision de positionnement de la broche de préparation glénoïdienne équivalente, voire meilleure (jusqu'à $\leq 2\text{mm}$ pour le point d'entrée et $\leq 2^\circ$ pour l'orientation), que celle obtenue avec les solutions de guidage chirurgical précédemment décrites(25–27). Ces derniers travaux enrôlaient néanmoins à chaque fois des opérateurs déjà expérimentés pour la chirurgie de l'épaule.

Alors qu'une revue récente de la littérature a montré qu'un chirurgien devait avoir une courbe d'apprentissage de plus de 25 prothèses d'épaule inversées, et entre 16 et 86 prothèses anatomiques, avant d'obtenir un positionnement acceptable des implants(28), l'un des intérêts de la RM pourrait être d'aider des chirurgiens débutants à gagner en précision lors de leurs premières interventions prothétiques, et par conséquent diminuer la durée de leur courbe d'apprentissage. Ce bénéfice potentiel de la RM a déjà été identifié par Dey Hazra et al., qui décrivait une précision équivalente pour l'inclinaison entre 2 opérateurs junior et sénior après avoir positionné une broche glénoïdienne sur 4 épaules cadavériques(29). Les spécimens utilisés dans cette étude étaient néanmoins sans arthrose ou présentaient une déformation glénoïdienne minime, de type A selon Walch(30).

L'objectif principal de notre étude était également de contribuer à l'évaluation de l'apport de la RM et de comparer la précision de positionnement de la broche de préparation glénoïdienne entre un chirurgien sénior et un chirurgien junior utilisant chacun une solution d'assistance opératoire par la RM. L'hypothèse était que l'utilisation de la RM permettait de niveler le niveau de précision pour le positionnement de la broche glénoïdienne entre des opérateurs d'expérience différente, pour des spécimens pathologiques avec déformation glénoïdienne variable.

2. Matériels et méthodes

2.1 Matériels

a/ Chirurgiens expérimentateurs

Deux chirurgiens ont participé à l'étude, l'un sénior expérimenté en chirurgie de l'épaule et co-concepteur de la solution de RM utilisée pour l'expérimentation, l'autre junior en 4^{ème} année d'internat n'ayant jamais réalisé d'arthroplastie d'épaule.

b/ Spécimens de glène

Trente fichiers 3D de segmentation de scanners d'épaule pathologique de patients, obtenus avec le logiciel de planification pré opératoire Blueprint® (Stryker, Montbonnot-Saint-Martin, France), ont été sélectionnés en fonction de l'usure glénoïdienne selon la classification de Walch(30) dans le plan horizontal et de Favard(31) dans le plan frontal. La répartition des glènes était la suivante : 10 type A, 10 type B (B2/B3) et 10 type E (E2/E3). Ces fichiers ont ensuite servi à la fabrication de spécimens de glène par impression 3D en Polyamide 2200 HD (Initial, Annecy, France). Chaque spécimen imprimé 3D comprenait la glène avec le processus coracoïde, en continuité avec un socle permettant une fixation solide sur un étau pour les phases d'expérimentation de visée glénoïdienne (*Figure 1*).

c/ Solution de Réalité Mixte

C'est le système de RMBlueprint® (Stryker, Montbonnot-Saint-Martin, France), qui a été utilisé pour l'étude. Il permet d'afficher un hologramme 3D de la planification préopératoire Blueprint® préalablement téléchargée, et ainsi de guider le positionnement de la broche de préparation pour le fraisage glénoïdien, permettant la correction des déformations et l'implantation précise de la pièce prothétique glénoïdienne. Le système de RMBlueprint® a pour intérêt de manipuler et de faire cohabiter en temps réel les hologrammes 3D sur l'anatomie réelle du patient, grâce à un casque de projection à visière transparente porté par le chirurgien : HoloLens2® (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) (*Figure 2*). Pour que ce système soit opérationnel, il faut que les composants numériques du système s'interfacent avec l'instrumentation chirurgicale spécifique marquée avec des QR codes : viseur de broche glénoïdienne, palpeur glénoïdien, pince de fixation coracoïdienne, bloc de contrôle des instruments (*Figure 2*). Ce système de RMBlueprint® fonctionne ensuite sur le même principe que la navigation stéréotaxique : le marqueur coracoïdien est fixé, la caméra du casque HoloLens 2® positionné sur la tête du chirurgien est utilisée pour surveiller et suivre

la position et les déplacements des marqueurs. Les emplacements spécifiques des instruments chirurgicaux navigués détectés par la caméra permettent le calcul d'informations spatiales pour fournir un suivi et une navigation du guidage glénoïdien. Ainsi, les instruments chirurgicaux et le marqueur coracoïdien permettent au chirurgien de positionner et de visualiser l'orientation de la broche selon la position de la scapula enregistrée en temps réel pendant la procédure chirurgicale.

En pratique, le processus de guidage pour le positionnement de la broche de préparation glénoïdienne suit 5 étapes successives : la reconnaissance des instruments marqués, le recalage de l'hologramme sur l'anatomie réelle du patient, le guidage du point d'entrée de la broche, puis de son orientation en version en en inclinaison, et enfin la vérification de précision du positionnement de la broche guidée.

2.2 Méthodes

a/ Phase 1 : chirurgie non guidée :

Chaque chirurgien a réalisé une première série de procédures de positionnement de broche de préparation glénoïdienne à mains levées, sur 15 spécimens différents de glène, avec une distribution identique des cas selon les classifications de Walch et Favard: 5 type A, 5 type B, 5 type E. Il disposait chacun de la planification pré opératoire réalisée en version papier pour chaque spécimen, qu'il pouvait consulter autant qu'il le voulait pour le placement de la broche.

b/ Phase 2 : chirurgie guidée avec RM :

Chacun des 2 chirurgiens a réalisé une seconde série de procédures avec le système RM Blueprint® sur les mêmes 30 spécimens de glènes, toutes différentes et dont l'usure selon Walch et Favard était répartie de façon équivalente : 10 type A, 10 type B, 10 type E. Le chirurgien sénior, ayant déjà utilisé le système RM Blueprint® lors de travaux de recherche et d'évaluation pour sa conception, n'a pas bénéficié de formation ou d'entraînement spécifiques avant de participer à la présente étude. Le chirurgien junior a pu en revanche réaliser une formation à la navigation par RM sur quelques cas avant les expérimentations de l'étude (Figure 3).

c/ Analyse du positionnement des broches

Après les 2 phases expérimentales conduites par chaque chirurgien, le point d'entrée et l'axe de la broche de préparation glénoïdienne pour chaque spécimen ont été analysés avec un système de mesure optique, Polaris Vicra System® (NDigital, Waterloo, ON, Canada). Pour cela, des marqueurs de position étaient placés sur chaque spécimen de glène imprimé 3D selon la planification préopératoire. Chaque spécimen était lui-même fixé sur un socle spécifique, sur lequel des marqueurs de position étaient aussi fixés. La première étape consistait à acquérir 4 points de référence sur le socle de façon à reconstruire la glène de référence. La deuxième étape permettait d'acquérir 3 points sur un fantôme placé sur la broche de préparation glénoïdienne pour pouvoir l'analyser. A partir de ces acquisitions, la localisation du point d'entrée de la broche guide sur la glène était mesurée en millimètres selon des directions antéro-postérieure et supéro-inférieure. La version et l'inclinaison de la broche étaient mesurées en degrés respectivement selon les plans axial et frontal. Ainsi, les résultats de précision de positionnement de la broche guide étaient exprimés en différence de position (en millimètres) et d'orientation (en degrés) entre la planification et l'expérimentation (*Figure 4*).

d/ Analyse statistique :

Le critère de jugement principal de l'étude était la mesure de précision de positionnement de la broche de préparation glénoïdienne : point d'entrée et orientation, entre un chirurgien sénior et un chirurgien junior, après chirurgie à mains levées et chirurgie guidée avec le système de RM.

Les critères de jugement secondaires étaient d'évaluer et de comparer la précision de positionnement de la broche en fonction du type de glène (selon les classifications de Walch et Favard) et du statut du chirurgien.

Les variables quantitatives, différence de point d'entrée et d'orientation de la broche entre position planifiée et obtenue après expérimentation, ont été décrites en médiane et écart-types. Les tests de Wilcoxon et Kruskal-Wallis ont été utilisés pour comparer les résultats. Une valeur $p < 0,05$ était considérée comme significative. L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel R-Core Team(2022). La recherche de facteur favorisant l'imprécision de positionnement de la broche a été effectuée grâce à une régression linéaire univariée et multivariée.

3. Résultats

3.1 / Précision de positionnement de la broche en fonction du statut du chirurgien, après chirurgie non guidée :

La Figure 5 représente les différences de précision pour le point d'entrée et l'orientation de la broche en version et inclinaison entre les 2 chirurgiens évalués chacun sur 13 glènes. Deux spécimens pour chaque chirurgien n'étaient pas exploitables. Les spécimens correspondants pour l'autre chirurgien ont été exclus de principe, expliquant l'effectif d'analyse de 13 spécimens par chirurgien.

Il n'existait pas de différence significative entre les deux chirurgiens, pour la précision du point d'entrée ($p=0,8$) et l'orientation de la broche ($p>0,05$). Néanmoins, il faut souligner un important écart médian de position pour la version et l'inclinaison, respectivement de $17 \pm 12^\circ$ et $20 \pm 13^\circ$ pour le chirurgien junior, et plus faible de $9 \pm 8^\circ$ pour le chirurgien sénior (Tableau 1).

3.2/ Précision de positionnement de la broche en fonction du statut du chirurgien, avec RM :

La Figure 6 représente les différences de précision pour le point d'entrée et l'orientation de la broche en version et inclinaison entre les 2 chirurgiens évalués chacun sur 30 spécimens.

La précision du point d'entrée global de la broche obtenue par le chirurgien junior était meilleure : $1,39 \pm 1,04$ mm Vs $2,10 \pm 0,86$ mm ($p=0,02$), même s'il n'existait pas de différence de positionnement selon les axes antéro-postérieur ($p=0,5$) et supéro-inférieur ($p=0,09$). Il n'y avait pas de différence significative pour l'inclinaison et la version de la broche entre les 2 chirurgiens (Figures 7 et 8).

3.3/ Influence du type d'usure de glène sur la précision de positionnement de la broche guide avec RM :

La précision du point d'entrée global de la broche ($p=0,04$), ainsi que sa position sur l'axe antéro-postérieur ($p=0,01$), étaient significativement différents entre les 3 types de glènes: respectivement, $1,59 \pm 0,8$ mm (type A) Vs $2,35 \pm 0,82$ mm (Type B) Vs $1,96 \pm 1,17$ mm (type E), et $0,87 \pm 0,77$ mm (type A) Vs $1,53 \pm 0,86$ mm (Type B) Vs $0,77 \pm 0,77$ mm (type E). Le positionnement selon l'axe supéro-inférieur, et l'orientation de la broche en

version et en inclinaison ne différaient pas significativement en fonction du type de glène (*Tableau 2*).

Après analyse par régression linéaire (*Tableau 3*), il était possible de conclure à une moins bonne précision en cas de glènes de type B comparativement aux glènes de type A et E, pour le point d'entrée global de la broche ($p=0.02$) et pour son positionnement antéro-postérieur ($p=0.03$) de manière significative.

La précision du positionnement de la broche selon le statut du chirurgien en fonction du type de glène l'aide de la RM, a également été comparée (*Tableau 4*). Le chirurgien débutant était significativement plus précis pour les glènes A avec un écart médian de $1,03 \pm 0,73$ mm Vs $1,82 \pm 1,70$ mm ($p=0,02$), ainsi que pour l'axe antéro-postérieur de $0,65 \pm 0,67$ mm Vs $1,35 \pm 0,70$ mm ($p=0,01$). Il n'y avait pas de différence entre les 2 chirurgiens pour les autres types de glènes.

4. Discussion

Notre étude a démontré que le guidage avec RM permettait de niveler la précision chirurgicale entre deux opérateurs d'expérience différente. A l'issue de l'expérimentation, l'orientation de la broche, en version et en inclinaison, différait de moins de 2.5° pour les 2 chirurgiens par rapport à la planification. Une meilleure précision pour le point d'entrée global de la broche était même obtenue par le chirurgien débutant. Dey Hezra et al.(29) a aussi comparé récemment la précision du positionnement du composant glénoïdien entre un chirurgien expérimenté et un chirurgien débutant, avec et sans l'utilisation de la RM. Ils disposaient chacun de 8 spécimens cadavériques, et ont chacun utilisé la RM pour 4 de ces spécimens. Ils ont montré que l'utilisation de la RM permettait aux 2 chirurgiens d'obtenir de manière significative une meilleure précision pour l'inclinaison de la broche, avec un écart moyen de 3° avec RM Vs 9° sans RM ($p=0.01$). Elle semblait également niveler la précision, avec un écart moyen d'inclinaison entre les chirurgiens de 1° avec RM contre 3° sans RM. Aucune différence de précision entre les 2 techniques n'a en revanche été retrouvée pour la version ou pour les axes antéro-postérieur et supéro-inférieur.

Dans notre étude, il est aussi intéressant de constater que la précision sans guidage était mauvaise pour les 2 chirurgiens enrôlés, avec notamment pour le sénior une erreur médiane de l'ordre de 9° pour l'orientation de la broche. En pratique, il est très peu probable que la différence de point d'entrée, de l'ordre d'un demi-millimètre, retrouvée entre les 2 chirurgiens après l'utilisation de la RM, puisse avoir un retentissement clinique fonctionnel, ou engendrer davantage de complications (fracture, descellement...). En revanche, le niveau d'imprécision observé sans guidage peut être plus problématique pour un implant glénoïdien anatomique (32), qu'en configuration inversée (33). Le guidage par RM apparaît donc être très utile pour chaque chirurgien, quel que soit son niveau d'expérience.

Des études équivalentes ont déjà rapporté des résultats semblables concernant la précision obtenue avec réalité augmentée (RA) ou RM. Kriechling et al.(21) a réalisé 2 études, la première portant sur 10 scapulae imprimées 3D et la seconde réalisée à partir de 12 spécimens cadavériques. Dans la première étude, l'écart de positionnement moyen rapporté était $2,3 \pm 1,1$ mm pour le point d'entrée et de $2,7 \pm 1,3^\circ$ pour la trajectoire. Dans leur deuxième étude, les valeurs de déviation moyennes étaient de $3,5 \pm 1,7$ mm pour le point d'entrée et de $3,8 \pm 1,7^\circ$ pour la déviation angulaire (34). Sotelo-Sanchez et al.(26) ont également observé récemment des résultats similaires à partir de 14 spécimens cadavériques, avec un écart de

position moyen rapporté de 1.7 ± 0.8 mm pour le point d'entrée, de $1,6 \pm 1,2^\circ$ pour la version et $1,7 \pm 1,5^\circ$ pour l'inclinaison. Dans une étude récente réalisée sur 97 patients durant la pose d'une prothèse d'épaule (18 anatomiques et 79 inversées), il a été comparé le positionnement du composant glénoïdien avec (25 épaules) et sans solution de RM (72 épaules). Ils ont observé que les patients opérés avec la RM présentaient des version et inclinaison du composant glénoïdien significativement plus précises ($p < 0,001$)(27).

Il est important de prendre en compte que le type de glène peut influencer le positionnement de la broche de préparation glénoïdienne. Hao et al.(35) a mené une étude sur 170 arthroplasties d'épaules, en comparant l'écart de position de la broche glénoïdienne entre la planification préopératoire et le positionnement final de la broche selon le type de glène (A1, A2, B1, B2 ou B3). Il a été observé une proportion plus importante d'erreur de version $>10^\circ$ pour les glènes de type B2/B3 que pour les glènes de type A1/A2/B1 pour les prothèses inversées d'épaule (31% vs. 8%, $p < 0.001$). Dans notre étude, nous avons aussi remarqué que le point d'entrée de la broche glénoïdienne était moins précis pour les glènes de type B, avec néanmoins un écart médian de précision inférieur à 3mm. L'erreur de version/inclinaison de la broche était inférieur à 3° avec l'utilisation du guidage par RM pour les glènes de type B. Il est intéressant de constater que le défaut de correction résiduel se fait dans l'orientation de l'usure glénoïdienne initiale : postérieur pour les glènes B, supérieur pour les glènes E. La navigation par RA semblait néanmoins limiter cette différence de précision observée en fonction du type de glène.

D'autres outils ont déjà été développés pour aider et améliorer les performances du chirurgien lors de la mise en place de la broche de préparation glénoïdienne, tels que la planification préopératoire 3D et l'utilisation d'un guide de visée spécifique au patient (*patient-specific instrumentation*, PSI)(36). La planification préopératoire 3D permet une segmentation automatisée des caractéristiques anatomiques de la glène, simplifiant le choix du type et de la taille optimale de l'implant. Le chirurgien peut simuler l'intervention chirurgicale à sa guise en implantant de façon virtuelle la prothèse. Dans une étude réalisée sur 18 cadavres, Walch et al.(37) ont observé un écart moyen de position du point d'entrée de la broche de 1,05 mm, d'inclinaison de $1,42^\circ$, et de version de $1,64^\circ$. Le guide PSI est fabriqué à l'aide d'une imprimante 3D en se basant sur les données de la planification 3D préopératoire. Lors de l'implantation d'une prothèse avec une instrumentation classique, le bon positionnement de l'implant repose entièrement sur une bonne interprétation par le

chirurgien des repères anatomiques. Dans une méta-analyse récemment publiée(19) sur 227 épaules, l'utilisation du guide PSI a montré une précision du point d'entrée de $1,1 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, de $2,7^\circ \pm 0,5^\circ$ pour la version et de $1,9^\circ \pm 0,4^\circ$ pour l'inclinaison, significativement supérieure au placement de la broche à main levée (point d'entrée $2,04 \text{ mm} \pm 0,40 \text{ mm}$, version $5,88^\circ \pm 1,10^\circ$, inclinaison $5,78^\circ \pm 0,98^\circ$). Une autre étude récente portant sur 20 modèles de scapulae imprimées 3D, a comparé la précision de l'implantation de la broche glénoïdienne entre le positionnement à main levée, avec le guide de visée PSI, et à l'aide de la navigation par RM(38). Elle a permis de conclure à une précision équivalente entre l'utilisation du guide PSI et la navigation par RM. En revanche, elle a observé une supériorité significative de l'utilisation du guidage par RM comparativement à l'implantation de la broche à main levée.

La formation par navigation a déjà fait la preuve de son intérêt pour améliorer les performances des chirurgiens débutants. Lohre et al.(39), dans un essai randomisé, a évalué l'exposition des glènes sur cadavres à l'aide de la réalité virtuelle (RV). L'étude incluait 19 chirurgiens débutants et 7 chirurgiens experts de l'épaule. Elle comparait la RV immersive à l'apprentissage traditionnel à l'aide d'un article de revue technique comme contrôle. La supériorité de la formation a été déterminée par les mesures des résultats selon le score d'évaluation structurée des compétences techniques (OSATS), des réponses verbales et du temps nécessaire pour l'achèvement de la tâche. La RV a démontré dans ce cas de façon significative une supériorité dans l'enseignement de l'exposition glénoïdienne par rapport à l'apprentissage traditionnel. Erickson et al.(40) a aussi étudié l'impact de l'utilisation de la RA pour le positionnement de la broche de préparation glénoïdienne, en la comparant au placement à mains levées, chez des chirurgiens débutants. Trente modèles de glène B2 3D ont été utilisés, les chirurgiens utilisant la visualisation par RA avaient une précision du point d'entrée de la broche significativement améliorée ($1,7 \text{ mm}$ Vs $2,2 \text{ mm}$, $p = 0,014$) et un écart de version réduit par rapport à la chirurgie à main levée ($5,3^\circ$ Vs $11,7^\circ$, $p = 0,0001$). Le positionnement en inclinaison n'était en revanche pas significativement différent. Ces derniers résultats évaluant la RA conforte l'idée princeps que c'est probablement la démarche de planification pré opératoire qui reste la plus importante pour gagner en précision. On peut d'ailleurs penser que la performance des 2 chirurgiens enrôlés dans la présente étude serait encore plus mauvaise s'ils avaient réalisé la même procédure sans se référer à la planification préalablement réalisée lors de la chirurgie non guidée. Cette interprétation est équivalente à celle qui a déjà été évoquée dans l'étude de Ianotti et al.(41) avec l'évaluation comparative de la chirurgie guidée avec PSI.

Limites :

Cette étude présentait certaines limites évidentes. Des modèles de glènes imprimées 3D sans tissus mous et sans scapula entièrement visible ont été utilisés. Cette approche ne constitue qu'une représentation approximative de la situation opératoire réelle, durant laquelle l'exposition glénoïdienne reste difficile, avec une courbe d'apprentissage relativement importante. Il est probable que la différence de précision entre un junior et un sénior aurait été plus importante sur sujets anatomiques, en raison de difficultés de voie d'abord et d'exposition plus marquées pour le chirurgien moins expérimenté. En outre, seulement un chirurgien débutant et un chirurgien expérimenté ont été comparés entre eux. Pour réduire le potentiel biais de performance du chirurgien, un nombre plus important de chirurgiens dans les deux groupes serait nécessaire.

5. Conclusion

L'utilisation du guidage avec RM, dans le but d'améliorer la précision de positionnement d'une broche de préparation glénoïdienne par rapport à chirurgie à mains levées, est autant bénéfique pour un chirurgien sénior que pour un chirurgien junior. Elle semble aussi niveler la précision chirurgicale obtenue entre 2 chirurgiens de niveau différent. Devant ces résultats prometteurs, il serait intéressant de réaliser une étude à plus grande échelle sur cadavres et in vivo, afin de prendre en compte notamment les difficultés liées à l'exposition de la glène et aux variations anatomiques éventuelles.

Annexes

Figures

Figure 1 : Spécimen imprimé 3D comprenant la glène et le processus coracoïde, en continuité avec un socle.



Figure 2 : Casque HoloLens 2® (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) et kit d'instrumentation RM Blueprint®(Stryker, Montbonnot-Saint-Martin, France) : bloc de reconnaissance, stylet palpeur, viseur glénoïdien, clamp coracoïdien.



Figure 3 : Chirurgien junior réalisant les visées avec la broche de préparation glénoïdienne, à l'aide de la RM



Figure 4 : Analyse l'écart de position de l'orientation de la broche selon le plan frontal pour l'inclinaison (A) et selon le plan axial pour la version (B).



Figure 5 : Représentation des écarts de position de la broche guide, réalisés par les chirurgiens junior (points rouges) et sénior (points bleus) sur 13 glènes, pour le point d'entrée et la version/inclinaison, sans RM.

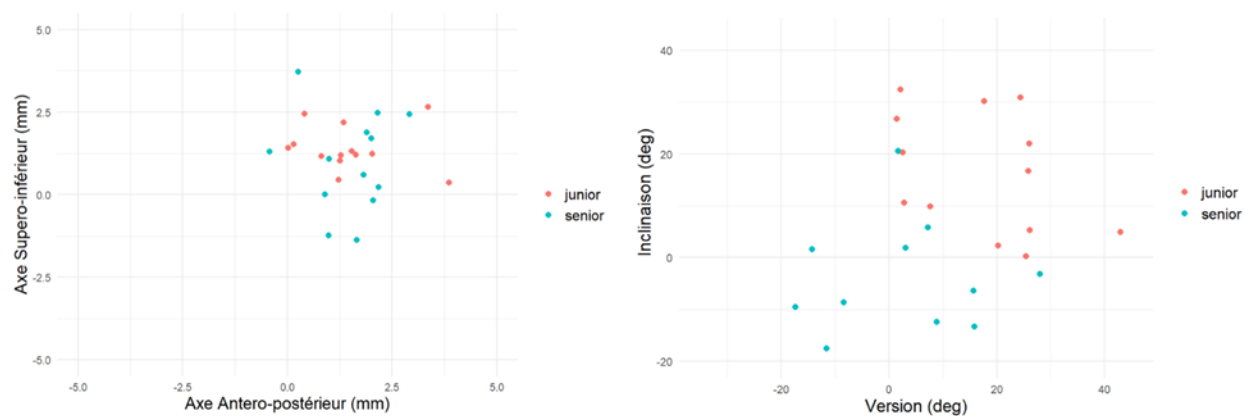


Figure 6 : Représentation des écarts de position de la broche guide, réalisés par les chirurgiens junior (points rouges) et sénior (points bleus) sur 30 glènes, pour le point d'entrée et la version/inclinaison, avec RM.

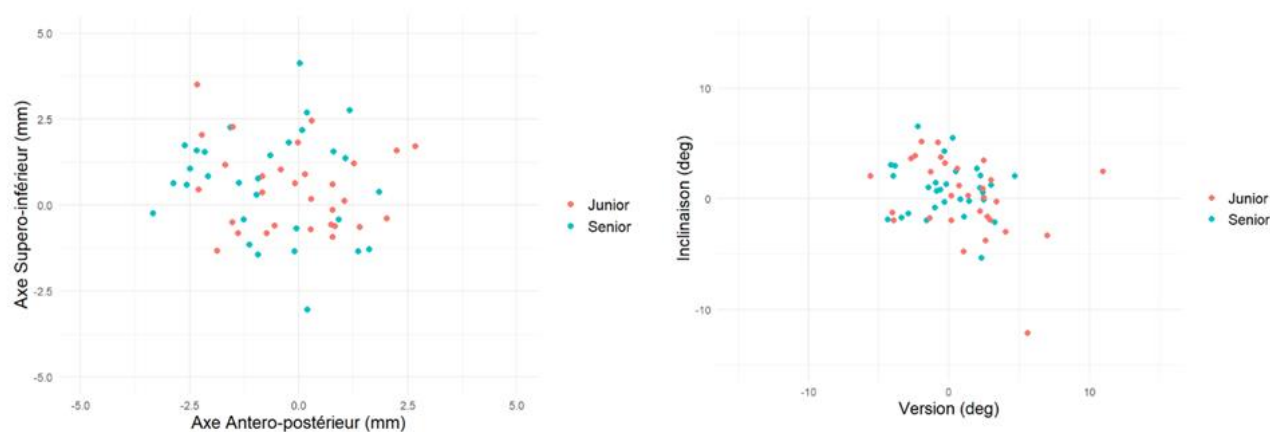


Figure 7 : Représentation des écarts de position de la broche guide, réalisés par les chirurgiens junior et sénior sur 30 glènes avec la RM.

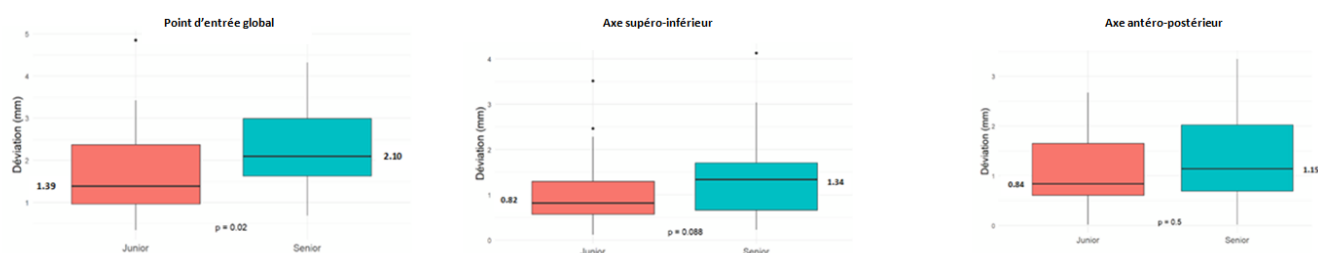
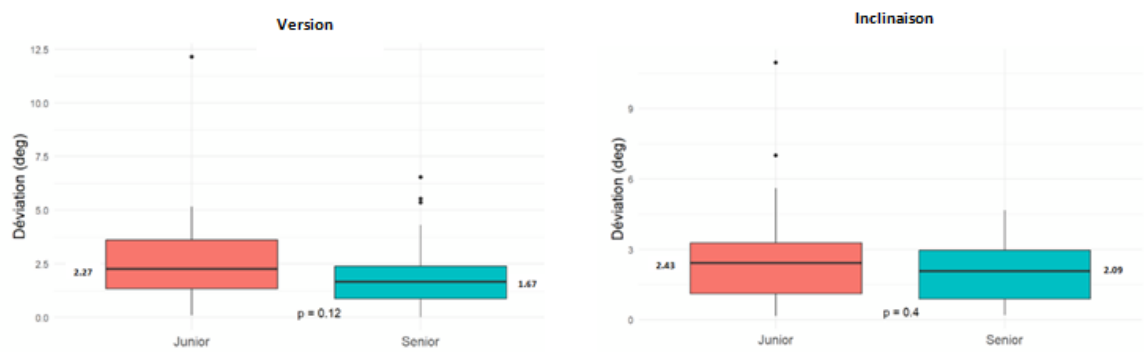


Figure 8 : Représentation des écarts d'orientation de la broche guide, réalisés par les chirurgiens junior et sénior sur 30 glènes, selon l'inclinaison et la version, avec la RM.



Tableaux

		Junior N = 13 ¹	Senior N = 13 ¹	P-value ²
Point d'entrée (mm)	Global	2.04 (1.1)	2.14 (0.9)	0.8
	Axe Sup-Inf	1.24 (0.68)	1.31 (1.07)	>0.9
	Axe Ant-Post	1.27 (1.13)	1.81 (0.78)	0.4
Version (°)		17 (12)	9 (8)	0.3
Inclinaison (°)		20 (13)	9 (8)	0.2

Tableau 1: Comparaison statistique de la précision selon le statut du chirurgien, sans la RM

¹ Médiane (Ecart-type)

² Wilcoxon test

		Type A N= 20 ¹	Type B N=20 ¹	Type E N=20 ¹	P-Value ²
Point d'entrée (mm)	Global	1.59 (0.80)	2.35 (0.82)	1.96 (1.17)	0.04
	Axe Sup-Inf	0.80 (0.57)	1.04 (0.74)	1.13 (1.15)	0.7
	Axe Ant-Post	0.87 (0.77)	1.53 (0.86)	0.77 (0.77)	0.01
Version (°)		1.90 (1.51)	2.03 (2.65)	1.92 (1.67)	0.7
Inclinaison (°)		1.34 (1.82)	2.23 (1.63)	2.43 (2.21)	0.3

Tableau 2: Comparaison statistique de la précision en fonction du type de glènes (30 glènes sénior + 30 glènes junior), avec la RM

¹ Médiane (Ecart-type)

² Kruskal-Wallis test

Type de glène	Point d'entrée Global			Axe Ant-Post		
	Beta	95% IC	P-Value	Beta	95 % IC	p- Value
Type A	-	-	-	-	-	-
Type B	0.71	0.11, 1.13	0.02	0.56	0.06, 1.1	0.03
Type E	0.46	0.14, 1.1	0.1	0.19	0.07, 0.32	0.5

Tableau 3: Régression linéaire selon le type de glène du point d'entrée global et l'axe antéro-postérieur, avec la RM (réalisée à partir du tableau 2)

IC = Intervalle de confiance

		Type A			Type B			Type E		
		Junior N = 10 ¹	Senior N = 10 ¹	P- Value ²	Junior N = 10 ¹	Senior N = 10 ¹	P- Value ²	Junior N = 10 ¹	Senior N = 10 ¹	P- Value ²
Point d'entrée (mm)	Global	1.03 (0.73)	1.82 (1.70)	0.02	2.29 (0.92)	2.49 (0.74)	0.8	1.23 (1.24)	2.32 (1.10)	0.2
	Axe Sup- Inf	0.64 (0.50)	1.21 (0.59)	0.2	1.04 (0.68)	1.01 (0.83)	>0.9	0.89 (1.08)	1.47 (1.19)	0.1
	Axe Ant- Post	0.65 (0.67)	1.35 (0.70)	0.01	1.61 (0.74)	1.32 (1.01)	0.8	0.81 (0.66)	0.21 (0.89)	0.2
Version (°)		2.20 (1.69)	1.74 (1.32)	0.4	2.54 (3.24)	1.52 (1.71)	0.1	2.20 (1.44)	1.64 (1.95)	0.9
Inclinaison (°)		1.18 (2.06)	1.44 (1.62)	0.2	2.60 (1.81)	1.62 (1.22)	0.2	2.65 (2.78)	2.26 (1.26)	0.08

Tableau 4: Comparaison statistique de la précision selon le statut du chirurgien en fonction du type de glène, avec la RM

¹ Médiane (Ecart-type)

² Wilcoxon test

Bibliographie:

1. Patzer T. [Reversed total shoulder arthroplasty in rotator cuff defect arthropathy]. *Orthopade*. mai 2018;47(5):390-7.
2. Simovitch RW, Friedman RJ, Cheung EV, Flurin PH, Wright T, Zuckerman JD, et al. Rate of Improvement in Clinical Outcomes with Anatomic and Reverse Total Shoulder Arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am*. 1 nov 2017;99(21):1801-11.
3. Vij N, Tummala S, Shahriary E, Tokish J, Martin S. Total Shoulder Arthroplasty Versus Reverse Shoulder Arthroplasty in Primary Glenohumeral Osteoarthritis With Intact Rotator Cuffs: A Meta-Analysis. *Cureus*. avr 2024;16(4):e57866.
4. Schairer WW, Nwachukwu BU, Lyman S, Craig EV, Gulotta LV. National utilization of reverse total shoulder arthroplasty in the United States. *J Shoulder Elbow Surg*. janv 2015;24(1):91-7.
5. Hammond JW, Queale WS, Kim TK, McFarland EG. Surgeon experience and clinical and economic outcomes for shoulder arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am*. déc 2003;85(12):2318-24.
6. Boileau P. Complications and revision of reverse total shoulder arthroplasty. *Orthop Traumatol Surg Res*. févr 2016;102(1 Suppl):S33-43.
7. Pinkas D, Wiater B, Wiater JM. The glenoid component in anatomic shoulder arthroplasty. *J Am Acad Orthop Surg*. mai 2015;23(5):317-26.
8. Karelse A, Van Tongel A, Van Isacker T, Berghs B, De Wilde L. Parameters influencing glenoid loosening. *Expert Rev Med Devices*. août 2016;13(8):773-84.
9. Dillon MT, Chan PH, Prentice HA, Burfeind WE, Yian EH, Singh A, et al. The association between glenoid component design and revision risk in anatomic total shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg*. oct 2020;29(10):2089-96.
10. McLendon PB, Schoch BS, Sperling JW, Sánchez-Sotelo J, Schleck CD, Cofield RH. Survival of the pegged glenoid component in shoulder arthroplasty: part II. *J Shoulder Elbow Surg*. août 2017;26(8):1469-76.
11. Alonso Pérez-Barquero J, Aroca Navarro JE, Navarro Bosch M, de la Calva Ceinos C, Pina Medina A. Scapular notching in reverse shoulder arthroplasty. Relationship with surgeons' experience and clinical outcomes. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol*. 2022;66(1):3-9.
12. Mollon B, Mahure SA, Roche CP, Zuckerman JD. Impact of scapular notching on clinical outcomes after reverse total shoulder arthroplasty: an analysis of 476 shoulders. *J Shoulder Elbow Surg*. juill 2017;26(7):1253-61.
13. Loucas M, Borbas P, Vetter M, Loucas R, Ernstbrunner L, Wieser K. Risk Factors for Dislocation After Reverse Total Shoulder Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Orthopedics*. 2022;45(6):e303-8.

14. Cho CH, Song KS, Koo TW. Clinical Outcomes and Complications during the Learning Curve for Reverse Total Shoulder Arthroplasty: An Analysis of the First 40 Cases. *Clin Orthop Surg.* juin 2017;9(2):213-7.
15. Jacquot A, Gauci MO, Chaoui J, Baba M, Deransart P, Boileau P, et al. Proper benefit of a three dimensional pre-operative planning software for glenoid component positioning in total shoulder arthroplasty. *Int Orthop.* déc 2018;42(12):2897-906.
16. Berhouet J, Gulotta LV, Dines DM, Craig E, Warren RF, Choi D, et al. Preoperative planning for accurate glenoid component positioning in reverse shoulder arthroplasty. *Orthop Traumatol Surg Res.* mai 2017;103(3):407-13.
17. Larose G, Greene AT, Jung A, Polakovic SV, Davis NZ, Zuckerman JD, et al. High intraoperative accuracy and low complication rate of computer-assisted navigation of the glenoid in total shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg.* juin 2023;32(6S):S39-45.
18. Gauci MO, Boileau P, Baba M, Chaoui J, Walch G. Patient-specific glenoid guides provide accuracy and reproducibility in total shoulder arthroplasty. *Bone Joint J.* août 2016;98-B(8):1080-5.
19. Villatte G, Muller AS, Pereira B, Mulliez A, Reilly P, Emery R. Use of Patient-Specific Instrumentation (PSI) for glenoid component positioning in shoulder arthroplasty. A systematic review and meta-analysis. *PLoS One.* 2018;13(8):e0201759.
20. Jennewine BR, Brolin TJ. Emerging Technologies in Shoulder Arthroplasty: Navigation, Mixed Reality, and Preoperative Planning. *Orthop Clin North Am.* avr 2023;54(2):209-25.
21. Kriechling P, Roner S, Liebmann F, Casari F, Fürnstahl P, Wieser K. Augmented reality for base plate component placement in reverse total shoulder arthroplasty: a feasibility study. *Arch Orthop Trauma Surg.* sept 2021;141(9):1447-53.
22. Sun P, Zhao Y, Men J, Ma ZR, Jiang HZ, Liu CY, et al. Application of Virtual and Augmented Reality Technology in Hip Surgery: Systematic Review. *J Med Internet Res.* 10 mars 2023;25:e37599.
23. Laverdière C, Corban J, Khoury J, Ge SM, Schupbach J, Harvey EJ, et al. Augmented reality in orthopaedics: a systematic review and a window on future possibilities. *Bone Joint J.* déc 2019;101-B(12):1479-88.
24. Berhouet J, Slimane M, Facomprez M, Jiang M, Favard L. Views on a new surgical assistance method for implanting the glenoid component during total shoulder arthroplasty. Part 2: From three-dimensional reconstruction to augmented reality: Feasibility study. *Orthop Traumatol Surg Res.* avr 2019;105(2):211-8.
25. Rojas JT, Menzemer J, Rashid M, Hayoz A, Lädermann A, Zumstein MA. Navigated augmented reality through a head-mounted display leads to low deviation between planned, intra- and post-operative parameters during glenoid component placement of reverse shoulder arthroplasty: a proof-of-concept case series. *J Shoulder Elbow Surg.* 26 juin 2024;S1058-2746(24)00453-1.

26. Sanchez-Sotelo J, Berhouet J, Chaoui J, Freehill MT, Collin P, Warner J, et al. Validation of mixed-reality surgical navigation for glenoid axis pin placement in shoulder arthroplasty using a cadaveric model. *J Shoulder Elbow Surg.* mai 2024;33(5):1177-84.
27. Kopriva JM, McKissack HM, Griswold BG, Hussain ZB, Cooke HL, Gottschalk MB, et al. Mixed-reality improves execution of templated glenoid component positioning in shoulder arthroplasty: a CT imaging analysis. *J Shoulder Elbow Surg.* août 2024;33(8):1789-98.
28. Avendano JP, Sudah SY, Gencarelli P, Imam N, Manzi JE, Ghajar M, et al. The learning curve for anatomic and reverse total shoulder arthroplasty: a systematic review. *JSES Rev Rep Tech.* mai 2023;3(2):150-9.
29. Dey Hazra RO, Paksoy A, Imiolczyk JP, Gebauer H, Hayta A, Akgün D. Augmented Reality Assisted Intraoperative Navigation Increases Precision of Glenoid Inclination in Reverse Shoulder Arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg.* 18 juill 2024;S1058-2746(24)00492-0.
30. Walch G, Badet R, Boulahia A, Khoury A. Morphologic study of the glenoid in primary glenohumeral osteoarthritis. *J Arthroplasty.* sept 1999;14(6):756-60.
31. Sirveaux F, Favard L, Oudet D, Huquet D, Walch G, Molé D. Grammont inverted total shoulder arthroplasty in the treatment of glenohumeral osteoarthritis with massive rupture of the cuff. Results of a multicentre study of 80 shoulders. *J Bone Joint Surg Br.* avr 2004;86(3):388-95.
32. Sanchez-Sotelo J, Sperling JW, Rowland CM, Cofield RH. Instability after shoulder arthroplasty: results of surgical treatment. *J Bone Joint Surg Am.* avr 2003;85(4):622-31.
33. Roche CP. Reverse Shoulder Arthroplasty Biomechanics. *J Funct Morphol Kinesiol.* 19 janv 2022;7(1):13.
34. Kriechling P, Loucas R, Loucas M, Casari F, Fürnstahl P, Wieser K. Augmented reality through head-mounted display for navigation of baseplate component placement in reverse total shoulder arthroplasty: a cadaveric study. *Arch Orthop Trauma Surg.* 1 janv 2023;143(1):169-75.
35. Hao KA, Sutton CD, Wright TW, Schoch BS, Wright JO, Struk AM, et al. Influence of glenoid wear pattern on glenoid component placement accuracy in shoulder arthroplasty. *JSES Int.* mars 2022;6(2):200-8.
36. Can Kolac U, Paksoy A, Akgün D. Three-dimensional planning, navigation, patient-specific instrumentation and mixed reality in shoulder arthroplasty: a digital orthopedic renaissance. *EFORT Open Rev.* 3 juin 2024;9(6):517-27.
37. Walch G, Vezeridis PS, Boileau P, Deransart P, Chaoui J. Three-dimensional planning and use of patient-specific guides improve glenoid component position: an in vitro study. *J Shoulder Elbow Surg.* févr 2015;24(2):302-9.
38. Fleet CT, Gao R, Johnson JA, Athwal GS. An In-Vitro Comparison of Mixed Reality Navigation to Traditional Freehand and Patient Specific Instrumentation Techniques for

Glenoid Guide Pin Insertion during Shoulder Arthroplasty. J Shoulder Elbow Surg. 20 juin 2024;S1058-2746(24)00429-4.

39. Lohre R, Bois AJ, Athwal GS, Goel DP, Canadian Shoulder and Elbow Society (CSES). Improved Complex Skill Acquisition by Immersive Virtual Reality Training: A Randomized Controlled Trial. J Bone Joint Surg Am. 18 mars 2020;102(6):e26.

40. Preoperative mixed reality training improves trainee performance of glenoid guidewire positioning in shoulder arthroplasty in Walch B2 glenoid model - ScienceDirect [Internet]. [cité 19 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1045452723001657>

41. Iannotti JP, Walker K, Rodriguez E, Patterson TE, Jun BJ, Ricchetti ET. Accuracy of 3-Dimensional Planning, Implant Templating, and Patient-Specific Instrumentation in Anatomic Total Shoulder Arthroplasty. J Bone Joint Surg Am. 6 mars 2019;101(5):446-57.

Vu, le Directeur de Thèse

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'D' with a horizontal line extending to the right.

**Vu, le Doyen
De la Faculté de Médecine de
Tours, le**

IMBERT Chloé

41 pages – 8 figures– 4 tableaux

Résumé:

Introduction : Le potentiel de la réalité mixte pour améliorer la précision du positionnement de la broche de préparation glénoïdienne dans le cadre de l'arthroplastie d'épaule a déjà été rapporté. Un autre intérêt de la réalité mixte serait d'aider des chirurgiens juniors à gagner en précision lors de leurs interventions prothétiques. L'objectif de cette étude était d'évaluer et de comparer la précision de positionnement de la broche de préparation glénoïdienne entre un chirurgien sénior et un chirurgien junior utilisant un guidage par réalité mixte. L'hypothèse de cette étude était que la réalité mixte permettait de niveler la précision chirurgicale entre des opérateurs d'expérience différente.

Matériels et Méthodes : Un chirurgien sénior expérimenté et un chirurgien junior débutant avaient chacun pour objectif de positionner une broche de préparation glénoïdienne, d'abord à mains levées, puis avec une solution de guidage par réalité mixte (Blue Mixed Reality Guidance®, Stryker), respectivement sur 15 et 30 spécimens de scapulae imprimées en 3D (10 type A et 10 type B selon Walch, 10 type E selon Favard), préalablement planifiés avec un logiciel dédié (Blueprint Planning®, Stryker). La précision de positionnement du point d'entrée et d'orientation de la broche glénoïdienne à l'issue des chirurgies, sans et avec guidage par réalité mixte, a été évaluée et comparée entre les deux opérateurs.

Résultats : Sans réalité mixte, il n'existait pas de différence significative entre les deux chirurgiens pour la précision du point d'entrée ($p=0,8$) et de l'orientation de la broche ($p>0,05$). Il existait néanmoins un important écart médian de position pour la version et l'inclinaison, respectivement de $17 \pm 12^\circ$ et $20 \pm 13^\circ$ pour le chirurgien junior, et de $9 \pm 8^\circ$ pour le chirurgien sénior. Avec le guidage par réalité mixte, il n'a pas été mis en évidence de différence significative pour l'inclinaison, la version, le positionnement selon les axes antéro-postérieur et supéro-inférieur de la broche entre les deux chirurgiens. Le chirurgien junior était néanmoins plus précis pour le point d'entrée global de la broche, avec un écart de positionnement médian de $1.39 \pm 1,04$ mm versus $2.10 \pm 0,86$ mm ($p=0,02$). Il n'y avait aucune différence significative de précision entre les deux chirurgiens en fonction du type de glène, hormis pour le point d'entrée global des glènes de type A, où le chirurgien débutant était plus précis ($p=0,02$), ainsi que pour l'axe antéro-supérieur ($p=0,01$).

Conclusion : L'utilisation de la réalité mixte améliore et nivèle la précision de positionnement et d'orientation d'une broche guide glénoïdienne sur glènes arthrosiques entre 2 chirurgiens d'expérience différente.

Mots clés : Prothèse d'épaule, réalité mixte, réalité augmentée, courbe d'apprentissage, précision, composant glénoïdien.

Jury :

Président : Professeur Emérite Luc FAVARD, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, Faculté de Médecine - Tours

Directeur : Professeur Julien BERHOUET, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, Faculté de Médecine – Tours

Membres :

Professeur Guillaume BACLE, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, Faculté de Médecine - Tours

Professeur Louis-Romée LE NAIL, Cancérologie, Faculté de Médecine - Tours

Date de soutenance : 18/10/2024