



**HAL**  
open science

# Analyse quantitative de l'articulation sous-talienne en scanner 4D : preuve du concept avec évaluation cadavérique et chez des sujets sains

Anne-Sophie Formery

► **To cite this version:**

Anne-Sophie Formery. Analyse quantitative de l'articulation sous-talienne en scanner 4D : preuve du concept avec évaluation cadavérique et chez des sujets sains. Sciences du Vivant [q-bio]. 2016. hal-01931930

**HAL Id: hal-01931930**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01931930>**

Submitted on 23 Nov 2018

**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.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

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

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

Contact : [ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

2016

THESE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR EN MEDECINE**

Présentée et soutenue publiquement

dans le cadre du troisième cycle de Médecine Spécialisée

par

**Anne-Sophie FORMERY**

Le 26 février 2016

**ANALYSE QUANTITATIVE DE L'ARTICULATION SOUS-TALIENNE EN  
SCANNER 4D : PREUVE DU CONCEPT AVEC EVALUATION CADAVERIQUE ET  
CHEZ DES SUJETS SAINS**

Examineurs de la thèse :

M. le Professeur A. BLUM	Président
M. le Professeur D. MAINARD	Juge
M. le Professeur J. FELBLINGER	Juge
M. le Docteur P. TEIXEIRA	Juge
Mme le Docteur I. LOIRET	Juge



**Président de l'Université de Lorraine :**  
**Professeur Pierre MUTZENHARDT**

**Doyen de la Faculté de Médecine**  
**Professeur Marc BRAUN**

**Vice-doyens**

Pr Karine ANGIOI-DUPREZ, Vice-Doyen  
Pr Marc DEBOUVERIE, Vice-Doyen

**Assesseurs :**

**Premier cycle :** Dr Guillaume GAUCHOTTE  
**Deuxième cycle :** Pr Marie-Reine LOSSER  
**Troisième cycle :** Pr Marc DEBOUVERIE

*Innovations pédagogiques :* Pr Bruno CHENUJEL  
*Formation à la recherche :* Dr Nelly AGRINIER  
*Animation de la recherche clinique :* Pr François ALLA

*Affaires juridiques et Relations extérieures :* Dr Frédérique CLAUDOT  
*Vie Facultaire et SIDES :* Dr Laure JOLY  
*Relations Grande Région :* Pr Thomas FUCHS-BUDER  
*Etudiant :* M. Lucas SALVATI

**Chargés de mission**

*Bureau de docimologie :* Dr Guillaume GAUCHOTTE  
*Commission de prospective facultaire :* Pr Pierre-Edouard BOLLAERT  
*Universitarisation des professions paramédicales :* Pr Annick BARBAUD  
*Orthophonie :* Pr Cécile PARIETTI-WINKLER  
*PACES :* Dr Chantal KOHLER  
*Plan Campus :* Pr Bruno LEHEUP  
*International :* Pr Jacques HUBERT

=====  
**DOYENS HONORAIRES**

Professeur Jean-Bernard DUREUX - Professeur Jacques ROLAND - Professeur Patrick NETTER  
Professeur Henry COUDANE

=====

**PROFESSEURS HONORAIRES**

Jean-Marie ANDRE - Daniel ANTHOINE - Alain AUBREGE - Gérard BARROCHE - Alain BERTRAND - Pierre BEY  
Marc-André BIGARD - Patrick BOISSEL - Pierre BORDIGONI - Jacques BORRELLY - Michel BOULANGE  
Jean-Louis BOUTROY - Jean-Claude BURDIN - Claude BURLET - Daniel BURNEL - Claude CHARDOT -  
François CHERRIER - Jean-Pierre CRANCE - Gérard DEBRY - Jean-Pierre DELAGOUTTE - Emile de  
LAVERGNE - Jean-Pierre DESCHAMPS  
Jean-Bernard DUREUX - Gérard FIEVE - Jean FLOQUET - Robert FRISCH - Alain GAUCHER - Pierre  
GAUCHER  
Hubert GERARD - Jean-Marie GILGENKRANTZ - Simone GILGENKRANTZ - Oliéro GUERCI - Claude HURIET  
Christian JANOT - Michèle KESSLER - François KOHLER - Jacques LACOSTE - Henri LAMBERT - Pierre  
LANDES  
Marie-Claire LAXENAIRE - Michel LAXENAIRE - Jacques LECLERE - Pierre LEDERLIN - Bernard LEGRAS  
Jean-Pierre MALLIÉ - Michel MANCIAUX - Philippe MANGIN - Pierre MATHIEU - Michel MERLE - Denise  
MONERET-VAUTRIN - Pierre MONIN - Pierre NABET - Jean-Pierre NICOLAS - Pierre PAYSANT - Francis PENIN  
- Gilbert PERCEBOIS  
Claude PERRIN - Guy PETIET - Luc PICARD - Michel PIERSON - François PLENAT - Jean-Marie POLU -  
Jacques POUREL - Jean PREVOT - Francis RAPHAEL - Antoine RASPILLER - Denis REGENT - Michel  
RENARD - Jacques ROLAND  
René-Jean ROYER - Daniel SCHMITT - Michel SCHMITT - Michel SCHWEITZER - Daniel SIBERTIN-BLANC -  
Claude SIMON - Danièle SOMMELET - Jean-François STOLTZ - Michel STRICKER - Gilbert THIBAUT - Hubert  
UFFHOLTZ - Gérard VAILLANT - Paul VERT - Colette VIDAILHET - Michel VIDAILHET - Jean-Pierre VILLEMOT  
- Michel WAYOFF - Michel WEBER

=====

## **PROFESSEURS ÉMÉRITES**

Professeur Pierre BEY - Professeur Marc-André BIGARD – Professeur Jean-Pierre CRANCE  
Professeur Jean-Pierre DELAGOUTTE – Professeur Jean-Marie GILGENKRANTZ – Professeure Simone GILGENKRANTZ – Professeur Philippe HARTEMANN - Professeure Michèle KESSLER - Professeur Jacques LECLÈRE

Professeur Alain LE FAOU – Professeure Denise MONERET-VAUTRIN - Professeur Pierre MONIN  
Professeur Jean-Pierre NICOLAS - Professeur Luc PICARD – Professeur François PLENAT - Professeur Jacques POUREL – Professeur Michel SCHMITT – Professeur Daniel SIBERTIN-BLANC - Professeur Paul VERT - Professeur Michel VIDALHET

---

---

## **PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS**

*(Disciplines du Conseil National des Universités)*

### **42<sup>ème</sup> Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE**

#### **1<sup>ère</sup> sous-section : (Anatomie)**

Professeur Gilles GROSDIDIER - Professeur Marc BRAUN

#### **2<sup>ème</sup> sous-section : (Cytologie et histologie)**

Professeur Bernard FOLIGUET – Professeur Christo CHRISTOV

#### **3<sup>ème</sup> sous-section : (Anatomie et cytologie pathologiques)**

Professeur Jean-Michel VIGNAUD

### **43<sup>ème</sup> Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDECINE**

#### **1<sup>ère</sup> sous-section : (Biophysique et médecine nucléaire)**

Professeur Gilles KARCHER – Professeur Pierre-Yves MARIE – Professeur Pierre OLIVIER

#### **2<sup>ème</sup> sous-section : (Radiologie et imagerie médecine)**

Professeur Michel CLAUDON – Professeure Valérie CROISÉ-LAURENT

Professeur Serge BRACARD – Professeur Alain BLUM – Professeur Jacques FELBLINGER - Professeur René ANXIONNAT

### **44<sup>ème</sup> Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION**

#### **1<sup>ère</sup> sous-section : (Biochimie et biologie moléculaire)**

Professeur Jean-Louis GUÉANT – Professeur Jean-Luc OLIVIER – Professeur Bernard NAMOUR

#### **2<sup>ème</sup> sous-section : (Physiologie)**

Professeur François MARCHAL – Professeur Bruno CHENUUEL – Professeur Christian BEYAERT

#### **4<sup>ème</sup> sous-section : (Nutrition)**

Professeur Olivier ZIEGLER – Professeur Didier QUILLIOT - Professeure Rosa-Maria RODRIGUEZ-GUEANT

### **45<sup>ème</sup> Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE**

#### **1<sup>ère</sup> sous-section : (Bactériologie – virologie ; hygiène hospitalière)**

Professeur Alain LE FAOU - Professeur Alain LOZNIIEWSKI – Professeure Evelyne SCHVOERER

#### **2<sup>ème</sup> sous-section : (Parasitologie et Mycologie)**

Professeure Marie MACHOUART

#### **3<sup>ème</sup> sous-section : (Maladies infectieuses ; maladies tropicales)**

Professeur Thierry MAY – Professeur Christian RABAUD – Professeure Céline PULCINI

### **46<sup>ème</sup> Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ**

#### **1<sup>ère</sup> sous-section : (Épidémiologie, économie de la santé et prévention)**

Professeur Philippe HARTEMANN – Professeur Serge BRIANÇON - Professeur Francis GUILLEMIN

Professeur Denis ZMIROU-NAVIER – Professeur François ALLA

#### **2<sup>ème</sup> sous-section : (Médecine et santé au travail)**

Professeur Christophe PARIS

#### **3<sup>ème</sup> sous-section : (Médecine légale et droit de la santé)**

Professeur Henry COUDANE

#### **4<sup>ème</sup> sous-section : (Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication)**

Professeure Eliane ALBUSSON – Professeur Nicolas JAY

### **47<sup>ème</sup> Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE**

#### **1<sup>ère</sup> sous-section : (Hématologie ; transfusion)**

Professeur Pierre FEUGIER

#### **2<sup>ème</sup> sous-section : (Cancérologie ; radiothérapie)**

Professeur François GUILLEMIN – Professeur Thierry CONROY - Professeur Didier PEIFFERT

Professeur Frédéric MARCHAL

#### **3<sup>ème</sup> sous-section : (Immunologie)**

Professeur Gilbert FAURE – Professeur Marcelo DE CARVALHO-BITTENCOURT

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Génétique)**

Professeur Philippe JONVEAUX – Professeur Bruno LEHEUP

**48<sup>ème</sup> Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE, PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Anesthésiologie - réanimation ; médecine d'urgence)**

Professeur Claude MEISTELMAN – Professeur Hervé BOUAZIZ - Professeur Gérard AUDIBERT  
Professeur Thomas FUCHS-BUDER – Professeure Marie-Reine LOSSER

**2<sup>ème</sup> sous-section : (Réanimation ; médecine d'urgence)**

Professeur Alain GERARD - Professeur Pierre-Édouard BOLLAERT - Professeur Bruno LÉVY – Professeur Sébastien GIBOT

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie)**

Professeur Patrick NETTER – Professeur Pierre GILLET – Professeur J.Y. JOUZEAU (*pharmacien*)

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Thérapeutique ; médecine d'urgence ; addictologie)**

Professeur François PAILLE – Professeur Faiez ZANNAD - Professeur Patrick ROSSIGNOL

**49<sup>ème</sup> Section : PATHOLOGIE NERVEUSE ET MUSCULAIRE, PATHOLOGIE MENTALE, HANDICAP ET RÉÉDUCATION**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Neurologie)**

Professeur Hervé VESPIGNANI - Professeur Xavier DUCROCQ – Professeur Marc DEBOUVERIE  
Professeur Luc TAILLANDIER - Professeur Louis MAILLARD – Professeure Louise TYVAERT

**2<sup>ème</sup> sous-section : (Neurochirurgie)**

Professeur Jean-Claude MARCHAL – Professeur Jean AUQUE – Professeur Olivier KLEIN  
Professeur Thierry CIVIT - Professeure Sophie COLNAT-COULBOIS

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Psychiatrie d'adultes ; addictologie)**

Professeur Jean-Pierre KAHN – Professeur Raymond SCHWAN

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Pédopsychiatrie ; addictologie)**

Professeur Bernard KABUTH

**5<sup>ème</sup> sous-section : (Médecine physique et de réadaptation)**

Professeur Jean PAYSANT

**50<sup>ème</sup> Section : PATHOLOGIE OSTÉO-ARTICULAIRE, DERMATOLOGIE ET CHIRURGIE PLASTIQUE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Rhumatologie)**

Professeure Isabelle CHARY-VALCKENAERE – Professeur Damien LOEUILLE

**2<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie orthopédique et traumatologique)**

Professeur Daniel MOLE - Professeur Didier MAINARD - Professeur François SIRVEAUX – Professeur Laurent GALOIS

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Dermato-vénéréologie)**

Professeur Jean-Luc SCHMUTZ – Professeure Annick BARBAUD

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie)**

Professeur François DAP - Professeur Gilles DAUTEL - Professeur Etienne SIMON

**51<sup>ème</sup> Section : PATHOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE ET VASCULAIRE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Pneumologie ; addictologie)**

Professeur Yves MARTINET – Professeur Jean-François CHABOT – Professeur Ari CHAOUAT

**2<sup>ème</sup> sous-section : (Cardiologie)**

Professeur Etienne ALIOT – Professeur Yves JUILLIERE  
Professeur Nicolas SADOUL - Professeur Christian de CHILLOU DE CHURET – Professeur Edoardo CAMENZIND

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie thoracique et cardiovasculaire)**

Professeur Thierry FOLLIGUET – Professeur Juan-Pablo MAUREIRA

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire)**

Professeur Denis WAHL – Professeur Sergueï MALIKOV

**52<sup>ème</sup> Section : MALADIES DES APPAREILS DIGESTIF ET URINAIRE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie)**

Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI – Professeur Laurent PEYRIN-BIROULET

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Néphrologie)**

Professeure Dominique HESTIN – Professeur Luc FRIMAT

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Urologie)**

Professeur Jacques HUBERT – Professeur Pascal ESCHWEGE

**53<sup>ème</sup> Section : MÉDECINE INTERNE, GÉRIATRIE ET CHIRURGIE GÉNÉRALE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; médecine générale ; addictologie)**

Professeur Jean-Dominique DE KORWIN - Professeur Athanase BENETOS  
Professeure Gisèle KANNY – Professeure Christine PERRET-GUILLAUME  
**2<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie générale)**  
Professeur Laurent BRESLER - Professeur Laurent BRUNAUD – Professeur Ahmet AYAV

**54<sup>ème</sup> Section : DÉVELOPPEMENT ET PATHOLOGIE DE L'ENFANT, GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE, ENDOCRINOLOGIE ET REPRODUCTION**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Pédiatrie)**  
Professeur Jean-Michel HASCOET - Professeur Pascal CHASTAGNER - Professeur François FEILLET  
Professeur Cyril SCHWEITZER – Professeur Emmanuel RAFFO – Professeure Rachel VIEUX  
**2<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie infantile)**  
Professeur Pierre JOURNEAU – Professeur Jean-Louis LEMELLE  
**3<sup>ème</sup> sous-section : (Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale)**  
Professeur Philippe JUDLIN – Professeur Olivier MOREL  
**4<sup>ème</sup> sous-section : (Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; gynécologie médicale)**  
Professeur Georges WERYHA – Professeur Marc KLEIN – Professeur Bruno GUERCI

**55<sup>ème</sup> Section : PATHOLOGIE DE LA TÊTE ET DU COU**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Oto-rhino-laryngologie)**  
Professeur Roger JANKOWSKI – Professeure Cécile PARIETTI-WINKLER  
**2<sup>ème</sup> sous-section : (Ophtalmologie)**  
Professeur Jean-Luc GEORGE – Professeur Jean-Paul BERROD – Professeure Karine ANGIOI

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie)**  
Professeur Jean-François CHASSAGNE – Professeure Muriel BRIX

=====

**PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS**

**61<sup>ème</sup> Section : GÉNIE INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL**  
Professeur Walter BLONDEL

**64<sup>ème</sup> Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE**  
Professeure Sandrine BOSCHI-MULLER

=====

**PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE**  
Professeur Jean-Marc BOIMN

**PROFESSEUR ASSOCIÉ DE MÉDECINE GÉNÉRALE**  
Professeur associé Paolo DI PATRIZIO

=====

**MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS**

**42<sup>ème</sup> Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Anatomie)**  
Docteur Bruno GRIGNON – Docteure Manuela PEREZ  
**2<sup>ème</sup> sous-section : (Cytologie et histologie)**  
Docteur Edouard BARRAT - Docteure Françoise TOUATI – Docteure Chantal KOHLER  
**3<sup>ème</sup> sous-section : (Anatomie et cytologie pathologiques)**  
Docteure Aude MARCHAL – Docteur Guillaume GAUCHOTTE

**43<sup>ème</sup> Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDECINE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Biophysique et médecine nucléaire)**  
Docteur Jean-Claude MAYER - Docteur Jean-Marie ESCANYE  
**2<sup>ème</sup> sous-section : (Radiologie et imagerie médecine)**  
Docteur Damien MANDRY – Docteur Pedro TEIXEIRA

**44<sup>ème</sup> Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Biochimie et biologie moléculaire)**  
Docteure Sophie FREMONT - Docteure Isabelle GASTIN – Docteur Marc MERTEN  
Docteure Catherine MALAPLATE-ARMAND - Docteure Shyue-Fang BATTAGLIA – Docteur Abderrahim OUSSALAH

**2<sup>ème</sup> sous-section : (Physiologie)**

Docteur Mathias POUSSEL – Docteure Silvia VARECHOVA

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Biologie Cellulaire)**

Docteure Véronique DECOT-MAILLERET

**45<sup>ème</sup> Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Bactériologie – Virologie ; hygiène hospitalière)**

Docteure Véronique VENARD – Docteure Hélène JEULIN – Docteure Corentine ALAUZET

**2<sup>ème</sup> sous-section : (Parasitologie et mycologie (type mixte : biologique))**

Docteure Anne DEBOURGOGNE (sciences)

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Maladies Infectieuses ; Maladies Tropicales)**

Docteure Sandrine HENARD

**46<sup>ème</sup> Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Epidémiologie, économie de la santé et prévention)**

Docteur Alexis HAUTEMANIÈRE – Docteure Frédérique CLAUDOT – Docteur Cédric BAUMANN

Docteure Nelly AGRINIER

**2<sup>ème</sup> sous-section (Médecine et Santé au Travail)**

Docteure Isabelle THAON

**3<sup>ème</sup> sous-section (Médecine légale et droit de la santé)**

Docteur Laurent MARTRILLE

**47<sup>ème</sup> Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Hématologie ; transfusion : option hématologique (type mixte : clinique))**

Docteur Aurore PERROT

**2<sup>ème</sup> sous-section : (Cancérologie ; radiothérapie : cancérologie (type mixte : biologique))**

Docteure Lina BOLOTINE

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Génétique)**

Docteur Christophe PHILIPPE – Docteure Céline BONNET

**48<sup>ème</sup> Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE, PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE**

**2<sup>ème</sup> sous-section : (Réanimation ; Médecine d'Urgence)**

Docteur Antoine KIMMOUN (stagiaire)

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique)**

Docteure Françoise LAPICQUE – Docteur Nicolas GAMBIER – Docteur Julien SCALA-BERTOLA

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Thérapeutique ; Médecine d'Urgence ; Addictologie)**

Docteur Nicolas GIRERD (stagiaire)

**50<sup>ème</sup> Section : PATHOLOGIE OSTÉO-ARTICULAIRE, DERMATOLOGIE ET CHIRURGIE PLASTIQUE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Rhumatologie)**

Docteure Anne-Christine RAT

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Dermato-vénérologie)**

Docteure Anne-Claire BURSZEJN

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie)**

Docteure Laetitia GOFFINET-PLEUTRET

**51<sup>ème</sup> Section : PATHOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE ET VASCULAIRE**

**3<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire)**

Docteur Fabrice VANHUYSE

**4<sup>ème</sup> sous-section : (Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire)**

Docteur Stéphane ZUILY

**52<sup>ème</sup> Section : MALADIES DES APPAREILS DIGESTIF ET URINAIRE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie)**

Docteur Jean-Baptiste CHEVAUX

**53<sup>ème</sup> Section : MÉDECINE INTERNE, GÉRIATRIE et CHIRURGIE GÉNÉRALE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; médecine générale ; addictologie)**

Docteure Laure JOLY



**55<sup>ème</sup> Section : OTO-RHINO-LARYNGOLOGIE**

**1<sup>ère</sup> sous-section : (Oto-Rhino-Laryngologie)**

Docteur Patrice GALLET (*stagiaire*)

=====

**MAÎTRE DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE**

Docteure Elisabeth STEYER

=====

**MAÎTRES DE CONFÉRENCES**

**5<sup>ème</sup> Section : SCIENCES ÉCONOMIQUES**

Monsieur Vincent LHUILLIER

**19<sup>ème</sup> Section : SOCIOLOGIE, DÉMOGRAPHIE**

Madame Joëlle KIMITS

**60<sup>ème</sup> Section : MÉCANIQUE, GÉNIE MÉCANIQUE, GÉNIE CIVIL**

Monsieur Alain DURAND

**61<sup>ème</sup> Section : GÉNIE INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL**

Monsieur Jean REBSTOCK

**64<sup>ème</sup> Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE**

Madame Marie-Claire LANHERS – Monsieur Pascal REBOUL – Monsieur Nick RAMALANJAONA

**65<sup>ème</sup> Section : BIOLOGIE CELLULAIRE**

Monsieur Jean-Louis GELLY - Madame Ketsia HESS – Monsieur Hervé MEMBRE

Monsieur Christophe NEMOS - Madame Natalia DE ISLA - Madame Nathalie MERCIER – Madame Céline HUSELSTEIN

**66<sup>ème</sup> Section : PHYSIOLOGIE**

Monsieur Nguyen TRAN

=====

**MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS**

**Médecine Générale**

Docteure Sophie SIEGRIST - Docteur Arnaud MASSON - Docteur Pascal BOUCHE – Docteur Olivier BOUCHY

=====

**DOCTEURS HONORIS CAUSA**

Professeur Charles A. BERRY (1982)  
*Centre de Médecine Préventive, Houston (U.S.A)*

Professeur Pierre-Marie GALETTI (1982)  
*Brown University, Providence (U.S.A)*

Professeure Mildred T. STAHLMAN (1982)  
*Vanderbilt University, Nashville (U.S.A)*

Professeur Théodore H. SCHIEBLER (1989)  
*Institut d'Anatomie de Würzburg (R.F.A)*  
*Université de Pennsylvanie (U.S.A)*

Professeur Mashaki KASHIWARA (1996)  
*Research Institute for Mathematical Sciences de Kyoto (JAPON)*

Professeure Maria DELVORIA-PAPADOPOULOS (1996)

Professeur Ralph GRÄSBECK (1996)  
*Université d'Helsinki (FINLANDE)*

Professeur Duong Quang TRUNG (1997)  
*Université d'Hô Chi Minh-Ville (VIËTNAM)*

Professeur Daniel G. BICHET (2001)  
*Université de Montréal (Canada)*

Professeur Marc LEVENSTON (2005)  
*Institute of Technology, Atlanta (USA)*

Professeur Brian BURCHELL (2007)  
*Université de Dundee (Royaume-Uni)*

Professeur Yunfeng ZHOU (2009)  
*Université de Wuhan (CHINE)*

Professeur David ALPERS (2011)  
*Université de Washington (U.S.A)*

Professeur Martin EXNER (2012)  
*Université de Bonn (ALLEMAGNE)*

**A notre Maître et Président de Thèse,**

**Monsieur le Professeur Alain BLUM**

Professeur en Radiologie et Imagerie médicale

Nous vous remercions de l'honneur que vous nous faites en acceptant la Présidence de notre thèse.

Sans votre soutien ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

Nous vous remercions de la confiance que vous nous avez accordée tout au long de cette période.

Nous avons eu le privilège de bénéficier de vos enseignements durant nos semestres d'internat.

Vos connaissances sont pour nous un exemple.

Nous nous réjouissons de poursuivre notre formation au sein de votre équipe et de bénéficier de votre savoir et votre expérience dans l'apprentissage de la radiologie.

Veillez recevoir ici l'expression de notre sincère gratitude et de notre profonde admiration.

**A notre Maître et Juge,**

**Monsieur le Professeur Didier MAINARD**

Professeur en Chirurgie orthopédique et Traumatologique

Nous sommes très sensible à l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger notre travail et nous espérons qu'il saura retenir votre intérêt.

Veillez recevoir l'assurance de notre gratitude et de notre profond respect.

**A notre Maître et Juge,**

**Monsieur le Professeur Jacques FELBLINGER**

Professeur en Radiologie et Imagerie médicale

Vous nous faites l'honneur de juger notre travail.

Nous vous remercions de l'intérêt que vous avez immédiatement porté au sujet.

Veillez recevoir l'assurance de notre gratitude et de notre profond respect.

**A notre Maître et Juge,**

**Monsieur le Docteur Pedro TEIXEIRA**

Docteur en Radiologie et Imagerie médicale

Nous vous remercions de l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger notre thèse.

Sans votre soutien et vos conseils ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

A plusieurs reprises vous avez su prendre le temps de nous apporter votre aide pour la conduite de différents travaux.

Votre disponibilité et votre gentillesse font que chacun peut trouver auprès de vous le conseil dont il a besoin. Vos connaissances en radiologie et votre dynamisme sont pour nous un exemple.

Travailler à vos côtés est un réel plaisir.

Nous espérons pouvoir vous témoigner par ce travail notre sincère reconnaissance.

**A notre Maitre et Juge,**

**Madame le Docteur Isabelle LOIRET,**

Docteur en Médecine physique et Réadaptation,

Vous nous faites l'honneur de juger notre travail.

Nous vous remercions de l'intérêt que vous avez immédiatement porté au sujet.

Veillez recevoir l'assurance de notre gratitude et de notre profond respect.

## **A mes Maîtres d'internat**

Monsieur le Professeur D. Régent

Monsieur le Professeur A. Blum

Madame le Professeur V. Croisé-Laurent

Monsieur le Professeur S. Bracard

Monsieur le Professeur R. Anxionnat

Monsieur le Professeur M. Braun

Monsieur le Professeur M. Claudon

Monsieur le Docteur D. Thomas

Monsieur le Docteur S. Ben Mahmoud

Madame le Docteur K. Polet-Lefebvre

## **Et à leurs collaborateurs**

Monsieur le Docteur Pedro Teixeira  
Monsieur le Docteur Matthias Louis  
Madame le Docteur Ariane Raymond  
Madame le Docteur Sabine Aptel  
Madame le Docteur Sophie Lecoq  
Monsieur le Docteur Guillaume Lux  
Monsieur le Docteur Benoît Osemont  
Monsieur le Docteur Guillaume Oldrini  
Monsieur le Docteur Jonhy Wassel  
Monsieur le Docteur Alban Gervaise  
Madame le Docteur Andrea Moisei  
Monsieur le Docteur Alexandre Oliver  
Monsieur le Docteur François Jausset  
Monsieur le Docteur Vincent Lombard  
Madame le Docteur Emmanuelle Schmitt  
Monsieur le Docteur Damien Mandry  
Madame le Docteur Andrea Sido  
Madame le Docteur Sylvie Béot  
Monsieur le Docteur Hervé Boccaccini  
Monsieur le Docteur Christophe Bazin  
Madame le Docteur Marie-Alexia Ottenin  
Madame le Docteur Laure Rivail  
Madame le Docteur Sophie Planel  
Monsieur le Docteur Grégory Lesanne  
Madame le Docteur Anne-Laure Derelle  
Madame le Docteur Charlotte Barbier  
Monsieur le Docteur Romain Tonnelet  
Madame le Docteur Montserrat Domingo  
Monsieur le Docteur Bruno Grignon  
Madame le Docteur Anne Chanson  
Madame le Docteur Pascale Bach-Segura



Madame le Docteur Marion Grandhayé  
Monsieur le Docteur Rachid Kechidi  
Monsieur le Docteur Jean-Baptiste Meyer  
Monsieur le Docteur Francis Pierrucci  
Madame le Docteur Sylvie Petit-Denet  
Madame le Docteur Luminita Jeager-Teodor  
Monsieur le Docteur Yalcin Yagdigul  
Monsieur le Docteur Philippe Denis

Veillez recevoir l'expression de notre profond respect et de notre gratitude pour avoir participé à notre formation.

Au Docteur Guillaume Lux pour son aide précieuse et ses conseils au cours ce travail et tout au long de mon internat.

Au Docteur Adrien Jacquot, qui a effectué les dissections, pour sa disponibilité et sa gentillesse.

**A toutes les personnes rencontrées au cours de mon internat et avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.**

**Et en particulier,**

A toutes les équipes de manipulateurs et secrétaires des services d'Imagerie Guilloz, Brabois Adulte, Neuroradiologie, d'Imagerie du Centre Hospitalier Emile Durkheim à Epinal, de la maternité et du service de Médecine Nucléaire de Mercy.

**A tous mes co internes ...**

**Stéphanie, Florence, Radwan, Mélanie, Anne, Guillaume L, Sarah B, Xavier, Clémence Balaj, Liang, Omar B, Olivier, Muhammed, Matthieu B, Charles, Jacques, Auréline, Rémi, Clémence Burgain, Marine, Chloé, Amir, Basile, Hubert, Valérie, Sophie et Matthieu C**

**A Stéphanie et Radwan**, notamment, avec qui j'ai eu le plaisir et la chance de travailler pendant deux années d'internat (et qui ont eu le mérite de me supporter ;-). Vous êtes des co internes au top !

**A Florence et Mélanie**, plus particulièrement, pour notre amitié et tous les bons moments passés ensemble... j'espère qu'il y en aura beaucoup d'autres !

**A Jacques, Sophie et Matthieu** avec qui j'ai le plaisir de partager ce semestre.

*A ma famille,*

**A Brice,**

Pour ton amour et ton soutien inconditionnels.

Pour ta présence à mes côtés chaque jour.

Parce que le meilleur reste à venir.

**A mes parents,**

Vous m'avez toujours accompagnée dans les bons moments comme dans les moments difficiles et c'est grâce à votre amour, votre soutien sans faille et aux valeurs que vous m'avez inculquées que j'ai pu franchir toutes ces étapes. Rien n'aurait été possible sans vous.

Merci d'avoir toujours été là pour moi et de m'avoir tant donné.

**A mon frère Pierre,**

Je suis fière de toi et de ton parcours. Merci pour ton soutien et pour tous les bons moments partagés depuis notre enfance. J'espère que notre complicité restera toujours la même.

**A mes grands-parents Monique, Alphonse, Jeanine et Michel,**

Votre amour et votre soutien m'ont aidé à me construire.

**A Marie-Elisabeth et Khalid,**

Pour votre affection qui m'est très chère.

**A Jonas et Hélène,**

Mon beau-frère et ma belle-sœur. Pour les bons moments partagés qui nous ont rapprochés.

*A mes amis,*

**A Apolline,**

Sans toi je n'en serais pas là aujourd'hui. J'ai eu la chance de croiser ton chemin en 1<sup>ère</sup> année de médecine et de passer toutes ces années à tes côtés ! Merci d'avoir toujours été là pour moi. Ton amitié m'est précieuse.

**A Mimi et Fred,**

Pour notre amitié sincère depuis tant d'années. J'espère partager encore plein de bons moments avec vous.

**A Florence et Pierre-Antoine,**

Pour notre « coup de foudre » amical ;- ) Vivement notre prochain week-end !

**A Benjamin et Pierre,**

Pour les moments partagés ensemble et ceux à venir. Votre amitié m'est chère.

**A Diane, Christelle, Emeric, Romain,**

Pour tout ce que nous avons partagé depuis toutes ces années malgré la distance qui peut nous séparer.

**Aux sous-colleurs,**

Apolline, Benjamin et Benjamin, pour nos mémorables soirées en D4 que je n'oublierai jamais ! Sans vous rien n'aurait été possible.

## SERMENT

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

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

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

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

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

# Tables des matières

1. INTRODUCTION	22
2. MATERIELS ET METHODES	24
a. Etude cadavérique	24
b. Etude des patients	25
c. L'acquisition des images	26
d. L'analyse de l'image et post-traitement	27
e. Statistiques	30
3. RESULTATS	31
a. Etude cadavérique	31
b. Etude chez les volontaires sains	33
4. DISCUSSION	34
5. CONCLUSION	37
6. BIBLIOGRAPHIE	38
7. FIGURES	42
8. TABLEAUX	50

# **L'analyse quantitative de l'articulation sous-talienne en scanner 4D: preuve du concept avec évaluation cadavérique et chez les sujets sains**

## **Article original**

### **Résumé :**

*Objectif:* Démontrer l'application de l'évaluation quantitative en scanner 4D de l'articulation sous-talienne chez des volontaires sains et des cadavres

*Méthodes:* 15 volontaires sains sans antécédents de traumatisme articulaire de la cheville et 3 cadavres, ont été évalués de façon prospective en scanner dynamique. L'articulation sous-talienne a été évaluée lors d'un cycle prono-supination. Toutes les acquisitions (cadavres et volontaires sains) ont été effectuées en utilisant le mode séquentiel intermittent avec un scanner 320 détecteurs. Les angles et distances entre le talus et le calcaneum ont été mesurés de façon semi-automatique. Des variations de mesure ont été décrites chez les volontaires sains et chez les cadavres, avant et après section des ligaments cervicaux et interosseux. La dose moyenne efficace était inférieure à 0,1 mSv.

*Résultats:* Chez les cadavres, il y avait une augmentation moyenne de l'amplitude articulaire sous-talienne de plus de 19% après section partielle du plan ligamentaire et de 22% après section complète. La variabilité inter-observateur des ratios de mesure a été considérée

comme excellente pour trois des mesures effectuées ( $ICC > 0,87$ ) et modérée pour la quatrième ( $ICC = 0,57$ ). La gamme normale de mouvement articulaire chez des volontaires sains est décrite avec des amplitudes articulaires variant de 6,4 et 22,8%.

*Conclusion:* L'analyse quantitative de l'articulation sous-talienne en scanner 4D peut fournir une analyse détaillée de l'articulation, et donc jouer un rôle potentiel dans l'évaluation de l'instabilité sous-talienne.

### **Mots clés**

Tomodensitométrie, articulation sous-talienne, analyse dynamique, quantitative, volontaires sains

### **Introduction**

L'instabilité chronique de la cheville est une situation post-traumatique relativement fréquente qui affecte les articulations talo-crurales et sous-taliennes [1,2]. La composante sous-talienne de ce syndrome est difficile à diagnostiquer parce que cette articulation présente à la fois une anatomie et une biomécanique complexes [3]. Les patients atteints d'instabilité sous-talienne (STJI) peuvent présenter divers symptômes comme des douleurs, une impotence fonctionnelle et/ou une atteinte proprioceptive [4,5]. Il n'y a pas de tests cliniques spécifiques pour le diagnostic de STJI et les patients sont généralement



traités de façon conservatrice basée sur la physiothérapie, le renforcement musculaire et l'immobilisation [4]. Il n'y a actuellement pas de moyen objectif d'évaluer la réponse des patients aux traitements.

Le diagnostic en imagerie de STJI est également difficile [4]. Malgré l'utilisation d'incidences radiographiques spécifiques (comme l'incidence sous-talienne de Broden, le signe du tiroir sous-talien), les radiographies dynamiques manquent de sensibilité et de reproductibilité, probablement liés à des problèmes techniques et de superposition (Kato TJ os Surg conjointe Br 1995) [6-8]. Des techniques d'imagerie in vivo sous contrainte ont également été étudiées notamment en IRM à l'aide d'arthromètre, permettant la différenciation entre les patients normaux et avec les patients avec une STJI [9]. En outre, les dispositifs de tests de stress sur l'IRM restent difficilement accessibles et non standardisés. Enfin, dans une méta-analyse de Cordova et al., une grande variation dans les mesures de l'articulation sous-talienne en situation de stress a été identifiée chez les cadavres, ajoutant de la complexité dans le diagnostic de STJI [1].

Le scanner dynamique peut être réalisé au niveau des extrémités avec des doses efficaces en dessous de 1 mSv et permet de mettre en évidence des anomalies de position fines entre les os in vivo [10] [11-13]. Des outils de post-traitement sont disponibles dans le commerce afin de mesurer distances et les angles de façon semi-automatique lors de manœuvres dynamiques, permettant d'évaluer les variations et la variabilité des mesures (Fig. 1). Des outils semi-automatiques peuvent augmenter la reproductibilité des mesures d'amplitudes articulaires sous-taliennes et aider à établir des critères diagnostiques généralisables.

Dans cette étude, l'application de l'analyse quantitative en scanner 4D à l'évaluation de l'articulation sous-talienne chez des volontaires sains et des cadavres a été démontrée. Cette méthode pourrait améliorer le diagnostic de STJI.

## **Matériel et méthodes**

### *Étude cadavérique*

Trois membres inférieurs humains (de la hanche jusqu'au pied) ont été obtenus à partir de trois cadavres différents fraîchement décongelés, deux hommes et une femme âgés de 70, 74 et 80 ans. Les échantillons ont été congelés à -25 ° C et laissés décongeler pendant 24 heures à température ambiante avant l'imagerie. Les échantillons ont été analysés avant et après la dissection, qui a été réalisée par un chirurgien orthopédiste (AJ) avec 6 ans d'expérience clinique. Tout d'abord, les échantillons ont été placés sur la table de scanner en position anatomique, un rembourrage a été placé sous le mollet pour permettre le mouvement du pied sans contact avec la table. Le mouvement de pronosupination a été obtenu en tirant sur les bouts d'une bande élastique enroulée autour de l'arrière-pied. Comme la population normale de patients, l'acquisition des images a débuté en position de pronation et s'est achevée lorsque le pied est retourné à la position de départ. Un radiologue entraîné en scanner musculo squelettique 4D (PT) a guidé le mouvement de l'échantillon.

Après examen scanographique, les spécimens ont été disséqués. Une incision latérale a été faite dans la région sous-malléolaire au niveau du sinus du tarse. Après la section de l'origine du retinaculum inférieur des extenseurs, les ligaments cervical et interosseux s ont été

identifiés et leur continuité anatomique vérifiée. Aucun signe scanographique de maladie dégénérative de l'articulation sous-talienne n'était présent chez les cadavres. Puis, l'un des ligaments a été sectionné (section sous-talienne ligamentaire partielle) et les échantillons ont été soumis à une nouvelle acquisition en scanner dynamique en utilisant la procédure décrite ci-dessus. Chez deux spécimens, le ligament cervical a été sectionné en premier lieu, pour le troisième, le ligament interosseux a été sectionné en premier. Enfin, les deux ligaments (section complète des ligaments de l'articulation sous-talienne) ont été sectionnés et les spécimens scannés une nouvelle fois, ce qui donne un total de trois séries d'acquisitions dynamiques par cadavre.

Dans notre institution, les études utilisant des échantillons prélevés sur des cadavres entièrement anonymes donnés à la science ne nécessitent pas l'approbation du comité d'éthique.

### *Étude des patients*

Dix-huit volontaires sains sans antécédent de traumatisme de la cheville et présentant un examen physique normal de la cheville ont été inclus dans cette étude. Tous étaient âgés de plus de 18 ans et ont signé un consentement éclairé. Le protocole d'étude a été approuvé par le comité d'éthique local. L'évaluation clinique a été réalisée par un radiologue senior de notre équipe avec au moins cinq années d'expérience clinique antérieure en imagerie y compris le dépistage d'une hyperlaxité articulaire. L'évaluation de l'hyperlaxité articulaire a été basée sur le score de Beighton [14]. Tous les volontaires sains ont subi un scanner dynamique de l'articulation sous-talienne. Les images ont été acquises au cours d'un cycle de

prono-supination de l'articulation sous-talienne. Le patient a été placé en décubitus dorsal sur la table du scanner. L'examen a débuté en position de pronation maximale et a pris fin lorsque le pied est retourné au point de départ après supination, d'une durée de 10-15 secondes. Une bande élastique a été utilisée pour guider le mouvement (fig. 2). Une session de formation a été réalisée avant les acquisitions scanographiques pour assurer un mouvement contrôlé et homogène des patients. Trois volontaires ont été exclus de l'analyse. Un volontaire, en dépit d'une histoire clinique négative initiale, présentait des irrégularités du périoste au niveau de l'insertion fibulaire du ligament talo-fibulaire antérieur, qui pourrait être lié à un traumatisme ancien de la cheville. Deux volontaires ont échoué à exécuter un mouvement homogène de prono-supination lors de l'examen scanographique et ont été exclus.

### *L'acquisition des images*

Les acquisitions ont été effectuées en utilisant un scanner large-détecteur avec 320 rangées de détecteurs (Aquilion ONE, Toshiba Medical Systems, Otawara, Japon). Toutes les acquisitions (chez les volontaires sains et les cadavres) ont été effectuées à l'aide d'un mode intermittent séquentiel (pas d'alimentation de table), 24 cm de FOV, matrice de 512x512, 0,5 mm d'épaisseur de coupe, rotation du tube de 0,35 seconde. Les constantes du tube étaient de 100 kV, 100 mAs pour les acquisitions cadavériques et 80 kVp et 22 mAs chez les volontaires sains. La couverture de l'axe Z était de 16 cm pour les cadavres et variait de 8 à 12 cm chez le volontaire sain en fonction de la morphologie du patient. Les images ont été

reconstruites en utilisant des filtres os et tissus mous. Le mode de reconstruction itérative adaptative (AIDR 3D, Toshiba Medical Systems, Otawara, Japon) a été utilisé pour la reconstruction de l'image dans toutes les acquisitions. Les acquisitions cadavériques ont été réalisées avec une dose plus élevée que les acquisitions des patients parce que dans ce réglage, le principe ALARA n'est pas applicable et la meilleure qualité d'image possible a été demandée.

L'indice de dose scanographique par volume (CTDI<sub>de vol</sub>) et le produit dose-longueur (DLP) des acquisitions des patients ont été estimés sur la base d'un fantôme 16 cm de diamètre. Les doses efficaces ont été calculées en utilisant un coefficient de conversion de 0,0004 [15].

#### *L'analyse de l'image et post-traitement*

Les images ont été post - traitées à l'aide d'une console de travail V 7.0 (Toshiba Medical Systems, Otawara, Japon) en utilisant l'outil d'application clinique 4-D Ortho. Les mesures cadavériques ont été effectuées de manière consensuelle par deux radiologues avec 8 (PT) et 3 (AS.F.) années d'expérience en radiologie musculo-squelettique. Les mesures sur les volontaires sains ont été réalisées indépendamment par ces deux lecteurs. Cette application est basée sur l'enregistrement de chaque os imagé dans tous les volumes acquis. L'enregistrement permet l'identification automatique de tout point de référence osseuse dans tous les volumes. L'application 4D Ortho fonctionne comme suit. Une fois que tous les volumes d'une acquisition dynamique sont chargés, les reconstructions avec les filtres tissus mous ont été utilisées pour une qualité d'image rendue optimale. Les images

multi planaires et le rendu volumique 3D étaient affichés. L'examineur a ensuite placé un point au sein de la médullaire du talus et l'algorithme d'enregistrement a été exécuté afin de bloquer le talus. Après enregistrement, tous les mouvements s'affichaient en respectant le talus, qui restait statique, servant de référence pour l'analyse quantitative. Ensuite, après enregistrement, l'examineur a placé deux points de référence pour les mesures de distance et quatre sur la corticale osseuse pour les mesures d'angle sur les reformations multi planaires, qui ont été tracées automatiquement sur tous les volumes. Quatre mesures différentes ont été effectuées pour décrire la relation talo-calcanéenne au cours du mouvement de prono-supination (Fig. 3):

- L'angle talo-calcanéen coronal (ACCT). Les points de référence ont été placés dans un plan bi-malléolaire coronal de la cheville en position neutre. Une ligne a été construite en plaçant deux points aux extrémités médiale et latérale du dôme du talus. Une deuxième ligne a été construite dans le calcanéum en plaçant un point correspondant au point le plus latéral du sustentaculum tali et un autre sur la partie la plus profonde de l'angle de Gissagne. L'angle formé entre ces lignes a été mesuré (Fig. 3 A et B). Cette mesure a été effectuée pour évaluer l'inclinaison sous-talienne et les repères utilisés sont similaires à ceux utilisés par Seebauer et al. [1,9,16].

- L'angle talo-calcanéen axial (ACTA). Les points de référence ont été placés dans le plan axial passant par le grand axe du talus. Les images sagittales ont été utilisées comme référence pour la sélection du plan. Le plan sagittal a été défini comme un axe perpendiculaire au plan bi-malléolaire avec la cheville en position neutre. Concernant le talus, le plan de coupe passant par le sommet de la tête du talus et le processus postéro-médial du talus (processus de Stieda) a été sélectionné. Une ligne a été construite en plaçant un point dans la section

représentant chacun de ces deux points. Au niveau du calcanéum, deux points ont été placés dans une coupe représentant le milieu de la facette articulaire calcanéocuboïdienne et le milieu de la surface postérieure du calcanéum. Une ligne entre deux marqueurs a été construite. L'angle formé entre ces lignes a été mesurée (Fig. 3C, D et E). Cette mesure a été effectuée pour évaluer la composante de rotation interne-externe de la sous-talienne en pronosupination, qui a été démontré comme augmentant après la section des ligaments de l'articulation sous-talienne [17].

- L'intervalle entre les facettes médiales (MFG). Les points de référence ont été placés dans un plan sagittal perpendiculaire au plan bi-malléolaire frontal avec la cheville en position neutre. La coupe représentant le point le plus latéral sur la facette médiale du talus, sans effet de volume partiel, a été sélectionnée. Dans cette coupe, les repères ont été placés sur les facettes médiales du talus et du calcanéum de sorte que la plus courte distance entre ces deux os a été mesurée (Fig. 3 F et G). Cette mesure a été effectuée pour évaluer la laxité sous-talienne en éversion [1]. Il n'y avait pas de description précédente dans la littérature de repères utilisés pour cette évaluation.

- La découverte postérieure du calcanéum (PCFU). Pour cette mesure, un plan sagittal perpendiculaire au plan bi-malléolaire frontal avec la cheville en position neutre a été sélectionné. Après sélection de ce plan, les points de référence ont été placés en utilisant le volume représentant la supination complète de la cheville. Les repères étaient placés aux extrémités de la plus grande distance entre le centre de l'angle de Gissagne (identifié à l'aide des contours osseux et l'emplacement du foramen nourricier) et le bord antérieur de la facette postérieure du talus (Fig. 3 H et I). Cette mesure permet d'évaluer la congruence de l'articulation sous-talienne postérieure comme suggéré par Kato et al. [8].

Le temps de post-traitement pour l'ensemble de données y compris le chargement des données, le verrouillage de l'os et de l'exécution des quatre mesures décrites a duré environ 15 minutes.

La qualité de l'enregistrement de l'image a été évaluée par l'analyse de la variation des coordonnées dans les trois plans de l'espace d'un repère situé dans le talus, après verrouillage de l'os. L'homogénéité du mouvement a été évaluée subjectivement en regardant une reconstruction en rendu volumique 4D. Les données pour lesquelles la pronation ou la supination sous-talienne ne sont pas visibles ont été rejetées ou acquises une nouvelle fois.

Les données cadavériques n'ont pas été directement comparées aux données des volontaires sains parce que le manque de tonus musculaire et l'absence d'effet d'attraction des tendons sur des cadavres ont empêché une comparaison directe. Pour cette raison, les auteurs n'ont pas tenté d'établir des critères diagnostiques pour la STJI basés sur les données provenant de cadavres.

### *Statistiques*

Les variations de ratio et des valeurs absolues des mesures acquises ont été comparées. Les ratios ont été calculés en divisant les valeurs obtenues par la valeur maximale en pronation. Des ratios ont été calculés, car la comparaison directe des valeurs absolues est imprécise en raison de facteurs techniques, tels que des variations mineures dans la position de référence et les différences dans la taille des os entre les sujets. La moyenne, l'écart-type (SD), le coefficient de variation (CV) et la variation d'amplitude des mesures obtenues lors de



la prono-supination de l'articulation sous-talienne ont été analysés dans la population de sujets sains et chez les sujets cadavériques. Le CV représente le rapport de la SD des mesures à leur moyenne et est exprimée en pourcentage (%).

$$CV = 100 \cdot \left( \frac{SD}{Mean} \right)$$

Les résultats quantitatifs ont été présentés en moyenne  $\pm$  SD. La concordance inter lecteurs a été évaluée en calculant le coefficient de corrélation intraclasse (CCI). Des valeurs de CCI de 0-0,20 ont été considérées comme accord faible, de 0,21-0,40 comme passable, 0,41-0,60 comme modéré, 0,61-0,80 substantiel et de 0,81-1 a été accepté comme un excellent accord.

## Résultats

### *Étude cadavérique*

Le nombre de volumes acquis dans les études de scanner dynamique chez les cadavres variait de 9 à 11. Le post - traitement était possible pour tous les échantillons. La qualité de l'enregistrement était bonne avec l'emplacement du repère après enregistrement variant de 0,2 à 3,5% (moyenne de  $1,3 \pm 1,3\%$ ). Après la première acquisition de l'échantillon non-disséqué, la dissection a confirmé l'intégrité des ligaments cervicaux et interosseux chez tous les spécimens (Fig. 4). Les valeurs moyennes de CTCA chez les spécimens non-disséqués étaient de  $15,6^\circ$  ;  $21,7^\circ$  et  $10,8^\circ$  pour les spécimens un, deux et trois, respectivement. Ces valeurs sont de  $10,4^\circ$  ;  $17,9^\circ$  et  $14,5^\circ$  pour l'ATCA; 10,3 mm, 9,0 mm et 7,86 mm pour le MFG et 8,8 mm, 10,8 mm et 12,4 mm pour la PCFU.

Le tableau 1 montre la variation du rapport des quatre mesures effectuées (CTCA, ATCA, MFG et PCFU) dans les échantillons avant et après la dissection. En vue de déterminer les paramètres statistiques (moyenne, écart-type, CV et variation d'amplitude) démontrant au mieux l'instabilité sous-talienne créée, ces valeurs ont été comparées avant et après section des ligaments. Les valeurs des échantillons non-disséqués ont été comparés avec celles des échantillons partiellement disséqués et ceux disséqués complètement. En outre, les valeurs de spécimens partiellement sectionnés ont été comparées à celle des spécimens complètement sectionnés. Ainsi, trois comparaisons ont été faites pour chacune des quatre mesures effectuées (CTCA, ATCA, MFG et PCFU) pour chaque spécimen, ce qui donne un total de 36 comparaisons possibles. Après section ligamentaire (partielle ou totale) les valeurs moyennes des mesures effectuées ont augmenté dans 17 (47,2%) cas, tandis que la DS, le CV et l'amplitude de variation ont augmenté de 80%, 83,3% et 88,8%, respectivement. Enfin, si seuls les échantillons non-disséqués et ceux sectionnés partiellement étaient comparés, une augmentation des moyennes, DS, CV et une variation d'amplitude a pu être identifiée dans 50%, 75%, 79,9% et 87,5% des cas respectivement.

Si les données des trois spécimens sont considérées, il y avait une augmentation moyenne de la variation d'amplitude du CTCA de  $19 \pm 13,2\%$  et de  $30,9 \pm 13,4\%$ , après section partielle ou totale des ligaments sous-taliens. Une augmentation similaire a été noté pour l'ACTA ( $22,4 \pm 16,8\%$  et  $44,8 \pm 13,1\%$ ). La plus large gamme d'augmentation de la variation a été observée avec le MFG, qui a montré une augmentation moyenne de  $30,5 \pm 30,8\%$  et  $54,8 \pm 12,1\%$ , après section partielle et totale du ligament. Les résultats ont été moins nets avec la distance PCFU, qui a diminué après la section ligamentaire partielle chez deux spécimens

(moyenne  $6,3 \pm 12,1\%$  de baisse) et a légèrement augmenté après la section complète des ligaments (hausse moyenne de  $9,9 \pm 24,5\%$ ) (Fig. 5).

### *Étude chez les volontaires sains*

Il y avait cinq hommes et 10 femmes dans la population d'étude (ratio homme-femme 1: 2); l'âge moyen était de  $31 \pm 2,16$  ans, allant de 24 à 50 ans. Le nombre de volumes acquis par patient variait de six à 12 (moyenne  $8,3 \pm 1,59$ ). Le post - traitement était possible chez tous les volontaires. La qualité de l'enregistrement était bonne, avec l'emplacement du repère après l'enregistrement des données variant de 0,17 à 6,48% (moyenne  $1,29 \pm 1,58\%$ ). La variabilité inter-observateur des rapports mesurés a été considérée comme excellente pour le CTCA, l'ATCA et le MFG (ICC = 0,938, 0,942 et 0,865, respectivement), et modérée pour PCFU (ICC = 0,569).

La relation talo-calcaneenne pourrait être étudiée en détail en scanner dynamique (matériel supplémentaire 1-4). Les valeurs moyennes pour le CTCA, ATCA, MFG et PCFU dans la population de patients pendant le mouvement de pronosupination étaient de  $24,3 \pm 8,75^\circ$ ,  $15,1 \pm 7,5^\circ$  :  $7,0 \pm 1,47$  mm et  $15,6 \pm 1,8$  mm, respectivement, pour le lecteur 1. Les mêmes valeurs étaient de  $23,5 \pm 7,78^\circ$ ,  $15,1 \pm 6,93^\circ$ ,  $10,15 \pm 1,32$  mm et  $14,09 \pm 2,51$  mm pour le lecteur 2. Le tableau 2 montre la variation du rapport des mesures effectuées pour les deux lecteurs. Basé sur ces données, des graphiques montrant la variation des mesures obtenues ont été construits (Fig. 6). La DS des valeurs de CV de cette population a été utilisée pour évaluer les variabilités attendues des mesures effectuées chez des volontaires sains. Cette analyse a démontré des variations de 10,9%, 17,5%, 7,5% et 6,4% pour le CTCA, l'ATCA, le

MFG et le PCFU, respectivement, pour le lecteur 1. Les mêmes valeurs ont été de 10,9%, 22,8%, 6,3% et 9,2% pour le lecteur 2.

Il n'y avait pas de différence notable dans la variation de ces mesures entre les hommes et les femmes. Deux des volontaires évalués présentaient des signes d'hyperlaxité articulaire et ont été classés 2 et 6 selon le système de notation Beighton. Il n'y avait pas de différence notable dans les mesures entre ces volontaires et le reste de la population étudiée. Le CTDI<sub>vol</sub>, moyen, la DLP et la dose efficace des études effectuées étaient respectivement de  $20,6 \pm 5,6$  mGy,  $168,1 \pm 43,7$  mG y.cm et  $0.067 \pm 0,01$  mSv.

## **Discussion**

A l'aide du scanner dynamique, l'articulation sous-talienne a pu être analysée au cours du temps lors d'une manœuvre donnée. Ainsi, une grande quantité de données est disponible pour l'analyse de la variation des mesures pendant le mouvement, par opposition à des comparaisons entre des acquisitions pré- et post-stress. Cela augmente la possibilité d'identifier des anomalies fines de position de l'articulation talo-calcaneenne. Les distances et les angles entre les os peuvent être évalués de différentes façons en scanner dynamique (par exemple, par la moyenne, DS, CV et par la variation d'amplitude). La variation d'amplitude et le CV des mesures étaient les paramètres les plus utiles pour l'évaluation du mouvement de l'articulation. Chez les cadavres, l'amplitude de variation et le CV augmentaient dans plus de 83% des cas après la section complète ou partielle des ligaments. Parmi les mesures effectuées, le CTCA, l'ATCA et le MFG ont le mieux démontré la variation d'amplitude après la section ligamentaire, tandis que le PCFU a montré des résultats

contradictoires dans les échantillons étudiés. Ces variations de l'articulation sous-talienne ont pu être démontrées sans contrainte de poids, ce qui souligne la performance du scanner dynamique et la validité clinique de cette méthode.

La variation normale de CTCA, ATCA, MFG et PCFU a été démontrée chez des volontaires sains, ce qui est la première étape dans la détermination des critères de diagnostic de STJI. Chez les cadavres, le CTCA, l'ATCA et le MFG ont montré des augmentations après section partielle ou totale des ligaments sous-taliens variant de 19 à 54%. Parmi ceux-ci, le MFG était la mesure la plus prometteuse. Il a présenté la plus grande variation après section ligamentaire chez les cadavres et plus petite variation chez les volontaires sains. La proximité anatomique des facettes médiales de l'articulation sous-talienne et du ligament interosseux est susceptible d'expliquer la variation des mesures de MFG chez les volontaires sains et chez les cadavres avant et après la section ligamentaire. Ces résultats suggèrent que l'analyse quantitative en scanner dynamique pourrait être utilisée pour le diagnostic de STJI, pour l'évaluation de l'efficacité des dispositifs d'immobilisation de l'articulation sous-talienne et dans le suivi des patients subissant une reconstruction ligamentaire sous-talienne.

Diverses études ont étudié l'utilisation de méthodes dynamiques d'imagerie en coupe pour l'évaluation des STJI. Le scanner a été utilisé dans l'évaluation des amplitudes articulaires sous-talienne par Beimers et al. Cependant, la méthode de post-traitement de données utilisées par ces auteurs était techniquement exigeante, ce qui gêne son application dans la pratique clinique quotidienne [18,19]. Une différence significative de l'inclinaison sous-talienne entre les patients avec et sans l'instabilité chronique de la cheville pourrait être démontrée en utilisant l'IRM utilisant des dispositifs et arthromètres de stress adaptées

[9]. Des dispositifs de stress compatibles en IRM restent difficilement accessibles et non standardisés. En outre, dans la plupart des études sur la dynamique articulaire en imagerie en coupe, les mesures sont effectuées manuellement [2,18]. Cela entrave la sélection des repères pour les mesures lors des acquisitions avec et sans stress pour les articulations avec des séquences de mouvements complexes tels que l'articulation sous-talienne. L'enregistrement automatique des os entre les volumes d'acquisition, augmente la précision dans la comparaison des repères utilisés lors des mesures. Avec cet outil, les positions des points sont automatiquement projetées à tous les volumes acquis menant à une excellente reproductibilité inter-observateur. Sur trois des quatre mesures effectuées la CPI était sur 0,87, ce qui est plus élevé que ce qui a été rapporté pour des radiographies réalisées à l'aide de dispositifs de stress [20].

Diverses limites de cette étude doivent être reconnues. L'articulation sous-talienne n'a pas été évaluée dans des conditions de stress physiologiques (par exemple la mise en charge). Un dispositif reproduisant la mise en charge pour l'acquisition en scanner dynamique de l'articulation sous-talienne est actuellement en cours d'élaboration. Un tel dispositif est susceptible d'augmenter la performance diagnostique de cette méthode. Le fait que des différences dans les mesures avant et après la section d'un ou deux ligaments de l'articulation sous-talienne ont été identifiées sans contrainte souligne la performance du scanner dynamique pour l'évaluation de fines anomalies de position osseuses. Une autre limite est la taille de la population de l'étude et le fait qu'aucun cas pathologique n'a été inclus. Des études complémentaires incluant un plus grand nombre de patients seront nécessaires pour évaluer la performance diagnostique de cette méthode. La comparaison directe des mesures entre les cadavres et les patients n'a pas été possible en raison de

l'absence de tonus musculaire et de force exercée par les tendons lors des acquisitions, rendant les conditions d'examen différentes et donc non comparables directement. Aucune histoire clinique n'était disponible pour les cadavres étudiés car les spécimens donnés sont entièrement anonymes. Les dissections, cependant, ont confirmé l'intégrité des ligaments sous-taliens chez tous les spécimens, excluant la possibilité de lésion articulation sous-talienne significative.

En conclusion, l'analyse quantitative en scanner dynamique de l'articulation sous-talienne peut fournir une analyse articulaire détaillée, jouer un rôle potentiel dans l'évaluation de l'instabilité sous-talienne. Des augmentations d'amplitude articulaire après section des ligaments sous-taliens sur des cadavres ont été identifiées, confirmant l'applicabilité clinique potentielle de cette méthode. Le coefficient de variation et l'amplitude de variation des valeurs de CTCA, ATCA et MFG étaient les meilleurs paramètres pour l'identification des instabilités articulaires sous-taliennes.

## Bibliographie

- [1] M.L. Cordova, J.M. Sefton, T.J. Hubbard, Mechanical joint laxity associated with chronic ankle instability: a systematic review, *Sports Health*. 2 (2010) 452–459. doi:10.1177/1941738110382392.
- [2] J. Hertel, Functional Anatomy, Pathomechanics, and Pathophysiology of Lateral Ankle Instability, *J Athl Train*. 37 (2002) 364–375.
- [3] F. Bonnel, E. Toullec, C. Mabit, Y. Tourné, Sofcot, Chronic ankle instability: biomechanics and pathomechanics of ligaments injury and associated lesions, *Orthop Traumatol Surg Res*. 96 (2010) 424–432. doi:10.1016/j.otsr.2010.04.003.
- [4] Y. Tourné, J.-L. Besse, C. Mabit, Sofcot, Chronic ankle instability. Which tests to assess the lesions? Which therapeutic options?, *Orthop Traumatol Surg Res*. 96 (2010) 433–446. doi:10.1016/j.otsr.2010.04.005.
- [5] F.G. Usuelli, L. Mason, M. Grassi, C. Maccario, M. Ballal, A. Molloy, Lateral ankle and hindfoot instability: a new clinical based classification, *Foot Ankle Surg*. 20 (2014) 231–236. doi:10.1016/j.fas.2014.05.003.
- [6] S.C. Frost, A. Amendola, Is stress radiography necessary in the diagnosis of acute or chronic ankle instability?, *Clin J Sport Med*. 9 (1999) 40–45.



- [7] F.M. Buck, A. Hoffmann, N. Mamisch-Saupe, N. Espinosa, D. Resnick, J. Hodler, Hindfoot alignment measurements: rotation-stability of measurement techniques on hindfoot alignment view and long axial view radiographs, *AJR Am J Roentgenol.* 197 (2011) 578–582. doi:10.2214/AJR.10.5728.
- [8] T. Kato, The diagnosis and treatment of instability of the subtalar joint, *J Bone Joint Surg Br.* 77 (1995) 400–406.
- [9] C.J. Seebauer, H.J. Bail, J.C. Rump, B. Hamm, T. Walter, U.K.M. Teichgräber, Ankle laxity: stress investigation under MRI control, *AJR Am J Roentgenol.* 201 (2013) 496–504. doi:10.2214/AJR.12.8553.
- [10] P.A.G. Teixeira, A. Gervaise, L. Matthias, S. Lecocq, A. Raymond, S. Aptel, et al., Musculoskeletal Wide detector CT: Principles, Techniques and Applications in Clinical Practice and Research, *European Journal of Radiology.* 0 (n.d.). doi:10.1016/j.ejrad.2014.12.033.
- [11] G.I. Wassilew, V. Janz, M.O. Heller, S. Tohtz, P. Rogalla, P. Hein, et al., Real time visualization of femoroacetabular impingement and subluxation using 320-slice computed tomography, *J. Orthop. Res.* 31 (2013) 275–281. doi:10.1002/jor.22224.
- [12] S. Leng, K. Zhao, M. Qu, K.-N. An, R. Berger, C.H. McCollough, Dynamic CT technique for assessment of wrist joint instabilities, *Med Phys.* 38 (2011) S50–S56. doi:10.1118/1.3577759.

- [13] S.-C. Tay, A.N. Primak, J.G. Fletcher, B. Schmidt, K.K. Amrami, R.A. Berger, et al., Four-dimensional computed tomographic imaging in the wrist: proof of feasibility in a cadaveric model, *Skeletal Radiol.* 36 (2007) 1163–1169. doi:10.1007/s00256-007-0374-7.
- [14] P. Beighton, L. Solomon, C.L. Soskolne, Articular mobility in an African population., *Ann Rheum Dis.* 32 (1973) 413–418.
- [15] N. Saltybaeva, M.E. Jafari, M. Hupfer, W.A. Kalender, Estimates of effective dose for CT scans of the lower extremities, *Radiology.* 273 (2014) 153–159. doi:10.1148/radiol.14132903.
- [16] J.W. Louwerens, A.Z. Ginai, B. van Linge, C.J. Snijders, Stress radiography of the talocrural and subtalar joints, *Foot Ankle Int.* 16 (1995) 148–155.
- [17] S. Weindel, R. Schmidt, S. Rammelt, L. Claes, A. v Campe, S. Rein, Subtalar instability: a biomechanical cadaver study, *Arch Orthop Trauma Surg.* 130 (2010) 313–319. doi:10.1007/s00402-008-0743-2.
- [18] L. Beimers, G.J.M. Tuijthof, L. Blankevoort, R. Jonges, M. Maas, C.N. van Dijk, In-vivo range of motion of the subtalar joint using computed tomography, *J Biomech.* 41 (2008) 1390–1397. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.02.020.
- [19] G.J.M. Tuijthof, L. Beimers, R. Jonges, E.R. Valstar, L. Blankevoort, Accuracy of a CT-based bone contour registration method to measure relative bone motions in the hindfoot, *J Biomech.* 42 (2009) 686–691. doi:10.1016/j.jbiomech.2009.01.002.

[20] H. Lohrer, T. Nauck, S. Arentz, J. Schöll, Observer reliability in ankle and calcaneocuboid stress radiography, *Am J Sports Med.* 36 (2008) 1143–1149. doi:10.1177/0363546507313091.

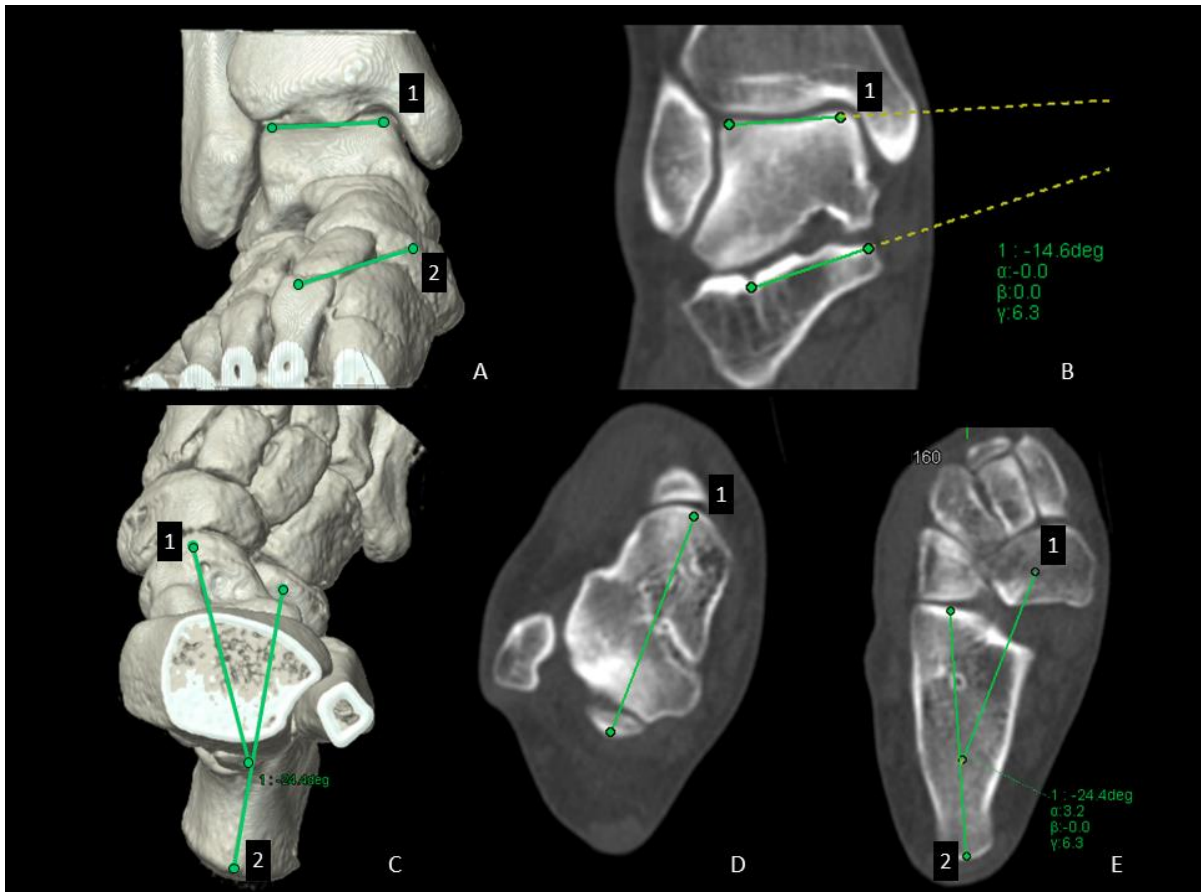
## Figures



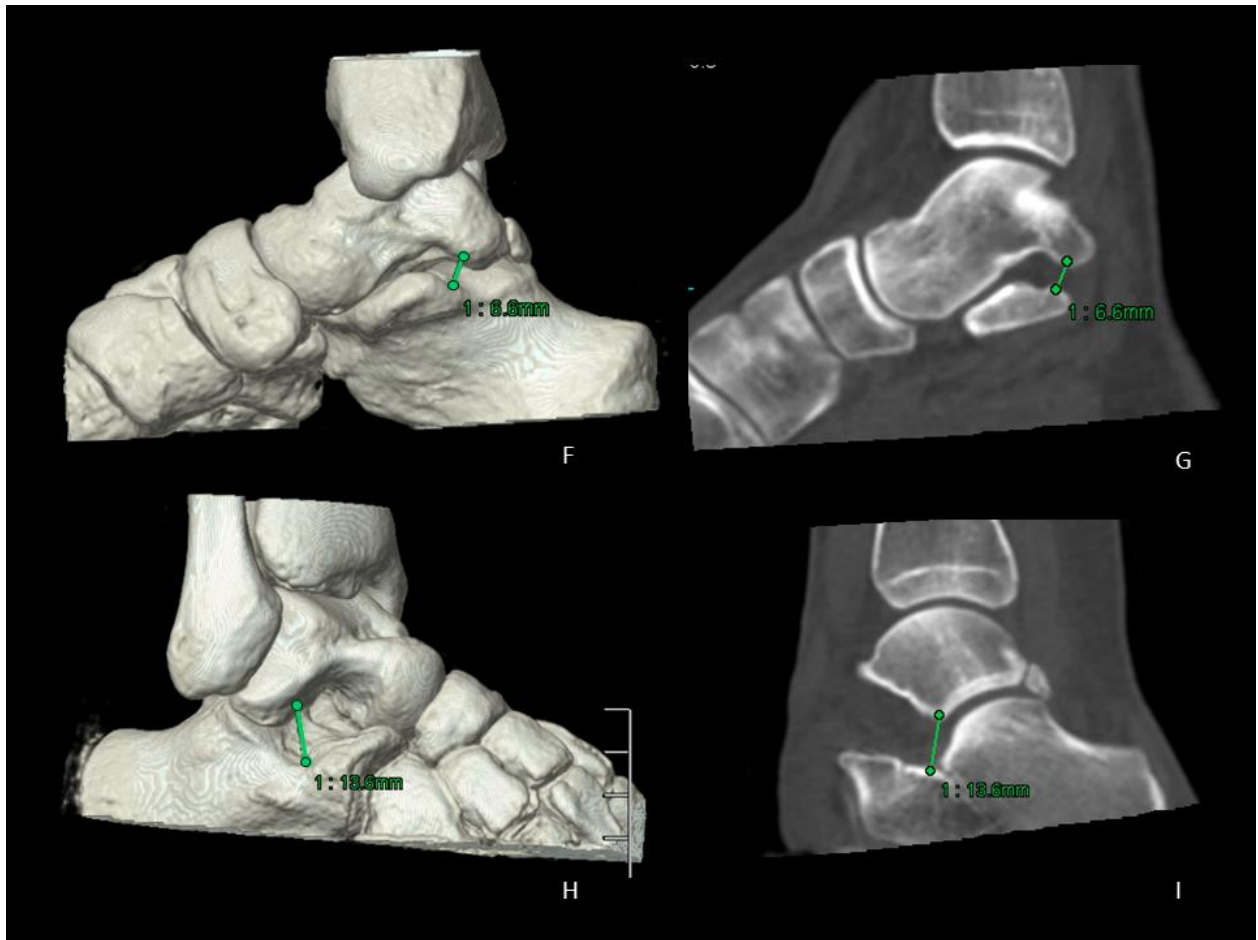
**Figure. 1** – Interface de post-traitement. Le logiciel permet le positionnement des différents points de référence dans toute structure osseuse de la zone d'étude (têtes de flèches). Contrôles temporel (flèche) permettant une visualisation de tous les volumes disponibles d'une acquisition dynamique. Une fois que les points de référence pour les distances (comme indiqué dans cet exemple) ou les angles (non représenté) sont fixés, le logiciel les projette automatiquement à tous les volumes acquis. Après analyse, la variation de la mesure effectuée dans des volumes d'acquisition est affichée graphiquement (rectangle rouge). Les données peuvent également être exportées pour une analyse ultérieure.



**Figure. 2** - Le positionnement du patient pour l'acquisition dynamique en scanner. Les volontaires ont été placés en décubitus dorsal avec le pied situé au centre de la table du scanner. La bande élastique bleue est utilisée pour guider le mouvement au cours du cycle de prono-supination.

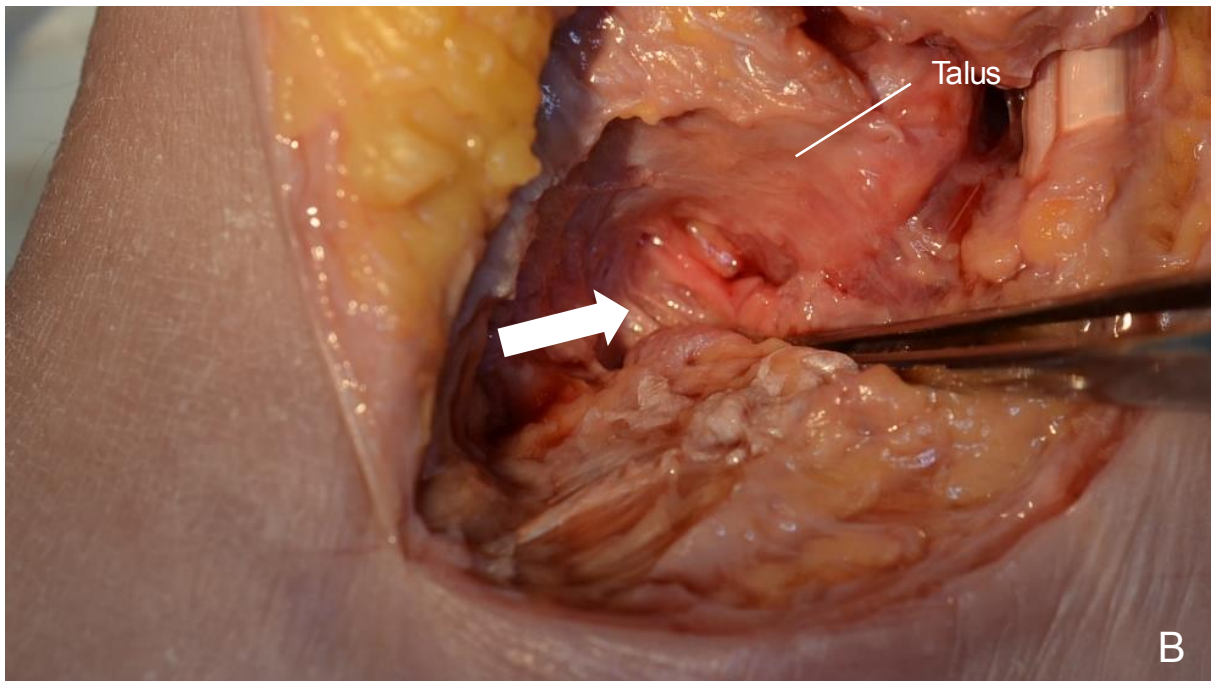
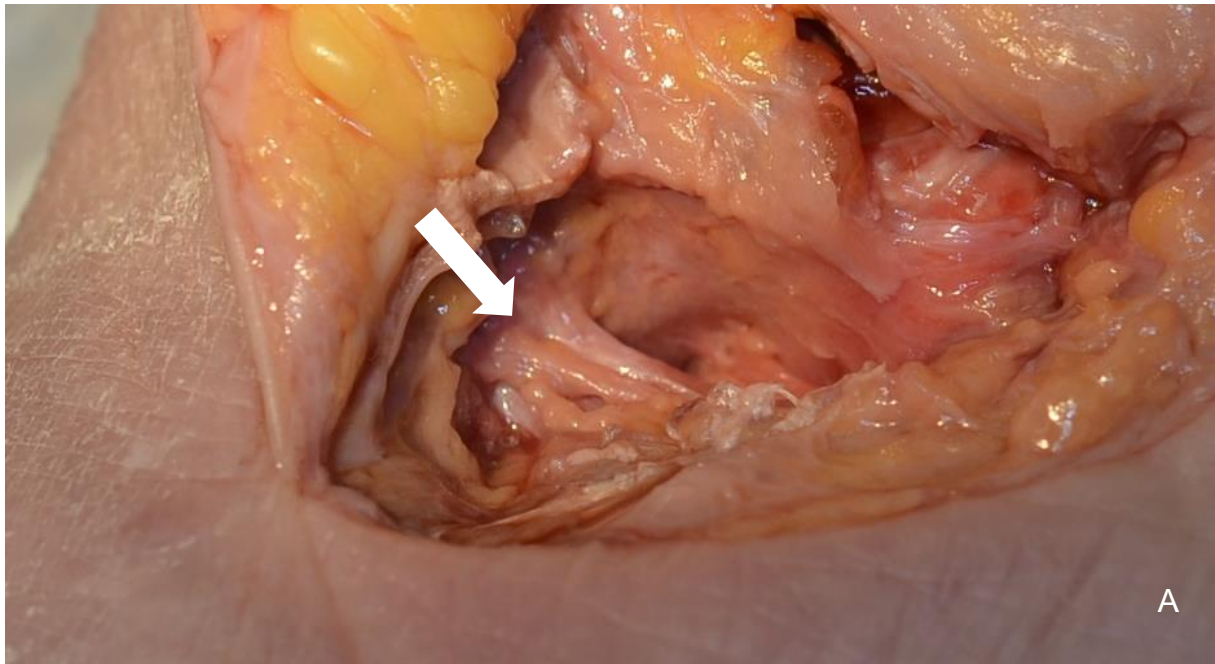


**Figure. 3a** - Position des points de référence pour les quatre mesures évaluées. Tous les points ont été placés sur les reformations multiplanaires sur l'os cortical. A) Rendu volumique (VR) et B) image coronale au niveau du plan malléolaire montrant la procédure de mesure de l'angle de talo-calcanéen coronal (ACCT). L'angle entre les lignes 1 et 2 représentait l'ACCT. C-E) VR et images axiales montrant la procédure de mesure de l'angle talo-calcanéen axial (ATCA). La ligne 1a été placée sur la coupe passant par le sommet de la tête du talus et le processus postéro-médial du talus (processus Stieda). La ligne 2a été placée sur une coupe passant par le milieu de la facette articulaire calcanéo-cuboïdienne et la surface calcanéenne postérieure. L'angle entre ces deux lignes représente l'ATCA.



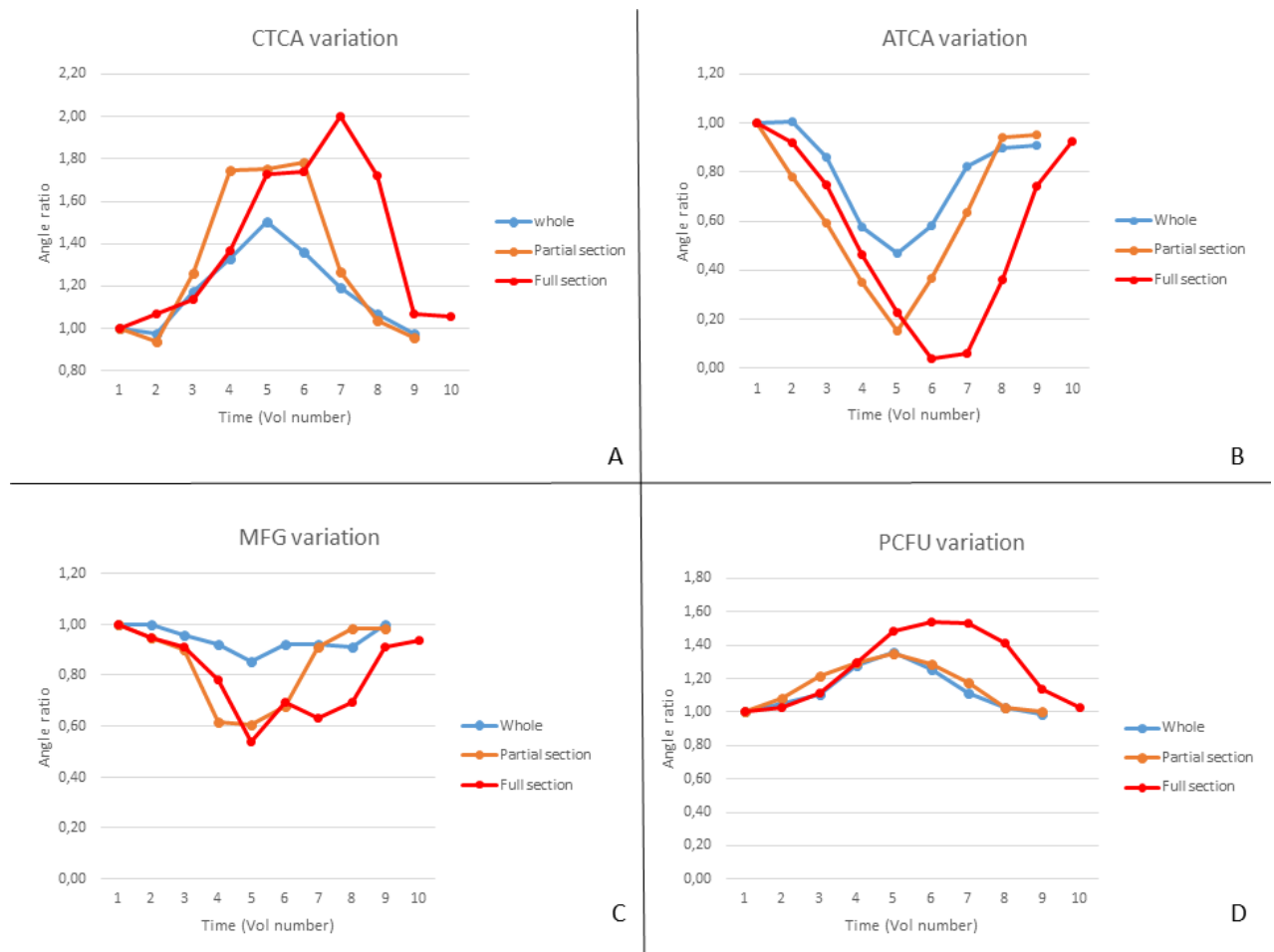
**Figure. 3b-** F) VR et G) Image sagittale médiale montrant la procédure de mesure de la distance de la facette médiale (MFG). La distance entre ces deux points (points verts) représente le MFG. H) VR et I) Coupe sagittale passant par le centre de l'angle de Gissagne montrant la découverte de la facette calcanéenne postérieure (PCFU): Notez que le pied est en supination maximale. Les points ont été placés aux extrémités de la plus grande distance entre l'angle de Gissagne et le bord antérieur de la facette postérieure du talus. La distance entre les deux points (points verts) représente le PCFU.



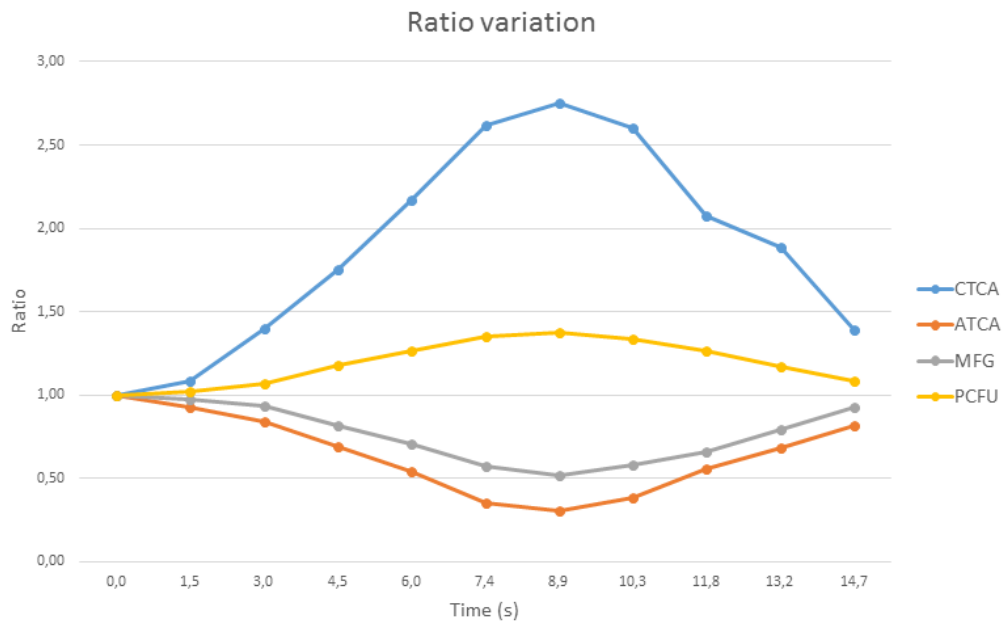


**Figure. 4-** Photographies de la dissection d'un spécimen masculin cadavérique. A) Vue latérale du sinus du tarse montrant le ligament cervical intact (flèche). B) Vue latérale du sinus du tarse du même spécimen après section du ligament cervical, montrant un ligament interosseux intact (flèche).





**Figure. 5-** Graphiques montrant la variation de rapport pendant un cycle de prono-supination de l'articulation sous-talienne de toutes les mesures effectuées avant et après section des ligaments sous-taliens, partielle et totale. A, B, C et D) angle talo-calcanéen coronal - CTCA, angle talo-calcanéen axial - ATCA, l'écart de facette médiale - MFG et la découverte de la facette articulaire postérieure - PCFU, respectivement. Noter l'augmentation de l'amplitude de variation après section d'un ou des deux ligaments sous-taliens.



**Figure. 6** – Variation de ratio de l'angle talo-calcanéen coronal (ACCT), angle talo-calcanéen axial (ATCA), l'écart de facette médiale (MFG) et la découverte de la facette calcanéenne postérieure (PCFU) chez une femme de 26 ans lors d'une prono-supination de l'articulation sous-talienne.



**Vue postérieure**



**Vue supérieure**



**Vue médiane**



**Vue latérale**

**Matériel supplémentaire** - reconstruction 4D en VR de l'articulation sous-talienne au cours d'une prono-supination chez un individu de 29 ans de sexe masculin.

**Tableaux :**

**Tableau 1 – Variation des ratios des quatre mesures effectuées (CTCA, ATCA, MFG et PCFU) sur les échantillons avant et après la dissection.**

		Spécimen 1			Spécimen 2			Spécimen 3		
		Aucune section	Section partielle	Section complète	Aucune section	Section partielle	Section complète	Aucune section	Section partielle	Section complète
CTCA	<b>moyenne</b>	1,18	1,30	1,29	1,28	1,23	1,32	1,26	1,42	1,46
	<b>DS</b>	0,19	0,36	0,36	0,28	0,32	0,35	0,33	0,35	0,42
	<b>coef var (%)</b>	16,12	27,68	28,29	21,81	25,59	26,42	26,43	24,78	28,91
	<b>var amp</b>	0,53	0,80	0,99	0,71	0,81	1,04	0,85	0,95	1,02
ATCA	<b>moyenne</b>	0,79	0,64	0,55	0,94	0,89	0,79	0,85	0,84	0,78
	<b>DS</b>	0,20	0,30	0,37	0,10	0,14	0,23	0,14	0,14	0,21
	<b>coef var (%)</b>	25,06	47,35	66,53	10,87	15,30	28,63	16,99	17,00	26,98
	<b>var amp</b>	0,54	0,85	0,96	0,26	0,35	0,62	0,39	0,41	0,58
MFG	<b>moyenne</b>	0,94	0,85	0,80	0,92	0,95	0,88	0,97	0,95	0,93
	<b>DS</b>	0,05	0,16	0,16	0,07	0,07	0,14	0,04	0,06	0,08
	<b>coef var (%)</b>	5,40	19,43	19,72	7,78	7,81	15,64	3,76	6,09	8,49
	<b>var amp</b>	0,15	0,39	0,46	0,19	0,20	0,41	0,12	0,17	0,22

PCFU	<b>moyenne</b>	1,13	1,16	1,26	1,16	1,09	1,10	1,12	1,17	1,19
	<b>DS</b>	0,14	0,14	0,22	0,14	0,12	0,11	0,14	0,16	0,18
	<b>coef var</b>	11,98	11,78	17,58	11,86	10,90	10,11	12,51	13,85	15,43
	<b>(%)</b>									
	<b>var amp</b>	0,37	0,35	0,54	0,35	0,30	0,30	0,39	0,41	0,46

CTCA = angle talo-calcaneen coronal

ACTA = Angle talo-calcaneen axial

MFG = Intervalle entre les facettes mediales (distance sustentaculum tali -tubercule postero-medial du talus)

PCFU = decouverte posterieure du calcaneum

DS = ecart-type

Coef var = coefficient de variation

Var amp = variation d'amplitude

**Tableau 2 – Variation de ratio des mesures effectuées pour les deux lecteurs.**

Lecteur 1	Femme															Homme					Global	
	Sujet	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	moyenne	DS				
	moyenne	1,6	1,8	1,2	1,5	1,9	1,8	1,1	1,5	1,8	1,4	1,4	1,6	10	1,8	1,6	1,5	0,3				
	DS	0,9	10	0,3	0,5	0,6	0,7	0,1	0,6	10	0,5	0,4	0,8	0,3	0,5	0,5	0,6	0,3				
CTCA	Coef var (%)	59,1	54,8	26,7	33,1	32,9	39,1	12,3	40,5	53,9	35,4	25,2	48,4	31,2	29,5	31,8	36,9	12,7				
	Var amp	2,5	2,5	0,9	1,4	1,8	1,9	0,4	1,5	2,3	1,1	0,9	1,9	0,9	1,3	1,3	1,5	0,6				
	moyenne	0,8	0,7	0,9	0,7	0,6	0,7	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	10	0,7	0,8	0,7	0,1				
	DS	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,7	0,2	0,3	0,3	0,1				
ATCA	Coef var (%)	42,6	65,1	20,3	53,0	36,8	43,3	20,2	37,0	55,3	63,4	40,1	72,3	73,9	25,1	32,9	45,4	17,8				
	Var amp	0,9	1,1	0,5	10	0,7	0,8	0,5	0,7	0,9	1,1	0,7	1,1	2,0	0,5	0,7	0,9	0,4				
	moyenne	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	10	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8	10	0,7	0,9	0,9	0,1				
	DS	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1				
MFG	Coef var (%)	13,6	23,1	11,9	22,0	22,5	15,6	9,4	16,6	28,3	10,7	29,1	22,8	25,7	25,1	10,1	19,1	6,9				
	Var amp	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,2	0,4	0,5	0,3	0,5	0,4	0,7	0,4	0,2	0,4	0,1				
	moyenne	1,1	1,2	1,2	1,1	1,2	1,1	10	1,1	0,8	1,1	1,2	10	10	1,4	1,1	1,1	0,1				
	DS	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1				
PCFU	Coef var (%)	13,0	20,3	22,8	11,0	11,3	10,1	6,9	8,7	19,5	6,6	15,1	5,0	7,2	19,4	7,1	12,3	5,8				
	Var amp	0,4	0,6	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,6	0,2	0,4	0,1	0,2	0,7	0,2	0,4	0,2				

CTCA = Angle talo-calcanéen coronal

ACTA = Angle talo-calcanéen axial

MFG = Intervalle entre les facettes médiales (distance sustentaculum tali-tubercule postéro-médial du talus)

PCFU = découverte postérieure du calcanéum

DS = écart-type

Coef var = coefficient de variation

Var amp = variation d'amplitude

Lecteur 2	Femme															Homme					Global	
Sujet	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Moyenne	DS					
CTCA	moyenne	1,5	1,7	1,3	1,5	1,7	1,9	1,1	1,4	1,4	1,2	1,4	1,6	10	1,5	1,6	1,4	0,2				
	DS	0,7	0,9	0,4	0,5	0,5	0,9	0,1	0,4	0,6	0,4	0,3	0,7	0,3	0,3	0,5	0,5	0,2				
	Coefvar (%)	48,8	54,2	29,8	33,9	31,1	44,8	12,2	32,0	41,5	29,6	22,7	41,4	30,0	22,0	33,1	33,8	10,9				
	Var amp	1,9	2,4	1,1	1,5	1,4	2,4	0,4	1,1	1,5	0,9	0,8	1,6	0,9	0,9	1,2	1,3	0,6				
ATCA	moyenne	0,8	0,7	0,9	0,8	0,6	0,6	0,9	0,8	0,6	0,9	0,7	0,5	10	0,6	0,6	0,7	0,2				
	DS	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,6	0,6	0,2	0,3	0,3	0,1				
	Coefvar (%)	50,5	53,5	23,9	29,1	55,4	59,0	23,3	27,0	72,5	29,7	47,2	109,8	61,6	37,3	54,0	48,9	22,8				
	Var amp	10	1,1	0,6	0,6	0,9	10	0,6	0,6	1,1	0,6	0,8	1,4	1,9	0,6	0,8	0,9	0,4				
MFG	moyenne	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	10	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	10	0,9	10	0,9	0,1				
	DS	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1				
	Coefvar (%)	12,1	10,6	6,8	17,2	11,6	15,6	5,9	12,0	25,4	11,1	17,0	17,4	25,7	10,5	4,0	13,5	6,3				
	Var amp	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,7	0,3	0,1	0,3	0,1				
PCFU	moyenne	1,2	1,2	1,2	1,1	1,7	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	0,1				
	DS	0,4	0,3	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1				
	Coefvar (%)	28,1	23,0	19,8	12,8	27,3	10,1	8,1	23,0	20,1	17,6	11,2	10,7	42,1	12,2	11,4	18,5	9,2				
	Var amp	0,9	0,7	0,6	0,4	1,3	0,3	0,2	0,7	0,6	0,5	0,3	0,3	1,2	0,4	0,3	0,6	0,3				

CTCA = angle talo-calcanéen coronal

ACTA = Angle talo-calcanéen axial

MFG = Intervalle entre les facettes médiales (distance sustentaculum tali-tubercule postéro-médial du talus)

PCFU = découverte postérieure du calcanéum

DS = écart-type

Coef var = coefficient de variation

Var amp = variation d'amplitude

Global = Valeurs moyennes pour l'ensemble de la population

VU

NANCY, le 17 décembre 2015

Le Président de Thèse

NANCY, le 26 janvier 2016

Le Doyen de la Faculté de Médecine

**Professeur Alain BLUM**

**Professeur Marc BRAUN**

AUTORISE À SOUTENIR ET À IMPRIMER LA THÈSE/ 9060

NANCY, le 29 janvier 2016

LE PRÉSIDENT DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE,

**Professeur Pierre MUTZENHARDT**



---

## RESUME DE LA THESE

**Titre :** Analyse quantitative de l'articulation sous-talienne en scanner 4D : preuve du concept avec évaluation cadavérique et chez les sujets sains.

**Introduction :** L'objectif est de démontrer l'application de l'évaluation quantitative en scanner 4D de l'articulation sous-talienne chez des volontaires sains et des cadavres.

**Matériel et méthodes :** 15 volontaires sains sans antécédent traumatique de cheville et 3 cadavres ont été évalués de façon prospective en scanner dynamique. L'articulation sous-talienne a été évaluée lors d'un cycle de prono-supination. Toutes les acquisitions ont été réalisées en utilisant le mode séquentiel intermittent avec un scanner 320 détecteurs. Les angles et distances entre le talus et le calcanéum ont été mesurés de façon semi-automatique. Des variations de mesures ont été décrites chez les volontaires sains et les cadavres, avant et après section des ligaments cervicaux et inter-osseux. La dose moyenne efficace était inférieure à 0,1 mSv.

**Résultats :** Chez les cadavres, il y avait une augmentation moyenne de l'amplitude articulaire sous-talienne de plus de 19% après section partielle ligamentaire et de 22% après section complète. La variabilité inter-observateur des ratios de mesure a été considérée comme excellente pour 3 des mesures effectuées (ICC > 0,87) et modérée pour la 4<sup>e</sup>. La gamme normale de mouvement articulaire chez les volontaires sains est décrite avec des amplitudes articulaires variant de 6,4 et 22,8%.

**Conclusion :** L'analyse quantitative de l'articulation sous-talienne en scanner 4D peut fournir une analyse détaillée de l'articulation et donc jouer un rôle potentiel dans l'évaluation de l'instabilité sous-talienne.

---

**TITRE EN ANGLAIS :** Quantitative analysis of subtalar joint motion with 4-DCT : proof of concept with cadaveric and healthy subject evaluation.

---

**THESE :** MEDECINE SPECIALISEE – ANNEE 2016

---

**MOTS CLEFS :** Computed tomography, articulation sous-talienne, dynamique, analyse quantitative, volontaires sains.

---

**INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR :**

UNIVERSITE DE LORRAINE  
Faculté de Médecine de Nancy  
9, Avenue de la Forêt de Haye  
54505 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX