



HAL
open science

Analyse tridimensionnelle semi-automatisée de la pronation du premier métatarsien dans l'hallux valgus : une étude cas-témoins

Luc Meuric

► **To cite this version:**

Luc Meuric. Analyse tridimensionnelle semi-automatisée de la pronation du premier métatarsien dans l'hallux valgus : une étude cas-témoins. Médecine humaine et pathologie. 2024. dumas-04778172

HAL Id: dumas-04778172

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04778172v1>

Submitted on 12 Nov 2024

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

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

UFR DE SANTE DE ROUEN NORMANDIE

ANNEE 2024

THESE POUR LE DOCTORAT EN MEDECINE

(Diplôme d'Etat)

Par

MEURIC Luc

Né le 22 Février 1994 au Mans.

Présentée et soutenue publiquement le 20 Septembre 2024.

**Analyse tridimensionnelle semi-automatisée
de la pronation du premier métatarsien dans
l'hallux valgus : une étude cas-témoins.**

Président de jury : Monsieur le Professeur Franck DUJARDIN

Directeur de thèse : Monsieur le Docteur Matthieu LALEVEE

Membres du jury : Monsieur le Professeur Fabrice DUPARC
Monsieur le Professeur Mourad OULD-SLIMANE
Monsieur le Docteur Jonathan CURADO

ANNEE UNIVERSITAIRE 2023 - 2024

U.F.R. SANTÉ DE ROUEN

DOYEN : **Professeur Benoît VEBER**
ASSEESSEURS : **Professeur Loïc FAVENNEC**
Professeur Agnès LIARD
Professeur Guillaume SAVOYE

I - MEDECINE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Najate ACHAMRAH	HCN	Nutrition
Mr Frédéric ANSELME	HCN	Cardiologie
Mme Gisèle APTER	Havre	Pédopsychiatrie
Mme Isabelle AUQUIT AUCKBUR	HCN	Chirurgie plastique
Mr Jean-Marc BASTE	HCN	Chirurgie Thoracique
Mr Fabrice BAUER	HCN	Cardiologie
Mme Soumeya BEKRI	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Ygal BENHAMOU	HCN	Médecine interne
Mr Jacques BENICHOU	HCN	Bio statistiques et informatique médicale
Mr Emmanuel BESNIER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation
Mr Olivier BOYER	UFR	Immunologie
Mme Valérie BRIDOUX HUYBRECHTS	HCN	Chirurgie Digestive
Mme Sophie CANDON	HCN	Immunologie
Mr François CARON	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Philippe CHASSAGNE	HCN	Médecine interne (gériatrie)
Mr Thomas CLAVIER	HCN	Anesthésie-Réanimation
Mr Florian CLATOT	CB	Cancérologie – Radiothérapie
Mr Moïse COEFFIER	HCN	Nutrition
Mr Vincent COMPERE	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mr Jean-Nicolas CORNU	HCN	Urologie
Mr Antoine CUVELIER	HB	Pneumologie
Mr Jean-Nicolas DACHER	HCN	Radiologie et imagerie médicale
Mr Stéfan DARMONI communication	HCN	Informatique médicale et techniques de
Mr Pierre DECHELOTTE	HCN	Nutrition

Mme Sophie DENEUVE	HCN	ORL
Mr Stéphane DERREY	HCN	Neurochirurgie
Mr Frédéric DI FIORE	CHB	Cancérologie
Mr Fabien DOGUET (<i>disponibilité</i>)	HCN	Chirurgie Cardio Vasculaire
Mr Franck DUJARDIN	HCN	Chirurgie orthopédique - Traumatologique
Mr Fabrice DUPARC traumatologique	HCN	Anatomie - Chirurgie orthopédique et
Mr Eric DURAND	HCN	Cardiologie
Mme Hélène ELTCHANINOFF	HCN	Cardiologie
Mr Manuel ETIENNE	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Jean François GEHANNO	HCN	Médecine et santé au travail
Mr Emmanuel GERARDIN	HCN	Imagerie médicale
Mme Priscille GERARDIN	HCN	Pédopsychiatrie
M. Guillaume GOURCEROL	HCN	Physiologie
Mr Dominique GUERROT	HCN	Néphrologie
Mme Julie GUEUDRY	HCN	Ophtalmologie
Mr Olivier GUILLIN	HCN	Psychiatrie Adultes
Mr Florian GUISIER	HCN	Pneumologie
Mr Claude HOUDAYER	HCN	Génétique
Mr Vivien HEBERT	HCN	Dermatologie
Mr Fabrice JARDIN	CHB	Hématologie
Mr Luc-Marie JOLY	HCN	Médecine d'urgence
Mr Pascal JOLY	HCN	Dermato – Vénérologie
Mme Bouchra LAMIA	Havre	Pneumologie
Mr Hervé LEFEBVRE	HB	Endocrinologie et maladies métaboliques
Mr Thierry LEQUERRE	HCN	Rhumatologie
Mme Anne-Marie LEROI	HCN	Physiologie
Mr Hervé LEVESQUE	HCN	Médecine interne
Mme Agnès LIARD-ZMUDA	HCN	Chirurgie Infantile
Mr Pierre Yves LITZLER	HCN	Chirurgie cardiaque
M. David MALTETE	HCN	Neurologie
M. Florent MARGUET	HCN	Histologie
Mr Christophe MARGUET	HCN	Pédiatrie
Mme Isabelle MARIE	HCN	Médecine interne
Mr Jean-Paul MARIE	HCN	Oto-rhino-laryngologie
Mr Stéphane MARRET	HCN	Pédiatrie
Mme Véronique MERLE (<i>disponibilité</i>)	HCN	Epidémiologie
Mr Pierre MICHEL	HCN	Hépto-gastro-entérologie

M. Benoit MISSET (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation Médicale
Mr Marc MURAINÉ	HCN	Ophtalmologie
Mr Gaël NICOLAS	UFR	Génétique
Mr Mourad OULD SLIMANE	HCN	Chirurgie Orthopédique
Mr Christian PFISTER	HCN	Urologie
Mr Jean-Christophe PLANTIER	HCN	Bactériologie - Virologie
Mr Didier PLISSONNIER	HCN	Chirurgie vasculaire
Mr Gaëtan PREVOST	HCN	Endocrinologie
Mr Jean-Christophe RICHARD (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation médicale - Médecine d'urgence
Mr Vincent RICHARD	UFR	Pharmacologie
Mme Nathalie RIVES	HCN	Biologie du développement et de la reproduction
Mr Frédéric ROCA	HCN	Médecine Gériatrique
Mr Horace ROMAN (<i>détachement</i>)	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Jean-Christophe SABOURIN	HCN	Anatomie – Pathologie
Mr Mathieu SALAUN	HCN	Pneumologie
Mr Guillaume SAVOYE	HCN	Hépto-gastro-entérologie
Mme Céline SAVOYE-COLLET	HCN	Imagerie médicale
Mme Pascale SCHNEIDER	HCN	Pédiatrie
Mr Lilian SCHWARZ	HCN	Chirurgie Viscérale et Digestive
Mme Fabienne TAMION	HCN	Réanimation médicale
Mr Luc THIBERVILLE	HCN	Pneumologie
Mr Sébastien THUREAU	CB	Radiothérapie
M. Gilles TOURNEL	HCN	Médecine Légale
Mr Olivier TROST	HCN	Anatomie -Chirurgie Maxillo-Faciale
Mr Jean-Jacques TUECH	HCN	Chirurgie digestive
Mr Benoît VEBER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation chirurgicale
Mr Pierre VERA	CHB	Biophysique et traitement de l'image
Mr Eric VERIN	Les Herbiers	Médecine Physique et de Réadaptation
Mr Eric VERSPYCK	HCN	Gynécologie obstétrique
Mr Olivier VITTECOQ	HCN	Rhumatologie
Mr David WALLON	HCN	Neurologie
Mme Marie-Laure WELTER	HCN	Physiologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Elodie ALESSANDRI-GRADT	HCN	Virologie
Mr Kévin ALEXANDRE	HCN	Maladies Infectieuses et Tropicales
Mme Noëlle BARBIER-FREBOURG	HCN	Bactériologie – Virologie
Mme Carole BRASSE LAGNEL	HCN	Biochimie
Mr Gérard BUCHONNET	HCN	Hématologie
Mme Mireille CASTANET	HCN	Pédiatrie
Mr Damien COSTA	HCN	Parasitologie
Mme Ivana DABAJ	HCN	Pédiatrie
Mme Charlotte DESPREZ	HCN	Physiologie
Mr Pierre DECAZES	CB	Médecine Nucléaire
Mr Maxime FONTANILLES	GHH	Oncologie Médicale
M. Vianney GILARD (<i>disponibilité</i>)	HCN	Neurochirurgie
Mr Serge JACQUOT	UFR	Immunologie
Mr Joël LADNER	HCN	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Baptiste LATOUCHE	UFR	Biologie cellulaire
Mme Chloé MELCHIOR	HCN	Hépto-gastro-entérologie
M. Sébastien MIRANDA	HCN	Médecine Vasculaire
Mr Thomas MOUREZ (<i>détachement</i>)	HCN	Virologie
Mme Muriel QUILLARD	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mme Laëtitia ROLLIN	HCN	Médecine du Travail
Mme Maud ROTHARMEL	HCN	Psychiatrie Adultes
Mme Mélanie ROUSSEL	HCN	Médecine d'Urgences
Mme Pascale SAUGIER-VEBER	HCN	Génétique
M. Abdellah TEBANI	HCN	Biochimie et Biologie Moléculaire
Mme Anne-Claire TOBENAS-DUJARDIN	HCN	Anatomie
Mr Julien WILS	HCN	Pharmacologie

PROFESSEUR AGREGE OU CERTIFIE

Mme Noémie MARIE	UFR	Communication
Mr Thierry WABLE	UFR	Communication
Mme Mélanie AUVRAY-HAMEL	UFR	Anglais
Mme Cécile POTTIER-LE GUELLEC	UFR	Anglais

II – PHARMACIE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Mr Jérémy BELLIEN (PU-PH)	Pharmacologie
Mr Thierry BESSON	Chimie Thérapeutique
Mr Jean COSTENTIN (Professeur émérite)	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
Mr Abdelhakim EL OMRI	Pharmacognosie
Mr François ESTOUR	Chimie Organique
Mr Loïc FAVENNEC (PU-PH)	Parasitologie
Mr Jean Pierre GOULLE (Professeur émérite)	Toxicologie
Mme Christelle MONTEIL	Toxicologie
Mme Martine PESTEL-CARON (PU-PH)	Microbiologie
Mme Malika SKIBA	Pharmacie galénique
Mr Rémi VARIN (PU-PH)	Pharmacie clinique
Mr Jean-Marie VAUGEOIS	Pharmacologie
Mr Philippe VERITE	Chimie analytique

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Mme Margueritta AL ZALLOUHA	Toxicologie
Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et Minérale
Mr Paul BILLOIR (MCU-PH)	Hématologie Biologique
Mr Frédéric BOUNOURE	Pharmacie Galénique
Mr Thomas CASTANHEIRO MATIAS	Chimie Organique
Mr Abdeslam CHAGRAOUI	Physiologie
Mme Camille CHARBONNIER (LE CLEZIO) (MCU-PH)	Statistiques
Mme Elizabeth CHOSSON	Botanique
Mme Marie Catherine CONCE-CHEMTOB la santé	Législation pharmaceutique et économie de
Mr Romain COPPEE	Bio-Informatique
Mme Cécile CORBIERE	Biochimie
Mme Sandrine DAHAYOT (MCU-PH)	Bactériologie
Mme Isabelle DUBUC	Pharmacologie
Mr Thomas DUFLOT (MCU-PH)	Pharmacologie
Mr Gilles GARGALA (MCU-PH)	Parasitologie

Mr Henri GONDÉ (MCU-PH)	Pharmacie
Mme Nejla EL GHARBI-HAMZA	Chimie analytique
Mr Chervin HASSEL	Virologie
Mme Maryline LECOINTRE	Physiologie
Mme Hong LU	Biologie
Mme Marine MALLETER	Biologie Cellulaire
M. Jérémie MARTINET (MCU-PH)	Immunologie
Mr Valentin PLATEL	Pharmacologie
M. Romy RAZAKANDRAINIBÉ	Parasitologie
Mme Tiphaine ROGEZ-FLORENT	Chimie analytique
Mr Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique

PROFESSEURS ASSOCIES

Mme Caroline BERTOUX	Pharmacie officinale
M. Charles CALTOT	DEUST Pharmacie
Mme Cécile GUERARD-DETUNCQ	Pharmacie officinale
Mme Christine HAIMET-LEROY	DEUST Pharmacie
Mme Lucile LOUIN	DEUST Officine
Mme Stéphanie LAMOUREUX	DEUST Pharmacie
M. Damien SALAUZE	Pharmacie industrielle

PAU-PH

M. Pierre BOHN	Radiopharmacie
M. Mikaël DAOUPHARS	Pharmacie

PROFESSEUR CERTIFIE

Mme Mathilde GUERIN	Anglais
----------------------------	---------

ASSISTANTS HOSPITALO-UNIVERSITAIRES

M. Eric BARAT	Pharmacie
Mme Marine CAVELIER	Pharmacie
M. Guillaume FEUGRAY	Biochimie Générale
M. Romain LEGUILLON	Pharmacie

LISTE DES RESPONSABLES DES DISCIPLINES PHARMACEUTIQUES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et minérale
Mr Thierry BESSON	Chimie thérapeutique
Mr Abdeslam CHAGRAOUI	Physiologie
Mme Elisabeth CHOSSON	Botanique
Mme Marie-Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation et économie de la santé
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
Mr Abdelhakim EL OMRI	Pharmacognosie
Mr François ESTOUR	Chimie organique
Mr Loïc FAVENNEC	Parasitologie
Mme Christelle MONTEIL	Toxicologie
Mme Martine PESTEL-CARON	Microbiologie
Mr Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mr Rémi VARIN	Pharmacie clinique
M. Jean-Marie VAUGEOIS	Pharmacologie
Mr Philippe VERITE	Chimie analytique

III – ODONTOLOGIE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Rénata **KOZYRAKI**

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Anne-Charlotte **BAS**

MAST

Mme Isabelle **FONTANILLES**

Mr Romain **JACQ**

Mr Benjamin **SOMMAIRE**

IV – MEDECINE GENERALE

PROFESSEUR MEDECINE GENERALE

Mr Matthieu **SCHUERS** (PU-MG)

UFR Médecine générale

PROFESSEURS ASSOCIES A MI-TEMPS – MEDECINS GENERALISTE

Mr Pascal **BOULET**

UFR Médecine générale

Mr Emmanuel **HAZARD**

UFR Médecine Générale

Mr Emmanuel **LEFEBVRE**

UFR Médecine Générale

Mme Lucille **PELLERIN**

UFR Médecine Générale

Mme Yveline **SEVRIN**

UFR Médecine générale

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE A MI-TEMPS – MEDECINS GENERALISTES

Mme Blandine **BILLET**

UFR Médecine Générale

Mr Julien **BOUDIER**

UFR Médecine Générale

Mme Laëtitia **BOURDON**

UFR Médecine Générale

Mme Elsa **FAGOT-GRIFFIN**

UFR Médecine Générale

Mme Ségolène **GUILLEMETTE**

UFR Médecine Générale

Mr Frédéric **RENOU**

UFR Médecine Générale

Mme Charlotte **SIEFRIDT**

UFR Médecine Générale

ENSEIGNANTS MONO-APPARTENANTS

PROFESSEURS

Mr Sahil ADRIOUCH (med) Inserm 905)	Biochimie et biologie moléculaire (Unité)
Mr Paul MULDER (phar)	Sciences du Médicament
Mme Su RUAN (med)	Génie Informatique

MAITRES DE CONFERENCES

Mr Jonathan BRETON (med)	Nutrition
Mme Gaëlle BOUGEARD-DENOYELLE (med)	Biochimie et biologie moléculaire (UMR 1079)
Mme Carine CLEREN (med)	Neurosciences (Néovasc)
M. Sylvain FRAINEAU (med)	Physiologie (Inserm U 1096)
Mme Pascaline GAILDRAT (med)	Génétique moléculaire humaine (UMR 1079)
Mme Rachel LETELLIER (med)	Physiologie
Mr Loïc MARTIN	Sciences Rééducation et Réadaptation
Mr Antoine OUVRARD-PASCAUD (med)	Physiologie (Unité Inserm 1076)
Mr Frédéric PASQUET	Sciences du langage, orthophonie
Mme Anne-Sophie PEZZINO	Orthophonie
Mme Christine RONDANINO (med)	Physiologie de la reproduction
Mr Youssan Var TAN	Immunologie
Mme Isabelle TOURNIER (med)	Biochimie (UMR 1079)

PAU

Mme Léopoldine DEHEINZELIN	Orthophonie
Mme Séverine ROBERT	Orthophonie

DIRECTEUR ADMINISTRATIF : M. Jean-Sébastien VALET

HCN - Hôpital Charles Nicolle

CB - Centre Henri Becquerel

CRMPR - Centre Régional de Médecine Physique et de Réadaptation

HB - Hôpital de BOIS GUILLAUME

CHS - Centre Hospitalier Spécialisé du Rouvray

SJ - Saint Julien Rouen

Par délibération en date du 3 mars 1967, la faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

SERMENT D'HIPPOCRATE

Au moment d'être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux. Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité. J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences. Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis(e) dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu(e) à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs. Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

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

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité. Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque.

Remerciements :

A Monsieur le Professeur Franck Dujardin, Président de jury

Vous me faites l'honneur de présider ce jury et de juger ce travail.

Votre aisance chirurgicale et vos connaissances sont remarquables. Vous nous permettez d'évoluer dans un service où l'ensemble de notre spécialité est exercé afin de nous octroyer une formation complète. Votre proximité et vos anecdotes réhaussent notre quotidien et votre ouverture d'esprit nous permet de nous réaliser dans chacun de nos projets.

Veillez être assuré, Monsieur, de mon profond respect.

A Monsieur le Docteur Matthieu Lalevée, Directeur de thèse

Tu me fais l'honneur de diriger cette thèse et de juger ce travail.

Tu m'as ouvert au monde de la chirurgie du pied et aux méandres de l'hallux valgus. Travailler sur ce sujet a été pour moi une source d'enrichissement et un apprentissage important dans ma formation. Ta bonne humeur et ton énergie inépuisable sont pour moi une vraie source d'inspiration et force mon respect. Les quelques blocs que nous avons partagés m'ont montré la rigueur qu'il faut pour devenir chirurgien. Je souhaite continuer à bénéficier de ton enseignement au sein de l'école Rouennaise.

Je te remercie et te témoigne mon plus grand respect.

A Monsieur le Professeur Fabrice Duparc, membre du jury

Vous me faites l'honneur de juger ce travail.

Votre enseignement de la chirurgie orthopédique et de l'anatomie fait partie de la réussite de notre parcours. La pédagogie et la patience que vous avez à notre égard m'a toujours impressionné. Vous attachez également une importance particulière à nous suivre et nous aider dans notre apprentissage universitaire et je vous en remercie.

Veillez être assuré, Monsieur, de mon profond respect.

A Monsieur le Professeur Mourad Ould-Slimane, membre du jury

Tu me fais l'honneur de juger ce travail.

En Novembre 2020 c'est dans ton service que j'ai fait mes premiers pas d'interne. Tu m'as accueilli avec beaucoup de bienveillance et tu m'as témoigné de la confiance très rapidement que ce soit au bloc opératoire ou dans les services. Ta générosité et ton enseignement sont exemplaires. Tu rends la chirurgie du rachis d'une facilité déconcertante et au travers de tes mains tu transmets la passion de cette chirurgie. Tu m'as permis de prendre confiance en moi dès le début de mon internat et tu as beaucoup participé au jeune chirurgien que je deviens.

Pour tout cela je te remercie et te témoigne mon profond respect.

A Monsieur le Docteur Jonathan Curado, membre du jury

Tu me fais l'honneur de juger ce travail.

Malgré mes ascendances bretonnes que tu veux tchèques, c'est avec toi que l'attrait de la chirurgie du membre inférieur m'est venu. Tu es un chirurgien complet et polyvalent ce qui est un modèle pour nous tous. Tu m'as également enseigné, lors de longues heures souvent nocturnes, la traumatologie. Les « dépêche toi Meuric ! » et tout le reste ont été un vrai moteur pour moi afin de toujours me perfectionner et devenir meilleur. Ton dynamisme et ton encadrement pour notre formation théorique, pratique et universitaire font partie de la réussite de notre apprentissage et je t'en remercie.

Je souhaite te témoigner mon plus profond respect.

A Madame le Professeur Isabelle Auquit-Auckbur

Madame, ces quelques mois passés dans votre service m'ont permis d'approfondir mes connaissances en chirurgie de la main. Les liens qui unissent le service de Chirurgie Plastique et de Chirurgie orthopédique sont forts et en font un duo inédit. Vous nous accueillez avec bienveillance et nous apprenez votre art, je vous en remercie.

Veillez être assurée, Madame, de mon plus grand respect.

A Monsieur le Professeur Olivier Courage

Ces six mois passés au sein de la HASS sont pour moi une expérience inestimable. Votre enseignement de l'arthroscopie mais aussi de la chirurgie prothétique est un modèle de pédagogie. Le compagnonnage est votre fer de lance et le soucis du geste utile et efficace votre crédo. Je vous remercie pour tout ce que vous m'avez appris.

Veillez être assuré, Monsieur, de mon plus grand respect.

A Monsieur de Docteur Simon Bertiaux

Six mois passés au Havre à apprendre la Bertiaux vision ! J'ai été honoré de recevoir ton enseignement. Ton soucis du détail et ton perfectionnisme sont une source d'inspiration. Avec tout mon respect.

A Monsieur le Docteur Simon Mouchel

Seul interne au Havre pendant ce semestre hiver 2022, tu m'as accueilli avec enthousiasme dans le service de l'hôpital Monod. Ta bonne humeur et ta rigueur m'ont permis de m'améliorer chaque jour. Sincères amitiés.

A Monsieur le Docteur Azad Melconian

Ta passion pour la chirurgie mais aussi nos longues discussions musicales sont une part importante de mon semestre à Monod. Un réel plaisir de travailler avec le musicien que tu es, aussi rigoureux dans le geste chirurgical que sur les notes fredonnées. Sincères amitiés.

A Marie

Chère moitié, cela va bientôt faire dix ans maintenant que je partage ta vie. Tu m'as accompagné et soutenu au plus haut comme au plus bas pendant ces longues années d'étude et voilà maintenant que nous allons pouvoir nous appeler confrères. Je suis très fier de toi, tu es déjà une chirurgienne hors paire et ton parcours brillant le démontre sans appel. Je suis un homme comblé chaque jour que je passe avec toi. Ton intelligence, ta bonne humeur, ta sincérité et ton humour rendent mon existence heureuse et tu sais me canaliser. J'ai hâte de poursuivre ce chemin à tes côtés aussi longtemps qu'il me le sera permis.

Ton Loulou.

A mes parents

Maman, je ne serai pas là où je suis si tu n'avais été pas là. Tu as toujours su t'occuper de Flo et de moi depuis notre plus jeune âge. Tu nous a guidé et élevé pour que nous soyons des hommes justes et honnêtes et que nous réussissions nos études. Je t'en suis éternellement reconnaissant et je te dédis cette thèse. Tu m'as soutenu même dans les années difficiles, te pliant en quatre pour que je puisse réussir. Tu m'as toujours poussé et soutenu dans tout ce que j'ai entrepris ; le piano, le tennis, le dessin et maintenant la chirurgie. Merci.

Ton Loulou.

Papa, tu m'as dit quand je t'ai annoncé que je souhaitais faire médecine de bien réfléchir avant de me lancer dans cette aventure. Je t'ai toujours dit que je ne serai jamais médecin généraliste car je trouvais ton métier trop difficile... et maintenant je vais bientôt devenir chirurgien orthopédiste ! Tu dois te dire une fois de plus que je ne suis pas logique ! Malgré cela tu m'as toujours soutenu et épaulé durant tout ce temps. Merci.

Ton Luc.

A Florian et Astrid

Mon Flo, après toute ces années où tu m'as supporté non sans difficultés me voilà enfin médecin ! Tes conseils avisés et ta présence de grand frère m'a toujours réconforté. Je sais que je pourrai toujours compter sur toi. Astrid, je suis heureux que tu fasses partie de notre famille. Question « passion os » nous nous rejoignons bien, on a juste choisi deux moments de leur vie différents, d'ailleurs j'attends toujours la photo de la PTH !

Votre petit Luc.

A Pierre

Cher Oncle, beaucoup de souvenirs en tête me viennent notamment les maxi sessions crêpes à la Clémentine ou à la maison que nous te réclamions année après année.

Ton Luc.

Aux Cousins de Toulouse

Cher Tata, cher Tonton, Cher Graton et Cher Nouné, bien que je descende moins souvent dans votre contrée occitane vous m'êtes très proche. La famille Meuric-Guionie c'est une grande famille qui m'est très précieuse. Votre Luc.

A ma belle famille.

Véronique, Daniel, Adri, Simon, Etienne, vous m'avez accueilli sans réserve dans votre grande famille. Je suis fier d'en faire partie et de partager tous ces moments avec vous. De savoir que les petits me considèrent comme leur tonton m'apporte beaucoup de sérénité. J'espère être à vos côtés pour de longues années encore. Luc.

Aux amis de Paris

Ma **Louise**, Ma **Clem**, les amies depuis toujours. Que d'épopées traversées dont je tairai l'histoire bien qu'elles nous fassent toujours autant rire ! Notre amitié est solide et je suis fier d'être votre ami. Toutes ces années de travail pour en partager avec vous le résultat me remplissent de joie. Que trépasse si je faiblis ! QQ

Ma chère maman de Paris, **Florence**, le souvenir des aller-retours à Paris tous ces WE au conservatoire me rappelle qu'un poulet du samedi m'attendait toujours qu'il vente, qu'il pleuve ou qu'il neige, agrémenté de son délicieux fondant. Tu as toujours été présente pour notre famille et moi, et tu en fait partie. Ton Luc.

Aux amis de Rouen

Alexis, nous nous sommes bien trouvé, toi l'épicurien qui nous régale de tes bonnes bouteilles et mets ! J'ai hâte d'enfin pouvoir rapporter ma cave à Rouen et te rendre la pareil. Néanmoins, un seul conseil, prend garde à tes lunettes si je suis dans les parages. **Clémence**, la réanimatrice de la bande, avec ta belle sensibilité tu sais supporter la bande d'orthopédistes que nous sommes. **Nico**, notre passion pour la gastronomie me dit que nous avons bien fait de nous rencontrer à Rouen, je serai toujours partant pour un « bon coup de fourchette » ou la fête du ventre à tes côtés, « Micheeeelll ». **Constance**, toujours de bonne humeur, tu nous régales toujours de tes histoires. Ton soutien et ta bienveillance me sont précieux. **Anissa**, déjà quatre ans que tu me supportes... tu m'as vu naître au rachis et tu as été une

amie dès les premiers jours. Aussi brillante neurochirurgienne que ton rire est éclatant, j'ai hâte que l'on bosse à nouveau ensemble. **Bryan**, le tombeur du 31, tu m'as fait l'honneur d'occuper une grande place auprès de toi en cet été 2024, merci, je suis fier d'être ton ami. **Théo**, tes qualités humaines et ton gout pour les curiosités en tout genre font de toi quelqu'un d'unique. **Mathieu**, là dès la première heure de mon internat, je sais que je pourrai toujours compter sur toi pour avoir une ou deux idées farfelues à réaliser. **Rionrion**, j'apprécie nos longues conversations, bien structurées au départ puis qui perdent peu à peu leur fil...mais on est toujours là ! **Romain**, bientôt deux ans et demi d'internat passés ensemble, à croire que tu me voues un culte ! Amitiés au pâté. **BB**, le mec le plus drôle le l'orthopédie, ne t'arrête pas, tes talents d'imitation en soirée sont toujours aussi bon !

A tous mes chef

Lisa, que ce soit au CHU ou à Monod tu m'as toujours pris sous ton aile pour me faire progresser et je t'en remercie. **Antoine-Guy**, avec patience tu m'enseignes l'art du prothétique, ça doit être tes origines Paki ! **Pierre**, entre bons angevins nous nous reconnaissons ! j'apprécie travailler avec toi en ce semestre Dieppois. **Amine**, l'homme qui sait tout faire. **Emeric**, cet artiste en herbe, merci pour ton soutien et ta bonne humeur. **Martin**, toujours dans les bons coups, un **Babache** n'est jamais loin ! merci pour votre soutien. **Richard**, malgré une imitation de toi que je maîtrise à la perfection tu ne m'en as pas tenu rigueur et tu m'as enseigné tout ce que tu savais, je t'en remercie. **Justine**, merci pour tout ce que tu m'as appris. **Elise**, je sais que ton nom s'écrit O.B.R.E.C.H.T et c'est déjà pas mal. **Gaëtan**, merci pour ces quelques blocs passés avec toi. **Eva**, **Solène** rien ne vaut un plateau de fruits de mer pour débriefer avec vous. **Dodo**, Muc Leuric te salue, merci pour ta bonne humeur. **Baptriste**, une vraie belle rencontre suite probablement à notre capacité à démolir les murs, félicitations pour ta famille qui s'agrandit. **Sixtine**, ta position pour dormir reste un mystère. **Malik**, à nos consultations du lundi matin ! **Alexandre**, je te connais peu mais ta passion pour le béhourd te démarque des autres.

A mes co-internes de promo

Laetitia, que de souvenirs ! Le bureau de l'internat, le bureau de la CHAIR, le DDP... c'est un vrai plaisir de partager cette journée où nous devenons docteurs. Hâte de continuer à partager le dancefloor une fois de plus. **Benjamin**, Benjo, Piccot, Traine des pieds et bien d'autres surnoms encore, premier semestre avec toi, à apprendre méticuleusement la danse du crabe mais je n'ai toujours pas le truc. **Patrick**, un semestre partagé chez Tonton où j'ai appris à te connaître un peu plus. **Andréas**, j'ai beaucoup d'admiration pour ta famille, malgré un métier difficile et prenant tu as su t'entourer d'une ribambelle de blondinés, bravo !

A mes co-internes d'orthopédie

Mattéo.oh.oh, toujours ce petit sourire sarcastique prêt à nous décrocher une pique, méfie toi ! **Chloé**, laisse donc mon épaule un peu tranquille. **Clémence**, j'ai plaisir à te voir boire moins de Coca ! **Thibaut**, le futur meilleur d'entre nous. **Agathe**, notre néologiste toute puissante, attention à ne pas te décrocher la mâchoire. **Clémentine, Caroline, Cyril, La Piche, Nolwenn**, vous êtes la deuxième année de Pioupious, des moments mémorables passés en votre compagnie déjà. **Paul, Erwan, Tom, Samy**, vous être la troisième année de Pioupious, là je suis dépassé...mais j'ai hâte de bosser avec vous.

Aux équipes d'orthopédie du CHU et de Navarre

Que ce soit dans les services, au bloc ou aux consultations, vous nous maternez dès la première seconde et on reste vos bambins pour toujours. Merci de m'avoir accompagné tout au long de ma formation.

Aux plasticiens

Marcelo, Dorothée, Octave merci pour votre accueil en plastique. **Flo, François**, toujours un plaisir de déguster des huîtres avec vous sur un front de mer. **Abeer, Baz, Nathan, Mathias, Jaïro**, promis je ne vous appellerai pas pour mes greffes de peaux.

Aux tanches

Louis, Charles, Mathieu, Fabien, Sixte, Maxime et Maxime, Quentin, Remy, Hugo, Ugo, Geoffrey, Thomas... bon je vais peut être pas tout déballer ici ! Mais mon petit doigt me dit que je ne vais pas avoir à attendre très longtemps pour que tout le monde connaisse notre pouvoir caché ! **Manu**, tu es aussi une tanche, mais, mention spéciale pour cette D4 où tu m'as soutenu jusqu'au bout, je ne serai probablement pas ici aujourd'hui si je ne t'avais pas rencontré.

Aux Choletais

Romain, Emeline, Julien, Charlotte, Enzo, Benjamin, Axel, Kenny, Damien, Théo, que j'ai rencontré maintenant il y a dix ans. Merci de m'avoir accueilli dans votre bourdou team, hâte d'être à nouveau le 31 décembre !

Table des matières

Table des abréviations.	22
Chapitre 1 : Introduction.	23
Chapitre 2 : Etat des connaissances dans l'hallux valgus.	24
1. Terminologie et nomenclature anatomique.	24
2. Epidémiologie et facteurs de risque	26
3. Synthèse des déformations articulaires et ostéoligamentaires dans l'hallux valgus.....	28
a. Hallux Valgus Angle et Intermetatarsal Angle	28
b. L'appareil sésamoïde et le carrefour métatarso-phalangien du premier rayon du pied	29
c. Le valgus articulaire distal du premier métatarsien	32
Chapitre 3 : Déformation dans la plan frontal du premier métatarsien dans l'hallux valgus, une composante ré-émergente.	34
1. Description radiographique de la pronation du premier métatarsien dans l'hallux valgus.	34
2. Apport de la tomodensitométrie.....	36
a. Description tomodensitométrique de la pronation du premier métatarsien.	36
b. La pronation de la tête du premier métatarsien par rapport est-elle une déformation inhérente à sa morphologie intrinsèque ?	40
c. Impact de la pronation du premier métatarsien sur l'appareil sésamoïde ..	42
d. Impact de la pronation du premier métatarsien sur le DMAA	47
3. Analyse semi-automatisée par scanner en charge des déformations du pied	50
a. Emergence d'une nouvelle technologie.....	50
b. La torsion intrinsèque du premier métatarsien : fait réel ou fiction ?	53
Chapitre 4 : Semi-automated three-dimensional analysis of first metatarsal pronation in hallux valgus: A case-control study.	55

1. Abstract	56
2. Introduction.....	58
3. Methods.....	60
4. Results	66
a. Reliabilities	66
b. Semi-automatic 3D measurements of the M1 head rotation in HV and controls.	67
c. Semi-automatic 3D measurements of the M1 intrinsic torsion in HV and controls.	67
d. Semi-automatic 3D measurements of the DMAA in HV and controls.....	67
5. Discussion	69
6. Conclusion.....	69
Chapitre 5 : Conclusion	71
Références bibliographiques	72

Table des abréviations.

HV : Hallux Valgus.

M1 : premier métatarsien.

IMA : angle intermétatarsien ou « InterMetatarsal Angle ».

IPA : angle interphalangien du premier rayon ou « InterPhalangeal Angle ».

HVA : angle de l'hallux valgus ou « Hallux Valgus Angle ».

DMAA : angle de la surface articulaire distale du premier métatarsien ou « Distal Metatarsal Articular Angle ».

MPA : angle pronateur du premier métatarsien ou « Metatarsal Pronation Angle ».

SD : écart type ou « Standard Deviation ».

IC_{95%} : Intervalle de confiance à 95%

SRA : angle de la rotation des sésamoïdes ou « Sesamoid Rotation Angle »

3d-DMAA : “three dimensionnal Distal Metatarsal Articular Angle.”

2D : deux dimensions.

3D : trois dimensions.

ICC : coefficient de corrélation interclasses et intraclasse.

3D WBCT : scanner en charge trois dimensions ou “Three Dimensionnal Weight-Bearing Computed Tomography

PCA : analyse en composante principale ou « Principal Component Analysis »

CT : Scanner ou “Computed Tomography”

Chapitre 1 : Introduction.

La pathologie Hallux Valgus (HV), fréquente, touche près d'un patient sur cinq au cours de sa vie. Malgré des progrès dans l'analyse et la prise en charge de cette pathologie, la récurrence reste la complication post-opératoire la plus fréquente. Après une introduction sur la pathologie nous traiterons la déformation dans le plan frontal de l'HV. Sa compréhension est encore incomplète et peu amener un progrès dans la prise en charge du patient. C'est pourquoi nous vous présenterons un travail sur l'analyse tridimensionnelle (3D) par scanner en charge de la déformation dans le plan frontal du premier métatarsien chez des patients présentant un HV comparés à des sujets contrôle. Notre hypothèse principale est qu'il existe une torsion intrinsèque pronatrice du premier métatarsien. Nos hypothèses secondaires sont qu'un modèle d'analyse 3D semi-automatisée est fiable et qu'il existe un valgus articulaire distal du premier métatarsien dans l'HV.

Chapitre 2 : Etat des connaissances dans l'hallux valgus.

1. Terminologie et nomenclature anatomique.

Le terme hallux valgus (HV) est retrouvé dans la littérature dès le XIXème siècle avec Carl Hueter²⁸ décrivant une déformation du « gros orteil » en abduction avec un premier métatarsien (M1) en adduction. Dès cette époque celui-ci évoque, en comparant au pied pédiatrique, une pathologie dégénérative survenant au cours de la vie et probablement en lien avec un mauvais chaussage. Il pose également la problématique de la description anatomique de cette pathologie préférant parler d'abduction du gros orteil prenant comme axe de référence celui du corps humain et non l'axe médian du pied représenté par le deuxième rayon. Note : si le terme de gros orteil a été utilisé dans la description princeps, il est utile de le citer dans ce premier paragraphe en référence, mais il est préférable de n'utiliser qu'une seule terminologie, et donc pour la suite de l'ouvrage « l'hallux »

Actuellement la terminologie anatomique utilisée pour décrire l'HV reste le sujet de débats. Des termes comme abduction ou adduction décrivant un mouvement articulaire sont utilisés au même titre que valgus ou varus décrivant une déformation articulaire dans le plan frontal. Ainsi, pour certains auteurs²¹, le valgus de M1 désigne une position en pronation correspondant à une déformation dans le plan frontal et prend comme référence le plan anatomique du corps humain. A l'inverse, le terme pronation désigne pour d'autres^{5,19,35,37,45,51,59,66,74} un mouvement de rotation portant la face plantaire de l'hallux ou de M1 vers le deuxième rayon. De plus le terme valgus est utilisé pour décrire la déviation latérale de hallux par rapport à M1 décrivant ainsi une déformation dans le plan axial en prenant comme référence l'axe médian du pied représenté par le deuxième rayon. Il nous semble dès lors important de proposer une synthèse des termes les plus fréquemment utilisés dans la littérature pour décrire l'HV. Nous emploierons cette nomenclature pour le reste de ce travail.

L'axe de référence pour décrire les déformations présentes dans l'HV sera celui du deuxième rayon du pied. Les trois premiers rayons du pied désignent l'ensemble des structures ostéoligamentaires allant des os cunéiformes jusqu'aux

phalanges distales des orteils. Les quatrième et cinquième rayons vont quant à eux des articulations tarsométatarsiennes jusqu'aux phalanges distales, ainsi :

- Le valgus prend le plan axial comme référence. Le valgus d'une articulation décrit une position latérale de l'os distal par rapport à l'os proximal à cette articulation. Par exemple le valgus de l'articulation métatarso-phalangienne décrit une position latérale (rapprochant l'hallux du deuxième rayon) de la première phalange par rapport à M1. Le sommet de la déformation est donc opposé au deuxième rayon. Le varus décrit la déformation inverse.
- La pronation décrit dans le plan frontal une position plaçant la face plantaire d'un segment osseux vers le rayon adjacent latéral, la supination la position inverse. Ce terme est utilisé à la fois pour décrire un mouvement et une déformation. Par exemple une déformation en pronation de M1 décrit un mouvement de rotation au sein du premier métatarsien plaçant la face plantaire de son extrémité distale vers le deuxième rayon de manière plus importante que son extrémité proximale. En revanche, une position en pronation de M1 désigne une rotation du métatarsien sur l'ensemble de son axe plaçant sa face plantaire vers le deuxième rayon.
- L'abduction, en accord avec l'action du muscle abducteur de l'hallux, décrit un mouvement éloignant le segment d'intérêt de l'axe du deuxième rayon du pied, l'adduction décrit le mouvement inverse. Ainsi, M1 se déplace en abduction dans l'hallux valgus.
- L'extension détermine dans le plan sagittal un mouvement portant le segment osseux proximal au dessus du segment osseux distal à une articulation. La flexion plantaire décrit le mouvement inverse.

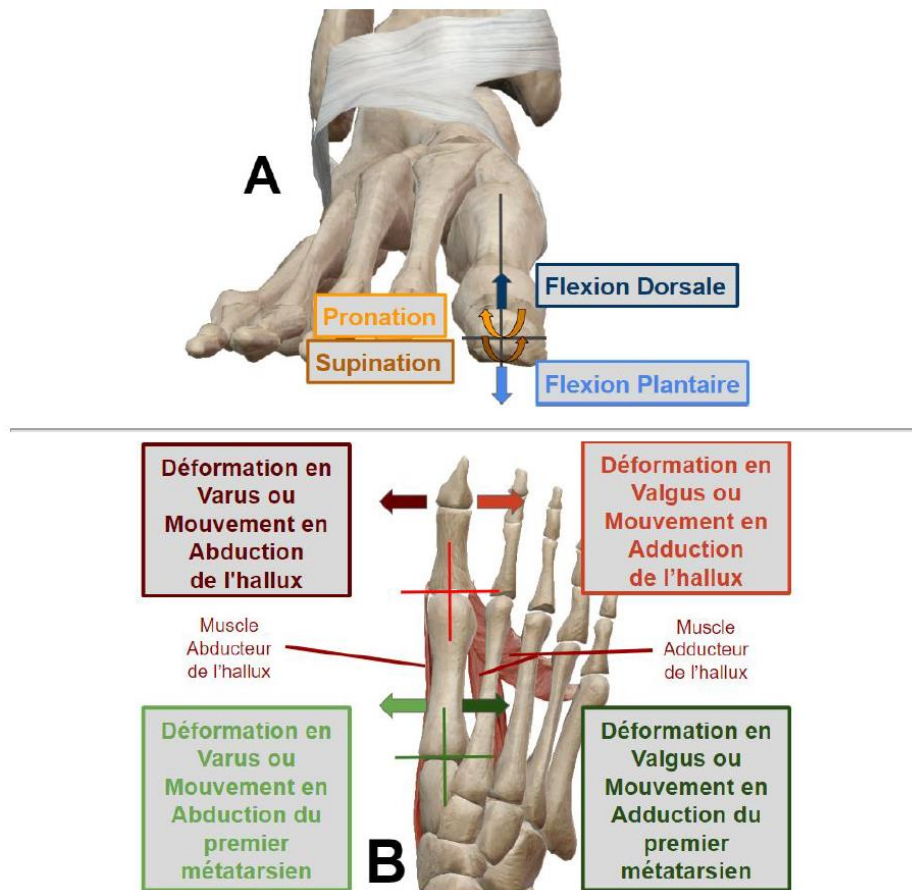


Figure 1: résumé des déformations et des mouvements sur un pied droit (A) de face et (B) de profil.

Image extraite de « Lalevée M, Impact de la dysmorphie du premier métatarsien et de ses articulations adjacentes dans la prise en charge chirurgicale de l'hallux valgus, thèse de doctorat, Rouen, 2019 » à partir du logiciel Visible Body® Muscle Premium.

2. Epidémiologie et facteurs de risque

Une méta analyse récente⁴, incluant 45 études sur les cinq continents, retrouvait une prévalence estimée de l'hallux valgus de 19% dans une population de plus de 186 millions de sujets. Les auteurs s'intéressaient à la distribution de la prévalence de l'HV selon la localisation géographique, l'âge et le sexe. Avant vingt ans la prévalence estimée était de 11% alors qu'elle était de 22,7% après 60 ans. La prévalence estimée chez les femmes était de 23,74% quand elle était de 11,43% chez les hommes. En Europe la prévalence estimée était de 18,35%. Elle était de 3% en Afrique alors qu'elle approchait les 30% en Océanie. Les auteurs soulignaient la difficulté d'obtenir des résultats homogènes notamment en raison de l'hétérogénéité des échantillons issus des séries scientifiques et des différences de critères diagnostiques de l'HV.

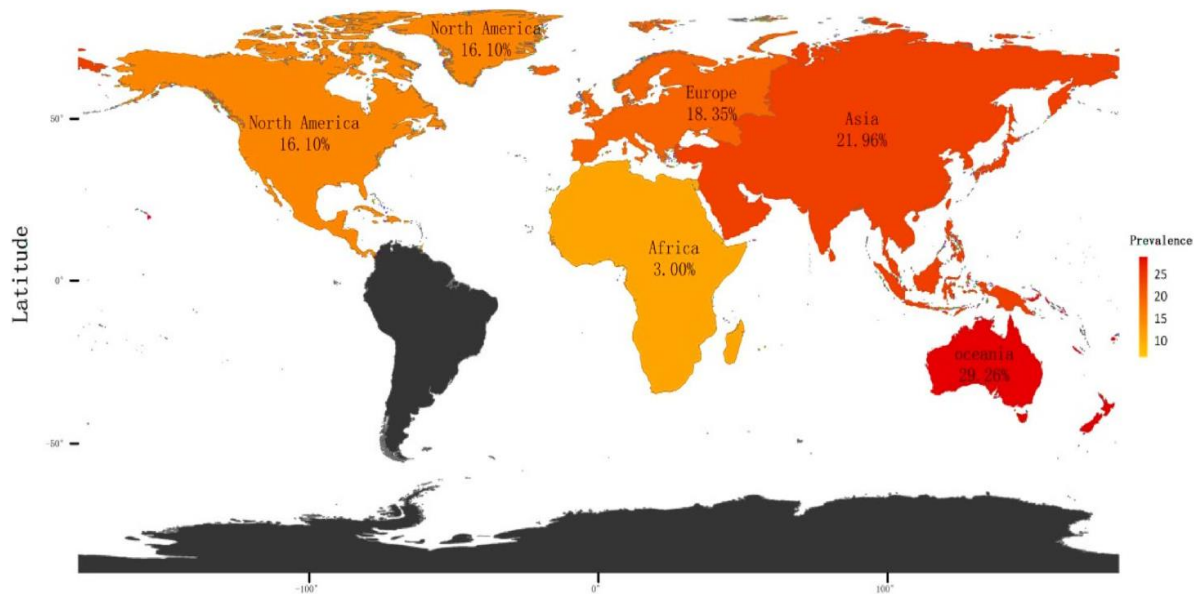


Figure 2 : Prévalence de l'hallux valgus en fonction de sa répartition géographique à travers le monde

Image extraite de « Cai Y, Song Y, He M, He W, Zhong X, Wen H, et al. Global prevalence and incidence of hallux valgus: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Foot and Ankle Research*. janv 2023;16(1):63. »

De nombreux facteurs de risques ont été étudiés dans le cadre de l'HV et peu ont démontré une association significative⁵⁵.

Le chaussage, avec des chaussures à talons hauts augmentant la mise en charge de la tête de M1 et le valgus de la première articulation métatarso-phalangienne, a été incriminé sans corrélation significative. De la même manière, l'obésité ou des populations spécifiques comme les danseurs de ballet n'ont pas montré d'association significative avec l'hallux valgus.

De plus, une méta analyse⁴⁸ regroupant des paramètres radiographiques et morphologiques retrouvait peu de facteurs de risque significatifs en dehors d'une augmentation de l'angle inter métatarsien (IMA), d'un aspect rond de la tête de M1, d'une subluxation de la première articulation métatarso-phalangienne avec déviation latéral du sésamoïde médial et d'une réduction de l'angle interphalangien de l'hallux (IPA). Les auteurs soulignaient le manque d'études avec une méthodologie adaptée et l'absence de prise en compte des facteurs confondants comme l'âge et le sexe. Le seul facteur de risque clairement identifié est génétique. En effet 90% des patients présentant un HV rapportaient un antécédent familial⁵⁷.

3. Synthèse des déformations articulaires et ostéoligamentaires dans l'hallux valgus

a. Hallux Valgus Angle et Intermetatarsal Angle

Les critères actuels pour diagnostiquer un HV sont basés sur l'analyse d'une radiographie en charge du pied avec une incidence dorso-plantaire. Hardy et Clapham²⁷ dans une série cas-témoins ont déterminé deux angles afin de décrire la déformation de l'HV:

- l'Hallux Valgus Angle (HVA) est défini par l'angle entre l'axe longitudinal du premier métatarsien et l'axe longitudinal de la première phalange. Il est non pathologique si $< 15^\circ$.
- l'Intermetatarsal Angle (IMA) est défini par l'angle entre l'axe longitudinal du premier et du deuxième métatarsiens. Il est non pathologique si $< 9^\circ$.

Ces deux paramètres présentent une bonne corrélation ($r = 0,71$) avec l'aggravation de la déformation. Ces mesures font toujours consensus aujourd'hui avec une bonne reproductibilité. Elles sont utilisées en routine par les chirurgiens lors des planifications opératoires et en suivi post-opératoire pour évaluer les résultats chirurgicaux.

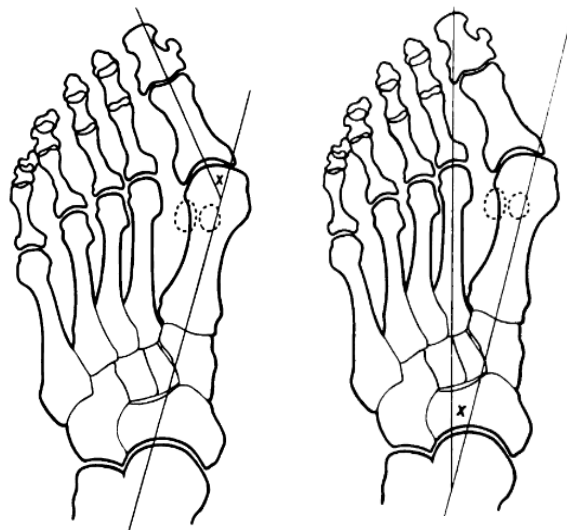


Figure 3 : le schéma de droite représente l'Hallux Valgus Angle (HVA), celui de gauche l'Intermetatarsal Angle (IMA).

Images extraites de « Hardy RH, Clapham JCR. Observation on Hallux Valgus : Based on Controlled Series. Journal of Bone and Joint Surgery. 1951 »)

b. L'appareil sésamoïde et le carrefour métatarso-phalangien du premier rayon du pied

Les os sésamoïdes du premier métatarsien occupent une place importante dans le champ de la recherche dans l'HV. Sur le plan anatomique, ils sont intégrés au terme « appareil sésamoïde » décrit par Gillette en 1872²⁶. L'appareil sésamoïde est une sangle ostéo-ligamentaire qui borde la face plantaire de la tête du premier métatarsien.

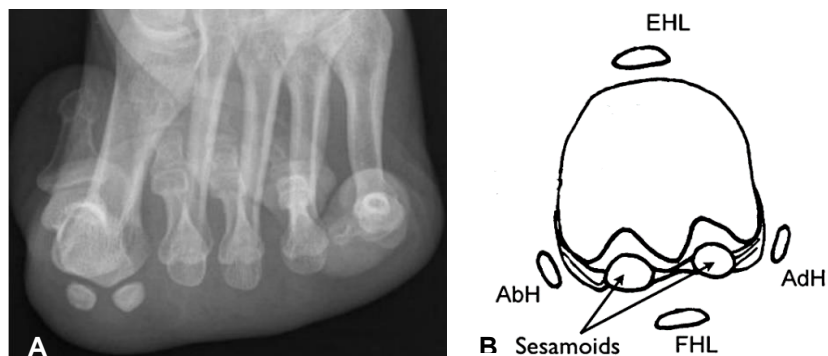


Figure 4 : (A) vue antéro-postérieure des os sésamoïdes à la face plantaire du premier métatarsien. (B) Schéma des rapports myo-capsulo-ligamentaires des os sésamoïdes de M1 sur une vue frontale chez un patient sain. EHL : extensor hallucis longus. AbH : Abductor Hallucis. FHL : Flexor Hallucis Longus. AdH : Adductor Hallucis.

Image extraite de « Perera AM, Mason L, Stephens MM. The Pathogenesis of Hallux Valgus. Journal of Bone and Joint Surgery. 7 sept 2011;93(17) »

L'appareil sésamoïde regroupe les structures anatomiques décrites sur la figure suivante ⁽³³⁾:

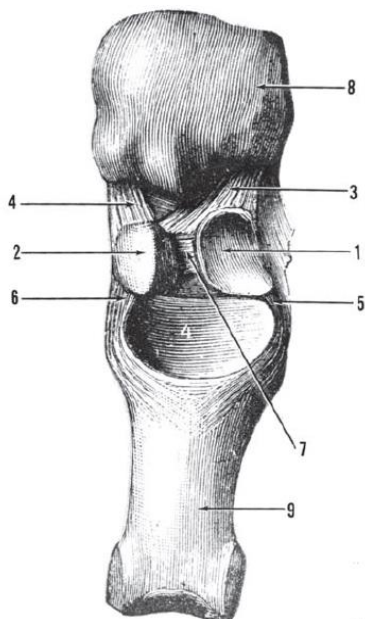


Figure 5 : appareil sésamoïde de l'hallux.

Extrait de « Kelikian A, Serafian S. Sarrafian's Anatomy of the Foot and Ankle: descriptive, topographic, functional. Lippincott Williams & Wilkins. 2011. p 218. »

- 1 : sésamoïde médial
- 2 : sésamoïde latéral
- 3 : ligament métatarso-sésamoïdien médial
- 4 : ligament métatarso-sésamoïdien latéral
- 5 : ligament sésamoïdo-phalangien médial
- 6 : ligament sésamoïdo-phalangien latéral
- 7 : ligament intersésamoïdien
- 8 : tête du premier métatarsien
- 9 : première phalange de l'hallux

Le premier métatarsien répond aux deux os sésamoïdes par ses facettes. Ces derniers sont séparés par une crête provenant de la face plantaire de la tête du premier métatarsien appelée crête inter-sésamoïdienne permettant le centrage harmonieux des deux sésamoïdes. L'appareil sésamoïde est intimement lié à la plaque plantaire constituant le plancher de la première articulation métatarso-phalangienne. Sur le plan musculaire le sésamoïde médial reçoit l'insertion distale du chef médial du court fléchisseur de l'hallux, il en est de même pour le sésamoïde latéral avec le chef latéral du court fléchisseur de l'hallux. Il existe un rapport étroit entre l'appareil sésamoïde et le tunnel fibreux dans lequel passe le tendon long fléchisseur de l'hallux. Nous insisterons sur le sésamoïde latéral qui reçoit l'insertion du ligament profond inter sésamoïdien séparant le premier et le deuxième métatarsiens. Il reçoit aussi une partie des insertions tendineuses des faisceaux transverses et obliques de l'adducteur de l'hallux. Le long extenseur de l'hallux envoie également des extensions aponévrotiques vers la plaque plantaire³³.

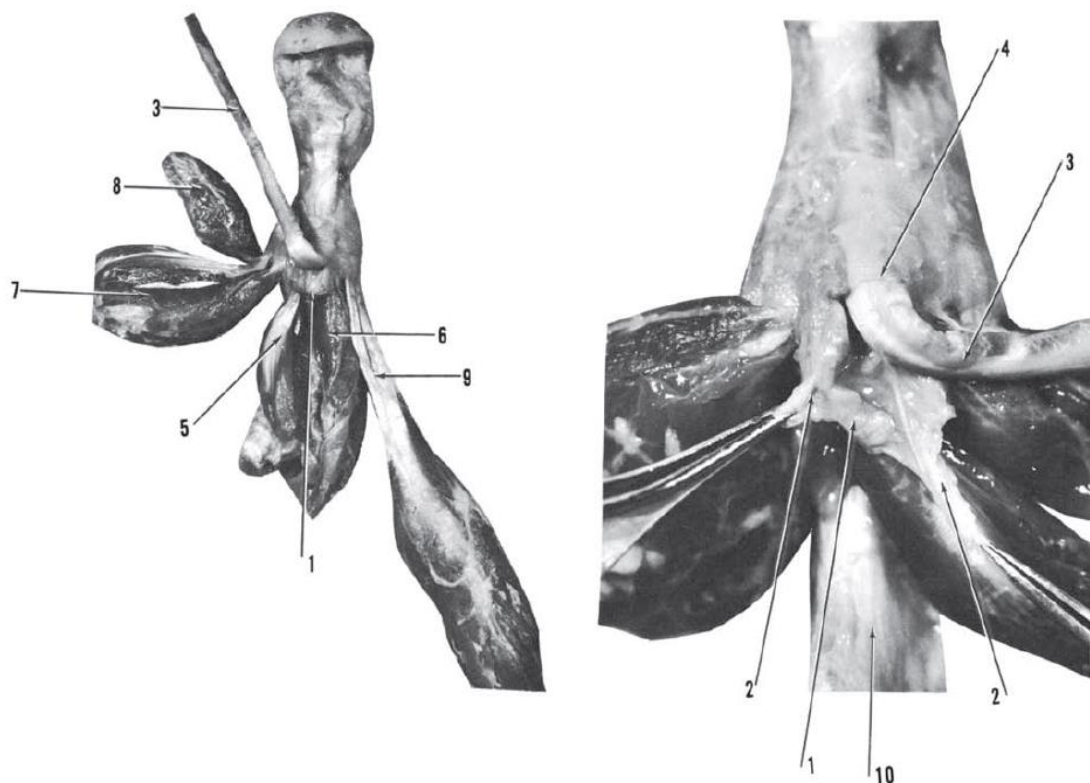


Figure 6 : Vue plantaire de l'hallux. 1 : plaque plantaire, 2 : insertion des septa longitudinaux de la plaque plantaire, 3 : tendon du long fléchisseur de l'hallux, 4 : tunnel fibreux du long fléchisseur de l'hallux, 5 : chef latérale du court fléchisseur de l'hallux, 6 : chef médial du court fléchisseur de l'hallux, 7 et 8 : chefs obliques et transverses de l'adducteur de l'hallux, 9 : tendon de l'abducteur de l'hallux, 10 : premier métatarsien.

Image extraite de « Kelikian A, Serafian S. Sarrafian's Anatomy of the Foot and Ankle: descriptive, topographic, functional. In: Lippincott Williams&Wilkins. 2011. p. p 219. ».

Contrairement à la tête du premier métatarsien qui ne reçoit aucune insertion tendineuse, l'appareil sésamoïde en synergie avec la capsule articulaire a pour rôle de stabiliser la première articulation métatarso-phalangienne de façon dynamique et statique⁵⁵.

Sur la **figure 3**, il est noté en pointillés la position de l'appareil sésamoïde. Hardy et Clapham²⁷ proposent une classification en 7 positions du sésamoïde médial basée sur l'axe longitudinal de M1 (trait vertical noir) **figure 7**. Dans cette étude, les patients HV présentaient dans 88% des cas un sésamoïde médial latéral à l'axe de M1 (position 4 et plus) alors que le groupe contrôle avaient dans 90% des cas une position médiale de son sésamoïde médial (position 3 et moins).

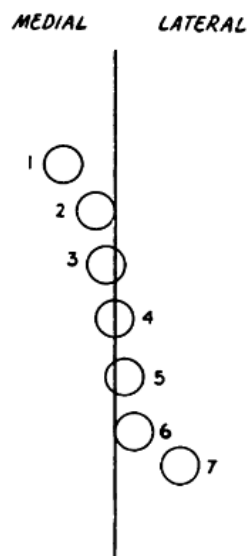


Figure 7 : Position du sésamoïde médial par rapport à l'axe longitudinal du premier métatarsien ; Image extraite de « Hardy RH, Clapham JCR. Observation on Hallux Valgus : Based on Controlled Series. Journal of Bone and Joint Surgery. 1951 »

Ce déplacement latéral de l'appareil sésamoïde aurait pour conséquence de latéraliser l'abducteur de l'hallux lui conférant non plus une action varisante mais valgisante (**figure 8**). De plus le long extenseur et long fléchisseur de l'hallux se positionnent latéralement à la tête du premier métatarsien et agissent comme une corde d'arc amplifiant un déplacement en valgus de la première phalange de l'hallux^{24,25,55}.

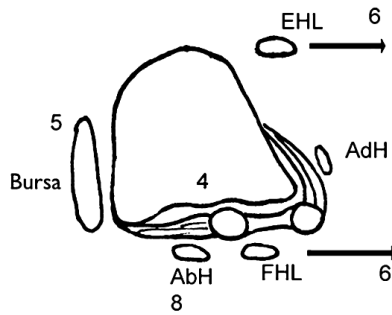


Figure 8 : schéma montrant chez un patient hallux valgus les modifications des rapports tendineux et de l'appareil sésamoïde.

Image extraite de « Perera AM, Mason L, Stephens MM. The Pathogenesis of Hallux Valgus. Journal of Bone and Joint Surgery. 7 sept 2011 ;93(17) »

c. Le valgus articulaire distal du premier métatarsien

Le valgus articulaire distal du premier métatarsien mesuré par le Distal Metatarsal Articular Angle (DMAA) a été initialement décrit par Harry Piggott⁵⁶. Il correspond (**figure 9**), sur une radiographie dorso-plantaire en charge, à l'angle entre la droite perpendiculaire à l'axe longitudinal du premier métatarsien et l'axe de la surface articulaire distale de M1³⁸. Harry Piggot rapportait un valgus articulaire distal plus important chez les patients HV comparés à un groupe contrôle. Présent dans l'HV juvénile il serait pour lui le premier facteur amenant à l'apparition de la déformation.

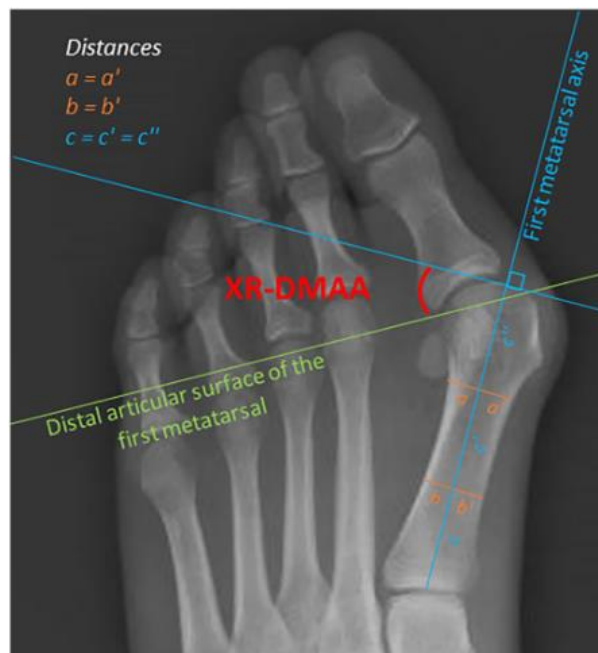


Figure 9 : mesure radiographique du Distal Metatarsal Articular Angle ; extraite de « Lalevée M, Barbachan Mansur NS, Lee HY, Maly CJ, Iehl CJ, Nery C, et al. Distal Metatarsal Articular Angle in Hallux Valgus Deformity. Fact or Fiction? A 3-Dimensional Weightbearing CT Assessment. Foot Ankle Int. avr 2022;43(4):495-503. »

En synthèse, un patient avec un HV présente une abduction de son premier métatarsien qui se traduit par une augmentation de son IMA. Il présente un valgus de l'articulation métatarso-phalangienne se traduisant par une augmentation de son HVA. Le premier métatarsien a un valgus articulaire distal se traduisant par un DMAA en valgus et finalement une position plus latérale de son sésamoïde médial traduisant une subluxation de son appareil sésamoïde.

Cette description de l'hallux valgus bien que pratique et reproductible⁴² ne permet pas de rendre compte d'une déformation dans les trois plans de l'espace. Dans le chapitre suivant il sera abordé la composante frontale de la déformation de l'HV et comment celle-ci impacte les mesures précédemment citées.

Chapitre 3 : Déformation dans la plan frontal du premier métatarsien dans l'hallux valgus, une composante ré-émergente.

1. Description radiographique de la pronation du premier métatarsien dans l'hallux valgus.

Eustace *et al.* proposent dès 1993²⁴ une première approche afin de mesurer la pronation du premier métatarsien. Dans un premier temps, sur une étude cadavérique, ils mesurent à l'aide de radiographies dorso-plantaires la variation de la forme de M1 tous les 10° de pronation imprimés à celui-ci à l'aide d'une broche. Ils remarquent alors que l'on peut estimer la pronation de M1 selon la position de la tubérosité inférieure de sa base (**figure 10**). Celle-ci se déporte progressivement en latéral. Seulement 9% des patients avec un IMA < 9° présentaient une pronation > 10°, en revanche 84% des patients avec un IMA > 9° présentaient une pronation > 10°. L'augmentation de la pronation semble corrélée à la gravité de la déformation dans l'HV et au varus métatarsien dans le plan axial ($r = 0.69$). La pronation du premier métatarsien serait compensatoire à l'abduction de ce dernier via les insertions tendineuses distales de l'adducteur de l'hallux.

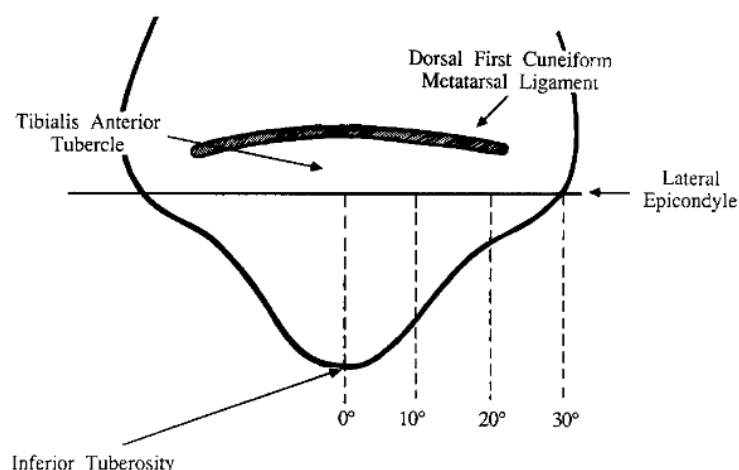


Figure 10 : schéma tubérosité inférieure de la base de M1 montrant son déport latéral tous les 10° de pronation.

Image extraite de « Eustace S, O'Byrne J, Stack J, Stephens MM. Radiographic features that enable assessment of first metatarsal rotation: the role of pronation in hallux valgus. Skeletal Radiol [Internet]. avr 1993 ».

Saltzman *et al.*⁶⁶, en 1996, proposent de mesurer la pronation du premier métatarsien avec une échelle continue. Ils utilisent une incidence antéro-postérieure avec une vue tangentielle de l'appareil sésamoïde, hallux en extension (**figure 11**). Cette mesure porte actuellement le nom de Metatarsal Pronation Angle (MPA) et est reproductible³⁵. Leurs résultats sont contradictoires avec l'étude d'Eustace *et al.*, ils ne trouvent pas de différence significative de pronation entre leur groupe hallux et leur groupe contrôle (5.7° vs 1.6°, p = 0,07). De même, la corrélation est faible entre le MPA, l'HVA et l'IMA (r < 0,5). Cette contradiction viendrait de la différence des populations entre les deux études, du fait de mesurer la pronation à deux sites différents du métatarsien et au fait d'utiliser une échelle continue et non par classes.

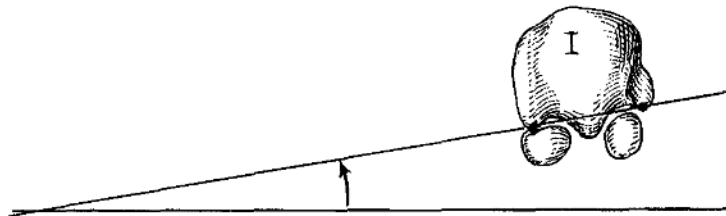


Figure 11 : schéma illustrant le Metatarsal Pronation Angle.

Image extraite de « Saltzman CL, Brandser EA, Anderson CM, Berbaum KS, Brown TD. Coronal Plane Rotation of the First Metatarsal. *Foot Ankle Int.* mars 1996;17(3):157-61. »

L'existence d'une déformation en pronation du premier métatarsien est donc questionnée.

Mortier *et al.* en 2012⁴⁵, dans une série de 100 patients HV, rapportent une pronation du premier métatarsien de 12.7° sur une incidence radiographique proche de celle de Saltzman *et al.* Il n'y a pas de groupe contrôle. En revanche ils réalisent une étude anatomique en comparant la position de la base par rapport à la tête du premier métatarsien. Premièrement, les sujets ne présentant pas d'HV présentent une position de la tête du premier métatarsien en supination. Deuxièmement le siège de cette composante rotatoire serait une torsion intrinsèque du premier métatarsien en pronation. Ils décrivent également une instabilité de l'articulation cunéo-métatarsienne permettant des mouvements de rotation au premier métatarsien plus importants non seulement dans le plan axial mais aussi dans le plan frontal.

Dayton *et al.*²⁰ en 2013 utilisent une arthrodèse avec dérotation de l'articulation cunéo-métatarsienne leur permettant de corriger la déformation de l'HV dans les trois plans de l'espace. En post-opératoire ils obtiennent une normalisation de l'HVA et une réduction de la position du sésamoïde tibial. Ils obtiennent également une correction du DMAA sans qu'aucune action n'ait été réalisée à la partie distale du premier métatarsien. Ils soulèvent donc plusieurs questions : la composante rotatoire dans le plan frontal semble être essentielle à prendre en compte dans la planification chirurgicale de l'hallux valgus, mais la littérature est contradictoire. Ils questionnent l'existence du DMAA puisque celui-ci se corrige spontanément lors de la dérotation du premier métatarsien et serait un artéfact radiographique. Finalement, ils soulignent que la problématique principale est l'analyse d'une déformation tridimensionnelle avec un outil permettant uniquement l'acquisition d'images en deux dimensions. La radiographie permet donc une compréhension partielle de cette déformation.

2. Apport de la tomodensitométrie

a. Description tomodensitométrique de la pronation du premier métatarsien

Collan *et al.*¹² en 2013 réalisent la première analyse tomodensitométrique de HV. L'acquisition est faite au repos et en charge et compare un groupe HV à un groupe contrôle. L'intérêt d'utiliser le scanner est de pouvoir analyser chaque os dans les plans frontaux, sagittaux et axiaux et d'en déterminer le centre ainsi que l'axe en fonction dans chaque plan (**figure 12**). Ils comparent donc l'HVA et l'IMA entre acquisition radiographique et scanographique avec une excellente et une bonne corrélation (respectivement ICC = 0.96 et 0.72) permettant ainsi de valider la tomodensitométrie. En comparant l'HVA au repos entre les deux groupes il n'existe pas de différence significative alors qu'à la mise en charge des patients la différence apparaît entre le groupe HV et le groupe contrôle. Ce résultat souligne qu'il est essentiel d'analyser les déformations du pied en charge et que l'HV est une déformation dynamique.

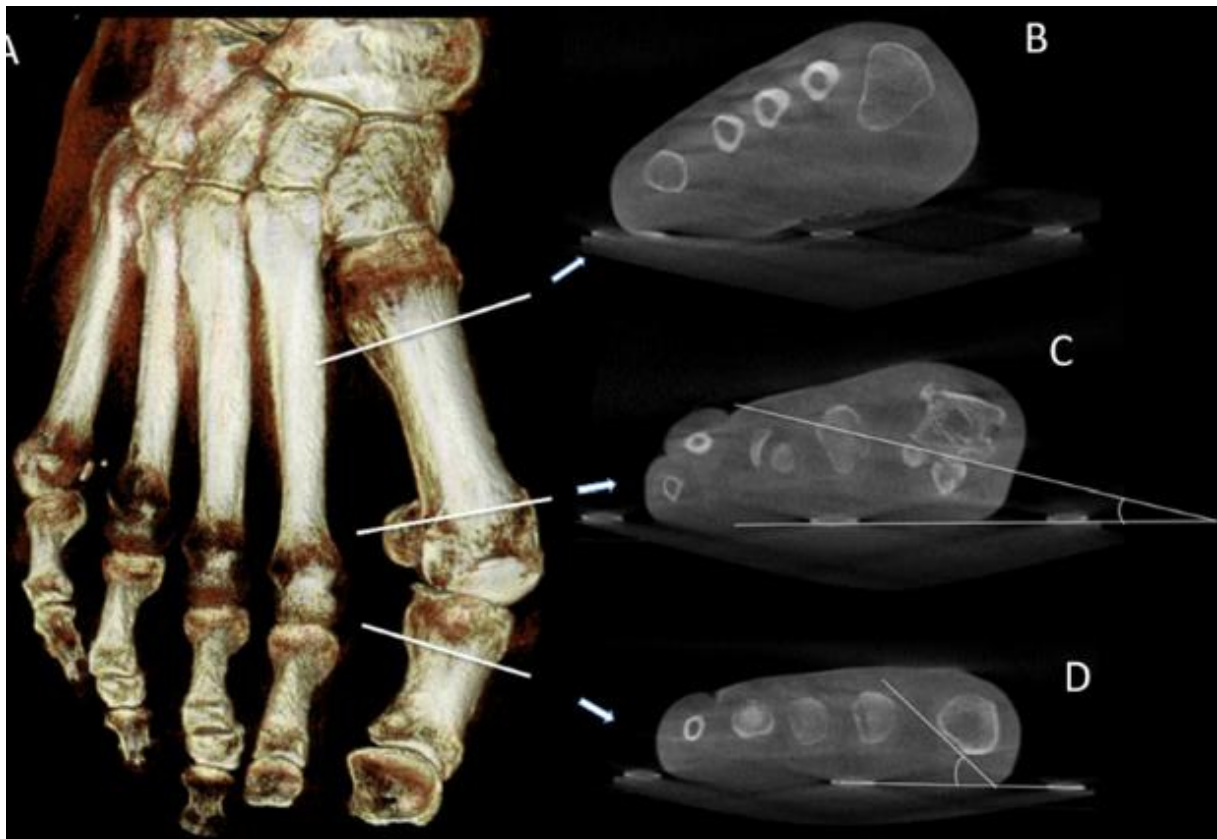


Figure 12 : A : représentation d'une reconstruction tomodensitométrique en trois dimensions (3D) d'un pied hallux valgus droit. B/C/D : coupes scanographiques frontales permettant l'analyse angulaire de la déformation de M1 chez un patient hallux valgus.

Image extraite de « Collan L, Kankare JA, Mattila K. The biomechanics of the first metatarsal bone in hallux valgus: A preliminary study utilizing a weight bearing extremity CT. *Foot and Ankle Surgery*. sept 2013;19(3):155-61. »

Afin de comparer la pronation entre contrôles et HV ils utilisent le Metatarsal Pronation Angle (MPA) déjà décrit par Saltzman *et al*⁶⁶. Ils ne retrouvent pas de différence de pronation de M1 entre le groupe HV et le groupe contrôle (8° vs 2° , NS) en revanche il existe une différence de pronation importante de la première phalange (33° vs 4° , $p < 0.05$) en faveur du groupe HV. Ce résultat va dans le sens de Saltzman *et al*. Il semble donc exister une composante rotatoire du premier rayon du pied dans l'HV sans qu'il ne soit possible d'étayer avec précision sa localisation et son amplitude. La mesure de la pronation du premier métatarsien par le MPA obtenu par tomodensitométrie est fiable^{14,65,68}.

Les années suivantes de nombreuses études scanographiques vont étudier la déformation frontale du premier rayon du pied dans l'HV :

Kim *et al.*³⁵ mesurent la pronation du premier métatarsien avec l'alpha angle (**figure 13**). Dans leur série, le groupe HV présente un excès de pronation comparé au groupe contrôle (21.9° vs 13.8°, p<0.001). L'alpha angle est une mesure fiable et reproductible^{44,47,52}. Ce paramètre n'est pas corrélé aux déformations axiales de l'HV (HVA et IMA) et ce résultat est supporté par plusieurs études^{46,47,70}.

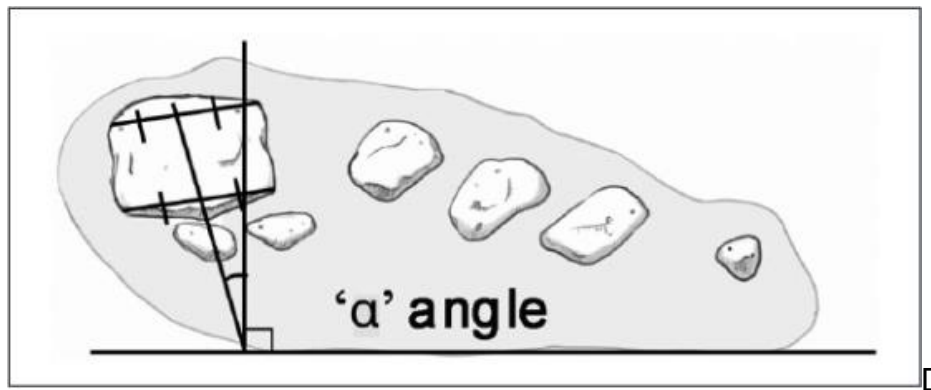


Figure 13 : représentation de l'alpha angle selon Kim *et al.*

Image extraite de « Kim Y, Kim JS, Young KW, Naraghi R, Cho HK, Lee SY. A New Measure of Tibial Sesamoid Position in Hallux Valgus in Relation to the Coronal Rotation of the First Metatarsal in CT Scans. *Foot Ankle Int.* août 2015;36(8):944-52. »

D'autres auteurs trouvent des résultats similaires avec une pronation du premier métatarsien (alpha angle ou MPA) chez les patients hallux valgus allant de 11,4° à 29,3°^{16,19,23,37,38,44,59,68,75}. Plusieurs publications rapportent également une différence de pronation allant de 6° à 8° entre sujets HV et contrôles indemnes de la pathologie^{37,38,59}. Une seule étude ne retrouve pas de différence significative de pronation du premier métatarsien entre groupe HV et groupe contrôle⁴⁴.

Kim *et al.* proposent également de définir un seuil pathologique de la pronation du premier métatarsien en prenant la borne haute de l'intervalle de confiance à 95% soit pour une valeur de 15,8°. Au-delà, on parlera d'hyperpronation de M1. Plusieurs publications s'intéressent à définir une valeur moyenne de la pronation du premier métatarsien chez les patients exempts de pathologie et à définir un seuil à partir duquel on parlera d'hyperpronation pathologique. En effet, certains patients ne présentant pas d'HV ont une hyperpronation. Steadman *et al.*⁶⁹ rapportent une pronation du premier métatarsien dans une population indemne de toute pathologie du pied de 2,1° en utilisant le MPA et de 6,1° en utilisant l'alpha angle. Najefi *et al.* rapportent un MPA à 5,4° et un alpha angle à 6,9°. Lalevée *et*

a/.⁴⁰ proposent de définir le seuil de l'hyperpronation en utilisant soit deux déviations standards (2SD) à la moyenne soit la borne haute de l'intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) de la moyenne. Ils comparent ensuite ces valeurs seuils à une population de 88 HV afin de déterminer la prévalence de l'hyperpronation dans la population HV (**figure 14**).

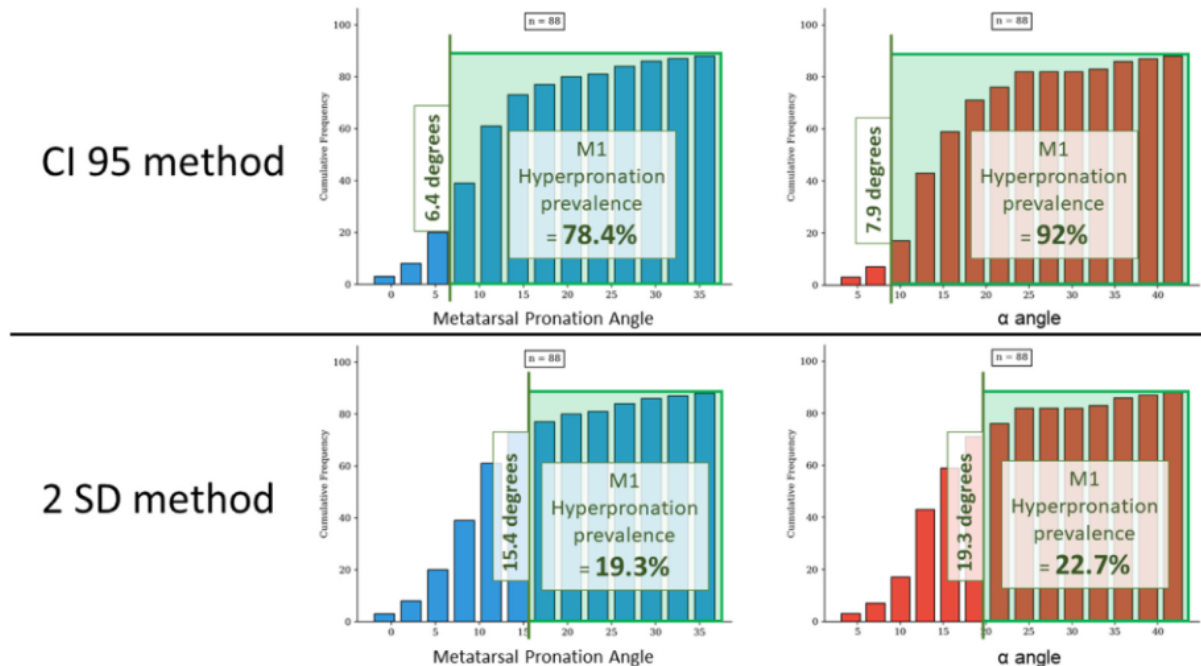


Figure 14 : Représentation selon le seuil retenu du pourcentage de patients présentant une hyperpronation dans le cadre de l'HV.

Image extraite de « Lalevée M, De Carvalho KAM, Barbachan Mansur NS, Kim KC, McGettigan L, Dibbern K, et al. Distribution, prevalence, and impact on the metatarsosesamoid complex of first metatarsal pronation in hallux valgus. *Foot and Ankle Surgery*. Août 2023;29(6):488-96. »

On remarque qu'en fonction du seuil retenu la prévalence de l'hyperpronation du premier métatarsien est radicalement différente parmi les patients HV. Il est difficile de conclure dans quelle mesure la pronation du premier métatarsien est pathologique et doit être corrigée au cours d'une chirurgie. D'autre part ces mesures ne permettent pas de déterminer où se situe la rotation dans le premier rayon du pied amenant à un excès de pronation du premier métatarsien.

b. La pronation de la tête du premier métatarsien est-elle une déformation inhérente à sa morphologie intrinsèque ?

Il a été décrit précédemment la pronation du premier métatarsien à l'aide de la tomodensitométrie. Cette rotation est mesurée à la tête du premier métatarsien et les patients HV semblent présenter un excès de pronation comparés aux patients indemnes de la pathologie. Dès 2019, Cruz *et al.*¹⁹ s'intéressent à déterminer si la pronation du premier métatarsien est une déformation inhérente à sa morphologie. Toujours en utilisant la tomodensitométrie, les auteurs mesurent la différence de rotation dans le plan frontal entre la base et la tête du premier métatarsien (**figure 15**), entre 46 HV et 45 contrôles. Cette mesure correspond à la torsion intrinsèque de M1. Dans leur série il existe une différence de torsion en pronation en faveur du groupe HV de 11.9° ($p < 0.001$) avec une excellente reproductibilité de cette mesure ($\rho = 0.96$).

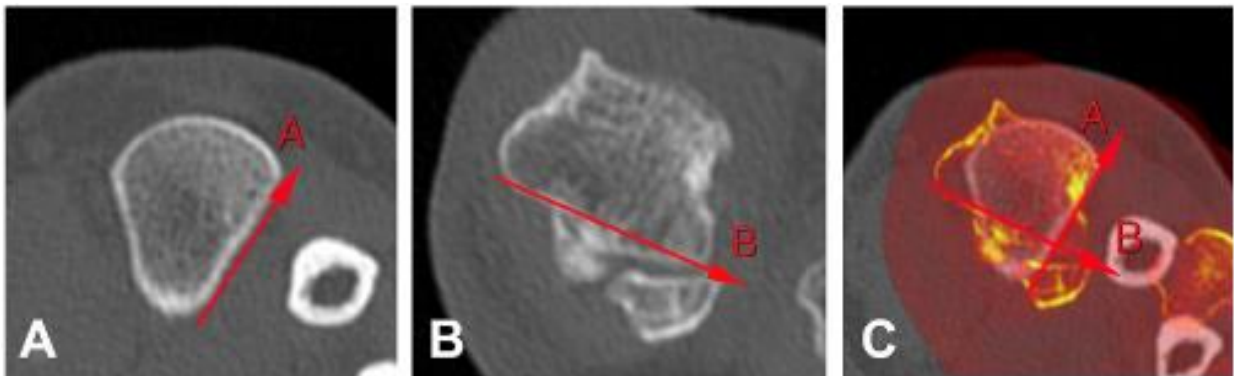


Figure 15 : mesure de la torsion intrinsèque du premier métatarsien par l'angle entre une ligne tangente au cortex latéral du premier métatarsien (A) et une ligne passant par le sommet des facettes articulaires sésamoïdiennes (B) moins 90°.

Image extraite de « Cruz EP, Wagner FV, Henning C, Sanhudo JAV, Pagnussato F, Galia CR. Does Hallux Valgus Exhibit a Deformity Inherent to the First Metatarsal Bone? The Journal of Foot and Ankle Surgery. nov 2019;58(6):1210-4 »

Ce résultat est corroboré par Randich *et al.*⁵⁹ avec une torsion intrinsèque du premier métatarsien de 8.76° ($p < .001$) en pronation pour le groupe HV, par Lalevée *et al.*³⁷ avec une torsion intrinsèque en pronation de 8.3° ($p < .001$) et par Campbell *et al.*⁵ avec une torsion intrinsèque de 8.2° ($p < 0.05$). Ces auteurs ont choisi des méthodes différentes pour mesurer la torsion intrinsèque du premier métatarsien (**figure 16**). Ce dernier élément pose la question de la comparabilité des mesures

de la pronation du premier métatarsien puisqu'aucune mesure de référence n'est clairement identifiée.

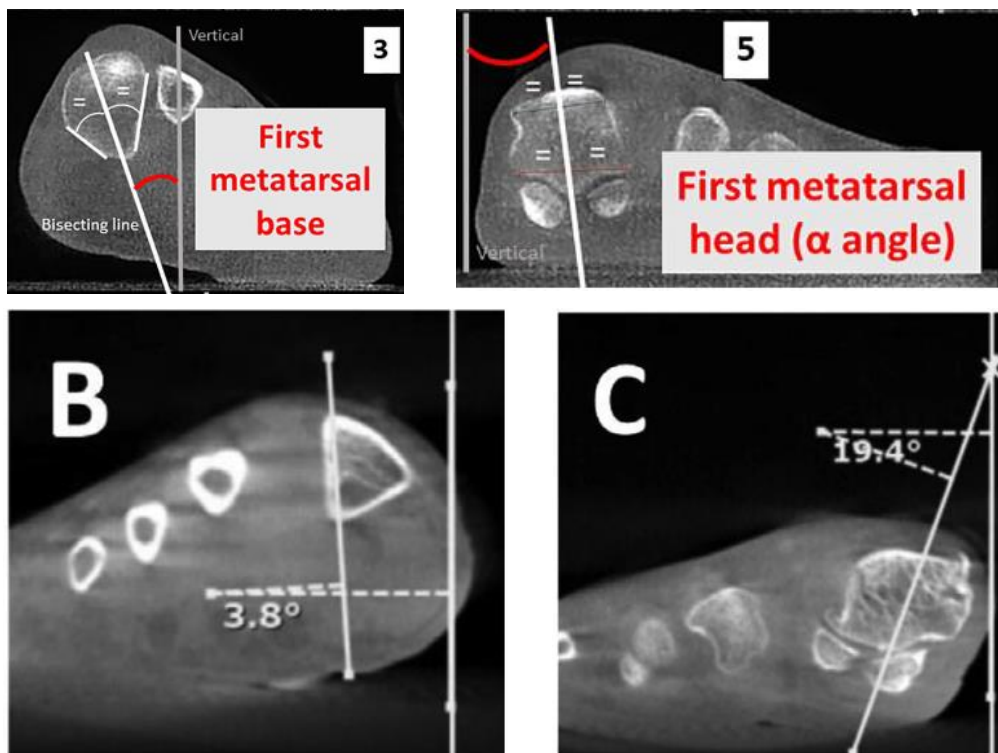


Figure 16 : (3) et (5) détermine l'axe de la base et de la tête du premier métatarsien selon Lalevée *et al.* (B) et (C) détermine l'axe de la base selon la corticale externe du premier métatarsien et la tête du premier métatarsien (alpha angle) selon Randich *et al* , la torsion intrinsèque est la différence entre l'axe de la base (3 ou B) et de la tête du premier métatarsien (5 ou C) moins 90° .

Ces protocoles de mesures étant différents, Conti *et al.* ¹⁴ se sont intéressés à déterminer si elles étaient équivalentes. Il n'existait pas de corrélation entre les différentes manières de mesurer la torsion intrinsèque du premier métatarsien. La littérature montre ainsi qu'il existe un excès de pronation du premier métatarsien dans la pathologie HV, que les mesures scanographiques sont reproductibles mais qu'elles ne sont pas comparables et qu'une standardisation des mesures est nécessaire.

c. Impact de la pronation du premier métatarsien sur l'appareil sésamoïde

Il a déjà été évoqué au chapitre 3.b la relation entre l'articulation métatarso-phalangienne du premier rayon du pied et l'appareil sésamoïde. Il est important de rappeler que la tête du premier métatarsien ne reçoit aucune insertion tendineuse et que la stabilité de la première articulation métatarso-phalangienne est assurée par le duo capsule articulaire et appareil sésamoïde.

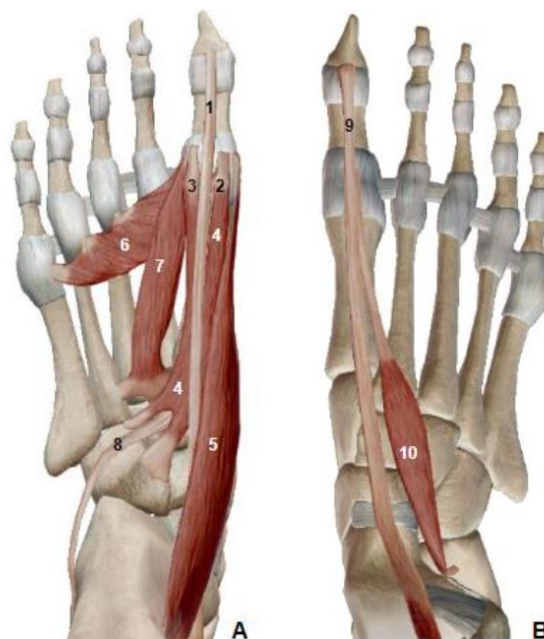


Figure 17 : représentation de l'appareil musculo-ligamentaire stabilisateur de la première articulation métatarso-phalangienne. A : pied droit vue plantaire – 1. Muscle long fléchisseur de l'hallux, 2. Sésamoïde médial, 3. Sésamoïde latéral, 4. Muscle court fléchisseur de l'hallux, 5. muscle abducteur de l'hallux, 6, chef transverse du muscle adducteur de l'hallux, 7. Chef oblique du muscle adducteur de l'hallux, 8. Tendon du muscle long fibulaire. B : pied droit vue dorsale – 9 muscle long extenseur de l'hallux, 10. Muscle court extenseur de l'hallux.

Image extraite du logiciel Visible Body® Muscle Premium.

En s'appuyant sur la **Figure 17**, le sésamoïde latéral reçoit l'insertion de :

- 3 : chef latéral du muscle court fléchisseur de l'hallux
- 6 et 7 : chefs obliques et transverses du muscle adducteur de l'hallux
- Du ligament inter-métatarsien M1-M2 (non représenté ci-dessus)

Le sésamoïde médial reçoit l'insertion de :

- 4 : chef médial du muscle court fléchisseur de l'hallux
- 5 : muscle abducteur de l'hallux

Le muscle long extenseur de l'hallux (9) envoie également des fibres vers la capsule articulaire et les deux sésamoïdes permettant son centrage au dessus de l'articulation métatarso-phalangienne. Dans l'HV la position des sésamoïdes est mesurée sur une radiographie d'incidence dorso-plantaire par rapport au premier métatarsien. Hardy et Clapham ²⁷ proposaient une classification en 7 grades en mesurant la position du sésamoïde tibial par rapport à l'axe longitudinal de M1. Cette classification a été par la suite simplifiée par Agrawal *et al.* ¹ afin d'en rendre l'utilisation plus facile en routine (**figure 18**) :

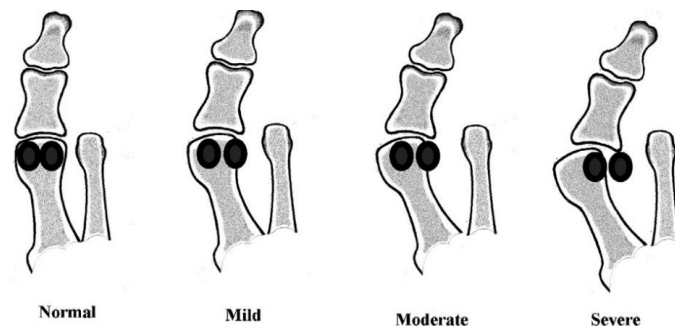


Figure 18 : classification simplifiée de la subluxation du sésamoïde médial. Normal : pas de déplacement, Mild : déplacement 2% du sésamoïde médial à l'axe de M1, Moderate : déplacement > 50% du sésamoïde médial à l'axe de M1, Severe : déplacement du sésamoïde médial vers l'espace intersésamoïdien.

Image extraite de « Agrawal Y, Desai A, Mehta J. Lateral sesamoid position in hallux valgus: Correlation with the conventional radiological assessment. *Foot and Ankle Surgery.* déc 2011;17(4):308-11. »

Devant la difficulté à décrire correctement une position dans le plan frontal des sésamoïdes avec des radiographies acquises dans le plan axial Kuwano *et al.* ³⁶ proposent une vue radiographique frontale pour mesurer la position de l'appareil sésamoïde à l'aide du Sesamoid Rotation Angle (SRA) (**figure 19**) :

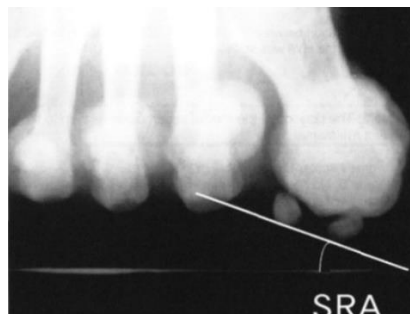


Figure 19 : Sesamoid Rotation Angle : angle entre la tangente aux deux sésamoïdes et l'axe de référence représenté par le sol.

Image extraite de « Ramdass R, Meyr AJ. The Multiplanar Effect of First Metatarsal Osteotomy on Sesamoid Position. *The Journal of Foot and Ankle Surgery.* janv 2010;49(1):63-7. »

Les patients HV présentent un SRA en pronation comparés au groupe contrôle ($p < 0.05$) traduisant un excès de pronation de l'appareil sésamoïde. Cette mesure est bien corrélée à l'HVA, l'IMA et aux classifications d'Hardy et Clapham ainsi que d'Agrawal ($p < 0.001$). En revanche les auteurs soulignent qu'il existe un nombre important de patients pour lequel les classifications selon Hardy ou Agrawal surestiment le déplacement sésamoïdien. De plus les auteurs constatent que sur les incidences radiographiques frontales, la subluxation de l'appareil sésamoïde ne serait due qu'à la pronation du premier métatarsien, l'appareil sésamoïde étant parfaitement centré sur la crête inter sésamoïdienne (**figure 19**). On peut en conclure que les incidences radiographiques dorso-plantaires ne sont pas adaptées et que la subluxation de l'appareil sésamoïde n'est peut-être qu'un artéfact causé par la pronation du premier métatarsien.

Kim *et al.* ³⁵ en 2015, à l'aide d'une analyse scanographique frontale, proposent d'analyser la position des sésamoïdes par rapport à la tête du premier métatarsien et de sa pronation. La subluxation des sésamoïdes est bien réelle, en association avec une pronation du premier métatarsien puisque 61.4% des HV de leur série présente à la fois une hyperpronation et une subluxation latérale des sésamoïdes. De la même manière 10.3% des patients HV ont une subluxation sans hyperpronation. Au total ils identifient quatre profils d'HV (**figure 20**). D'autre part, ils ne retrouvent pas de corrélation significative entre l'intensité de la pronation du premier métatarsien et le grade de subluxation des sésamoïdes ($\rho = 0.019$, $p = 0.10$).

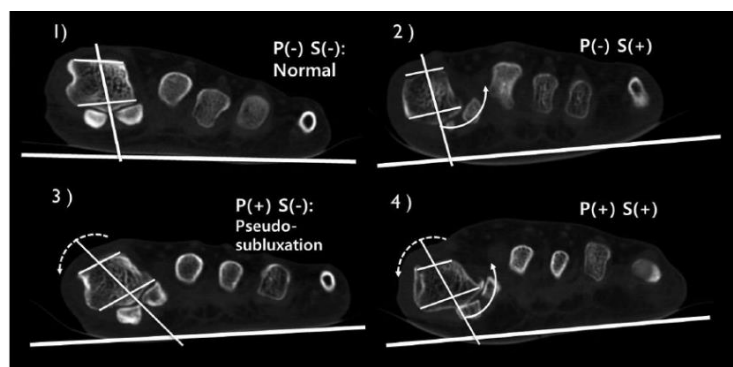


Figure 20: P(-) absence de pronation ; S(-) absence de supination ; P(+) pronation ; S(+) supination.

Image extraite de Kim Y, Kim JS, Young KW, Naraghi R, Cho HK, Lee SY. A New Measure of Tibial Sesamoid Position in Hallux Valgus in Relation to the Coronal Rotation of the First Metatarsal in CT Scans. *Foot Ankle Int.* août 2015;36(8):944-52 »

La subluxation de l'appareil sésamoïde semble donc être une composante à part entière de l'HV. Ce résultat est soutenu par la méta-analyse de Kim et Young ³⁴ et par Lalevée *et al.* ⁴⁰ qui retrouvent une relation inverse entre l'importance de la pronation du premier métatarsien et le grade de subluxation de l'appareil sésamoïde. En effet le sésamoïde latéral est fixe de part son attache à la tête du deuxième métatarsien via le ligament inter-sésamoïdien profond. Ramdass *et al.* ⁵⁸ retrouvent dans leur étude une distance constante entre le sésamoïde latéral et la tête du deuxième métatarsien chez une population HV que ce soit en pré-opératoire ou en post-opératoire.

Le carrefour de ces deux composantes de l'HV semble être la dégénérescence de l'articulation métatarso-sésamoïdienne. Clarke *et al.* ¹⁰ ont démontré, en mesurant sur des coupes frontales par scanner en charge, une corrélation positive entre l'importance de la luxation des sésamoïdes et la dégénérescence de la crête inter sésamoïdienne (**figure 21**). plus les sésamoïde sont déportés en latéral plus le volume de la crête inter sésamoïdienne diminue ce qui indique son érosion. Ce résultat était également corrélé de façon positive à l'HVA et à l'IMA mais pas au degré d'hyperpronation du premier métatarsien.

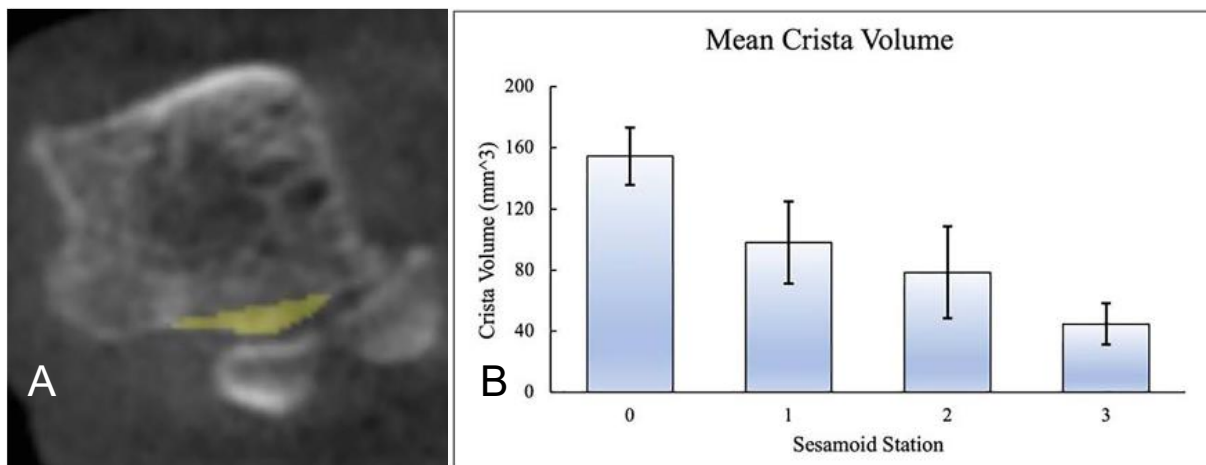


Figure 21 : A) coupe frontale scanographique passant par les sésamoïdes, en jaune mesure de l'aire de la crête inter-sésamoïdienne. B) diagramme représentant la corrélation inverse entre l'aire de la crête inter-sésamoïdienne et le degré de subluxation des sésamoïde.

Image extraite de « Clarke AJ, Conti SF, Conti M, Fadle AA, Ellis SJ, Miller MC. The Association of Crista Volume With Sesamoid Position as Measured From 3D Reconstructions of Weightbearing CT Scans. Foot Ankle Int. mai 2022;43(5):658-64 »

En résumé, la pronation du premier métatarsien et le déplacement latéral de l'appareil sésamoïde semble être deux phénomènes concomitants mais non exclusifs. Certains patients présentent une pronation du premier métatarsien avec

des sésamoïdes parfaitement centrés sur la crête inter-sésamoïdienne simulant une luxation des sésamoïdes et inversement certains patients présentent une luxation des sésamoïdes sans pronation du premier métatarsien. La pronation du premier métatarsien en plus de son abduction semble être un élément favorisant le déplacement latéral des sésamoïdes. L'attache des sésamoïdes par le ligament inter métatarsien profond à la tête du deuxième métatarsien constitue une attache fixe accentuant la rotation de l'appareil sésamoïde. Cela positionne le sésamoïde médial au contact de la crête inter-sésamoïdienne provoquant progressivement son érosion permettant l'aggravation de l'abduction du premier métatarsien et la translation latérale de l'appareil sésamoïde. Ce positionnement des sésamoïdes par rapport à la tête de M1 déplace en plantaire et latéralise l'abducteur de l'hallux lui conférant une action valgisante. De plus le long extenseur et le long fléchisseur de l'hallux se positionnent latéralement à la tête du premier métatarsien et agissent comme une corde d'arc amplifiant un déplacement en valgus de la première phalange de l'hallux ^{24,25,55}. Il semble difficile de pouvoir affirmer quel phénomène survient avant l'autre. En revanche la réduction de la position des sésamoïdes sous la tête du premier métatarsien lors de la chirurgie HV semble être un enjeu important dans la pérennité du résultat autant sur le plan de la récurrence de la déformation que sur le résultat clinique et fonctionnel ^{7,53}.

d. Impact de la pronation du premier métatarsien sur le DMAA

Le Distal Metatarsal Articular Angle est une composante caractéristique de l'HV juvénile ^{6,18,32}. Il a également été discuté chez l'adulte. En effet une augmentation en valgus de l'inclinaison de la surface articulaire distale du premier métatarsien aurait pour conséquences d'accentuer le valgus de l'articulation métatarso-phalangienne du premier rayon et donc d'aggraver l'HV. Pour Piggot *et al.* ⁵⁶ la présence d'un valgus articulaire distal serait la première déformation à l'origine de l'HV. La présence d'un DMAA en valgus en pré comme en post-opératoire par défaut de réduction est corrélée à une augmentation du risque de récurrence de la déformation.

Okuda *et al.* ⁴⁹ ont proposé une classification selon trois aspects radiographiques de la tête du premier métatarsien (**figure 22**) : R pour « round » si celle-ci a un aspect arrondi, A pour « angular » si celle-ci a un aspect angulé et I pour « intermediate » si la tête n'était ni A ni R. Ils retrouvaient une association significative entre le groupe HV et l'aspect rond de la tête du premier métatarsien. Ainsi, la mauvaise reproductibilité de la mesure du DMAA ⁸ sur des radiographies dorso-plantaires pourrait venir de cet aspect arrondi de la tête du premier métatarsien venant fausser la mesure du DMAA.

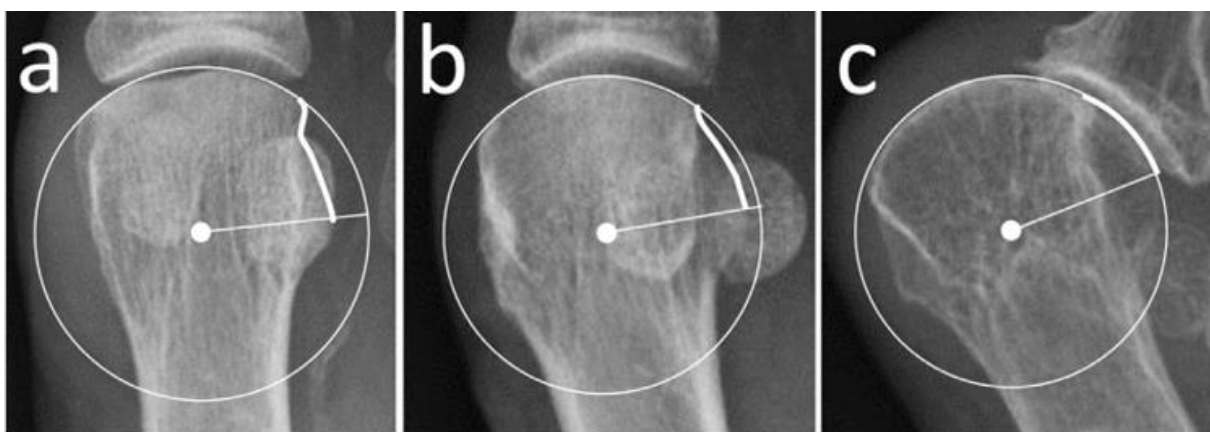


Figure 22 : classification de l'aspect du bord latéral de la tête du premier métatarsien. a) Angular, b) Intermediate, c) Round.

Image extraite de « Ono Y, Yamaguchi S, Sadamasu A, Kimura S, Watanabe S, Akagi R, et al. The shape of the first metatarsal head and its association with the presence of sesamoid-metatarsal joint osteoarthritis and the pronation angle. Journal of Orthopaedic Science. juill 2020;25(4):658-63”

Ono *et al*⁵⁰ ont démontré récemment que cet aspect rond de la tête du premier métatarsien était en lien avec la pronation de M1. En effet les patients présentant un aspect R de la tête du premier métatarsien avaient une pronation de 14° alors que les patients présentant un aspect A avaient une pronation de 4° ($p < 0.05$). Les auteurs considéraient alors que le valgus articulaire distal dans la pathologie HV était un artéfact provoqué par la pronation du premier métatarsien et non une déformation réelle⁷⁰.

Plus récemment Lalevée *et al*³⁸ dans une étude comparant un groupe HV à un groupe contrôle ont élaboré un protocole scanographique afin d'établir une mesure corrigée du DMAA en fonction de la pronation de M1 : le «3d-DMAA ». Afin d'établir cette mesure l'axe longitudinal de M1 était établi en coupes axiales et sagittales. Dans un second temps la coupe frontale passant par les sésamoïdes permettant de mesurer l'alpha angle était repérée permettant ainsi de corriger la pronation du premier métatarsien. Dans un dernier temps le 3d-DMAA était mesuré après correction de la pronation (**figure 23**). Non seulement le groupe HV présentait un valgus plus important de la tête du premier métatarsien (8.6°, $p < 0.001$) mais la mesure avait une excellente reproductibilité (ICC > 0.9). Un valgus articulaire plus important de la tête du premier métatarsien semble donc être une composante à part entière de la déformation dans l'HV.



Figure 23 : Mesure du 3d-DMAA ; step 1 – alignement sur l’axe longitudinal de M1, step 2 – mesure de l’alpha angle, step 3 – alignement sur l’axe sagittal de M1, step 4 alignement et correction par rapport à l’alpha angle, step 5 – alignement sur la coupe sagittale passant par le centre de l’articulation MTP, step 6 – mesure du 3d-DMAA sur la coupe axiale passant dans le plan du step 5.

Image extraite de « Lalevée M, Barbachan Mansur NS, Lee HY, Maly CJ, Iehl CJ, Nery C, et al. Distal Metatarsal Articular Angle in Hallux Valgus Deformity. Fact or Fiction? A 3-Dimensional Weightbearing CT Assessment. Foot Ankle Int. avr 2022;43(4):495-503. »)

3. Analyse semi-automatisée par scanner en charge des déformations du pied

a. Emergence d'une nouvelle technologie

Les travaux présentés jusqu'à maintenant ont été réalisés à l'aide de la radiographie et de la tomodensitométrie. En fonction des auteurs, les conditions d'acquisition de l'imagerie ont été faites soit en décubitus, soit en charge simulée, soit en charge complète avec un patient en station bipodale. Collan *et al.*¹² soulignaient l'importance d'étudier les pathologies du pied avec une imagerie acquise en charge afin d'obtenir l'action des différentes structures ostéo-myo-ligamentaires au plus proche de la réalité. Malgré tout, soulignons que cette façon de faire ne propose qu'une image statique de la pathologie et ne présage pas des phénomènes intervenant lors de la marche.

Pour la radiographie, les clichés obtenus représentent en deux dimensions (2D) les structures du pied qui sont *in fine* tridimensionnelles (3D). Cela provoque la superposition sur une même image de structures orthogonales au rayon incident induisant dès lors une erreur dans les mesures effectuées et l'impossibilité d'appréhender la nature tridimensionnelle des déformations intervenant dans les pathologies du pied⁴⁴.

La tomodensitométrie a permis d'affiner les connaissances déjà acquises. Elle permet d'analyser de façon plus précise les déformations que nous connaissons déjà dans l'hallux valgus. Elle permet aussi d'appréhender de nouveaux paramètres comme la mesure dans le plan frontal du degré de pronation ou de supination d'un segment du pied qui échappait jusqu'alors à la radiographie²⁴. L'émergence de scanner permettant une acquisition en charge a également permis d'analyser les pathologies du pied chez un patient érigé avec la mise en jeu des acteurs myo-ligamentaires et de leurs actions sur le squelette osseux. Cet examen à l'avantage d'être précis avec une acquisition haute résolution, peu irradiante, peu couteuse et reproductible⁵¹. Des articles récents nous montrent qu'il est possible d'effectuer des mesures multi planaires en corrigeant par ajustement sur des coupes sagittales et frontales un paramètre comme le DMAA³⁸. La tomodensitométrie a également permis d'augmenter la fiabilité intra et inter observateur des mesures^{3,47}.

L'avènement des reconstructions en 3D par scanner du squelette osseux du pied dès 2014 promet une meilleure analyse. En effet, Richter *et al.* ⁶² montrent que le scanner en charge permet de s'affranchir du phénomène de superposition propre à la radiographie. Grâce à une reconstruction en 3D par logiciel le scanner en charge permet aussi de s'affranchir de la position du pied lors de l'acquisition des images. Dans une seconde étude ⁶³ ils démontrent que la mesure des angles communément mesurés dans les pathologies du pied sur une radiographie ou sur un scanner est différente de celle des angles mesurés par scanner en charge avec reconstruction 3D. C'est pour eux la seule technologie qui permettrait une mesure et une analyse correctes de ces angles.

Une première étape a été d'utiliser cet outil pour mesurer la pronation du premier métatarsien. Campbell *et al.* ⁵, dans une série comparant 10 patients HV à 10 patients indemnes de pathologie du pied ont mesuré à l'aide d'une reconstruction en 3D du premier métatarsien sa pronation. Les mesures étaient effectuées manuellement. Le groupe HV avait une pronation de 8.2° ($p = 0.048$) comparé au groupe sain, avec une excellente fiabilité du protocole de mesure ($\kappa = 0.90$).

Dans un second temps, le développement de logiciels d'analyse semi-automatisée a permis en synergie avec la reconstruction en 3D du squelette osseux ⁷¹ le positionnement automatisé des marqueurs anatomiques nécessaires à la construction des angles d'intérêts dans les pathologies du pied. Cela a rendu possible un affranchissement partiel des mesures manuelles et une meilleure compréhension des déformations de l'arrière-pied, du médio pied et de l'avant pied en comparant sujets sains et patients. ^{13,43,64,68,77}.

Plusieurs auteurs ont validé cet outil en mesurant la fiabilité des modèles 3D, les coefficients de corrélation intra et inter classes sont excellents, allant de 0.90 à 0.99 ^{22,67,73}. En revanche Richter *et al.* ⁶⁰ soulignent que les logiciels d'analyse semi-automatisée génèrent des mesures différentes pour le même angle mesuré manuellement. Par exemple, Sangoi *et al.* ⁶⁷ ont montré que l'analyse des déformations sagittales dans le pied cavovarus était systématiquement plus élevée par le logiciel de mesures semi-automatisées comparée aux mesures manuelles. Au contraire l'analyse des déformations axiales retrouvait systématiquement une

mesure plus faible. Néanmoins cette nouvelle technologie, utilisable en pratique courante, est fiable et peu coûteuse ⁶⁴. Elle permet également de préparer le planning opératoire et, en perspective, de suivre et mesurer les corrections apportées par la chirurgie aux pathologies du pied.

L'application de cette technologie à l'HV a donné d'excellents résultats pour les paramètres axiaux. De Carvalho *et al.* ²² ont comparé la mesure manuelle de l'HVA, l'IMA et le IPA à une mesure semi-automatisée par scanner en charge dans une cohorte de patients HV et sujets sains. L'analyse semi-automatisée était fiable avec des ICC proche de 1. Elle permettait de différencier avec précision les sujets sains des patients HV. À nouveau, les mesures étaient différentes entre le protocole manuel et le protocole semi-automatisé, mais avec un biais constant et une excellente corrélation positive entre mesures manuelles et semi-automatisées.

Au total, le scanner en charge est un outil indispensable pour décrire les déformations du pied. Il est peu coûteux et fiable. Il a permis de préciser et d'affiner progressivement les connaissances que nous avons dans l'HV avec une analyse par coupe dans les trois plans de l'espace. L'avènement des reconstructions 3D du squelette osseux du pied a permis également de mieux mesurer les déformations du pied et de s'affranchir du positionnement du pied lors de l'examen d'imagerie. L'utilisation de logiciels d'analyse semi-automatisée semble être un garant de fiabilité et de reproductibilité des mesures, à la fois chez le sujet sain et chez le patient porteur d'une déformation du pied, sous réserve que ces mesures sont parfois différentes de celle réalisées connues jusqu'à maintenant et mesurées manuellement.

b. La torsion intrinsèque du premier métatarsien : fait réel ou fiction ?

L'utilisation du scanner en charge avec analyse 3D de la pronation de M1 a été réalisée par Campbell *et al.* ⁵ et mesurait une augmentation de la pronation du premier métatarsien de 8.2° dans le groupe HV. Au chapitre 2.2.b, il a été établi qu'une partie de cette rotation était due à une **torsion intrinsèque pronatrice** du premier métatarsien. Deux auteurs ont voulu confirmer cette donnée.

Ota *et al.* ⁵¹, en 2017, ont utilisé un modèle 3D pour établir s'il existait une torsion intrinsèque pronatrice du premier métatarsien. Les mesures ont été faites manuellement. Ils ont comparé entre 27 HV et 27 pieds sains la torsion pronatrice de M1. (**figure 24**)

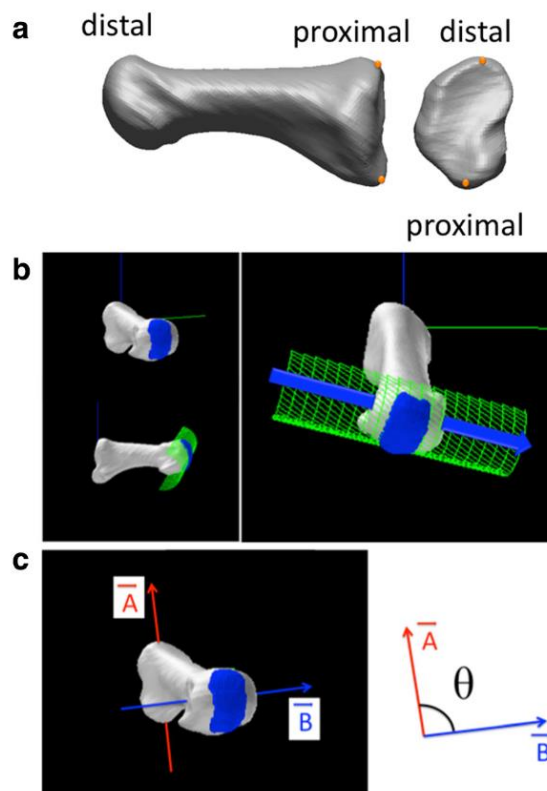


Figure 24 : a) le point le plus haut et le point le plus bas de la surface articulaire proximale de M1 sont utilisés pour déterminer le vecteur A qui exprime l'axe de la base de M1. B) un modèle cylindrique est ajusté à la surface articulaire distale de M1 permettant de déterminer son axe transversal B. c) l'angle AB – 90° détermine la torsion pronatrice de M1

Image extraite de « Ota T, Nagura T, Kokubo T, Kitashiro M, Ogihara N, Takeshima K, et al. Etiological factors in hallux valgus, a three-dimensional analysis of the first metatarsal. J Foot Ankle Res. déc 2017;10(1):43»

Le groupe HV présentait une torsion intrinsèque de 12.9° en pronation comparé au groupe contrôle.

Cependant Wei *et al.* ⁷⁴, en 2023, en utilisant également une reconstruction 3D de M1, ont trouvé un résultat contradictoire. L'analyse a été faite par mesures semi-automatisées sur 17 pieds sains et 16 pieds HV. Malgré des protocoles de mesures similaires à la fois pour l'axe de la base et l'axe de la surface articulaire distale de M1 en comparaison à Ota, ils n'ont pas mesuré de différence significative de torsion intrinsèque en pronation de M1 pour le groupe HV. Les auteurs expliquent ces résultats contradictoires par la petite taille des populations dans leur étude et dans celle de Ota *et al.*

Malgré l'utilisation de l'analyse scanographique 3D dans l'HV, deux paramètres de l'HV semblent toujours source de débats ; l'existence d'une torsion intrinsèque en pronation de M1 et l'augmentation du valgus articulaire distal chez les patients atteints d'HV. Le chapitre suivant présentera une étude (soumise dans **Foot And Ankle International**) dans laquelle il a été comparé une population de patients HV à une population de patients indemnes de pathologie du pied. Le but de l'étude était de déterminer la torsion intrinsèque du premier métatarsien par scanner en charge à l'aide d'une analyse semi-automatisée en 3D. Les objectifs secondaires étaient de déterminer s'il existait un excès de valgus articulaire distal chez les patients HV et de mesurer la fiabilité du modèle d'analyse 3D et sa concordance par rapport aux mesures 2D scanographiques déjà établies dans la littérature.

Chapitre 4 : Semi-automated three-dimensional analysis of first metatarsal pronation in hallux valgus: A case-control study.

Luc Meuric¹, Matthieu Lalevée^{1,2}, Nacime Salomao Barbachan Mansur^{3,4}, François Lintz⁵, Cesar de Cesar Netto^{6,}*

¹ Rouen University Hospital, Orthopedic and Trauma Surgery Department, 37 Boulevard Gambetta, 76000 Rouen, France.

² CETAPS UR 3832, Research Center for Sports and Athletic Activities Transformations, University of Rouen Normandy, F-76821 Mont-Saint-Aignan, France.

³ Department of Orthopedics and Rehabilitation, Carver College of Medicine, University of Iowa (UIOWA), Iowa City, IA, USA.

⁴ Department of Orthopedics and Traumatology, Escola Paulista de Medicina, UNIFESP, São Paulo, Brazil.

⁵ Clinique de L'Union, Ramsay Santé, Saint-Jean, France.

⁶ Foot and Ankle Division, Duke University, Durham, NC, USA.

* Corresponding author: Cesar de Cesar Netto

Foot and Ankle Division, Duke University, Durham, NC, USA.

cesar.netto@duke.edu

Article soumis dans Foot And Ankle International.

1. Abstract

1. Introduction :

The pronation of the first metatarsal (M1) in hallux valgus (HV) is currently the subject of a growing body of scientific research. However, several methods of manual measurement have been developed, providing heterogeneous results.

Therefore, our objective was to develop semi-automatic 3D WBCT measurements to compare coronal rotation of M1 head relative to the ground, M1 intrinsic torsion and valgus deviation of M1 distal articular surface (DMAA) in HV and controls.

2. Material and method :

Forty-four symptomatic HV and 44 matched controls were retrospectively enrolled in this study, all of whom had undergone WBCT acquisition. Semi-automated bone segmentation was performed. Two methods have been developed to assess position of the M1 head. One was based on automatic fitting of a cylinder in the head, and the other on automatic selection of the position of the sesamoid gutters. Similarly, two methods have been developed to assess the position of the M1 base. One was defined using principal component analyses (PCA) of the proximal articular surface of M1, and the other using the longest diagonal of the M1 base.³

Results :

The two groups did not differ according to age ($p=0.71$), sex ($p=0.8$) and BMI ($p=1$).

First metatarsal head rotation relative to the ground was respectively 8.9 ± 8.4 degrees and 2.1 ± 6.4 degrees (cylinder method, $p<0.001$) and 9 ± 8.3 degrees and 0.7 ± 6.8 degrees (gutters method, $p<0.001$) in HV control groups.

Combining the different sets of head and base measurements, the increase in M1 intrinsic torsion in pronation in HV ranged from 2 to 5 degrees.

The DMAA was 11.4 ± 6.9 degrees in the HV group and 5.6 ± 4.7 degrees in the control group ($p<0.001$).

4. Conclusion:

Using semi-automatic 3D WBCT measurement we found that HV showed an increase in M1 head pronation relative to the ground of 7 to 8 degrees greater than controls, with an increase in M1 intrinsic torsion in pronation of 2 to 5 degrees and an increase in valgus deviation of the M1 distal articular surface of approximately 6 degrees.

Level of evidence 3, case control study.

Key words : hallux valgus, first metatarsal, pronation, weight-bearing computed tomography, torsion, distal metatarsal articular angle.

2. Introduction

Hallux valgus (HV) pathogenesis is still unclear and involve several factors.⁵⁵ Furthermore, the outcomes of HV surgical correction are perfectible, with significant recurrence rates reported in certain studies.^{30,39} First metatarsal (M1) dysplasia is considered to be a factor influencing both pathogenesis and surgical outcomes.^{15,41} The pronation of M1 is part of this dysplasia and is currently the subject of a growing body of scientific research.^{46,70}

However, there are a number of controversial points on this subject. First, there is a confusion between the rotation of the M1 head relative to the ground and the intrinsic torsion of M1 (from M1 base to head), even though both are most often in pronation.^{37,51} Second, there is no consensus on the method to be used to measure this rotation and, consequently, pronation values vary according to the different methods.^{14,40} Third, previously defined as a valgus deviation of the distal articular surface of M1, the distal metatarsal articular angle (DMAA), appears to be, at least in part, an artifact created by this pronation combined with two-dimensional radiographic analysis.^{38,70}

Nevertheless, beyond these controversies, increased pronation of the M1 head and increased valgus deviation of the distal articular surface of M1 are associated with poorer surgical outcomes in HV.^{9,11,15,49,54} It therefore seems essential to define an easy and reproducible method for assessing M1 pronation. Initially, M1 head rotation were measured on conventional weight-bearing radiographs, while M1 intrinsic torsion was measured by CT scan, as there was no need for a ground reference to perform this measurement.^{19,35,46,51,66,70} To this end, several methods have been described, leading to inconsistencies in the results of studies comparing HV and controls.^{14,44,47,70} Valgus deviation of the distal articular surface was also measured on conventional radiographs, as defined with the DMAA, but these measurements suffer from a lack of reliability.^{29,56,72} This lack of reliability seems to be linked to the M1 head pronation, which causes the lateral plantar condyle to project onto the M1 distal articular surface on dorsoplantar 2D measurements.^{38,72} This problem could be solved with 3D measurement.³⁸

More recently, weight bearing cone-beam computed tomography (WBCT) has enabled 3D acquisitions of foot bones with ground references.^{3,61} In addition, a growing number of semi-automatic and automatic measurements have been defined to assess foot morphology, and can serve as a starting point for increasing data collection and improving the power and objectivity of scientific studies.^{22,74} However, to our knowledge, no semi-automatic WBCT measurement has been developed to assess pronation of the M1 head relative to the ground, M1 intrinsic torsion and valgus deviation of the distal articular surface of M1 in HV and controls.

Therefore, our objective was to develop semi-automatic 3D WBCT measurements to compare coronal rotation of M1 head relative to the ground, M1 intrinsic torsion and valgus deviation of M1 distal articular surface in HV and controls. Our hypothesis was that semi-automatic 3D WBCT measurements would provide reliable measures and that HV subjects compared to controls would show increased pronation of the M1 head relative to the ground and increased M1 intrinsic torsion in pronation, but no increase in valgus deviation of the distal articular surface of M1, being considered an artifact of 2D analysis rather than a true deformity.

3. Methods

This retrospective case-control study received institutional review board approval (IRB 201904825) before its start and complied with the Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA).

We reviewed our data base and included patients who had WBCT images (PedCAT; Curvebeam) for symptomatic HV between January 1, 2015 and December 31, 2021. A group of control subjects was then selected to match the HV group in terms of age, BMI and gender. Forty-four feet (38 patients) were included in the HV group and 44 feet (38 subjects) in the control group (Table 1).

Table 1. Demographics

	HV group (n=44)	Control group (n=44)	p-value
	<i>Mean ± SD (Range)</i>	<i>Mean ± SD (Range)</i>	
Age (years)	48.2 ± 17.5 (18 - 82)	47.2 ± 17.6 (18 - 85)	0.71
BMI (kg/m ²)	27.6 ± 6.3 (19.5 - 51.2)	27.5 ± 6.6 (18.8 - 49.2)	0.8
Gender	26W / 18M	26W / 18M	1

HV, hallux valgus; BMI, body mass index; SD, Standard Deviation; W, Women; M, Men

Manual 2D measurements of the M1 head rotation.

Metatarsal Pronation Angle (MPA) and α angle are two previously described manual measurements of M1 head rotation relative to the ground, widely used and considered as gold standards.^{46,70} Therefore, two independent foot and ankle surgeons performed these measurements (CubeVue, Curvebeam software) in the HV group using previously published methods.^{35,46,70}

Semi-automatic 3D measurements of the Hallux Valgus Angle and the Intermetatarsal Angle

All 3D measurements were performed using Bonelogic 2.1® software (DISIOR, Finland). The longitudinal axis for each bone was defined according to a previously published method⁷⁷. The Hallux Valgus Angle (HVA) was defined as the angle

between longitudinal axis of the M1 and the longitudinal axis of the hallux first phalanx. The Intermetatarsal Angle (IMA) was defined as the angle between the longitudinal axis of M1 and the longitudinal axis of the second metatarsal (M2).

Semi-automatic 3D measurements of the M1 head rotation.

To assess M1 head rotation, we calculated the axis of M1 distal end relative to the ground. The axis of the M1 distal end was calculated using two methods:

- *Cylinder method*

First, a modulated cylinder was fitted to the surface of the M1 head, excluding the medial and lateral sides. This fitting routine finds the location, direction, and radius of the cylinder, together with cylinder modulation parameters. The coronal and axial axes of this cylinder were then determined relative to the longitudinal axis of M1 (Figure 1).

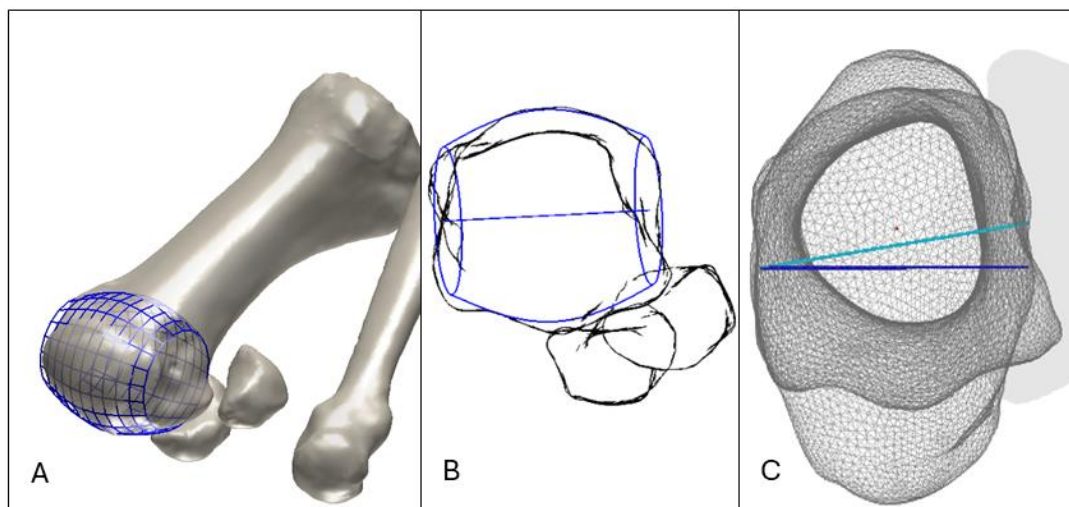


Figure 1: First metatarsal head coronal rotation measurement using the cylinder method.

A, Fitted cylinder method.

B, Coronal representation of the M1 distal end axis approximated by the cylinder method.

C, M1 head coronal rotation relative to the ground (dark blue line) using the cylinder method.

- *Gutters method*

Second, we automatically calculated the axis of the sesamoid gutters in the coronal plane; the distal end of M1 was isolated and projected along the entire longitudinal axis of the bone. The projection of the distal end of M1 was split into two subsets containing 20% of the most medial points of the medial side of the distal end and 20% of the most lateral points of the lateral side of the distal end of M1. Then the two subsets were combined to create a convex hull. From the resulting convex hull, we picked the edge that pointed downwards where one edge endpoint belonged to medial subset and the other belonged to the lateral subset, this edge became finally our gutter axis. (Figure 2).

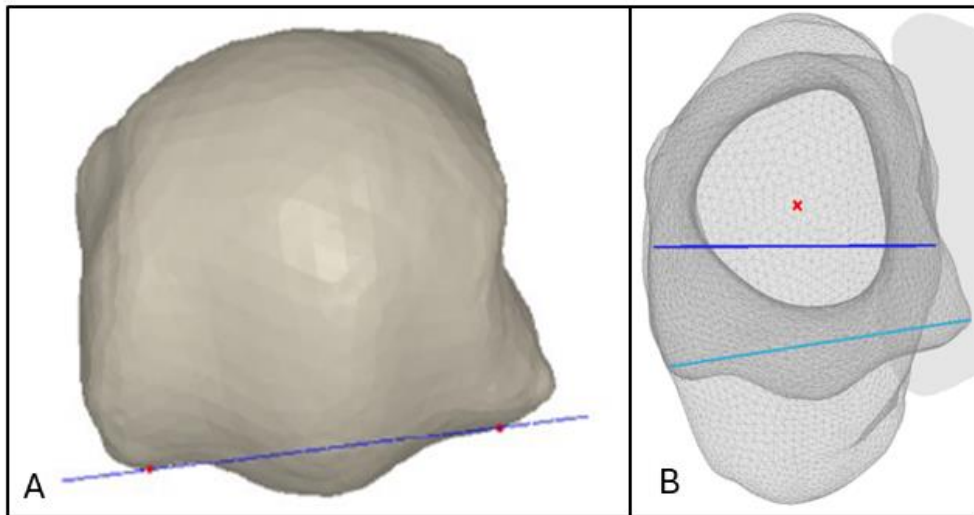


Figure 2 : *First metatarsal head coronal rotation measurement using the Gutters method.*

A, Gutters method.

B : M1 head coronal rotation relative to the ground (dark blue line) using the Gutters method.

Semi-automatic 3D measurements of the M1 base rotation.

The M1 base axis and its rotation along the longitudinal axis of M1 were determined using two methods:

- *PCA method*

First, we used a Principal Component Analyses of the proximal articular surface of M1. Then the near medio-lateral component was used in the direction of the longitudinal axis of M1 (Figure 3A).

- *Ota method*

Second, as reported by Ota et al.⁵¹, the longest diagonal of the M1 base was calculated, and the angle between the vertical and the axis of this diagonal was determined (Figure 3B).

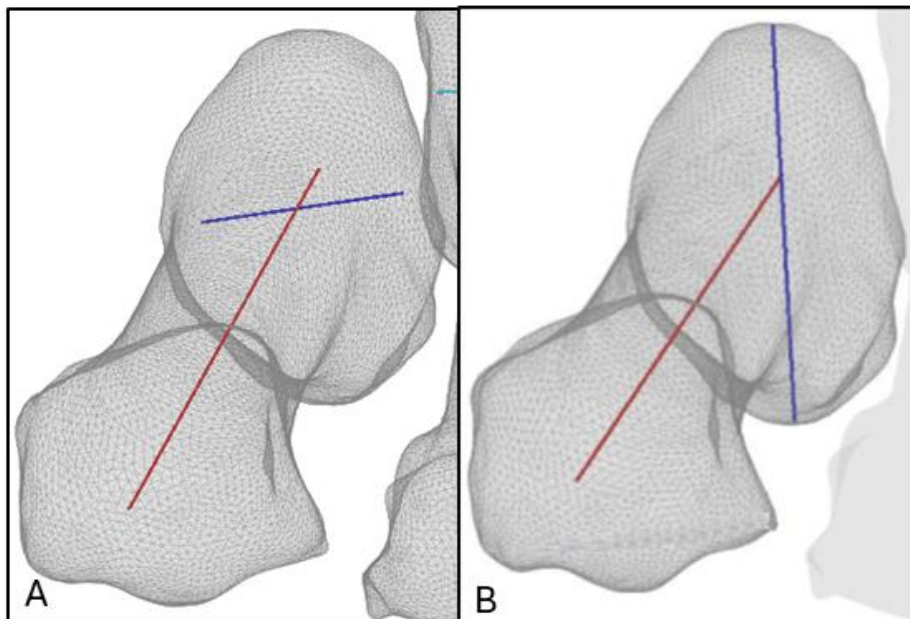


Figure 3 : First metatarsal base coronal rotation using two different methods.

A, PCA method using the near medio-lateral component.

B, Ota method using the longest diagonal in the dorso-plantar way.

Semi-automatic 3D measurements of the M1 intrinsic torsion.

The various combinations of these four methods (two for M1 head and two for M1 base) were then used to assess the M1 intrinsic torsion, which was determined as the angle between the M1 head axis and the M1 base axis, resulting in four measurements: Cylinder-PCA method, Cylinder-Ota method, Gutters-PCA method and Gutters-Ota method (Figure 4).

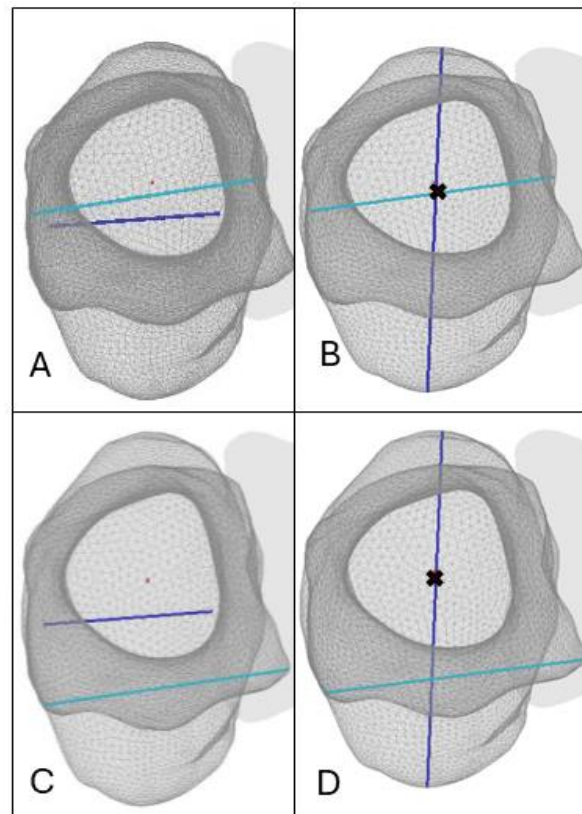


Figure 4 : First metatarsal intrinsic torsion using the two base methods and the two distal head methods.

A, M1 intrinsic torsion using Cylinder-PCA method

B, M1 intrinsic torsion using Cylinder-Ota method

C, M1 intrinsic torsion using Gutters-PCA method

D, M1 intrinsic torsion using Gutters-Ota method

Semi-automatic 3D measurements of the DMAA.

The distal metatarsal articular angle (DMAA) was measured as the angle between the perpendicular to the M1 longitudinal axis and the medio-lateral axis of the cylinder model in the axial plane (Figure 5).

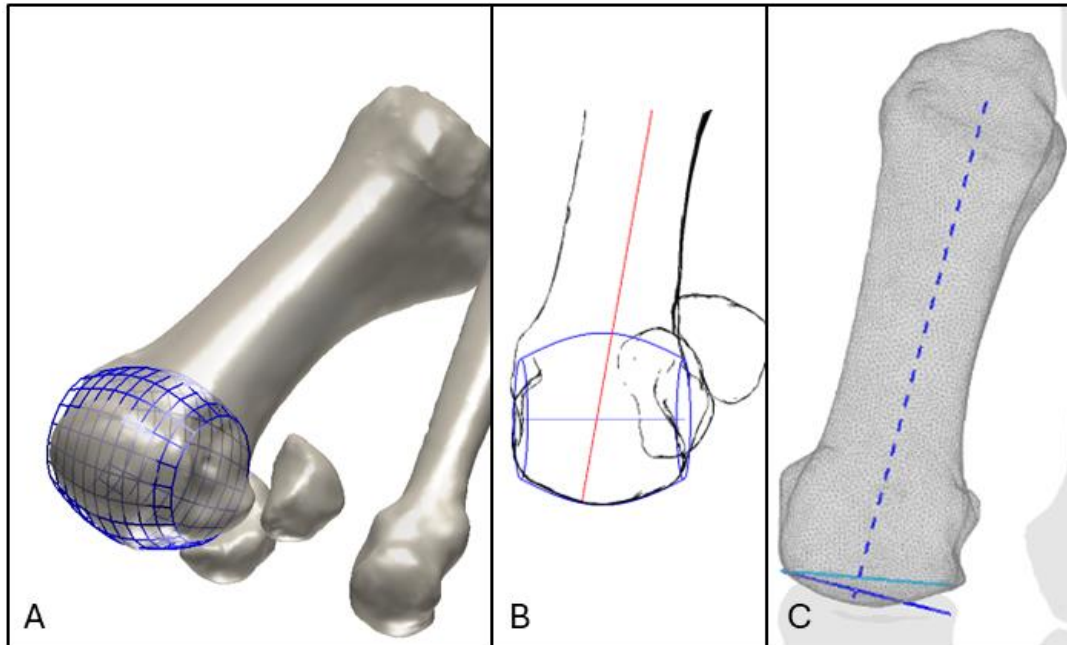


Figure 1: First metatarsal head joint surface axial rotation measurement using the cylinder method.

A, Fitted cylinder method.

B, Axial representation of the M1 distal end axis approximated by the cylinder method.

C, M1 head axial rotation corresponding to the Distal Metatarsal Articular Angle.

Statistical analysis.

Normality and heteroskedasticity of continuous data were assessed with Shapiro-Wilk and Levene's test respectively. Continuous outcomes were compared with unpaired Student t-test, Welch t-test or Mann-Whitney U test according to data distribution. Discrete outcomes were compared with chi-squared or Fisher's exact test accordingly. The Intraclass Correlation Coefficient (ICC) was used to assess the inter-observer and inter-method reliabilities. The alpha risk was set to 5% and two-tailed tests were used. Statistical analysis was performed with EasyMedStat (version 3.36; www.easymedstat.com).

4. Results

The mean HVA was $12.5^{\circ} \pm 5.5$ in the control group and $26.9^{\circ} \pm 10.2$ in the HV group ($p < 0.001$). The mean IMA was $11.1^{\circ} \pm 2.1$ in the control group and $15.4^{\circ} \pm 3.5$ in the HV group ($p < 0.001$).

a. Reliabilities

Interobserver reliability for α angle and MPA was excellent (ICC=0.95 and 0.96, $p < 0.001$).

Reliabilities between α angle and M1 head rotation using the cylinder (ICC=0.46; $p < 0.001$) and gutter method (ICC=0.49; $p < 0.001$) were poor. Reliabilities between MPA and M1 head rotation using the cylinder (ICC=0.72; $p < 0.001$) and gutter method (ICC=0.73; $p < 0.001$) were moderate.

Other inter-method reliabilities are shown in **Table 2**.

Table 2. Measurement reliability

Measurements	ICC	CI ₉₅	Mean difference \pm SD (degrees)	p value
α angle (Interobserver)	0.95	(0.91 ; 0.97)	1.1 \pm 3.7	<0.001
MPA (Interobserver)	0.96	(0.87 ; 0.98)	1.9 \pm 2.4	<0.001
α angle - MPA	0.78	(0.18 ; 0.92)	4.4 \pm 3.5	<0.001
M1 Rotation Cylinder - α angle	0.46	(-0.04 ; 0.72)	-8.5 \pm 6.2	<0.001
M1 Rotation Cylinder - MPA	0.72	(0.35 ; 0.86)	-4.1 \pm 4.8	<0.001
M1 Rotation Gutters - α angle	0.49	(-0.02 ; 0.74)	-8.2 \pm 6.3	<0.001
M1 Rotation Gutters - MPA	0.73	(0.45 ; 0.85)	-3.5 \pm 5.2	<0.001
M1 Rotation Cylinder - Gutters	0.93	(0.91 ; 0.95)	0.6 \pm 3.0	<0.001
M1 Base PCA - M1 Base Ota	0.53	(-0.01 ; 0.77)	7.1 \pm 5.3	<0.001

ICC, Interclass Coefficient Correlation ; MPA, Metatarsal Pronation Angle ; CI₉₅, 95% Confidence Interval ; M1, first metatarsal ; PCA, Principal Component Analysis ; SD, Standard Deviation.

b. Semi-automatic 3D measurements of the M1 head rotation in HV and controls.

According to the cylinder method, M1 head rotation was respectively $8.9^{\circ} \pm 8.4$ and $2.1^{\circ} \pm 6.4$ in HV and control groups ($p < 0.001$).

According to the gutters method, M1 head rotation was respectively $9^{\circ} \pm 8.3$ and $0.7^{\circ} \pm 6.8$ in HV and control groups ($p < 0.001$).

c. Semi-automatic 3D measurements of the M1 intrinsic torsion in HV and controls.

According to the Cylinder-PCA method, M1 intrinsic torsion was respectively $4.1^{\circ} \pm 6.9$ and $2^{\circ} \pm 5.5$ in HV and control groups ($p = 0.134$).

According to the Cylinder-Ota method, M1 intrinsic torsion was respectively $11.8^{\circ} \pm 6.3$ and $8.3^{\circ} \pm 5.4$ in HV and control groups ($p = 0.009$).

According to the Gutters-PCA method, M1 intrinsic torsion was respectively $8.3^{\circ} \pm 5.3$ and $4.3^{\circ} \pm 6.9$ in HV and control groups ($p = 0.011$).

According to the Gutters-Ota method, M1 intrinsic torsion was respectively $12^{\circ} \pm 6.1$ and $7^{\circ} \pm 6.3$ in HV and control groups ($p < 0.001$).

d. Semi-automatic 3D measurements of the DMAA in HV and controls.

The mean DMAA was $5.6 \pm 4.6^{\circ}$ in the control group and $11.4 \pm 6.8^{\circ}$ in the HV group ($p < 0.001$). Thus, the M1 distal articular surface in the HV group was 5.8° more deviated in valgus than in the control group ($p < 0.001$).

All Semi-automatic 3D measurements are shown in **Table 3.**

Table 3. Comparison of HVA, DMAA and rotational parameters of M1 in HV and Control groups.

Measurements	Controls Mean ± SD (degrees)	CI ₉₅ ()	HV Mean ± SD (degrees)	CI ₉₅ ()	Mean difference (degrees)	p-value
DMAA	5.6 ± 4.7	(4.1 ; 7.0)	11.4 ± 6.9	(9.3 ; 13.5)	5.8	<0.001
Base PCA	0.1 ± 5.7	(-1.7 ; 1.9)	4.7 ± 7.5	(2.2 ; 7.3)	4.7	0.002
Base Ota	-6.2 ± 6.3	(-8.2 ; -4.3)	-3.0 ± 8.8	(-5.9 ; -0)	3.3	0.033
Rotation Cylinder	2.1 ± 6.4	(0.1 ; 4.1)	8.9 ± 8.4	(6.1 ; 11.7)	6.8	<0.001
Rotation Gutters	0.7 ± 6.8	(-1.4 ; 2.8)	9 ± 8.3	(6.2 ; 11.8)	8.3	<0.001
Torsion Cylinder-PCA	2.0 ± 5.5	(0.3 ; 3.7)	4.1 ± 6.9	(1.8 ; 6.4)	2.1	0.134
Torsion Cylinder-Ota	8.3 ± 5.4	(6.6 ; 10.0)	11.8 ± 6.3	(9.7 ; 13.9)	3.5	0.009
Torsion Gutters-PCA	0.6 ± 5.2	(-1.0 ; 2.3)	4.3 ± 6.9	(2 ; 6.6)	3.6	0.011
Torsion Gutters-Ota	6.9 ± 6.3	(5.0 ; 8.9)	12 ± 6.1	(10 ; 14)	5.0	<0.001

M1, first metatarsal ; m, mean ; SD, Standard Deviation ; CI₉₅, 95% confidence interval ; HV, Hallux Valgus ; dif, difference ; DMAA, Distal Metatarsal Articular Angle ; HVA , Hallux Valgus Angle ; PCA Principal Component Analysis.

5. Discussion

In this study, several methods of semi-automatic 3D WBCT measurement of first metatarsal pronation were developed and used to compare HV and controls. It was found that HV showed an increase in M1 head pronation relative to the ground of 7 to 8 degrees greater than controls, with an increase in M1 intrinsic torsion in pronation of 2 to 5 degrees, which confirmed part of our hypothesis. On the other hand, contrary to our hypothesis, semi-automatic measurements showed an increase in valgus deviation of the M1 distal articular surface of approximately 6 degrees in HV compared to controls.

According to the semi-automatic measurements of M1 head pronation relative to the ground, using the gutters method alone showed a greater increase in pronation in HV patients compared to the cylinder method (Table 3), which considered the entire M1 head morphology. This suggested that the pronation values were substantially influenced by the position of the sesamoid gutters^{34,40}. However, this study could not determine whether the pronated malposition of the gutters was secondary or constitutional. One could argue that metatarsosesamoid arthritis and inherent gutter erosion^{10,55}, might explain the pronated malposition of the gutters. Nonetheless, it could also have been due to a developmental anomaly of the M1 head, and this study did not provide evidence to support either theory.

It is also surprising to observe that the M1 intrinsic torsion in pronation that we found, independently of the method, was significantly lower (2 to 5 degrees) than those previously reported in the literature^{5,12,14,17,35,37,38,40,46,59}. Indeed, for example, Ota et al. reported an increase in intrinsic pronation of M1 of around 13 degrees more in HV compared to controls⁵¹. Our values are much lower and closer to those reported by other authors⁷⁴. This should reopen the debate on whether the pronation of the M1 head originates from an intrinsic torsion of that bone or not. According to our study, this pronation malposition may be proximal to M1 and could be present at the level of the first tarsometatarsal joint as previously reported^{31,74}, or originate directly from a valgus position of the hindfoot^{2,37,76}.

Another important matter of debate was the existence or not of a valgus deviation of the M1 distal articular surface in HV. The DMAA was initially described

to quantify this deviation using 2D dorsoplantar conventional radiographs. However, numerous authors criticized this angle, suggesting it might be solely an artifact of M1 head pronation relative to the ground, which causes the lateral plantar condyle (which is round) of the M1 head to be superimposed with its distal articular surface^{49,70}. Other authors proposed three-dimensional measurements of the DMAA after computerized correction of M1 head pronation relative to the ground, finding a remaining increase of approximately 8 degrees of valgus deviation in HV compared to controls³⁸. In our study, we also found 6 degrees increase in valgus deviation using the semi-automatic cylinder method, which accounted for the overall morphology of the M1 distal end. This study supported the hypothesis that even though valgus deviation of the M1 distal articular surface is overestimated on dorsoplantar conventional radiographs, partially due to pronation, some degree of increase in valgus deviation remains in the HV.

This study presented several limitations. First, we did not consider whether or not HV was combined with flatfoot deformity, which could be seen as a confounding factor^{2,37,76}. However, we focused on a standard cohort of HV patients who consulted for a painful bunion rather than painful flatfoot. Second, the method we described is dependent on the software we used, which may differ from one center to another. Nonetheless, this software is commercially available and can be used by any foot and ankle specialist. Third, this was a retrospective study conducted on small cohorts, with inherent potential biases. However, to our knowledge, this is the first study to describe several semi-automatic methods for assessing pronation and valgus deviation of the M1 distal articular surface in HV and controls.

6. Conclusion.

Using semi-automatic 3D WBCT measurement we found that HV showed an increase in M1 head pronation relative to the ground of 7 to 8 degrees greater than controls, with an increase in M1 intrinsic torsion in pronation of 2 to 5 degrees. An increase in valgus deviation of the M1 distal articular surface of approximately 6 degrees in HV compared to controls was also observed. These semi-automated measurements can be used to generate large datasets, providing a more accurate and standardized, objective approach to address questions regarding pronation in HV.

Chapitre 5 : Conclusion

Ce travail nous a permis, à la suite d'une synthèse de l'état de l'art actuel des connaissances sur la déformation en pronation du premier métatarsien dans la pathologie de l'hallux valgus, de déterminer une méthode d'analyse 3D semi-automatisée de la pronation du premier métatarsien. Premièrement, nous avons montré que la position de la tête du premier métatarsien dans le plan coronal par rapport au sol des patients HV présentait une pronation d'environ 9° comparé à un groupe contrôle et que la torsion pronatrice de M1 variait de 2 à 5° en fonction de la méthode utilisée. Deuxièmement, les résultats obtenus par analyse 3D sont inférieurs en valeur à ceux déjà décrits dans la littérature par des analyses 2D scanographiques, cela est cohérent avec les publications déjà connues. En fonction de la méthode utilisée, la concordance de notre modèle 3D était de moyenne à bonne. Cela souligne que les nouvelles méthodes d'analyse 3D amènent des résultats qui peuvent être différents de ceux déjà publiés par méthode d'analyses 2D. Enfin, nous avons confirmé qu'il existe un valgus articulaire plus important chez les patients souffrant d'HV comparés à un groupe contrôle. C'est une déformation à part entière de la pathologie HV et non un artéfact radiologique.

Références bibliographiques

1. Agrawal Y, Desai A, Mehta J. Lateral sesamoid position in hallux valgus: Correlation with the conventional radiological assessment. *Foot Ankle Surg.* 2011;17(4):308-311. doi:10.1016/j.fas.2011.01.001
2. Bakshi N, Steadman J. Association Between Hindfoot Alignment and First Metatarsal Rotation.
3. Barg A, Bailey T, Richter M, et al. Weightbearing Computed Tomography of the Foot and Ankle: Emerging Technology Topical Review. *Foot Ankle Int.* 2018;39(3):376-386. doi:10.1177/1071100717740330
4. Cai Y, Song Y, He M, et al. Global prevalence and incidence of hallux valgus: a systematic review and meta-analysis. *J Foot Ankle Res.* 2023;16(1):63. doi:10.1186/s13047-023-00661-9
5. Campbell B, Miller MC, Williams L, Conti SF. Pilot Study of a 3-Dimensional Method for Analysis of Pronation of the First Metatarsal of Hallux Valgus Patients. *Foot Ankle Int.* 2018;39(12):1449-1456. doi:10.1177/1071100718793391
6. Chell J, Dhar S. Pediatric Hallux Valgus. *Foot Ankle Clin.* 2014;19(2):235-243. doi:10.1016/j.fcl.2014.02.007
7. Chen JY, Rikhranj K, Gatot C, Lee JYY, Singh Rikhranj I. Tibial Sesamoid Position Influence on Functional Outcome and Satisfaction After Hallux Valgus Surgery. *Foot Ankle Int.* 2016;37(11):1178-1182. doi:10.1177/1071100716658456
8. Chi TD, Davitt J, Younger A, Holt S, Sangeorzan BJ. Intra- and Inter-observer Reliability of the Distal Metatarsal Articular Angle in Adult Hallux Valgus. *Foot Ankle Int.* 2002;23(8):722-726. doi:10.1177/107110070202300808
9. Choi GW, Choi WJ, Yoon HS, Lee JW. Additional surgical factors affecting the recurrence of hallux valgus after Ludloff osteotomy. 2013;95(6).
10. Clarke AJ, Conti SF, Conti M, Fadle AA, Ellis SJ, Miller MC. The Association of Crista Volume With Sesamoid Position as Measured From 3D Reconstructions of Weightbearing CT Scans. *Foot Ankle Int.* 2022;43(5):658-664. doi:10.1177/10711007211061363
11. Coillard JY, Rey R, Civinini A, et al. Spontaneous Reduction in the Intermetatarsal Angle in Distal First Metatarsal Osteotomies with No Lateral Head Displacement in Hallux Valgus. *Biomedicines.* 2024;12(7):1438. doi:10.3390/biomedicines12071438
12. Collan L, Kankare JA, Mattila K. The biomechanics of the first metatarsal bone in hallux valgus: A preliminary study utilizing a weight bearing extremity CT. *Foot Ankle Surg.* 2013;19(3):155-161. doi:10.1016/j.fas.2013.01.003

13. Conti MS, Ellis SJ. Weight-bearing CT Scans in Foot and Ankle Surgery. *J Am Acad Orthop Surg*. 2020;28(14):e595-e603. doi:10.5435/JAAOS-D-19-00700
14. Conti MS, Patel TJ, Caolo KC, et al. Correlation of Different Methods of Measuring Pronation of the First Metatarsal on Weightbearing CT Scans. *Foot Ankle Int*. 2021;42(8):1049-1059. doi:10.1177/10711007211003090
15. Conti MS, Patel TJ, Zhu J, Elliott AJ, Conti SF, Ellis SJ. Association of First Metatarsal Pronation Correction With Patient-Reported Outcomes and Recurrence Rates in Hallux Valgus. *Foot Ankle Int*. Published online October 6, 2021:107110072110469. doi:10.1177/10711007211046938
16. Conti MS, Willett JF. Effect of the Modified Lapidus Procedure on Pronation of the First Ray in Hallux Valgus.
17. Conti MS, Willett JF. Effect of the Modified Lapidus Procedure on Pronation of the First Ray in Hallux Valgus.
18. Coughlin MJ. Juvenile Hallux Valgus: Etiology and Treatment. *Foot Ankle Int*. 1995;16(11):682-697. doi:10.1177/107110079501601104
19. Cruz EP, Wagner FV, Henning C, Sanhudo JAV, Pagnussato F, Galia CR. Does Hallux Valgus Exhibit a Deformity Inherent to the First Metatarsal Bone? *J Foot Ankle Surg*. 2019;58(6):1210-1214. doi:10.1053/j.jfas.2018.09.031
20. Dayton P, Feilmeier M, Kauwe M, Hirschi J. Relationship of Frontal Plane Rotation of First Metatarsal to Proximal Articular Set Angle and Hallux Alignment in Patients Undergoing Tarsometatarsal Arthrodesis for Hallux Abducto Valgus: A Case Series and Critical Review of the Literature. *J Foot Ankle Surg*. 2013;52(3):348-354. doi:10.1053/j.jfas.2013.01.006
21. Dayton P, Kauwe M, Feilmeier M. Clarification of the Anatomic Definition of the Bunion Deformity. *J Foot Ankle Surg*. 2014;53(2):160-163. doi:10.1053/j.jfas.2013.10.007
22. De Carvalho KAM, Walt JS, Ehret A, et al. Comparison between Weightbearing-CT semiautomatic and manual measurements in Hallux Valgus. *Foot Ankle Surg*. 2022;28(4):518-525. doi:10.1016/j.fas.2022.02.014
23. Dullaert K, Hagen J, Klos K, et al. The influence of the Peroneus Longus muscle on the foot under axial loading: A CT evaluated dynamic cadaveric model study. *Clin Biomech*. 2016;34:7-11. doi:10.1016/j.clinbiomech.2016.03.001
24. Eustace S, O'Byrne J, Stack J, Stephens MM. Radiographic features that enable assessment of first metatarsal rotation: the role of pronation in hallux valgus. *Skeletal Radiol*. 1993;22(3). doi:10.1007/BF00206143
25. Eustace S, Williamson D, Wilson M, et al. Tendon shift in hallux valgus: observations at MR imaging. *Skeletal Radiol*. 1996;25(6):519-524. doi:10.1007/s002560050128

26. Gillette. Des os sesamoides.
27. Hardy RH, Clapham JCR. Observation on Hallux Valgus : Based on Controlled Series. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 10.1302/0301-620X.33B3.376. 1951.
28. Hueter C. Klinik der Gelenkkrankheiten mit Einschluss der Orthopaedie : auf anatomisch-physiologischen Grundlagen nach klinischen Beobachtungen für Ärzte und Studierende bearbeitete. Published online 1870.
29. Jastifer JR, Coughlin MJ, Schutt S, et al. Comparison of radiographic and anatomic distal metatarsal articular angle in cadaver feet. *Foot Ankle Int*. 2014;35(4):389-393. doi:10.1177/1071100714522027
30. Jeuken RM, Schotanus MGM, Kort NP, Deenik A, Jong B, Hendrickx RPM. Long-term Follow-up of a Randomized Controlled Trial Comparing Scarf to Chevron Osteotomy in Hallux Valgus Correction. *Foot Ankle Int*. 2016;37(7):687-695. doi:10.1177/1071100716639574
31. Ji L, Ding S, Zhang M, Colon Reyes K, Zhu M, Sun C. The Role of First Tarsometatarsal Joint Morphology and Instability in the Etiology of Hallux Valgus: A Case-Control Study. *Foot Ankle Int*. Published online July 1, 2023:10711007231175846. doi:10.1177/10711007231175846
32. Kaiser P, Livingston K, Miller PE, May C, Mahan S. Radiographic Evaluation of First Metatarsal and Medial Cuneiform Morphology in Juvenile Hallux Valgus. *Foot Ankle Int*. 2018;39(10):1223-1228. doi:10.1177/1071100718789696
33. Kelikian A, Serafian S. Sarrafian's Anatomy of the Foot and Ankle: descriptive, topographic, functional. In: Lippincott Williams&Wilkins. ; 2011:p 218.
34. Kim JS, Young KW. Sesamoid Position in Hallux Valgus in Relation to the Coronal Rotation of the First Metatarsal. *Foot Ankle Clin*. 2018;23(2):219-230. doi:10.1016/j.fcl.2018.01.003
35. Kim Y, Kim JS, Young KW, Naraghi R, Cho HK, Lee SY. A New Measure of Tibial Sesamoid Position in Hallux Valgus in Relation to the Coronal Rotation of the First Metatarsal in CT Scans. *Foot Ankle Int*. 2015;36(8):944-952. doi:10.1177/1071100715576994
36. Kuwano T, Nagamine R, Sakaki K, Urabe K, Iwamoto Y. New Radiographic Analysis of Sesamoid Rotation in Hallux Valgus: Comparison with Conventional Evaluation Methods. *Foot Ankle Int*. 2002;23(9):811-817. doi:10.1177/107110070202300907
37. Lalevée M, Barbachan Mansur NS, Dibbern K, et al. Coronal Plane Rotation of the Medial Column in Hallux Valgus: A Retrospective Case-Control Study. *Foot Ankle Int*. 2022;43(8):1041-1048. doi:10.1177/10711007221091810
38. Lalevée M, Barbachan Mansur NS, Lee HY, et al. Distal Metatarsal Articular Angle in Hallux Valgus Deformity. Fact or Fiction? A 3-Dimensional

- Weightbearing CT Assessment. *Foot Ankle Int.* 2022;43(4):495-503. doi:10.1177/10711007211051642
39. Lalevee M, de Cesar Netto C, ReSurg null, Boublil D, Coillard JY. Recurrence Rates With Longer-Term Follow-up After Hallux Valgus Surgical Treatment With Distal Metatarsal Osteotomies: A Systematic Review and Meta-analysis. *Foot Ankle Int.* 2023;44(3):210-222. doi:10.1177/10711007231152487
 40. Lalevée M, De Carvalho KAM, Barbachan Mansur NS, et al. Distribution, prevalence, and impact on the metatarsosesamoid complex of first metatarsal pronation in hallux valgus. *Foot Ankle Surg.* 2023;29(6):488-496. doi:10.1016/j.fas.2023.06.003
 41. Lalevée M, Dibbern K, Barbachan Mansur NS, et al. Impact of First Metatarsal Hyperpronation on First Ray Alignment: A Study in Cadavers. *Clin Orthop.* Published online June 7, 2022. doi:10.1097/CORR.0000000000002265
 42. Lee KM, Ahn S, Chung CY, Sung KH, Park MS. Reliability and Relationship of Radiographic Measurements in Hallux Valgus. *Clin Orthop.* 2012;470(9).
 43. Lintz F, Bernasconi A, Li S, et al. Diagnostic accuracy of measurements in progressive collapsing foot deformity using weight bearing computed tomography: A matched case-control study. *Foot Ankle Surg.* 2022;28(7):912-918. doi:10.1016/j.fas.2021.12.012
 44. Mahmoud K, Metikala S, Mehta SD, Fryhofer GW. The Role of Weightbearing Computed Tomography Scan in Hallux Valgus.
 45. Mortier JP, Bernard JL, Maestro M. Axial rotation of the first metatarsal head in a normal population and hallux valgus patients. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2012;98(6):677-683. doi:10.1016/j.otsr.2012.05.005
 46. Najefi AA, Katmeh R, Zaveri AK, et al. Imaging Findings and First Metatarsal Rotation in Hallux Valgus. *Foot Ankle Int.* 2022;43(5):665-675. doi:10.1177/10711007211064609
 47. Najefi AA, Malhotra K, Patel S, Cullen N, Welck M. Assessing the Rotation of the First Metatarsal on Computed Tomography Scans: A Systematic Literature Review. *Foot Ankle Int.* 2022;43(1):66-76. doi:10.1177/10711007211020676
 48. Nix SE, Vicenzino BT, Collins NJ, Smith MD. Characteristics of foot structure and footwear associated with hallux valgus: a systematic review. *Osteoarthritis Cartilage.* 2012;20(10):1059-1074. doi:10.1016/j.joca.2012.06.007
 49. Okuda R, Kinoshita M, Yasuda T, Jotoku T, Kitano N, Shima H. The Shape of the Lateral Edge of the First Metatarsal Head as a Risk Factor for Recurrence of Hallux Valgus: *J Bone Jt Surg.* 2007;89(10):2163-2172. doi:10.2106/JBJS.F.01455
 50. Ono Y, Yamaguchi S, Sadamasu A, et al. The shape of the first metatarsal head and its association with the presence of sesamoid-metatarsal joint

- osteoarthritis and the pronation angle. *J Orthop Sci.* 2020;25(4):658-663. doi:10.1016/j.jos.2019.06.013
51. Ota T, Nagura T, Kokubo T, et al. Etiological factors in hallux valgus, a three-dimensional analysis of the first metatarsal. *J Foot Ankle Res.* 2017;10(1):43. doi:10.1186/s13047-017-0226-1
 52. Ota T, Nagura T, Yamada Y, et al. Effect of natural full weight-bearing during standing on the rotation of the first metatarsal bone. *Clin Anat.* 2019;32(5):715-721. doi:10.1002/ca.23385
 53. Park CH, Lee WC. Recurrence of Hallux Valgus Can Be Predicted from Immediate Postoperative Non-Weight-Bearing Radiographs. *J Bone Jt Surg.* 2017;99(14):1190-1197. doi:10.2106/JBJS.16.00980
 54. Park HW, Lee KB, Chung JY, Kim MS. Comparison of outcomes between proximal and distal chevron osteotomy, both with supplementary lateral soft-tissue release, for severe hallux valgus deformity: A prospective randomised controlled trial. *Bone Jt J.* 2013;95-B(4):510-516. doi:10.1302/0301-620X.95B4.30464
 55. Perera AM, Mason L, Stephens MM. The Pathogenesis of Hallux Valgus. *J Bone Jt Surg.* 2011;93(17):1650-1661. doi:10.2106/JBJS.H.01630
 56. Piggott H. The natural history of hallux valgus in adolescence and early adult life. *The Journal of Bone and Joint Surgery.* 1960.
 57. Piqué-Vidal C, Solé MT, Antich J. Hallux Valgus Inheritance: Pedigree Research in 350 Patients With Bunion Deformity. *J Foot Ankle Surg.* 2007;46(3):149-154. doi:10.1053/j.jfas.2006.10.011
 58. Ramdass R, Meyr AJ. The Multiplanar Effect of First Metatarsal Osteotomy on Sesamoid Position. *J Foot Ankle Surg.* 2010;49(1):63-67. doi:10.1053/j.jfas.2009.07.025
 59. Randich JR, John KJ, Gomez K, Bush W. Frontal Plane Rotation of the First Ray in Hallux Valgus using Standing Computerized Tomography (CT). *J Foot Ankle Surg.* 2021;60(3):489-493. doi:10.1053/j.jfas.2020.05.022
 60. Richter M, Duerr F, Schilke R, Zech S, Meissner SA, Naef I. Semi-automatic software-based 3D-angular measurement for Weight-Bearing CT (WBCT) in the foot provides different angles than measurement by hand. *Foot Ankle Surg.* 2022;28(7):919-927. doi:10.1016/j.fas.2022.01.001
 61. Richter M, Lintz F, de Cesar Netto C, Barg A, Burssens A. Results of more than 11,000 scans with weightbearing CT - Impact on costs, radiation exposure, and procedure time. *Foot Ankle Surg Off J Eur Soc Foot Ankle Surg.* 2020;26(5):518-522. doi:10.1016/j.fas.2019.05.019
 62. Richter M, Seidl B, Zech S, Hahn S. PedCAT for 3D-imaging in standing position allows for more accurate bone position (angle) measurement than

- radiographs or CT. *Foot Ankle Surg.* 2014;20(3):201-207. doi:10.1016/j.fas.2014.04.004
63. Richter M, Zech S, Hahn S. PedCAT for Radiographic 3D-Imaging in standing position. *Fuß Sprunggelenk.* 2015;13(2):85-102. doi:10.1016/j.fuspru.2015.04.001
 64. Rojas EO, Mansur NS, Dibbern KN, et al. Weightbearing Computed Tomography for Assessment of Foot and Ankle Deformities: The Iowa Experience. *Foot Ankle Orthop.* 2022;7(1):2473011421S0041. doi:10.1177/2473011421S00419
 65. Sadamasu A, Yamaguchi S, Kimura S, et al. Influence of foot position on the measurement of first metatarsal axial rotation using the first metatarsal axial radiographs. *J Orthop Sci.* 2020;25(4):664-670. doi:10.1016/j.jos.2019.09.013
 66. Saltzman CL, Brandser EA, Anderson CM, Berbaum KS, Brown TD. Coronal Plane Rotation of the First Metatarsal. *Foot Ankle Int.* 1996;17(3):157-161. doi:10.1177/107110079601700307
 67. Sangoi D, Ranjit S, Bernasconi A, et al. 2D Manual vs 3D Automated Assessment of Alignment in Normal and Charcot-Marie-Tooth Cavovarus Feet Using Weightbearing CT. *Foot Ankle Int.* 2022;43(7):973-982. doi:10.1177/10711007221084308
 68. Scheele CB, Christel ST, Fröhlich I, et al. A cone beam CT based 3D-assessment of bony forefoot geometry after modified Lapidus arthrodesis. *Foot Ankle Surg.* 2020;26(8):883-889. doi:10.1016/j.fas.2019.11.006
 69. Steadman J. Normative Distribution of First Metatarsal Axial Rotation.
 70. Steadman J, Barg A, Saltzman CL. First Metatarsal Rotation in Hallux Valgus Deformity. *Foot Ankle Int.* 2021;42(4):510-522. doi:10.1177/1071100721997149
 71. Suojärvi N, Tampio J, Lindfors N, Waris E. COMPUTER-AIDED 3D analysis of anatomy and radiographic parameters of the distal radius. *Clin Anat.* 2021;34(4):574-580. doi:10.1002/ca.23615
 72. Vittetoe DA, Saltzman CL, Krieg JC, Brown TD. Validity and Reliability of the First Distal Metatarsal Articular Angle. *Foot Ankle Int.* 1994;15(10):541-547. doi:10.1177/107110079401501004
 73. WBCT ISG, Burssens A, Peeters J, et al. Reliability and correlation analysis of computed methods to convert conventional 2D radiological hindfoot measurements to a 3D setting using weightbearing CT. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2018;13(12):1999-2008. doi:10.1007/s11548-018-1727-5
 74. Wei RX, Ko VM chi, Chui EC sing, et al. Investigation on the site of coronal deformities in Hallux valgus. *Sci Rep.* 2023;13(1):1815. doi:10.1038/s41598-023-28469-4

75. Welck MJ, Singh D, Cullen N, Goldberg A. Evaluation of the 1st metatarso-sesamoid joint using standing CT — The Stanmore classification. *Foot Ankle Surg.* 2018;24(4):314-319. doi:10.1016/j.fas.2017.03.005
76. Yokozuka M, Okazaki K. Characteristics of hindfoot morphology and ankle range of motion in young women with hallux valgus. *J Foot Ankle Res.* 2023;16(1):64. doi:10.1186/s13047-023-00666-4
77. Zaidi R, Sangoi D, Cullen N, Patel S, Welck M, Malhotra K. Semi-automated 3-dimensional analysis of the normal foot and ankle using weight bearing CT – A report of normal values and bony relationships. *Foot Ankle Surg.* 2023;29(2):111-117. doi:10.1016/j.fas.2022.12.001

Abstract

Introduction :

The pronation of the first metatarsal (M1) in hallux valgus (HV) is currently the subject of a growing body of scientific research. However, several methods of manual measurement have been developed, providing heterogeneous results.

Therefore, our objective was to develop semi-automatic 3D WBCT measurements to compare coronal rotation of M1 head relative to the ground, M1 intrinsic torsion and valgus deviation of M1 distal articular surface (DMAA) in HV and controls.

Material and method :

Forty-four symptomatic HV and 44 matched controls were retrospectively enrolled in this study, all of whom had undergone WBCT acquisition. Semi-automated bone segmentation was performed. Two methods have been developed to assess position of the M1 head. One was based on automatic fitting of a cylinder in the head, and the other on automatic selection of the position of the sesamoid gutters. Similarly, two methods have been developed to assess the position of the M1 base. One was defined using principal component analyses (PCA) of the proximal articular surface of M1, and the other using the longest diagonal of the M1 base.

Results :

The two groups did not differ according to age ($p=0.71$), sex ($p=0.8$) and BMI ($p=1$). First metatarsal head rotation relative to the ground was respectively 8.9 ± 8.4 degrees and 2.1 ± 6.4 degrees (cylinder method, $p<0.001$) and 9 ± 8.3 degrees and 0.7 ± 6.8 degrees (gutters method, $p<0.001$) in HV control groups.

Combining the different sets of head and base measurements, the increase in M1 intrinsic torsion in pronation in HV ranged from 2 to 5 degrees.

The DMAA was 11.4 ± 6.9 degrees in the HV group and 5.6 ± 4.7 degrees in the control group ($p<0.001$).

Conclusion:

Using semi-automatic 3D WBCT measurement we found that HV showed an increase in M1 head pronation relative to the ground of 7 to 8 degrees greater than controls, with an increase in M1 intrinsic torsion in pronation of 2 to 5 degrees and an increase in valgus deviation of the M1 distal articular surface of approximately 6 degrees.